

REUSSIR
LA TRANSITION ENERGETIQUE
DANS LES TERRITOIRES



Novembre 2013

Rapport préparé par Serge Salat, Loëiz Bourdic et Françoise Labbe

Pour la Caisse des Dépôts

INSTITUT DES MORPHOLOGIES URBAINES

ET DES SYSTÈMES COMPLEXES



MESSAGES CLES DU RAPPORT

AVANT PROPOS

INTRODUCTION : LA TRANSITION ENERGETIQUE ET URBAINE

PARTIE I. L'URBANISATION ET LA TRANSITION ENERGETIQUE

CHAPITRE I. LA FRANCE DANS LE CONTEXTE MONDIAL

CHAPITRE II. MESURER L'ENERGIE ET LES EMISSIONS URBAINES

CHAPITRE III. LES MOTEURS DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE URBAINE

CHAPITRE IV. LES LEVIERS DE LA TRANSITION ENERGETIQUE URBAINE

PARTIE II. STRUCTURES SPATIALES URBAINES ET TRANSITION ENERGETIQUE

CHAPITRE I. EVOLUTION DES STRUCTURES SPATIALES URBAINES

CHAPITRE II. LES CAUSES DE L'ETALEMENT URBAIN

CHAPITRE III. IMPACTS DE L'EVOLUTION DES STRUCTURES SPATIALES

CHAPITRE IV. QUELLES POLITIQUES ET STRATEGIES POUR FAVORISER L'EMERGENCE DE STRUCTURES SPATIALES URBAINES SOBRES EN ENERGIE ET DURABLES ?

PARTIE III. LA TRANSITION DES SYSTEMES ENERGETIQUES

CHAPITRE I. L'INTEGRATION DES SYSTEMES ENERGETIQUES ET LA TRANSITION

CHAPITRE II. STRATEGIES DE PLANIFICATION ENERGETIQUE INTEGREE

CHAPITRE III. METTRE EN ŒUVRE LES POLITIQUES DE TRANSITION

MESSAGES CLES DU RAPPORT

La mise en œuvre de la transition énergétique nécessitera d'impliquer de plus en plus les collectivités locales et les municipalités. Les villes consomment 80% de l'énergie. Les émissions directes associées aux villes ont représenté entre 75 et 80 % des émissions globales de CO₂ entre 1990 et 2008. Les villes, par la concentration, l'échelle et l'interaction des activités, des habitants et des ressources offrent des opportunités significatives d'accroissement de l'efficacité énergétique.

C'est en premier lieu sur la génération de la demande qu'il faut agir car les actions sur la demande ont à la fois le plus d'impact et représentent des effets de levier beaucoup plus importants que les actions sur l'offre. Au sein des actions sur la demande, ce sont celles qui portent sur l'échelle la plus grande et la plus intégratrice, c'est-à-dire l'aménagement spatial des territoires) qui ont l'effet de levier le plus important. Selon le GEA, les moteurs les plus importants des consommations d'énergie urbaine et les leviers les plus importants d'action politique sont en premier lieu et dans l'ordre : l'économie géographique (c'est à dire l'aménagement spatial et économique des territoires), la consommation, l'efficacité dans la demande finale, la forme urbaine et les infrastructures (c'est-à-dire les infrastructures de fourniture de l'énergie, les réseaux de transport, la densité, la mixité des usages du foncier). Le choix des modes de transport et la conception des bâtiments viennent seulement ensuite, suivis en dernier des actions sur les énergies (substitutions de carburants, intégration des systèmes énergétiques, énergies renouvelables).

L'aménagement des territoires est le levier le plus important d'efficacité énergétique. Dans un contexte d'interdépendance globale, il est contraint par l'intégration des territoires français dans les systèmes de villes européens et mondiaux qui sont structurés par des lois d'échelle et présentent à la fois des effets positifs de rendement d'échelle et des effets négatifs de déséconomies d'échelle en particulier pour les consommations énergétiques. L'aménagement spatial des territoires permet à lui seul de réduire la demande énergétique finale de 50 %. Les territoires urbains français partagent cependant quatre tendances majeures de l'urbanisation mondiale : l'expansion et la fragmentation spatiales, la diminution des densités démographiques, la diminution des densités construites, l'émergence de grandes zones métropolitaines. Les territoires urbains français sont d'autre part insérés dans la hiérarchie des systèmes urbains européens et mondiaux caractérisés par des lois d'échelle qui ont un impact sur les consommations énergétiques. Les villes nord américaines, auxquelles les territoires européens ressemblent de plus en plus, présentent des effets de rendement

d'échelle croissant avec leur taille démographique pour leurs capacité d'innovation, de création de richesse et pour la diminution de leurs quantités d'infrastructures routières et énergétiques. En revanche, leurs consommations électriques et leurs énergies de transport croissent plus rapidement que leur taille démographique, ce qui semble indiquer des déséconomies d'échelle. Les élasticités de la consommation énergétique des villes sont différentes selon leurs tailles énergétique. Lorsque les petites villes deviennent plus importantes, elles voient leur consommation énergétique augmenter très fortement (élasticité rang/taille de - 6,1). Les villes moyennes d'un point de vue énergétique voient leur énergie augmenter fortement mais moins vite (élasticité rang/taille de - 1,6) tandis que les grandes villes augmentent leur consommation énergétique de manière infra linéaire lorsqu'elles se déplacent dans la hiérarchie des rangs (élasticité rang/taille de - 0,5). Ces importants effets systémiques déterminent les consommations énergétiques à la grande échelle des territoires et ne peuvent pas être transformés par une addition d'actions sectorielles à plus petite échelle. Seule une approche intégrée des territoires permet de créer des synergies et de dépasser le fractionnement de l'action publique et des thématiques d'efficience organisées selon des approches sectorielles et verticales, peu ou pas structurées de manière complémentaire. Les investisseurs institutionnels, et notamment la Caisse des Dépôts, ont un rôle clé à jouer pour que l'évolution de la structure spatiale des territoires contribue à la transition énergétique.

Les stratégies spatiales de transition énergétique à l'échelle des territoires sont : 1. **accroître et articuler la densité.** 2. **limiter l'emprise spatiale et la fragmentation des territoires urbanisés ;** 3. **accroître l'accessibilité ;** 4. **accroître la connectivité ;** 5. **accroître la mixité des usages du sol ;** 6. **accroître les options de transport en commun et les intégrer ;** 7. **accroître la surface d'espaces verts et d'autres puits de carbone.** Mettre en œuvre de manière intégrée l'ensemble de ces stratégies renforce leur efficacité et a un effet beaucoup plus important que d'appliquer les stratégies séparément. Les investissements dans les systèmes de transport public, la planification intégrée de la croissance urbaine et du transport, et la capture de valeur foncière permettent d'atteindre ces objectifs.

Une ville avec une faible efficacité des ressources consomme environ quatre fois plus d'énergie primaire qu'une ville optimisée pour une haute efficacité des ressources. Les villes à faible densité exigent des vitesses plus élevées de transport sur de longues distances et les bâtiments occupent des zones plus vastes avec plus de surfaces exposées pour la même norme de construction. L'énergie de transport et l'énergie primaire pour le chauffage et l'électricité sont, dans une ville compacte, réduites d'environ 50% par rapport à une ville étalée. En optimisant uniquement le secteur de la production d'énergie, la baisse des

émissions est de l'ordre de 20%. En optimisant les bâtiments uniquement, la consommation baisse de plus de 40%. Avec un modèle de ville compacte uniquement, les émissions baissent d'environ 50%. Enfin, une combinaison des leviers est susceptible de diminuer les émissions de 80%. Les coûts sur le cycle de vie complet montrent des résultats identiques à ceux de la minimisation de l'énergie primaire. Ils montrent aussi que minimiser seulement les coûts en capital biaise les choix en les éloignant de la solution énergétique minimale. Ces résultats soulignent l'importance des mécanismes de financement et de la tarification dans le choix de solutions optimales.

La distribution (plus ou moins homogène, plus ou moins hiérarchisée) de la densité au sein d'un même territoire influe très fortement sur les consommations énergétiques. Les deux variables qui ont les élasticités les plus fortes sur la consommation énergétique de transport sont celles qui caractérisent la forme spatiale urbaine : l'entropie spatiale (c'est-à-dire l'homogénéité et le désordre dans la distribution des densités) et la hiérarchie spatiale (c'est-à-dire la structure et l'ordre dans la distribution des densités). Ces deux variables agissent dans des sens opposés. Plus le système urbain se structure, plus il utilise l'énergie efficacement et moins il a besoin d'énergie. Plus le système se déstructure, plus il s'homogénéise et plus il a besoin d'énergie pour fonctionner. Ce résultat est général et traduit pour les villes une loi fondamentale de la physique, celle de la création de hiérarchie complexe par les structures dissipatives loin de l'équilibre.

Les coûts d'infrastructure par habitant sont jusqu'à 4 fois plus élevés dans les zones à faible densité. La relation entre densité et longueur d'infrastructures par habitant est fortement non linéaire. Les infrastructures de services urbains par habitant sont considérablement plus longues dans les formes étalées que dans les formes plus compactes. Leur coût est ainsi accru, de même que leur consommation énergétique directe et leur énergie incorporée.

La planification énergétique urbaine intégrée consiste à 1.intégrer les stratégies d'efficience énergétique portant sur la demande finale ; 2.développer les énergies renouvelables locales. Elles doivent mettre en œuvre en priorité les effets de levier d'efficacité énergétique suivants : (1) la structure spatiale, la forme urbaine et la densité ; (2) la qualité de l'environnement construit et les politiques de transport ; (3) l'amélioration des systèmes énergétiques. Agir sur le premier levier, en encourageant la ville compacte, permet de diviser par deux les consommations énergétiques. Agir sur le deuxième levier en améliorant la qualité de l'environnement construit permet de diminuer les consommations énergétiques de 40%. Les efforts doivent porter ensuite sur des stratégies axées sur l'offre énergétique pour en diminuer l'intensité carbone et la dépendance aux énergies fossiles. Une approche intégrée

qui associe planification spatiale, rénovation énergétique et optimisation de l'offre énergétique permet de diviser par 4 la consommation énergétique urbaine finale.

Les améliorations de l'efficacité énergétique sont la meilleure option pour réussir la transition énergétique, augmenter la flexibilité de l'offre et améliorer la structure des systèmes énergétiques. Avec des taux élevés d'amélioration de l'efficacité, il est possible d'atteindre les objectifs de la transition quelque soit le portefeuille énergétique. Seuls les scénarios d'efficacité fondés sur une réduction de la demande permettent d'atteindre les objectifs de la transition énergétique sans recours à l'énergie nucléaire et sans capture et stockage du carbone. Les scénarios fondés sur l'offre, avec leur maintien de demandes élevées, nécessitent la croissance rapide et simultanée de nombreuses technologies de pointe, ce qui réduit la flexibilité de l'offre et implique des coûts importants.

La planification énergétique des territoires fondée sur l'exergie est le moyen le plus puissant pour diminuer la demande finale. En thermodynamique, l'exergie est une grandeur permettant de mesurer la qualité d'une énergie. C'est la partie utilisable de l'énergie. La plus grande partie de la consommation énergétique urbaine est perdue sous forme d'énergie résiduelle non fonctionnelle. L'efficacité thermodynamique dans l'utilisation de l'énergie urbaine est généralement inférieure à 20% de la frontière d'efficacité thermodynamique, ce qui suggère un potentiel d'amélioration de plus d'un facteur 5. Les stratégies de planification exergétique, mises en œuvre, notamment à Rotterdam, consistent à intégrer la planification des usages du foncier et la planification énergétique pour réaliser notamment des cascades d'utilisation de la chaleur et des échanges thermiques entre bâtiments.

L'écart entre demande énergétique urbaine et potentiel de production locale d'énergies renouvelables est très important ; pour que la production locale couvre une part significative des consommations urbaines, celles-ci devront au préalable être massivement réduites. La densité de la demande d'énergie dans les zones urbaines est généralement comprise entre 10 W/m² et 100 W/m². Elle peut atteindre 1 000 W/m² dans les zones de gratte-ciel ou les quartiers d'affaires. À l'opposé, les énergies renouvelables ont des densités d'offre énergétique typiques de quelques W/m² dans des conditions idéales (en supposant que tous les terrains peuvent être consacrés à exploiter les flux d'énergie renouvelables).

La gouvernance institutionnelle requise pour mettre en œuvre l'efficacité énergétique à l'échelle urbaine inclut : 1. une gouvernance intégrant la planification spatiale et les différents secteurs ; 2. des compétences en planification spatiale, en gestion du foncier et en planification des transports et de l'énergie ; 3. des dispositifs institutionnels pour intégrer les objectifs de transition énergétique au sein des agendas urbains ; 4. un rôle significatif pour les secteurs non gouvernemental et privé.

AVANT PROPOS

Le système énergétique actuel se caractérise par une dépendance excessive vis-à-vis des énergies fossiles : le charbon (28 %), le pétrole (32 %) et le gaz naturel (21 %) entrent ainsi pour plus de 80 % dans le bilan de la consommation mondiale qui a cru d'environ 2,3 % par an depuis 1970. Les énergies renouvelables, malgré l'augmentation de leur part dans le bouquet énergétique mondial, n'ont représenté 2011 que 13 % de la consommation d'énergie primaire. Le système énergétique mondial se caractérise également par un accès inégal aux services énergétiques modernes. 2,4 milliards de personnes, plus du tiers de l'humanité, dépendent encore de l'énergie de biomasse pour répondre à leurs besoins de cuisson, de chauffage, voire d'éclairage. Il se caractérise encore par une grande fragilité face à l'avenir, dans un monde qui comptera 4 milliards de personnes supplémentaires en 2050, et 2 milliards d'urbains supplémentaires dans les 20 prochaines années. Les défis sont liés à l'épuisement des ressources fossiles que les prévisions situent à la fin du siècle, lorsque l'humanité comptera 9 milliards d'urbains. Il se caractérise enfin par d'importants risques liés au changement climatique. Ce système énergétique n'est pas durable.

Les projections du « World Energy Outlook » (WEO) de 2012 montrent que, même en tenant compte des politiques et développements récents, le système énergétique mondial n'est pas engagé sur une trajectoire durable. Le WEO examine trois scénarios différents : le scénario « politiques actuelles », qui prolonge les tendances actuelles ; le scénario « nouvelles politiques », qui tient compte des engagements politiques annoncés par les gouvernements ; le scénario « 450 ppm », qui permettrait de limiter la hausse de la température du globe à 2 °C, en réduisant la concentration à long terme des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à 450 parties par millions (ppm) d'équivalent CO₂ [1].

Le scénario « nouvelles politiques » prévoit une augmentation de plus d'un tiers de la demande énergétique mondiale sur la période 2011 – 2035. La Chine, l'Inde et le Moyen-Orient représentent 60 % de cette hausse. Un nouveau paysage énergétique mondial est en train de se dessiner avec la récente augmentation des productions pétrolières et gazières aux États-Unis, résultat des technologies permettant l'exploitation des ressources en pétrole et en gaz de schiste.

Aux incertitudes qui pèsent sur l'accessibilité et le prix des énergies fossiles, s'ajoutent les contraintes environnementales et climatiques. Le scénario « nouvelles politiques » de l'édition 2012 du « World Energy Outlook » estime que les mesures actuelles auront pour effet

une hausse de la température d'au moins 3,6 % sur le long terme, car les politiques actuelles ne permettent pas les réductions des émissions de gaz à effet de serre nécessaires.

Monsieur Ban Ki-Moon, actuel Secrétaire Général des Nations Unies, avec le soutien de la communauté internationale, a lancé l'initiative Énergie Durable pour Tous (*Sustainable Energy for All*) qui vise l'accès universel à l'énergie, l'amélioration de l'efficacité énergétique et l'utilisation accrue des énergies renouvelables. Cette initiative invite les acteurs clés à faire de l'accès à l'énergie durable pour tous une réalité à l'horizon 2030. Il s'agit d'adopter des façons de produire et de consommer l'énergie qui soient plus respectueuses de l'équilibre écologique de la planète. Il s'agit également d'équité entre les différentes régions du monde et entre les générations. Il s'agit d'opérer une transition énergétique.

La mise en œuvre du mix énergétique futur nécessitera d'impliquer de plus en plus les collectivités locales et les municipalités. Bien que les objectifs soient globaux, la mise en œuvre des solutions sera locale. Cette mise en œuvre concerne tant la demande énergétique qui va porter principalement sur l'habitat et le transport que l'offre énergétique avec le besoin de développer des énergies renouvelables décentralisées, des réseaux de chaleur, que la mise en place des réseaux intelligents pour gérer des réseaux énergétiques de plus en plus alimentés par des sources diverses et, pour certaines, intermittentes. Il est nécessaire d'investir dans la recherche-développement pour assurer un stockage massif de l'énergie et une maîtrise de la demande urbaine, ainsi qu'une gestion optimisée de la pointe électrique urbaine afin de limiter les fluctuations des prix de l'électricité. Passer d'un système centralisé basé principalement sur une offre d'énergie fossile et une forte demande vers un système énergétique décentralisé, sobre et propre est la seule option possible pour réussir la transition énergétique. Cette réussite dépendra de notre capacité à mettre en œuvre des solutions au niveau des collectivités locales. C'est bien l'action des élus locaux, les décisions qu'ils prendront sur le transport, l'urbanisation ou l'inclusion sociale, qui feront demain que la somme des émissions des territoires permettront aux États d'atteindre leurs propres objectifs globaux de réduction d'émissions de gaz à effet de serre.

Les villes ont un rôle clé à jouer dans la transition énergétique. On assiste à une prise de conscience croissante du rôle que les territoires urbains peuvent et doivent jouer dans la lutte contre le changement climatique et la réduction des gaz à effet de serre. Parallèlement, une impulsion est donnée par la montée en puissance des associations de villes vis-à-vis des états et la signature de pactes entre villes qui rassemblent aujourd'hui, comme le pacte de Mexico, 185 villes regroupant 300 millions d'habitants.

L'action concrète des villes peut être évaluée aujourd'hui par la crédibilité de leurs premiers résultats. Par exemple, Copenhague peut aujourd'hui atteindre son objectif de

neutralité carbone, Nantes tient ses objectifs intermédiaires pour dépasser les -30 % des émissions en 2020.

L'inclusion des autorités locales dans la lutte contre le changement climatique apparaît pertinente pour deux raisons principales : la morphologie et la structure spatiale des villes sont des déterminants clés des consommations énergétiques (bâtiments et transports) ; les opportunités d'abattement des émissions de CO₂ nécessitent une coordination locale pour minimiser les coûts de transaction.

Engage, empower and resource. Cette formule, forgée lors du sommet C40 Séoul (mai 2009) appelle à des engagements clairs et quantifiés, à une augmentation des pouvoirs et des compétences attribuées aux autorités locales et à des ressources financières accrues.

Nous savons avec certitude que la sobriété énergétique des villes, qui consiste à réduire le besoin des services énergétiques, est le vecteur principal d'une transition énergétique réussie, suivi de l'efficacité énergétique qui consiste à réduire la consommation d'énergie pour un même service rendu. Mais les efforts actuels sont loin d'exploiter la totalité du potentiel disponible en matière à la fois de sobriété et d'efficacité énergétique urbaine. Seule une approche systémique des villes comme des systèmes complexes permet de dépasser le fractionnement de l'action publique et des thématiques d'efficacité organisées selon des approches sectorielles et verticales, peu ou pas structurées de manière complémentaire. Ce rapport contribue à la mise en place de nouveaux scénarios pour un monde urbain plus efficace et montre comment une approche systémique peut à la fois lever de nombreux obstacles aux investissements en faveur de l'efficacité énergétique, libérer le potentiel urbain d'économies d'énergie, réaliser des progrès en matière d'efficacité et de sécurité énergétique, de croissance économique et de protection de l'environnement. Dans un monde où près de 80 % de l'énergie sont consommés en ville, exploiter le potentiel d'efficacité et d'optimisation des structures urbaines est le préalable pour, à partir d'une demande fortement réduite, mettre en place des technologies innovantes et réussir ainsi la transition énergétique.

En France, la conférence environnementale a clôturé formellement le débat national sur la transition énergétique. Remise le 18 juillet au Président de la République et en présence du Premier ministre et du ministre de l'Écologie et du Développement durable, la synthèse des conclusions a tracé des directions, dressé l'état des consensus sur les grandes questions et listé les points de divergence à trancher par les pouvoirs publics.

Le présent rapport pour la CDC constitue une contribution à la mise en œuvre des directions tracées par la conférence environnementale. Il rejoint pour la mise en place de stratégies en France ce pourquoi l'Institut des Morphologies Urbaines et des Systèmes Complexes, avec le soutien de l'AFD et de la CDC, plaide au niveau mondial et européen, en

participant notamment à la rédaction du prochain rapport du GIEC et à la nouvelle stratégie d'urbanisation chinoise commandée par le premier ministre chinois : une vision plus *systémique* intégrant les gains d'efficience créés par la forme urbaine et par celle des réseaux dans la réduction de la demande et l'optimisation de l'offre ; une perspective de long terme, une *trajectoire* , car la forme des villes présente une forte inertie au changement et enferme les trajectoires énergétique et climatique des sociétés dans des chemins de dépendance ; une mise en œuvre *synergétique* des leviers de forme urbaine, des leviers sectoriels, des leviers de production et de distribution de l'énergie et des leviers comportementaux ; une réflexion sur les différents leviers financiers, économiques et réglementaires qui peuvent déclencher la transformation nécessaire ; la nécessité de faire dialoguer les deux approches de planification spatiale et énergétique (*top-down*) et d'émergence de la complexité auto organisée qui caractérisent les phénomènes urbains.

La méthode que ce rapport essaie d'insuffler dans le débat est celle des *patterns* urbains qui résultent à la fois d'actions de planification et d'auto organisation complexe. Ces *patterns* urbains sont de puissants leviers d'efficience énergétique, de résilience et d'adaptabilité urbaine. Alors que les villes historiques, jusqu'à la rupture constituée par le modernisme du XX^e siècle et son recours aux énergies fossiles, faisaient émerger des *patterns* urbains complexes, intégrateurs et efficaces, la ville contemporaine est caractérisée, à grande échelle, par l'étalement, la fragmentation, la discontinuité et le manque de compacité de sa forme globale. Aux échelles moyennes et petites, elle est caractérisée par la répétitivité d'éléments sériels, que ce soient des tours, des barres ou des villas pavillonnaires, et l'absence d'espace public. La ville contemporaine ne se constitue pas en système composé de sous-systèmes, caractéristique majeure et essentielle des *systèmes complexes* efficaces et résilients.

Reconnaître que la ville est avant tout une *forme sociale* avant même d'être une forme physique, reconnaître que la ville n'est pas un phénomène statique mais un *phénomène dynamique* permet de construire les notions de *trajectoires de long terme* , différentes et spécifiques pour chaque ville et chaque territoire, autour desquelles l'héritage historique d'un territoire peut être réapproprié par sa société pour construire une forme physique plus inclusive, plus résiliente, plus efficace.

Au-delà des chiffres et des indicateurs qui ne font que prélever des données éparses et lacunaires sur la réalité bien plus complexe des formes urbaines, de leur morphogenèse et de leur évolution, la notion de modèle urbain, ou *pattern* , permet de donner forme à une vision partagée de l'habitat, des modes de vie, de la mobilité et de l'économie urbaine, en d'autres termes à un projet de territoire élaboré et partagé par ses habitants. Une approche des structures spatiales et morphologiques des villes permet d'ouvrir les « boîtes noires » des

outils quantifiés élaborés par les experts sectoriels qui ne réalisent que des optimisations partielles, du foncier, des transports, ou des systèmes énergétiques par exemple, sans parvenir à les faire dialoguer entre elles et à les intégrer en un système complexe unique faute d'un modèle urbain spatial intégrateur fondé sur une description commune. Or aujourd'hui la technologie des SIG permet d'élaborer de tels modèles urbains, de comprendre ce qui les distingue, de les ordonner et de les classifier en familles, d'en établir la taxinomie et l'*arbre évolutif*, d'en comprendre les chemins de dépendance, d'en dessiner les trajectoires d'évolution contrainte, d'en comprendre les marges de liberté.

La réflexion sur la forme et l'espace urbain permet surtout de passer du dire des experts à la réalité mouvante des évolutions sociales, technologiques, industrielles qui définissent les contours sans cesse changeants des territoires. Elle permet surtout à la société de ces territoires de débattre ensemble des moments concrets où les changements sont possibles, d'identifier les inerties et de décider en commun des mesures à prendre. Les modèles ou *patterns* urbains ne sont pas des outils prescriptifs mais des supports de débat et de choix. Ils permettent d'inventer ensemble le futur et de ne pas le subir. C'est cette démarche active et prospective qui justifie le choix de trajectoires à l'horizon 2030 et 2050.

L'intérêt des *patterns* urbains ne réside ni dans leur caractère normatif ni dans leur dimension métrique et prédictive. Ils doivent être compris comme l'identification de trajectoires dans l'espace des configurations possibles que peuvent prendre les formes urbaines. Cette mise en évidence de la trajectoire des formes urbaines dans l'espace de leurs configurations possibles, cette quantification des propriétés de développement durable de ces configurations, comme la compacité ou la connectivité, ne doit pas être comprise comme un outil d'analyse statique mais comme un moyen de mettre en débat les choix qui se posent à une collectivité et de faire converger à long terme les anticipations des différents acteurs tout en orientant les choix de court terme. En ce sens, l'utilisation des *patterns* urbains doit être comprise dans le cadre d'une planification stratégique flexible et non d'une optimisation statique, dont nous savons qu'elle est le plus souvent déjouée par les choix individuels des acteurs, par l'évolution des marchés, des sociétés et des technologies.

La notion de *pattern* urbain permet de travailler à différentes échelles en comprenant la logique géographique et économique de leur intégration. Les formes urbaines localement discontinues et constituées d'objets séparés par des infrastructures à la hiérarchie fonctionnelle stricte divisant les fonctions de mobilité de celles d'accès et de desserte résidentielle contribuent à une échelle supérieure à un manque d'intégration et d'accessibilité des aménités urbaines essentielles et des emplois ; et à une échelle encore supérieure à l'étalement urbain fragmenté et peu dense. À l'inverse, la compacité des îlots traditionnels,

leur capacité à intégrer une grande variété de formes de cours ou de places publiques, adaptées aux différents climats et interagissant de manière optimale avec les besoins sociaux comme avec l'énergie passive du soleil, du vent et de la lumière, sont les briques fondamentales de constitution de villes denses et compactes.

Mettre en place des politiques publiques qui permettent à des structures et des morphologies urbaines sobres de se constituer est d'autant plus important que l'énergie urbaine est un secteur avec une inertie forte en raison de la durée de vie des infrastructures énergétiques dont certaines dépassent le demi-siècle voire le siècle, dans le domaine du bâtiment et des transports. Le mix énergétique de 2050 sera en partie déterminé par les infrastructures que nous construisons aujourd'hui. Or, les choix d'infrastructures urbaines du XX^e siècle (bâtiments, systèmes de transport, centrales électriques, usines, etc.) ont orienté nos villes dans des *chemins de dépendance* à l'égard des énergies fossiles, et ce, dans un contexte géopolitique incertain et des conditions d'accès aux ressources énergétiques de plus en plus difficiles. Une réflexion nouvelle sur la réorientation et la réorganisation des *patterns* urbains hérités du XX^e siècle est aujourd'hui nécessaire. À l'échelle globale, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) considère que les infrastructures actuelles ou en construction produiront 80 % des gaz à effet de serre en 2035. Ce qui signifie que nos marges de manœuvre au-delà de 2035 seront de plus en plus réduites si un changement de cap n'a pas lieu dès aujourd'hui [2].

La réflexion sur la morphologie et la structure spatiale de la ville est également le point d'ancrage de la spécificité fondamentale de la ville française, de la ville européenne, et de ce que peut faire la France en Europe et dans le monde pour exporter notre modèle national de ville durable. La ville française et européenne traditionnelle était à la fois durable, créatrice de richesse et énergétiquement efficiente. Ses qualités doivent être aujourd'hui réévaluées et son modèle promu. La France et l'Europe partagent les mêmes défis et les mêmes leviers pour la transition énergétique, que ce soit en matière d'efficacité énergétique, de valorisation des ressources énergétiques territoriales ou de transformation structurelle de la mobilité. La stratégie européenne pour 2030, puis 2050, doit se construire autour de la valeur ajoutée que peut apporter une approche européenne cohérente et ambitieuse pour la mise en œuvre des stratégies nationales. C'est également l'effort de coordination et de valorisation de la forme urbaine européenne qui permettra d'exploiter pleinement le potentiel d'efficacité énergétique et le potentiel de création de valeur économique que porte la transformation. La contribution de la France à une politique européenne ambitieuse pour les villes est la condition pour que la France conduise la conférence des parties de 2015 vers un résultat positif.

INTRODUCTION

LA TRANSITION ENERGETIQUE ET URBAINE

Les villes et leurs systèmes énergétiques sont des cibles critiques pour réussir la transition énergétique. Ce rapport décrit la transition des systèmes énergétiques urbains à travers une approche qui intègre la demande générée par la structure urbaine et l'offre énergétique. Nous définissons ici la structure urbaine comme l'ensemble des processus économiques, politiques, réglementaires et sociologiques dont les interactions déterminent le développement des formes urbaines et périurbaines. L'efficacité des systèmes énergétiques urbains peut être fortement améliorée par une meilleure intégration de l'offre technologique et des profils de demande, et par une prise en compte des caractéristiques sociales, économiques, morphologiques et de structure spatiale, spécifiques à chaque ville. L'intégration de l'offre et de la demande permet d'identifier des potentiels de réduction importants de l'intensité énergétique des villes. Ce rapport explore d'optimisation croisée des différents systèmes de production énergétique avec celle de la demande énergétique urbaine totale.

Quatre raisons incitent à développer des politiques publiques d'efficacité des systèmes énergétiques à l'échelle urbaine :

- *La concentration spatiale de la demande* de services énergétiques offre un fort potentiel d'intégration et d'optimisation des systèmes.

- *Les risques provoqués par le changement climatique.*

- *La sécurité énergétique et la rareté des ressources* augmentent le besoin d'optimisation des systèmes énergétiques urbains.

- *Le potentiel d'action des institutions locales.* Alors que les infrastructures urbaines ont une forte inertie et enferment les villes dans des chemins de dépendance pour des décennies, les institutions locales sont, en revanche, des niveaux d'organisation aux cycles de décisions relativement courts par rapport à ceux des gouvernements nationaux. Elles sont des centres d'innovation avec un accès rapide aux capitaux, aux compétences, aux technologies et aux marchés.

Le changement climatique est une des motivations majeures de la transition énergétique. L'AIE estime que les villes représentent plus de 70 % des émissions globales de

CO₂ [3] et que, par l'amélioration de l'efficacité énergétique et par la décarbonisation de l'énergie, les villes peuvent jouer un rôle actif dans l'atténuation du changement climatique. Les villes subissent également les effets du changement climatique sous la forme d'inondations, de vagues de chaleur, de problèmes de qualité et de rareté de l'eau. Le changement climatique aura également un impact sur la santé et sur les principales infrastructures urbaines : l'eau, les eaux usées, les réseaux de transport et les systèmes énergétiques[4].

Le système urbain a connu un changement structurel profond au cours du dernier siècle. En 1900, lorsque la population urbaine mondiale était de 1,65 milliard de personnes, seulement 10 à 13 % de la population vivaient dans des zones urbaines – soit entre 160 millions et 200 millions. Aujourd'hui, environ 53 % de la population mondiale – approximativement 3,6 milliards – vivent dans les zones urbaines. En 2100, la population urbaine mondiale s'accroîtra à plus de 9 milliards, environ 88 % de la population mondiale.

L'urbanisation française partage quatre tendances majeures de l'urbanisation mondiale : l'expansion et la fragmentation spatiales, la diminution des densités démographiques, la diminution des densités construites, l'émergence de grandes zones métropolitaines. L'étalement urbain des dernières décennies a provoqué un chemin de dépendance au transport automobile et a augmenté le coût des infrastructures. En France comme dans le reste du monde, les villes sont les principaux consommateurs d'énergie et les principaux émetteurs de gaz à effet de serre. Les émissions directes associées aux villes représentent entre 75 et 80 % des émissions globales de CO₂ entre 1990 et 2008.

La concentration et l'échelle des activités humaines et des ressources dans les zones urbaines offrent toutefois des opportunités significatives pour des optimisations permettant de réussir la transition énergétique. L'intensité énergétique des villes et leurs émissions de CO₂ sont influencées par une variété des facteurs physiques, économiques et sociaux dont les principaux sont les dynamiques de population, la richesse, la forme urbaine, les comportements, la localisation des facteurs, et la structure économique.

La forme urbaine et la structure spatiale affectent de manière significative les consommations énergétiques ainsi que les émissions de gaz à effet de serre directes (opérationnelles) et indirectes (incorporées). Elles déterminent les flux de matériaux et d'énergie qui traversent les villes, les déchets qu'elles génèrent, et les efficacités systémiques urbaines.

Dans les villes qui se développent rapidement, les options d'efficacité énergétique disponibles incluent l'articulation de leurs structures spatiales et de la forme de leur urbanisation ainsi que les trajectoires de développement de leurs infrastructures. En revanche,

dans des systèmes de villes mûres, comme le système français, les options sont contraintes par les *patterns* existants de formes urbaines et d'infrastructures. Cependant, même si les options sont contraintes, une combinaison de planification spatiale, d'intégration des infrastructures en particulier énergétiques et de mesures fiscales peut accroître les efficacités et réduire les émissions de gaz à effet de serre dans les villes déjà construites.

Les mesures d'efficacité énergétique liées à la planification spatiale incluent : (1) accroître l'accessibilité ; (2) accroître la connectivité ; (3) limiter la taille de l'emprise urbaine ; (4) accroître la mixité des usages du foncier ; (5) accroître les options de transport en commun ; (6) accroître les espaces verts et les autres puits de carbone ; (7) accroître et articuler les densités urbaines.

Les investissements dans les systèmes de transport public, la planification intégrée de la croissance urbaine et du transport, et la capture de valeur foncière peuvent permettre d'atteindre ces objectifs. La mise en œuvre simultanée de ces politiques publiques peut réduire la demande énergétique et les émissions de gaz à effet de serre dans les différents secteurs et créer les conditions nécessaires d'accroissement des efficacités systémiques pour permettre la transition énergétique vers une part croissante d'énergies renouvelables.

Peu de méthodes existent à l'heure actuelle pour mesurer le niveau d'accessibilité, de connectivité et de mixité des structures spatiales urbaines. L'objectif de ce rapport est de construire un socle commun de méthodes et d'indicateurs, qui permette de mesurer l'accroissement d'efficacité systémique des villes, et de proposer une première quantification de l'impact de ces *patterns* de planification spatiale pour la réduction de la demande énergétique.

Une telle approche propose un renouvellement de la pensée stratégique sur la planification urbaine et la reconnaissance du fait que les villes sont des systèmes complexes. La planification spatiale traditionnelle est généralement statique et simplificatrice tandis que la ville est un phénomène dynamique complexe. Les stratégies traditionnelles pour contrôler la forme urbaine ont souvent d'une efficacité limitée car les préférences des individus peuvent défaire ces politiques à travers des ajustements comportementaux. C'est pourquoi les stratégies spatiales d'efficacité énergétique demandent la mise en œuvre d'une combinaison de politiques publiques visant à mettre en place des infrastructures physiques et énergétiques durables et intégrées, de planification spatiale, et d'instruments incitatifs fondés sur les mécanismes de marché.

Une stratégie efficace pour réduire l'effet des infrastructures sur la demande énergétique est de gérer l'offre totale d'infrastructures par une planification intégrée et

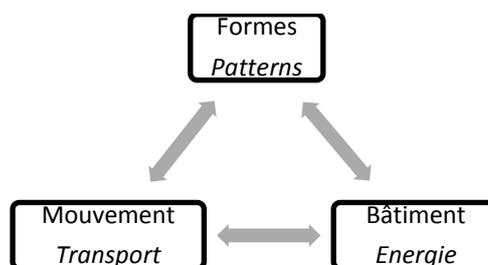
d'accroître les efficiences systémiques des stocks d'infrastructures existantes. Donner un prix correct aux infrastructures et à leurs externalités peut réduire leur impact énergétique.

La faisabilité des politiques de planification spatiale pour l'efficacité énergétique dépend fortement des capacités financières et de gouvernance de chaque ville. Les objectifs d'efficacité énergétique doivent être intégrés dans la gestion du foncier et dans les plans de développement des infrastructures. La gouvernance du foncier et la planification spatiale ne dépendent pas cependant seulement des autorités locales et des barrières significatives doivent être levées au niveau national.

D'autre part, les politiques d'efficacité énergétique urbaine d'atténuation du changement climatique sont centrées autour d'approches sectorielles plutôt qu' autour d'approches systémiques concernant l'ensemble de la ville. L'objectif de ce rapport est de décrire ce type d'approche systémique à partir de la notion de *patterns* urbains et des leviers d'action de politique publique sur ces patterns urbains, qui représentent un gisement de réduction de la demande énergétique existante de l'ordre de 50 %.

L'approche de la ville par les *patterns* spatiaux et morphologiques s'intègre dans les sciences de la complexité. Les villes constituent des formes extrêmement complexes où se concentrent aujourd'hui les activités humaines qui ont le plus d'impact sur la planète. Il est d'autant plus nécessaire de mesurer l'impact local et global des différentes formes urbaines sur les flux d'énergie et sur les émissions de gaz à effet de serre. Ce rapport passe en revue l'état des connaissances et propose un certain nombre de résultats originaux. Il dégage un certain nombre de lois stables de l'énergie urbaine de la multiplicité des formes des villes. Il met en évidence un certain nombre de variables et évalue leur impact énergétique.

Construire aujourd'hui une science de l'énergie urbaine répond à un besoin de résultats et de méthodes pour orienter les politiques publiques. Ce rapport présente de nombreux exemples montrant les types d'outils disponibles à la fois pour analyser les formes et les flux urbains, les quantifier et améliorer la productivité de leurs ressources.



Consommation et Production

L'un des objectifs de ce rapport est de constituer une approche quantifiée de ce triangle en développant des approches systémiques sur les interactions complexes et dynamiques entre les trois sommets du triangle. L'un des messages les plus importants est celui de la synergie. La densité articulée en *patterns* efficaces est le levier essentiel pour provoquer une série de cercles vertueux à la fois sur la consommation d'énergie des bâtiments et sur celle des transports. Ces cercles vertueux permettent d'alléger le métabolisme urbain et de simplifier, mieux répartir, mieux distribuer les composants énergétiques et technologiques qui le régulent.

Au cœur de la nouvelle régulation du métabolisme urbain, la deuxième révolution technologique repose sur l'intelligence distribuée. Les capteurs et les automatismes pourront rendre nos villes intelligentes et permettre de gérer l'ensemble de leurs flux par des réseaux synergétiques provoquant une nouvelle série de réductions de la demande énergétique. Les gains de productivité de l'énergie liés à la forme et aux *patterns* urbains, aux nouvelles technologies du bâtiment et des transports, aux nouvelles technologies distribuées de production locale d'énergies renouvelables ne s'ajoutent pas, ils se multiplient. Cette multiplication est un accélérateur de la productivité des ressources. Elle peut permettre de multiplier la productivité énergétique par 4 et de réduire par le même facteur les émissions de gaz à effet de serre.

Améliorer l'efficacité et la résilience de la ville implique cependant de la concevoir non pas comme une addition de composants juxtaposés, mais comme une intégration de systèmes composés de sous-systèmes à différentes échelles. Une rupture est nécessaire avec le zonage qui sépare les fonctions pour les relier ensuite par des autoroutes, et avec la répétitivité des constructions modernistes, que ce soient les tours et les barres des grands ensembles ou les pavillons de l'étalement urbain. Seul un tissu urbain à grain plus fin, plus dense, mieux connecté permettant de mixer les fonctions, peut créer une ville aérée et accessible, diminuant l'énergie incorporée dans les infrastructures et les coûts énergétiques pour assurer la mobilité.

RÉFÉRENCES

- [1] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2012*. Paris: OECD / IEA, 2012.
- [2] M. van der Hoeven, “La transition énergétique, le mix gagnant”, dans , *Liaison Énergie Francophonie*, numéro 93, premier trimestre 2013,” *Liaison Énergie Francophonie*, “*La transition énergétique ou les énergies que nous aurons*,” vol. 93, 2013.
- [3] OCDE and AIE, *Cities, towns & renewable energy: yes in my front yard*. Paris, 2009.
- [4] C. Rosenzweig and Urban Climate Change Research Network, *Climate change and cities: first assessment report of the urban climate change research network*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2011.

PARTIE I

L'URBANISATION ET LA TRANSITION ENERGETIQUE

MESSAGES CLES DE LA PARTIE

1. La transition énergétique des villes françaises prend place au sein d'une transition urbaine mondiale, caractérisée par deux phénomènes : l'interdépendance des villes qui se traduit par l'émergence d'un système complexe organisé de toutes les villes du monde ; le remplacement, sous l'effet d'un manque d'intégration de la gestion foncière et du développement des infrastructures, des formes compactes de la ville traditionnelle par des formes étalées et fragmentées fortement consommatrices d'énergie et de territoires.
2. Alors que la population urbaine globale va tripler d'ici la fin de ce siècle, il existe une fenêtre d'opportunité et des perspectives économiques pour la France pour l'exportation d'un modèle urbain et de stratégies pour la transition énergétique urbaine. La majorité de la future croissance de la population urbaine globale se produira dans les villes petites et moyennes des pays émergents et les moins avancés. Le modèle de la ville moyenne française durable devrait être exporté pour ces villes.
3. La non-linéarité des phénomènes urbains et de leurs impacts énergétiques montre la nécessité et l'urgence de la mise en place d'actions et de stratégies concrètes, visant en premier lieu à lutter contre l'étalement urbain.
4. Il existe des variations significatives de demande énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre entre les différentes villes françaises, et même au sein d'une même ville comme, par exemple, Paris. Les variations de la demande énergétique par habitant à travers les différentes villes ne sont pas explicables par un facteur unique. La demande énergétique et les émissions de gaz à effet de serre sont influencées par une variété de facteurs physiques, économiques et sociaux, par les niveaux de développement des villes et leur trajectoire d'urbanisation spécifique. Les principaux facteurs sont les dynamiques de population, la richesse, la forme urbaine, les comportements, les facteurs de localisation et la structure économique.
5. Le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique des seules politiques énergétiques sectorielles (énergies renouvelables locales, cogénération) à l'échelle urbaine est plus limité que celui des politiques visant à minimiser la demande énergétique des bâtiments ou des politiques de structuration spatiale (forte densité urbaine et usages mixtes) qui diminuent fortement la consommation d'énergie des transports. Les plus grands potentiels d'amélioration de l'efficacité peuvent être réalisés par une combinaison d'efficacité énergétique des bâtiments et de la forme urbaine à travers des politiques de densité. La forme urbaine compacte à elle seule peut diviser la consommation énergétique par 2. L'efficacité des bâtiments a un potentiel de réduction d'environ 45 %.

CHAPITRE I

LA FRANCE DANS LE CONTEXTE MONDIAL

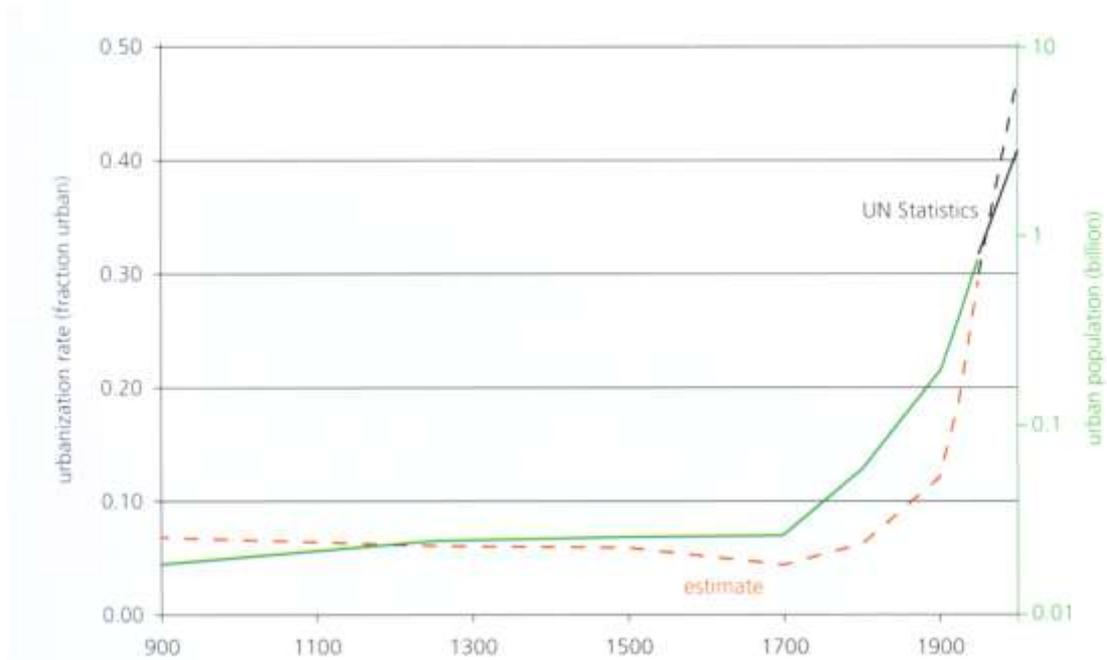
1. L'URBANISATION MONDIALE ET LE SYSTEME URBAIN GLOBAL

Dans un monde global interdépendant, où le système mondial des villes est organisé en système complexe, aucune ville n'est indépendante du système constitué par l'ensemble des villes du monde. Les villes françaises ne pourront réussir la transition énergétique à l'échelle du pays, en faisant évoluer nos habitats, nos villes, notre cadre de vie professionnel ou privé, que si cette transition énergétique est replacée dans le contexte international dans lequel doivent s'inscrire les choix que nous allons faire et sur lesquels nous souhaitons exercer notre influence, à Bruxelles ou sur le plan multilatéral.

À l'heure des interdépendances, de la compétition des villes globales pour l'accès aux ressources et de la recherche d'une solution négociée sur la question climatique, il est indispensable pour concevoir une politique de transition énergétique nationale pour les villes françaises de l'intégrer dans une meilleure compréhension et analyse des enjeux globaux.

Un accroissement exponentiel de l'urbanisation mondiale aux XXe et XXIe siècles

Avant la Révolution industrielle, la croissance de la population urbaine globale se produisait lentement. En 1800, les niveaux globaux d'urbanisation étaient approximativement de 3 %, dont environ 1,7 % vivait dans des villes de 100 000 habitants ou plus [1], [2]. Au cours du siècle suivant, la part totale de la population urbaine s'est accrue de 10 à 13 % en 1900, c'est-à-dire entre 160 et 200 millions d'urbains. Le XX^e siècle a connu une urbanisation rapide. La proportion de la population urbaine mondiale s'est accrue de 13 % en 1900, à 29 % en 1950, à 52 % en 2011, avec environ 3,6 milliards, soit une multiplication par plus de 20 en un siècle [3].



Estimations de la population urbaine mondiale (en milliards sur l'axe de droite, ligne continue verte) et en pourcentage de la population mondiale totale (fraction, axe de gauche, ligne pointillée rouge). Les données entre 900 et 1950 sont extraites de [1] et [4]

L'urbanisation est le phénomène majeur du XXI^e siècle. En 2050, les projections de la population urbaine prévoient un accroissement à entre 5,6 et 6,1 milliards, c'est-à-dire 64 % à 69 % de la population mondiale. La grande majorité de la croissance urbaine aura lieu dans les zones urbaines des pays en développement et des économies émergentes d'Asie et d'Afrique [3], [5], [6]. L'urbanisation des pays en développement et émergents nécessitera la mise en place à grande échelle de systèmes d'infrastructures et de services urbains. Elle provoquera la transition des sources d'énergies traditionnelles vers des sources d'énergie moderne, c'est-à-dire aujourd'hui des sources d'énergie fossile. L'ampleur et la vitesse du processus d'urbanisation mondial offrent une fenêtre d'opportunité très étroite pour donner une forme durable aux trajectoires d'urbanisation des villes mondiales et les orienter vers un développement durable tout en prévenant des chemins de dépendance à des infrastructures inefficaces.

Le niveau d'urbanisation d'un pays – la transition d'une société largement agricole et rurale vers une société industrielle et fondée sur la consommation – coïncide avec son niveau de développement [7]. Elle reflète des changements dans la proportion du PNB générée par l'industrie et les services et dans la proportion de la population active employée dans ces secteurs [2], [8]. Les transitions urbaines sont également influencées par l'histoire, les schémas de migration, le

développement technologique, les institutions de gouvernance, ainsi que par des facteurs environnementaux comme la disponibilité de l'énergie. Ensemble, ces facteurs rendent partiellement compte des fortes variations de niveau d'urbanisation à travers les régions du monde. Tandis que les pays de l'OCDE et les autres pays développés ont atteint un fort niveau d'urbanisation, entre 73 % et 89 %, les pays en développement ont des niveaux d'urbanisation faibles [6]. Les parts de la population urbaine sur la population totale en Afrique et en Asie sont d'environ 40 % et 45 % respectivement [3]. L'urbanisation dans le futur aura lieu à des niveaux de développement plus faibles qu'au cours des périodes précédentes.

L'essentiel de la croissance démographique du XXI^e siècle se concentrera dans les villes

Les projections des Nations Unies indiquent qu'au XXI^e siècle environ 90 % de la croissance de la population mondiale aura lieu dans les zones urbaines ; celles-ci représenteront, en 2030, 60 % de la population mondiale, 80 % de la richesse et, selon les estimations de l'AIE, 73 % de la consommation énergétique directe [3], [9]. La distribution de la demande énergétique mondiale sera de plus en plus influencée par la structure du système urbain mondial. Les régions les plus développées sont déjà très urbanisées et ont une population qui restera globalement stable. Les régions les moins développées connaîtront une forte croissance démographique dont la presque totalité sera urbaine. L'essentiel de la croissance démographique se produira dans les régions les moins développées, avec un très fort besoin d'investissements dans les infrastructures, notamment énergétiques. Les tendances montrent une forte croissance de l'urbanisation globale et une stagnation marquée de la population rurale. En 2050, la part de la population urbaine dans la population mondiale est estimée à environ les deux tiers.

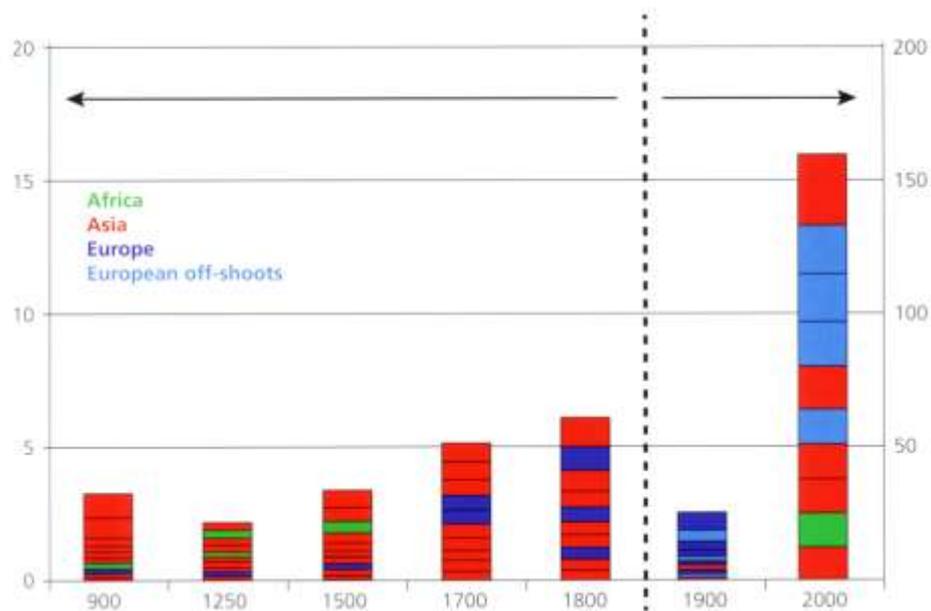
Le système urbain français au sein d'un système urbain global en recomposition

Le système urbain français est dans son organisation hiérarchique par taille de villes un sous-système du système européen, qui est lui-même un sous-système du système mondial. Cette intégration systémique du monde urbain global traduit l'interdépendance des villes. Elle a d'importantes conséquences du point de vue de l'énergie et les flux de matière. Le système mondial des villes a été intégré par la globalisation en un système complexe. Au sein de ce système, certaines villes déclineront fortement, tandis que d'autres vont connaître une forte croissance.



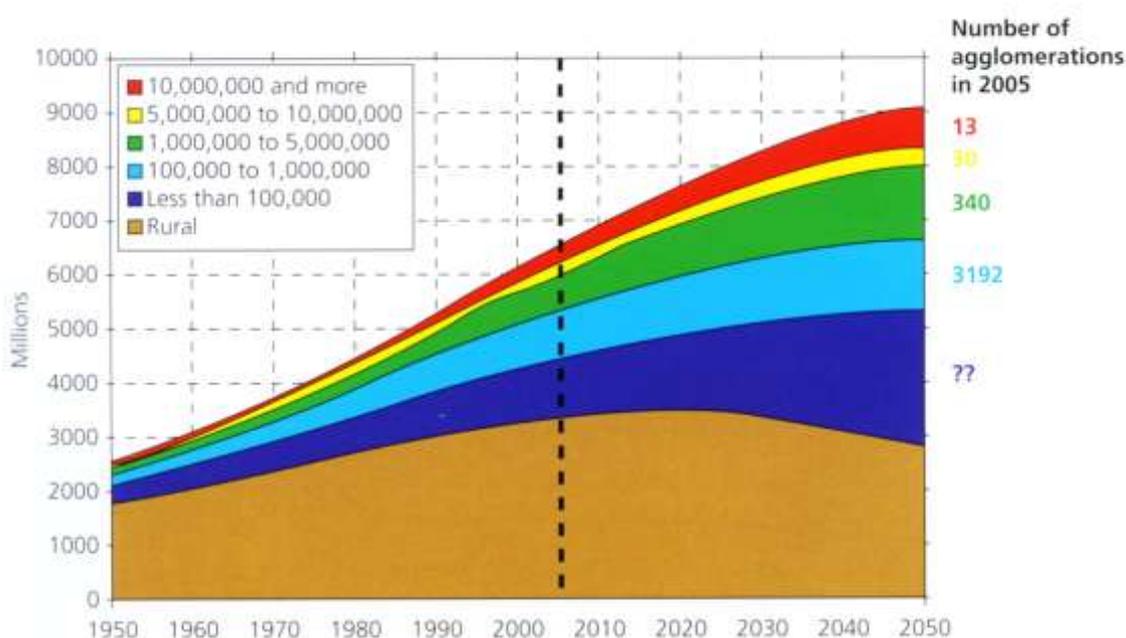
Rang relatif de différentes villes classées par population : dans le passé et projection. Les villes des pays les plus développés sont en gris foncé ; les villes des pays moins développés sont en gris clair [3]

La figure ci-dessus montre le déclin relatif de villes comme Chicago et Londres comparé à l'émergence de villes des pays moins développés, en particulier en Asie (par exemple Delhi, Mumbai, Dhaka, Karachi). Seules quelques villes centrales dans le réseau mondial des villes, comme New York, Shanghai et Tokyo, continueront à croître et à maintenir leur poids relatif.



Population des 10 plus grandes villes du monde par continent en millions de 900 à 1800 (axe de gauche) et De 1900 à 2000 axe de droite [1], [4].

Historiquement le centre géographique de l'urbanisation était en Asie, le continent le plus peuplé. La domination asiatique de l'urbanisation a cédé la place à un siècle urbain européen élargi entre 1850 et 1950 (Europe de l'Ouest, Amérique du Nord et Australie). Une large proportion des plus grandes villes du monde pendant ce siècle était située dans le monde occidental en raison de sa rapide urbanisation et de son industrialisation. Ce « siècle européen » a été aujourd'hui remplacé par un phénomène urbain global où les plus grandes agglomérations du monde seront de plus en plus en dehors des pays industrialisés traditionnels.

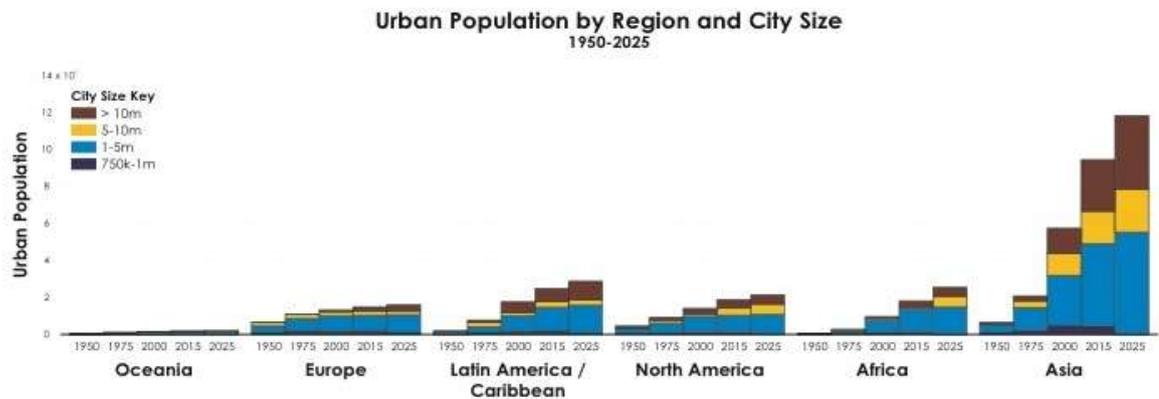


L'évolution de la population urbaine mondiale par taille de villes à l'horizon 2050. La majorité de la population urbaine mondiale vivra dans des villes petites et moyennes malgré l'accélération de la concentration dans les grandes mégalo-poles [4]

Les méga-villes de plus de 10 millions d'habitants ne représentent cependant que 10,7 % de la population urbaine totale. Une grande partie de la population urbaine (31,4 %) vit dans des villes de 500 000 à 5 millions d'habitants, tandis que 50,9 % vivent dans des villes de moins de 500 000 habitants [3]. Pour les systèmes énergétiques urbains, cette caractéristique du système urbain mondial montre qu'il faut adapter les solutions à la taille de chaque ville.

Toutefois, une concentration dans la hiérarchie nationale des villes va se produire au cours des prochaines décennies. Une grande part de la croissance future de la population urbaine dans les pays en développement et les économies émergentes se produira, selon les prévisions, dans des zones urbaines de 1 million d'habitants ou plus. Les projections les plus récentes des Nations Unies

suggèrent que les mégaloformes connaîtront le plus fort pourcentage d'accroissement de la population urbaine, ce qui est une inversion des tendances par rapport aux décennies précédentes [3].



Population urbaine par région et taille de ville [3]

La hiérarchie d'échelle des systèmes urbains

Parmi les outils transversaux qui sont fournis par les théories des systèmes complexes, les lois d'échelle sont une puissante méthode d'analyse et d'optimisation de l'évolution urbaine. Les lois d'échelle sont des relations en loi de puissance de la forme $Y = cX^\beta$, où Y représente une variable qui varie de façon systématique avec la taille X du sous-système et C et β sont des paramètres. Les lois d'échelle résument les caractéristiques structurelles des systèmes d'une manière très efficace et elles révèlent l'effet de contraintes universelles agissant sur la structure et le développement sur plusieurs ordres de grandeur dans ces systèmes [10], [11].

La hiérarchie l'échelle est importante pour les systèmes urbains¹ parce qu'elle apparaît comme un descripteur universel et un outil de comparaison des inégalités de taille entre les entités interurbaines et intra-urbaines, tant en termes de population, de taille physique, de PIB, d'innovation, de concentration des entreprises, de demande énergétique. Les inégalités des dimensions observées au sein des systèmes urbains sont souvent extrêmement fortes, avec des variables parcourant plusieurs ordres de grandeur, comme dans le cas des agglomérations de

¹ Les lois d'échelle dans les systèmes urbains ont été explorées dans des directions différentes, telles que l'organisation fractale des morphologies urbaines [12], [13] ou des réseaux urbains et des flux de trafic [14], ainsi que la différenciation hiérarchique des tailles urbaines, traditionnellement observées en géographie urbaine à travers le prisme de la loi rang taille et la théorie des lieux centraux.

peuplement, ou des superficies, ou bien encore des PIB et des demandes énergétiques. L'importance de la hiérarchie d'échelle tient également à ce qu'elle décrit une forme de différenciation très fréquente dans les systèmes complexes, que l'on retrouve dans un très grand nombre de systèmes. Des exemples de hiérarchie d'échelle en loi de puissance inverse incluent la fréquence des mots dans les langues, la hiérarchie des tailles des populations urbaines dans le monde [15], [16], les structures d'échelle allométriques en biologie² comme la loi de Kleiber (qui décrit la constance dans les relations entre la masse corporelle et les taux de métabolisme des organismes vivants à travers plusieurs ordres de grandeur).

La loi rang taille des systèmes urbains, appelée loi de Zipf, est utilisée en science régionale pour étudier le degré de hiérarchisation des systèmes urbains et son évolution dans le temps. Elle décrit des inégalités³ de poids, de taille, d'importance, ou encore de masse entre les éléments du système. Ces éléments font tous partie d'un système et la loi de Zipf révèle que ce système est organisé en sous-systèmes à différentes échelles. Ces processus d'organisation des systèmes complexes engendrent de fortes inégalités territoriales ou spatiales, en termes de dimensions (superficie), de valeurs de concentration, accumulation de population, de richesse, de demande énergétique, d'émissions de gaz à effet de serre, ou d'autres.

L'évolution des systèmes urbains

Lorsque l'on procède à une analyse rang taille⁴ des systèmes urbains, on constate que les tailles varient en fonction des rangs selon une loi de puissance inverse dont l'exposant est le coefficient de hiérarchisation du système. Lorsque l'on examine comment la taille varie en fonction du rang, ainsi que le propose Zipf à la suite de Lotka, plus ce coefficient est élevé et plus le système a

² Les études d'écosystèmes [10], [11], [17] et les études urbaines [18], [19] ont examiné le lien entre la taille, la forme et la distribution rang taille des réseaux organiques et urbains [20] et des contraintes d'optimisation de réseaux hiérarchiques à branchement de systèmes métaboliques ou de transport.

³ La distribution de Zipf révèle que dans les systèmes complexes les inégalités ne se distribuent pas de manière symétrique autour d'une valeur centrale.

⁴ Lorsque le rang est en abscisse et la taille en ordonnée en coordonnées logarithmiques, les points s'alignent sur une droite (ce qui traduit le fait que les 2 variables sont reliées par une loi de puissance inverse) dont la pente (l'exposant de la loi de puissance inverse) est le coefficient de hiérarchisation de Zipf (ou de Lotka). Plus ce coefficient est élevé, plus le système est hiérarchisé. Plus le coefficient est faible, plus le système est homogène. Lorsque la taille est en abscisse et le rang en ordonnée (où il correspond à une fréquence cumulée) on obtient la formulation standard de Pareto de la loi de puissance inverse. Dans ce cas plus le coefficient est faible et plus le système est hiérarchisé. On trouve dans la littérature scientifique, les deux variantes du coefficient de hiérarchisation (dont l'un est l'inverse mathématique de l'autre) sans que le protocole (de Zipf ou de Pareto) soit toujours précisé.

une structure hiérarchique. Si, comme on le fait en économie, on examine en ordonnée la fréquence cumulée des tailles portées en abscisse on obtient une loi de Pareto classique dont l'exposant de Pareto est l'inverse de l'exposant de Zipf et varie donc en sens inverse. Plus l'exposant de Zipf est élevé et plus le système est hiérarchisé ; plus l'exposant de Pareto est faible et plus le système est hiérarchisé. L'estimation du coefficient de hiérarchisation permet de comparer, dans l'espace et dans le temps, les systèmes urbains à différentes échelles et sur de longues périodes.

Il est indispensable, au-delà de la simple mesure, de comprendre le processus de croissance qui conduit à une évolution du coefficient de hiérarchisation ou même à l'existence d'une distribution rang taille conforme à une loi de Zipf. Pour construire une théorie de l'évolution des systèmes de villes, il faut nécessairement que cette théorie englobe la loi de Zipf, mais aussi qu'elle spécifie comment elle est produite dans le cas des villes, par quel type de processus de croissance et d'accumulation, comprenant à la fois des accroissements sur place et des migrations, il faut donc faire appel nécessairement aux théories géographiques de l'interaction, de la différenciation et de la diffusion spatiale [21]. Une première approche des théories de la croissance urbaine est menée en termes de croissance aléatoire. Son origine est dans l'article de Simon [22] qui s'appuie sur la loi de l'effet proportionnel de Gibrat, mais c'est Gabaix [23] qui après Robson [24] a élaboré le modèle de base actuellement le plus utilisé⁵.

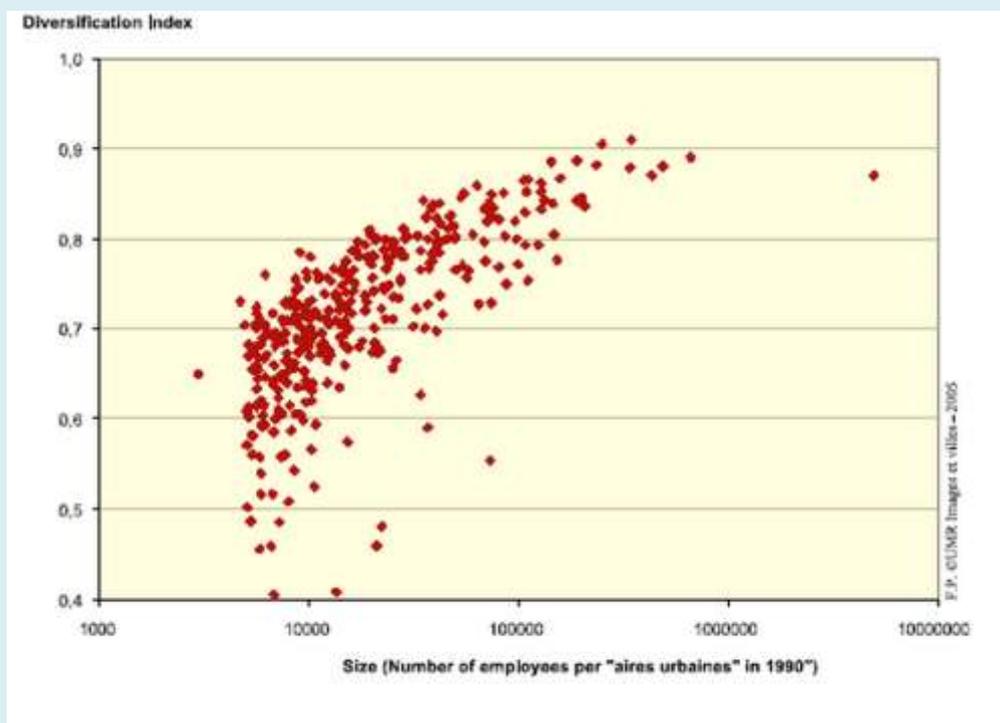
En complément à ce modèle stochastique, Pumain et al (2006) ont proposé une théorie évolutionniste des systèmes urbains, permettant d'interpréter leurs caractéristiques de hiérarchisation. La théorie évolutive des villes [25] considère que les villes ne sont jamais isolées, mais se développent en relation avec de multiples réseaux, qui les ont progressivement rendues mutuellement interdépendantes. Dans la longue durée de l'histoire des sociétés humaines, les systèmes de villes sont une invention extrêmement durable, un instrument adaptatif de gestion des ressources et de contrôle des territoires et des réseaux. Dans l'évolution des systèmes urbains, les grandes villes captent, par leur diversité et leur complexité, l'innovation et la nouveauté, en relayant

⁵ Il est construit sur des hypothèses très restrictives telles qu'une population croissante, la libre mobilité du travail – mais uniquement pour les jeunes générations – et des technologies de production à rendement constant. Dans le cadre de ces hypothèses, la croissance des villes dépend de l'apparition de chocs ponctuels exogènes, distribués de façon aléatoire entre les villes, qui sont générateurs d'aménités urbaines et modifient donc les choix de localisation des ménages mobiles. Dans ce contexte, et à partir d'un certain seuil de taille, la dynamique d'un système urbain suit un processus stochastique, au sein duquel chaque ville a la même espérance de croissance démographique. La dynamique urbaine suit une loi de Gibrat, ce qui signifie que le taux de croissance d'une ville est indépendant de sa taille, tandis que sa variance est proportionnelle à $(\beta - 1)$ (où β est le coefficient de Pareto de la distribution rang taille). La loi de Gibrat appliquée aux systèmes de peuplement exprime avant tout une tendance au regroupement, à la concentration spatiale, assortie de fluctuations aléatoires.

aux villes moyennes les activités plus banalisées. La diffusion de l'innovation des grandes vers les petites villes ne se fait pas à vitesse constante ni égale, mais dépend des capacités d'adaptation de chaque système urbain, d'où une instabilité de la pente de la distribution rang taille [26].

La diversification des fonctions urbaines et les lois d'échelle dans les villes françaises

Selon une interprétation évolutionniste des lois d'échelle urbaine, on peut s'attendre à une plus grande diversité d'activités dans les plus grandes villes. Ce résultat est confirmé par une étude empirique sur la diversification des activités menée dans 354 aires urbaines [26]. La relation entre la taille de la ville et la diversité économique est évidente dans le graphe ci-dessous dans lequel plus l'index est proche de 1, plus la diversité est grande, et plus l'index est proche de 0 plus la diversité est faible.



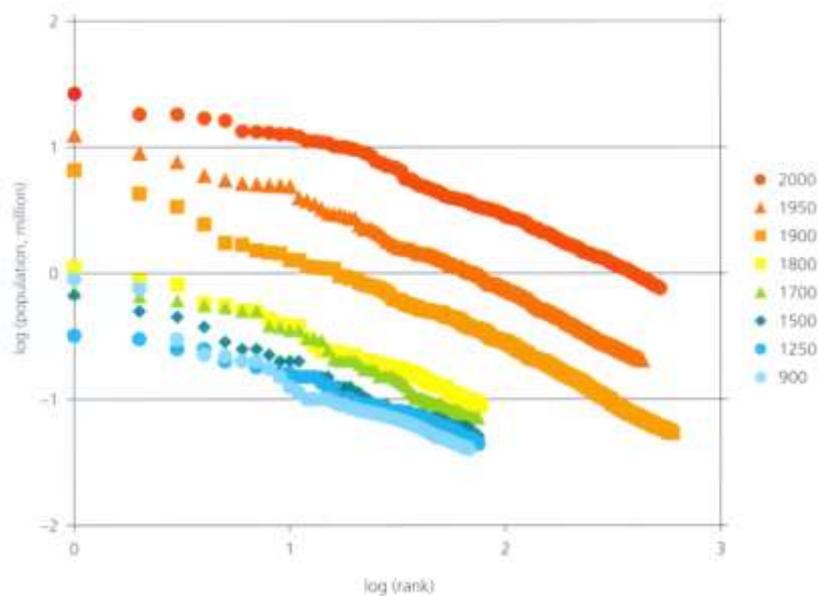
Diversification des activités menée dans 354 aires urbaines [26]

Les plus grandes villes doivent leur grande taille à l'adoption réussie de nombreuses innovations sur le temps long. Elles ont continuellement capté les innovations, par adaptation, imitation ou anticipation et elles concentrent une part importante de tout ce qui est nouveau à chaque époque. Les fonctions qu'elles exercent révèlent un niveau élevé de complexité ou de sophistication de leurs constituants économiques et sociaux. Les technologies les plus avancées se concentrent dans les plus grandes villes, tandis que les activités banales sont ubiquistes, et que les

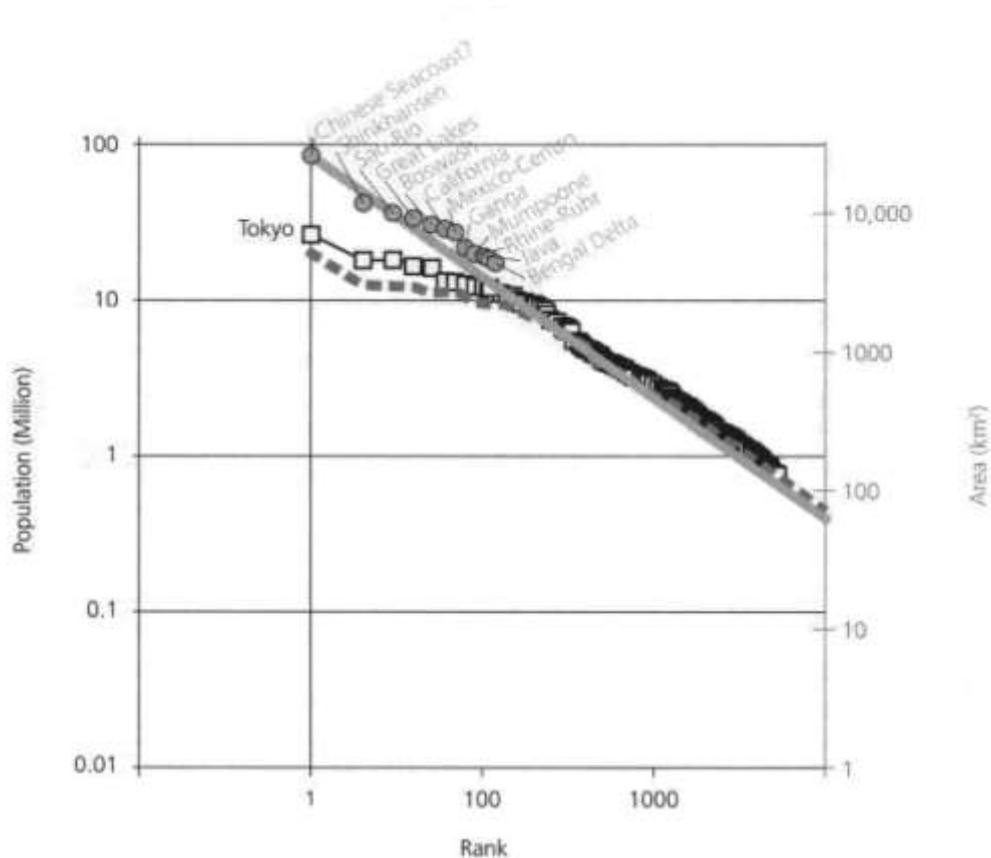
secteurs en récession ont tendance à se replier sur les petites villes (ce qui peut se traduire en termes économiques par des rendements croissants, constants ou décroissants en fonction de la taille des villes). Les lois d'échelle révèlent ainsi des contraintes sur la structure et l'évolution dans les systèmes complexes urbains, comme dans les systèmes physiques ou biologiques. Analyser les activités des villes en termes de lois d'échelle apporte un éclairage nouveau sur les relations entre fonctions urbaines, taille des villes et cycles d'innovation économique.

Le système urbain mondial est un système complexe intégré constitué de sous systèmes nationaux et régionaux caractérisés par de fortes régularités

Le système urbain mondial est un système complexe. La distribution des villes du monde selon une loi de Zipf est un phénomène historiquement stable depuis plus d'un millénaire.



Distribution rang taille des villes du monde de l'an 900 à l'an 2000. Les données avant 1950 sont basées sur [1]. Les données après 1950 sont basées sur [4]. L'échantillon varie entre moins de 80 villes dans la période avant 1800 à plus de 600 villes dans la période après 1900 [27].



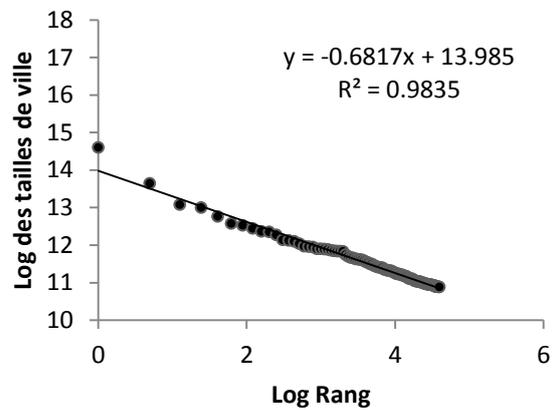
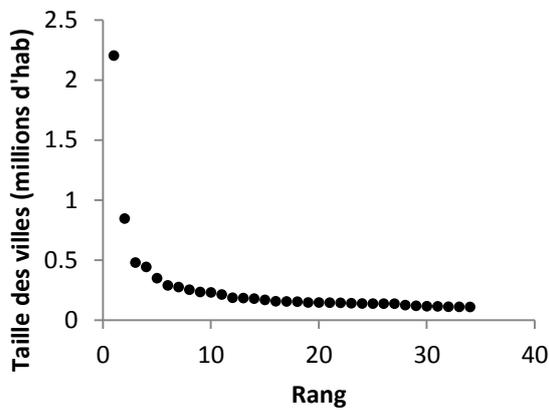
Distribution log-rang/log-taille des villes mondiales [28]

La distribution du système urbain mondial est irrégulière pour les plus grandes villes lorsque celles-ci sont définies par leurs limites administratives. En revanche, lorsque les villes individuelles sont agrégées en « clusters urbains » ou « corridors », la régularité de la distribution rang taille du système global des villes est maintenue. L'émergence d'un cluster urbain côtier chinois est hypothétique. À l'heure actuelle, le plus grand cluster urbain mondial est au Japon le long du corridor du Shinkansen avec 70 millions d'habitants. La distribution rang taille du système global des villes ne concerne pas seulement leur population (représentée par des carrés pour les villes et des cercles pour les agglomérations urbaines, sur l'axe de gauche) mais également leur surface (aire urbaine, en pointillés sur l'axe de droite) [28].

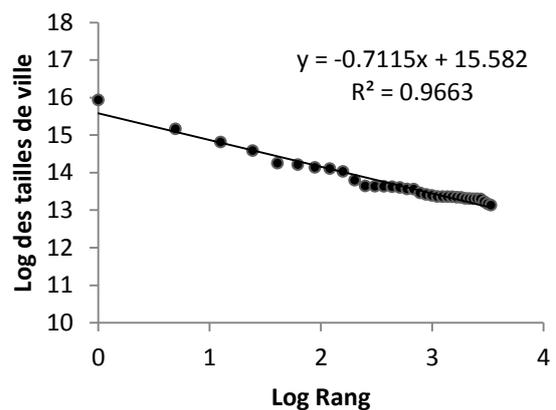
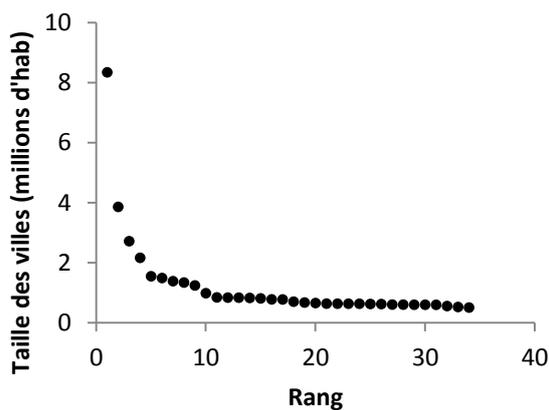
La stabilité des lois de Zipf pour les systèmes urbains à différentes échelles (globale, continentales, nationales, régionales, sous régionales) montre que le système global est un système complexe constitué d'une cascade de sous-systèmes emboîtés. Un très grand nombre de villes petites et moyennes jouent un rôle important dans les dynamiques de l'urbanisation. Elles sont indispensables à la compétitivité et à la croissance économique. Les politiques de transition

énergétique doivent s'adresser aux villes petites et moyennes en priorité car elles constituent l'essentiel de l'armature urbaine nationale.

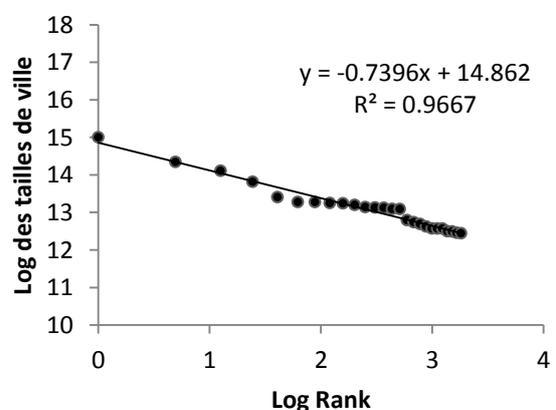
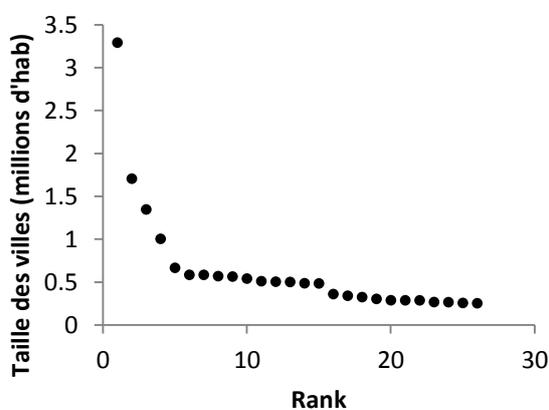
Lois de Zipf dans les systèmes urbains des pays développés



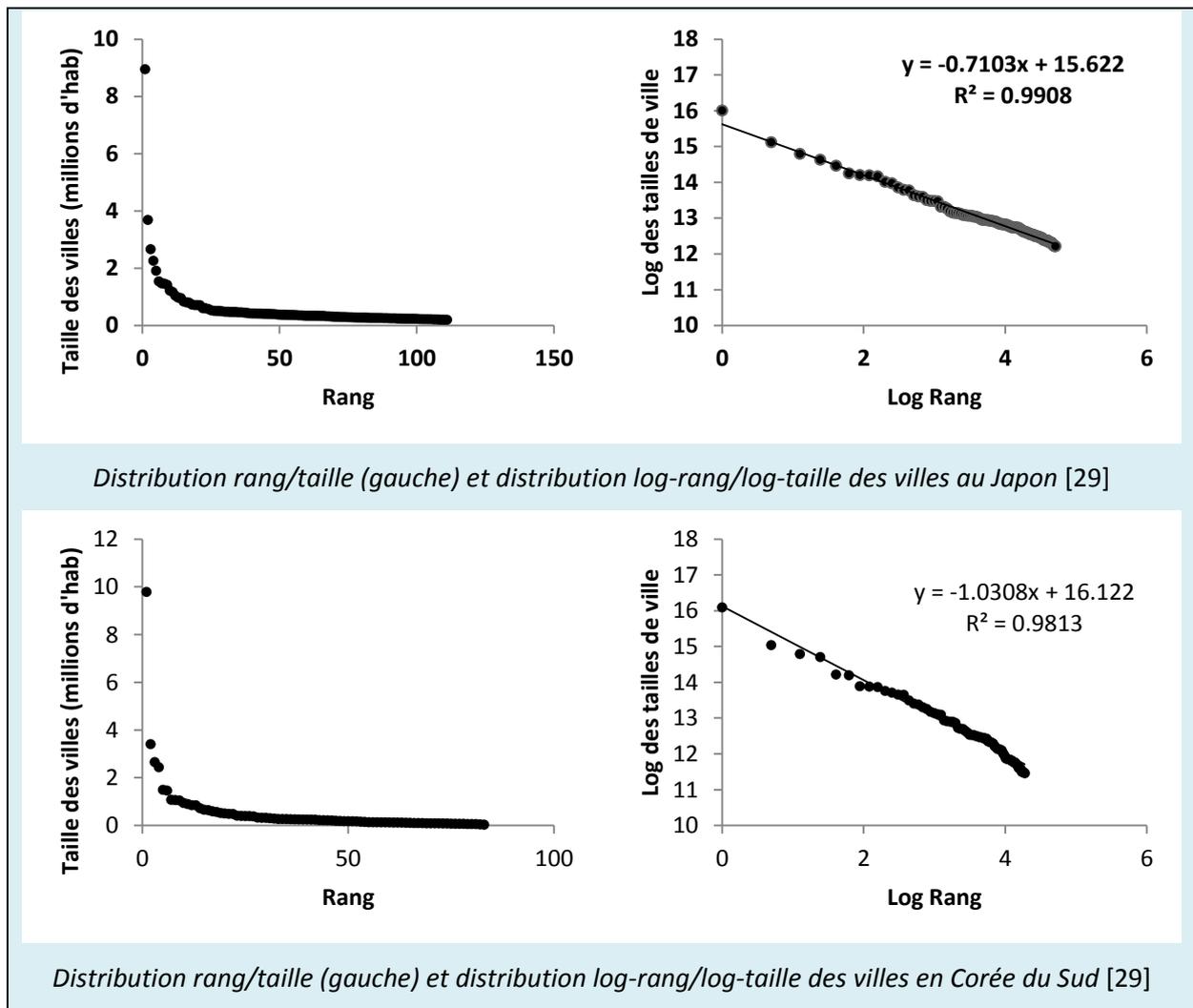
Distribution rang/taille (gauche) et distribution log-rang/log-taille des villes en France [29]



Distribution rang/taille (gauche) et distribution log-rang/log-taille des villes aux Etats Unis [29]



Distribution rang/taille (gauche) et distribution log-rang/log-taille des villes en Allemagne [29]



Des sous-systèmes de villes en évolution avec des *patterns* contrastés

L'analyse globale masque cependant des disparités et des évolutions locales. En Afrique du Sud par exemple, les études que nous avons menées montrent que la loi rang taille n'est pas vérifiée, ce qui traduit le manque d'intégration économique d'un pays résultant de la juxtaposition de républiques anciennement indépendantes et non encore intégrées dans un système économique unique. En revanche, la loi rang taille fournit une bonne description de la distribution des tailles des villes américaines à chaque décennie entre 1790 et 1950 et traduit l'intégration des États-Unis en un seul pays. Elle continue d'ordonner le système américain des villes aujourd'hui. Toutefois la forme de la loi a changé au cours du temps. Elle a eu tendance à devenir plus plate : la distribution des villes américaines est aujourd'hui plus uniforme que par le passé.

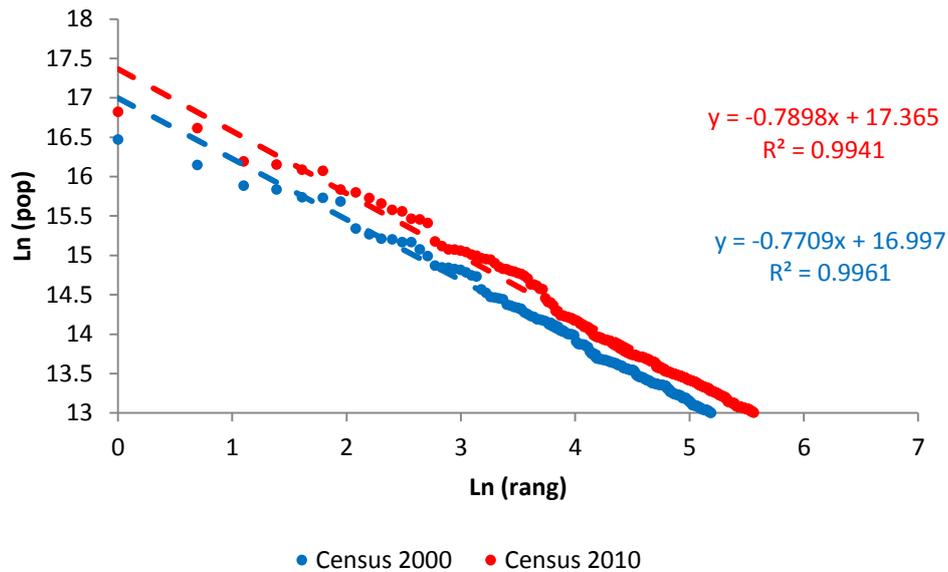
Le cas du système urbain chinois :

Une cascade de sous-systèmes complexes ou une hiérarchie plate de mégalo-poles géantes ?



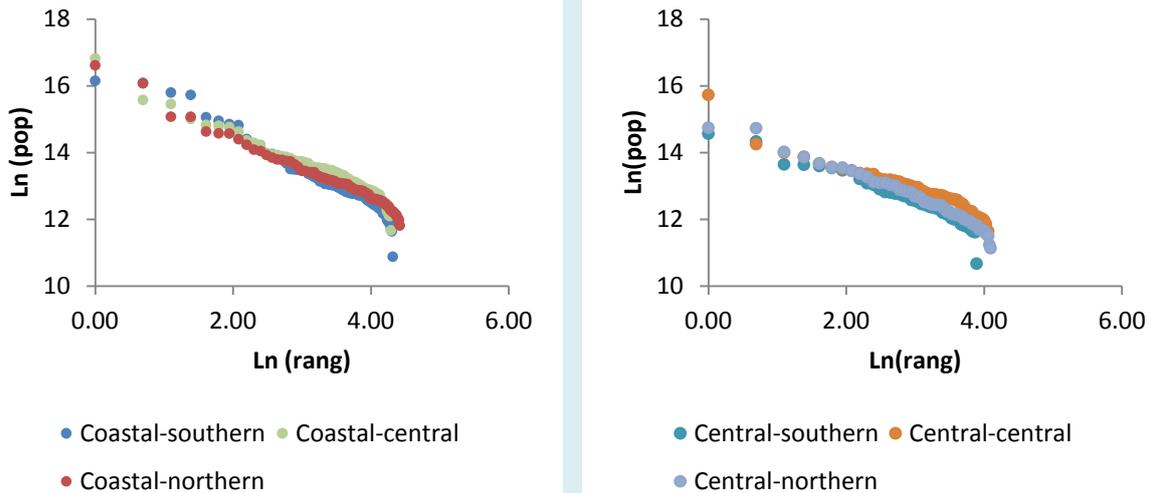
Carte de nuit de la Chine (gauche) et de la région côtière (gauche) qui montre la hiérarchie du système urbain à l'échelle nationale et régionale.

Lorsque l'on considère la population des villes chinoises telle qu'elle est définie par les statistiques officielles (c'est-à-dire en incluant l'ensemble des populations à la fois urbaines et rurales qui résident dans les limites administratives) le système des villes chinoises s'ordonne selon une loi rang taille avec une pente (-0,63 en 2010) qui correspond à la pente de l'ensemble du monde. Ce résultat est remarquable car le niveau d'urbanisation de la Chine est aujourd'hui équivalent à celui de l'ensemble du monde. Cette organisation en loi de Pareto des rangs et des tailles des villes est également vérifiée pour l'extension spatiale urbaine. En revanche, si l'on ne considère dans l'analyse que la population réellement urbanisée à l'intérieur des limites administratives, la pente rang taille pour la population devient plus importante à -0.79. Elle est alors du même ordre que celle des pays développés voire sensiblement plus forte ; elle reflète cette fois le niveau de développement de la Chine qui est sous urbanisée par rapport à son niveau de développement actuel.



Analyse logarithmique rang taille du système urbain chinois, en ne considérant que les populations urbaines [30]

La loi rang taille est également vérifiée en Chine à l'échelle régionale et sous-régionale mais sa forme est différente selon les régions. Alors que les régions du centre présentent une pente entre -0,7 et -0,8, et donc un niveau de hiérarchie similaire à ceux du Japon, des États-Unis ou des pays européens, la pente du système des villes des trois régions côtières de l'Est (le golfe de Bohai autour de Pékin, le delta du Yangtse autour de Shanghai, le delta de la Rivière des Perles autour de Canton) révèle un très haut niveau de hiérarchisation, entre -0,9 et -1,1, similaire et même supérieur à celui de la Corée du Sud. Celle-ci présente une pente de - 1,03 avec une concentration de 50 % de la population nationale, 24,5 millions d'habitants dans le Grand Séoul aujourd'hui contre 2,4 millions à Séoul en 1960. Ce très haut niveau de hiérarchie sur la côte Est de la Chine traduit un développement accéléré avec une forte concentration urbaine et des inégalités régionales économiques que les autorités chinoises cherchent à équilibrer en promouvant par des politiques publiques le développement des villes petites et moyennes.

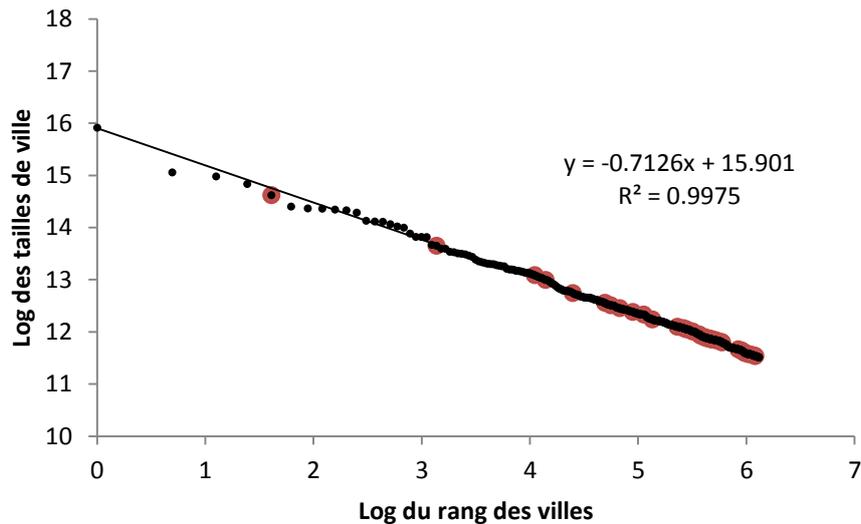


Analyse logarithmique rang taille des sous-systèmes urbains régionaux chinois, côtiers (gauche) et centraux (droite) [30]

La loi rang taille n'est pas seulement un outil d'analyse ; elle peut servir à faire des prévisions et des scénarios. Un scénario de développement régional et sous régional de la Chine avec des politiques actives d'aménagement régional pour équilibrer la croissance vers l'Ouest et vers les villes moyennes et petites conduirait la Chine urbaine à devenir, avec 1 milliard d'urbains à l'horizon 2030, un grand système urbain continental constitué de sous-systèmes régionaux, constitués à leur tour de sous-systèmes sous-régionaux équilibrés. Cette organisation du système urbain en sous-systèmes serait plus efficace et plus résiliente qu'une organisation à hiérarchie plate constituée de quelques dizaines d'immenses régions urbaines, comme le montrent les théories des systèmes complexes. Un autre scénario est toutefois envisageable : celui d'une poursuite de la concentration et d'une désintégration des niveaux hiérarchiques intermédiaires. Dans ce second scénario, la pente du système urbain chinois dans son ensemble évoluerait à l'horizon 2050 de - 0,7 à -1, ce qui conduirait des villes comme Pékin, Shanghai ou Canton à devenir d'immenses agglomérations continues de 200 kilomètres de diamètre avec des populations de l'ordre de la centaine de millions d'habitants.

Intégration du système urbain français au sein du système urbain européen

Le système urbain français est fortement intégré au système urbain européen, et ne peut être analysé de façon isolée. Le graphique suivant montre que le système urbain européen est un système complexe et hiérarchisé, au sein duquel s'insère le sous-système urbain français (rouge).



Distribution rang-taille des 453 premières villes européennes (points noirs), incluant les 37 premières villes françaises (points noirs entourés de rouge)

Les rendements d'échelle des systèmes urbains

La distribution des tailles de villes selon une loi de Pareto reflète un optimum économique. Des villes de tailles différentes sont en effet complémentaires au sein du système urbain. Les métropoles, les villes secondaires, les villes marchés, et les villages sont tous liés par leurs fonctions complémentaires. La ville principale est souvent la capitale nationale et le siège du pouvoir politique. La ville principale d'un pays tend aussi à être la plus diversifiée, à la fois dans les échanges de biens et de services et dans l'intensité de la vie culturelle. De la même manière que la ville capitale forme le cœur d'une grande région métropolitaine comprenant d'autres villes adjacentes, d'autres grands centres urbains constituent des capitales régionales qui sont le point focal de l'économie régionale [31].

Les villes montrent des rendements d'échelle croissant avec leur taille démographique. Des travaux récents montrent une relation supra linéaire statistiquement robuste entre le dépôt des brevets aux États-Unis et la taille de la population urbaine. C'est également le cas pour le PIB par habitant [32], [33]. Les propriétés des villes changent graduellement avec leur taille [32], [34]. À chaque doublement de la population urbaine, une ville contient en moyenne 10 à 20 % de volume d'infrastructures par habitant en moins. Elle présente aussi un accroissement de 10 à 20 % des taux de production de richesses et d'innovation. Ces effets s'appliquent lorsque l'on considère la ville comme un tout, à la fois mélange de populations et marché du travail unifié. Ils s'appliquent aux villes lorsqu'elles sont définies comme des zones métropolitaines fonctionnelles, plutôt qu'à leurs

cœurs centraux ou à leurs divisions administratives, qui n'ont pas de signification socio-économique réelle. Pour expliquer l'universalité de ces effets, Luis Bettencourt [32], [34] a proposé un cadre théorique qui dérive ces propriétés d'une conceptualisation des villes comme des réseaux sociaux et infrastructurels. L'idée fondamentale est que les villes sont d'abord et avant tout de grands réseaux sociaux. En ce sens les villes ne sont pas juste de grandes agglomérations d'habitants, elles sont des *patterns* structurés de liens sociaux. L'espace, le temps et les infrastructures jouent un rôle fondamental pour permettre l'établissement et la persistance des liens sociaux, pour leur permettre d'acquérir une structure en évolution ouverte qui accroît et organise la connectivité et la complexité.

La hiérarchisation croissante du paysage urbain français



Image satellite de la France vue de nuit

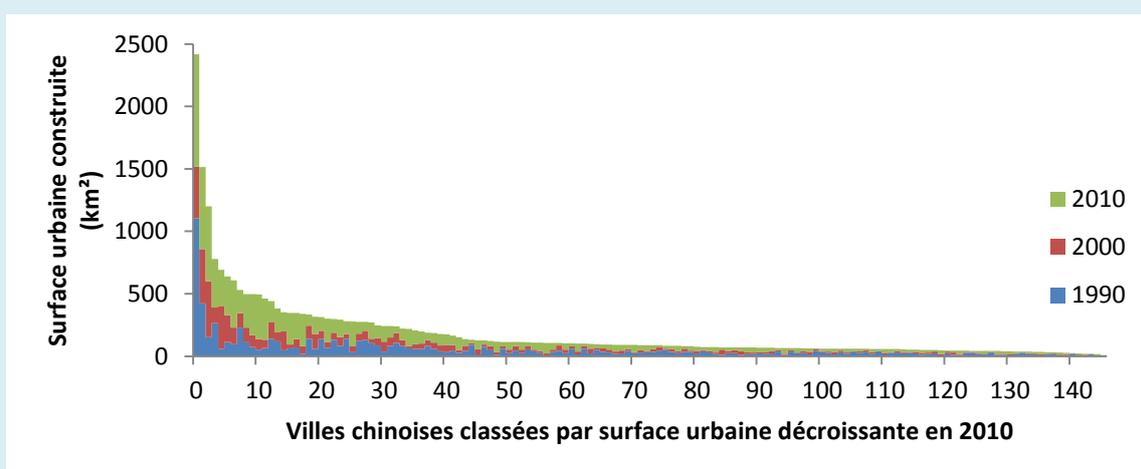
Lepetit [35] a évalué l'évolution du coefficient de hiérarchisation du système urbain en France entre le XVIII^e et le XIX^e siècle et a trouvé des changements très lents de la distribution rang taille, marquée surtout par la faiblesse du nombre des grandes villes. L'ensemble des villes de plus de 10 000 habitants a été étudié en 1750, 1780 et 1836. Les coefficients de hiérarchisation (de Zipf) sont en moyenne de 0,74 (min 0,72 – max. 0,76). Guérin-Pace [36] a étudié le cas français entre 1831 et 1982, en utilisant un échantillon qui contient toutes les unités urbaines de plus de 2000 habitants. Elle trouve une augmentation constante des coefficients de hiérarchisation (de Zipf), ce qui induit

l'hypothèse d'une hiérarchisation croissante du paysage urbain français et son organisation en un système complexe interconnecté. Depuis les trente dernières années, le territoire français opère une véritable mutation sous l'effet de l'insertion européenne et les dynamiques mondiales. Il est organisé autour de certains espaces de production de richesse, qui sont principalement les métropoles, les territoires frontaliers et les littoraux. Les contrastes s'accroissent entre ces territoires dynamiques et des territoires moins favorisés, comme certains espaces ruraux en crise, les zones urbaines appauvries ou les territoires industriels en attente de reconversion.

Pour la croissance et la compétitivité économique, c'est l'organisation du système urbain en différents sous systèmes bien structurés, et avec une invariance d'échelle correspondant à l'optimum économique d'une loi de Zipf-Pareto, qui est importante et non les seules d'économies d'agglomération des grandes métropoles. En termes de politiques publiques d'aménagement, la planification régionale et le soutien aux villes moyennes et petites sont cruciaux pour la compétitivité.

Stabilité et recomposition dynamique du système urbain chinois

Dans un système urbain très dynamique et en forte évolution comme le système chinois au cours des 20 dernières années, les classements respectifs des villes intermédiaires (par surface urbaine) ont fortement varié entre 1990 et 2000 (voir figure ci dessous) ; cependant à chaque période, malgré la croissance plus rapide ou plus lente de certaines villes, le *pattern* d'ensemble s'est reconstitué.



Evolution de l'ordre des villes chinoises (classées par surface) entre 1990 et 2010 [30]

2. L'URBANISATION ET L'ENERGIE

Les quatre âges énergétiques de l'urbanisation

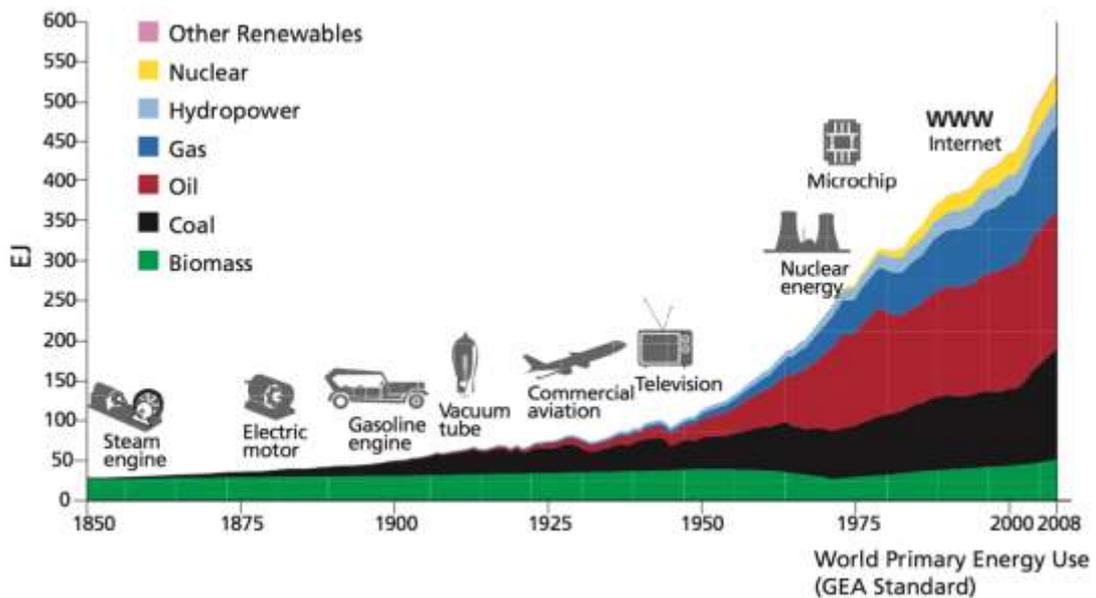
Les transitions actuelles doivent être replacées dans l'histoire longue des villes. L'histoire des villes coïncide avec les progrès de l'agriculture et des techniques. Celles-ci ont fourni un surplus énergétique pour subvenir aux besoins d'une population rassemblée et aux activités de plus en plus spécialisées. Ces surplus, d'abord produits par l'arrière-pays proche, ont ensuite été générés par des territoires de plus en plus éloignés. Le phénomène d'urbanisation s'est amplifié selon quatre phases et a parallèlement connu des variations géographiques.

L'urbanisation pré-moderne (3 000 avant – 1 800 après J.-C.) constitue une première étape, débutée il y a 5 000 ans en Mésopotamie, puis en Chine et en Inde. Chaque personne consommait alors 26 000 kcal par jour en moyenne. L'augmentation de la productivité des techniques agricoles a généré des surplus permettant de supporter l'existence de populations non agricoles. La division sociale du travail s'est accompagnée d'inégalités et de concentration des richesses. La densité des peuplements s'est accrue ainsi que la transmission des maladies. Les monocultures (par exemple le riz, le blé, le maïs, les pommes de terre) ont accru la vulnérabilité aux maladies et à la famine. Le nombre et la taille des villes dans une zone donnée dépendaient alors des capacités d'extraction de nourriture et d'autres surplus des populations rurales sans provoquer de dégradations environnementales de long terme.

L'industrialisme urbain (de 1800 à 1950) peut être considéré comme une seconde étape. Cette phase a débuté il y a deux siècles avec la Révolution Industrielle en Europe et en Amérique du Nord. La consommation d'énergie, en particulier des combustibles fossiles, s'est accrue rapidement, accompagnée de la mécanisation de la production. Les villes ont crû rapidement en taille et en part de la population globale. Les cycles écologiques ont été bouleversés : les déchets humains (notamment nitrogènes) jusqu'alors recyclés, ont été déversés dans les rivières et les océans. La population urbanisée a été exposée de manière croissante aux déchets et aux pollutions. De nombreuses cités ont crû en s'appropriant la capacité porteuse d'autres régions et en exportant leurs déchets.

Une troisième phase peut être marquée par l'interdépendance globale (1950 – 1980). Les villes sont des points nodaux de flux de ressources, de déchets, de biens et services, de capital et de main-d'œuvre globalement interconnectés. Les problèmes environnementaux sont répartis entre l'échelle locale, régionale et globale, avec une contribution croissante des villes à la dégradation

environnementale. La consommation énergétique moyenne par personne et par jour passe à 300 000 kcal.



En 2005, près de 78 % de la consommation énergétique globale étaient basés sur des sources d'énergie fossile qui fournissaient une énergie abondante et bon marché à la moitié de l'humanité [37], [38].

Les trois dernières décennies sont une quatrième phase marquée par un dépassement des limites. Cette période débute avec le dépassement de la capacité porteuse globale de la planète à la fin des années 1970. La poursuite de la croissance urbaine devient le principal facteur d'accélération du changement climatique. La pression anthropique sur les écosystèmes s'accroît au rythme d'environ un milliard d'humains nouveaux tous les 10 ans, dont une part croissante est urbanisée dans des mégapoles géantes. Avec un foyer de peuplement urbain de 1,5 milliard de personnes en Asie de l'Est et de 1,3 milliard de personnes dans le sous-continent Indien, l'Asie retrouve la première place (perdue après la Révolution Industrielle) dans l'urbanisation mondiale. L'urbanisation crée des villes dont une majorité des habitants vit en dessous du seuil de pauvreté, sans accès à l'eau potable ou à l'électricité. Les mégapoles nouvelles sont des organismes fragilisés par les risques de pénurie d'énergie, d'eau, et par les impacts du réchauffement climatique sur des zones côtières où se concentre la majeure partie de l'urbanisation.

Les investissements massifs en infrastructures urbaines vont entraîner une forte croissance de la demande énergétique et des chemins de dépendance pour le futur

L'urbanisation va entraîner la construction de routes et de bâtiments, de réseaux d'eau et d'installations de traitement des déchets, de systèmes énergétiques et de transport qui vont nécessiter de forts investissements. À l'échelle globale, entre 25 trillions et 57 trillions de dollars seront investis dans les infrastructures à l'horizon 2030, avec 100 milliards de dollars par an en Chine [39], [40]. Une forte croissance de la demande énergétique est prévisible pour la construction, le fonctionnement et la maintenance de ces infrastructures. Elles sont de plus construites avec des matériaux intensifs en énergie et en carbone comme le béton [41], [42]. Cette construction d'infrastructures, essentiellement en Asie, représente une fenêtre d'opportunité très étroite pour intégrer des stratégies de développement bas carbone dans les plans de développement urbain. Toutefois, cette fenêtre d'opportunité va se rétrécir avec le temps, au fur et à mesure que les trajectoires d'urbanisation se forment et que les infrastructures deviennent une contrainte. Une fois en place, les infrastructures urbaines de base créent des *patterns* urbains irréversibles qui limitent les choix futurs. En raison de leur longévité, les infrastructures sont susceptibles de créer des *chemins de dépendance* et des inerties dans les émissions de gaz à effet de serre, ce qui allonge les échelles de temps au cours desquelles les émissions peuvent être réduites.

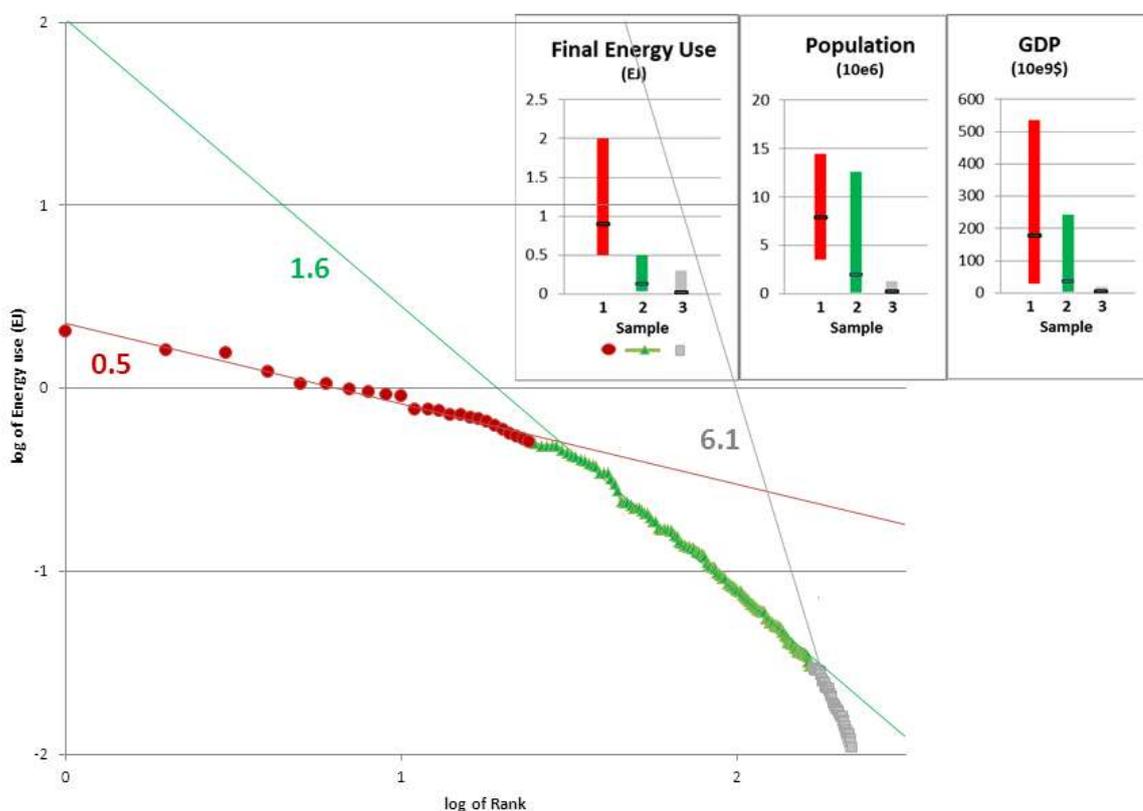
La longue traîne du système des villes implique pour la transition énergétique de faire porter un effort particulier sur les villes petites et moyennes

La structure selon une loi de Zipf Pareto du système des villes a une implication pour la politique énergétique. Celle-ci ne doit pas se concentrer uniquement sur le sommet de la distribution, c'est-à-dire sur les plus grandes villes, car les villes moyennes et petites constituent la majorité du continuum de la courbe de distribution rang taille.

Peu d'études ont été effectuées sur les implications de la loi rang taille sur la demande énergétique urbaine. Bettencourt et al. [32] ont identifié des effets d'économies d'échelle pour les infrastructures énergétiques, en particulier pour les réseaux de distribution de carburant et d'électricité (câbles). Les villes les plus peuplées ont moins d'infrastructures énergétiques proportionnellement que les villes les moins peuplées, du moins en Allemagne et aux États-Unis. En termes de demande énergétique, les études ne concernent que des cas spécifiques et sont difficilement généralisables. La consommation de carburant semble moins élevée aux États-Unis dans les villes les plus peuplées, ce qui est cohérent avec la dépendance automobile des villes moins

denses et plus éparses. À l'inverse, la consommation électrique est proportionnellement plus importante dans les villes les plus peuplées aux États-Unis, en Allemagne et en Chine. Toutefois, ce résultat est peut-être lié également à une préférence dans les villes les plus peuplées pour les vecteurs d'énergie plus propres et dépendants du réseau comme l'électricité par rapport au fioul et au charbon.

La consommation totale d'énergie finale des villes n'obéit pas à une loi rang taille mais révèle des élasticités différentes selon les tailles des villes



Distribution rang taille de la demande énergétique urbaine (EJ) [27]

L'analyse rang taille des consommations énergétiques finales des villes révèle des comportements différents suivant les tailles énergétiques urbaines. Cette analyse a été menée sur 225 villes de la base de données d'énergie urbaine du GEA avec des consommations urbaines allant de 0,825 PJ pour la ville de Shinayanga en Tanzanie avec environ 50 000 habitants à 2 EJ pour les 14,5 millions de résidents de la zone métropolitaine de Shanghai.

L'analyse révèle des déviations significatives par rapport à une loi d'échelle uniforme telle quelle a été proposée dans certaines publications [32]. La distribution réelle est caractérisée par des

effets de seuil dans une distribution globale convexe. Si l'ensemble des données est subdivisé en trois sous-ensembles (différenciés par la taille énergétique de la ville) des différences significatives des exposants sont trouvées, ce qui suggère des effets de seuil importants. Les petites villes (en dessous de 30 PJ de consommations d'énergie finale) présentent la pente la plus forte d'accroissement de l'énergie consommée avec la diminution de rang (c'est-à-dire avec l'accroissement de taille énergétique). La consommation énergétique des petites villes a une élasticité de -6,1 par rapport à leur rang. Lorsque leur rang augmente, leur consommation diminue très fortement, de façon nettement supra-linéaire. Pour les villes moyennes, qui consomment entre 30 et 500 PJ, cette élasticité tombe à -1,6. L'anti-corrélation⁶ entre rang et consommation énergétique est toujours supra-linéaire, mais plus faiblement que pour les petites villes. Les grandes villes quant à elles présentent une élasticité-rang de -0,5. Contrairement aux villes moyennes et petites, l'anti-corrélation est nettement infra-linéaire.

L'infra linéarité de la croissance de la demande énergétique pour les villes les plus grandes en taille énergétique indique des économies d'agglomération considérables dans les plus grandes villes par rapport à la consommation énergétique.

Seules quatre régions urbaines de l'échantillon analysé ont une consommation d'énergie finale significativement au-dessus de 1 EJ. La structure du système urbain global en sous-systèmes comprenant tous de longues traînes de petites villes et la très forte élasticité de la demande énergétique par rapport aux déplacements dans l'ordre des tailles invite à porter une attention particulière à ces villes et à leur future croissance. C'est particulièrement vrai pour le système urbain mondial, qui même s'il connaît un phénomène de forte concentration dans les mégalo-poles, verra sa croissance la plus rapide dans les plus petits segments de tailles de villes, en dessous de 500 000 habitants, qui selon les projections de population contiendront une part croissante de la population urbaine globale [4].

⁶ Corrélation avec un signe négatif entre deux paramètres.

3. L'URBANISATION ET LES LIMITES DE LA PLANETE

La capacité porteuse de la planète est largement dépassée alors que le processus d'urbanisation en est à son premier tiers

Les méga régions urbaines ne peuvent pas être autosuffisantes. Leurs densités énergétiques locales très élevées, leurs besoins de matériaux et de ressources, et leur génération de forts volumes de déchets non recyclables les rendent dépendantes d'écosystèmes lointains s'étendant à la planète entière. La dépendance des villes globales est évaluée par leur empreinte écologique⁷. Les grandes villes ont le plus souvent un territoire écologique 100 à 1000 fois supérieur à leur territoire physique.

Dans les pays développés dont la population et le nombre d'urbains augmentent faiblement voire stagnent, la réduction de l'empreinte écologique peut s'obtenir en travaillant sur l'efficacité des structures urbaines existantes, ainsi que sur les modes de consommation. En revanche, des politiques d'optimisation a posteriori ne peuvent être efficaces dans un monde urbain émergent en très forte croissance. Il ne s'agit pas seulement d'optimiser l'existant, mais de définir et favoriser une évolution de la demande et une optimisation de l'offre énergétique les plus sobres possibles en gérant la croissance urbaine en fonction de la contrainte climatique. L'urbanisation constitue un changement de trajectoire énergétique. Transformer un villageois rural dans un pays en voie de développement en un urbain, c'est multiplier par 3 à 6 sa pression sur la biosphère. Le changement rapide du paysage urbain mondial impose de prévoir une croissance urbaine sobre dès le départ.

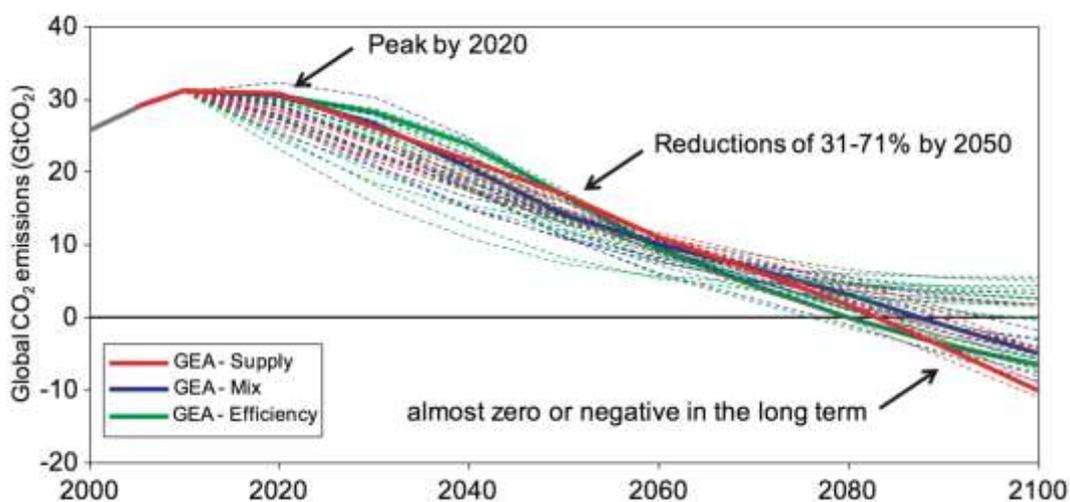
⁷ L'empreinte écologique est un outil faisant correspondre une surface en ha à une ou plusieurs activités, pour traduire de manière facilement compréhensible l'impact d'activités humaines sur les écosystèmes et la planète. Elle quantifie pour une population la surface nécessaire pour produire les principales ressources consommées par cette population et pour absorber ses déchets. Cette surface est en réalité fragmentée et éparse sur la planète entière. Elle correspond à la réalité concrète qu'est la finitude de la planète et de ses ressources.

4. L'URBANISATION ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le changement climatique

Au cours de la dernière glaciation, la concentration de dioxyde de carbone était de 180 ppm. Elle s'est élevée à 280 ppm au début de l'ère interglaciaire, il y a 12 000 ans pour atteindre 380 ppm aujourd'hui du fait des émissions anthropiques [43]. L'humanité a, en 150 ans, transformé l'atmosphère autant qu'entre le début et la fin de la période glaciaire. Si la tendance actuelle se poursuit, la teneur en CO₂ dans l'atmosphère pourrait atteindre vers la fin du siècle une valeur de 750 ppm, voire dépasser 1000 ppm, en provoquant des transformations irréversibles du climat. L'élévation de la température moyenne depuis le début de l'ère industrielle a été de l'ordre de 0,8 °C [43]. Le rapport Stern [44] a estimé à plus de 5 500 milliards d'euros l'impact économique du changement climatique en l'absence de mesures adéquates prises dès à présent.

Pour éviter les conséquences les plus graves d'une telle évolution, le seuil limite est de 2 °C pour l'élévation de la température moyenne au cours des 50 prochaines années. Ceci implique de diviser par deux, d'ici 2050, les émissions de CO₂ au niveau mondial par rapport aux niveaux actuels (l'année 2000 étant l'année de référence). Les pays industrialisés devront fournir un effort encore plus important, d'où le *Facteur 4* retenu pour la France.



Évolutions des émissions mondiales de CO₂ d'origine énergétique et industrielle visant à limiter le changement de la température en dessous de 2 °C (avec une probabilité de succès > 50 %) [45]. Le graphique montre que les émissions doivent atteindre leur maximum vers 2020 (ou plus tôt) et qu'elles doivent décroître vers zéro au cours des quatre à cinq décennies suivantes. Plus le pic se

produit tard, plus la baisse doit être forte et plus les émissions nettes doivent être "négatives". Des émissions nettes négatives peuvent être réalisées grâce à la capture et au stockage du dioxyde de carbone en conjonction avec l'utilisation de biomasse. Pour plus de détails sur les scénarios GEA voir la base de données de scénarios GEA de l'IIASA : www.iiasa.ac.at/web-apps/ene/geadb.

La forme de l'urbanisation à venir influera sur la trajectoire du changement climatique

Une croissance de 1 % de l'urbanisation conduit aujourd'hui à une croissance de 2,2 % de la consommation énergétique. Les prévisions pour la croissance de l'urbanisation entre 1990 et 2025 sont de 150 %, et mèneraient en l'état actuel à une multiplication par 4 de la consommation énergétique et des émissions de CO₂ associées. D'autre part, une croissance de 1 % du PIB conduit à une croissance de 1,03 % de la consommation énergétique. La croissance annuelle du PIB mondial a été de 4 % entre 1995 et 2005. La Chine annonce, elle, une croissance de 11,4 % de son PIB en 2008 et de 8,7 % en 2009. La croissance économique et le développement des pays asiatiques et africains reposent sur une dynamique d'urbanisation rapide associée à une forte croissance des émissions et des consommations énergétiques. Entre 1970 et 1990, les émissions de soufre ont diminué de 65 à 40 millions de tonnes par an dans les pays développés tandis qu'elles ont cru de 48 à 59 millions de tonnes dans les pays en développement.

L'accroissement simultané de la démographie et de l'urbanisation entrainera d'autre part la construction d'infrastructures urbaines lourdes qui enfermeront les modes de vie et les constructions à venir dans des chemins de dépendance. La construction rapide de l'équivalent d'un deuxième monde urbain actuel est à l'heure actuelle organisée autour de très larges mailles viaires et de structures construites de grande taille. Celles-ci sont produites en série sur le même modèle et juxtaposées sans intégration. La conversion accélérée du foncier rural en foncier urbain provoque une expansion spatiale sans précédent accompagnée d'une fragmentation de la forme urbaine.

La demande énergétique urbaine croît plus vite que l'expansion spatiale⁸. En effet, l'augmentation de la taille et des distances demande, d'une part, plus de matériaux de construction. Elle crée, d'autre part, des distances qui sont plus longues à parcourir, des déplacements plus fréquents et plus contraints, et rend l'usage de la voiture indispensable. Enfin, les grands bâtiments isolés sont moins performants énergétiquement (besoins de chauffage et de lumière artificielle accrus) que des îlots urbains compacts des centres villes traditionnels.

⁸ En termes mathématiques, la croissance de l'énergie est supra linéaire par rapport à l'expansion spatiale.

Non maîtrisée, l'urbanisation pourrait nous faire franchir en trois décennies les seuils fatidiques du changement climatique. Comme l'urbanisation des pays émergents est un phénomène irréversible qui obéit à de forts déterminants économiques et sociaux, il est urgent de promouvoir des modèles urbains faiblement consommateurs en énergie et en ressources.

Les formes de l'urbanisation créent des trajectoires de dépendance

Un réseau d'autoroutes peut être construit en vingt ans. Un réseau viaire peut durer deux mille ans. Dans les villes européennes comme à Rome ou à Turin, où le centre ville a été dessiné à l'époque d'Auguste au premier siècle avant J.-C, on utilise encore les tracés des voies romaines. On construit aujourd'hui en une génération des villes qui contraindront les *patterns* énergétiques de dizaines de générations. À l'échelle planétaire, le climat change en réponse à des changements dans la composition de l'atmosphère qui mettront plusieurs siècles à se dissiper tandis que le climat continuera de changer même après la disparition de la cause initiale. Les sols demandent plusieurs siècles pour se reconstituer. Les hausses de température observées aujourd'hui correspondent en fait à des causes plus anciennes, et ne font donc qu'annoncer des changements plus grands, correspondant aux activités actuelles. C'est pourquoi le principe de précaution doit inciter à modifier dès aujourd'hui les comportements, mais aussi à prévoir les changements à venir comme conséquences des événements récents et actuels.

CHAPITRE II

MESURER L'ÉNERGIE ET LES ÉMISSIONS URBAINES

COMMENT DÉFINIR LES LIMITES DU SYSTÈME URBAIN ?

COMMENT COMPTABILISER L'ÉNERGIE ET LES ÉMISSIONS ?

Les méthodes pour mesurer la demande énergétique et les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle urbaine varient en fonction des pays. La taille plus réduite des villes, comparée à celle des pays, pose un certain nombre de défis techniques. Tout d'abord, les zones urbaines sont généralement de plus petite taille que les infrastructures dans lesquelles elles prennent place ; une grande partie de leurs émissions est susceptible d'avoir pour origine des zones extérieures à leurs limites administratives. Ensuite, les zones urbaines sont des systèmes ouverts qui tirent leur énergie, leurs ressources, et leurs biens de consommation de la planète entière. Les biens de consommation qui entrent aujourd'hui dans une ville française ont des composants qui ont été produits et assemblés dans des villes de nombreux pays différents répartis sur plusieurs continents.

Les définitions des zones urbaines à travers les différents pays, et parfois même à l'intérieur d'un même pays, ne sont pas cohérentes entre elles et conduisent à des évaluations de la demande énergétique urbaine et à des inventaires des émissions qui ne sont pas comparables. La nature poreuse des limites urbaines et le manque de méthode de comptabilisation standardisée conduisent à des différences significatives dans la comptabilité des émissions.

Les méthodes de comptabilisation de l'énergie et des émissions de gaz à effet de serre sont primordiales pour la mise en œuvre de politiques publiques fondées sur des données factuelles. Aucune ville moderne cependant n'est un système économique fermé. La comptabilisation des émissions et des consommations énergétiques est donc largement dépendante du choix des frontières pour le système urbain, en termes d'échelle spatiale (ville

ou agglomération), en termes de définition de l'énergie (énergie finale, énergie primaire), ou encore en termes de postes couverts (énergie consommée, énergie produite, énergie incorporée dans les produits et services de consommation, etc.).

Impact du choix des frontières spatiales sur la comptabilisation des consommations énergétiques

La mesure des consommations énergétiques est le premier pas vers le contrôle des consommations. Cependant, la comptabilisation n'est pas une tâche aisée du fait des difficultés à définir des frontières précises aux systèmes urbains. Cette section passe en revue les différents aspects qui doivent être pris en compte et clarifiés pour la comptabilisation des consommations énergétiques urbaines. Une mesure cohérente et transparente de ces consommations est essentielle pour la mise en œuvre de politiques adaptées à l'échelle urbaine.

L'un des aspects essentiels est l'échelle de mesure. Barles [46] a étudié la consommation en énergie fossile de Paris, sa banlieue et de la région métropolitaine au sens large. La consommation d'énergies fossiles par habitant est plus faible dans Paris, et s'accroît au fur et à mesure que la zone considérée grandit. Ce phénomène est dû à une combinaison de facteurs, dont notamment le fait que :

- la consommation énergétique pour les transports est plus faible dans Paris intramuros grâce aux plus fortes densités et à l'offre de transport en commun,
- Les formes urbaines de Paris intramuros ont une meilleure qualité intrinsèque, comparée à l'habitat individuel et aux développements de type barre en périphérie, dont les pertes thermiques via l'enveloppe sont jusqu'à six fois plus importantes que dans les tissus urbains haussmanniens [47].

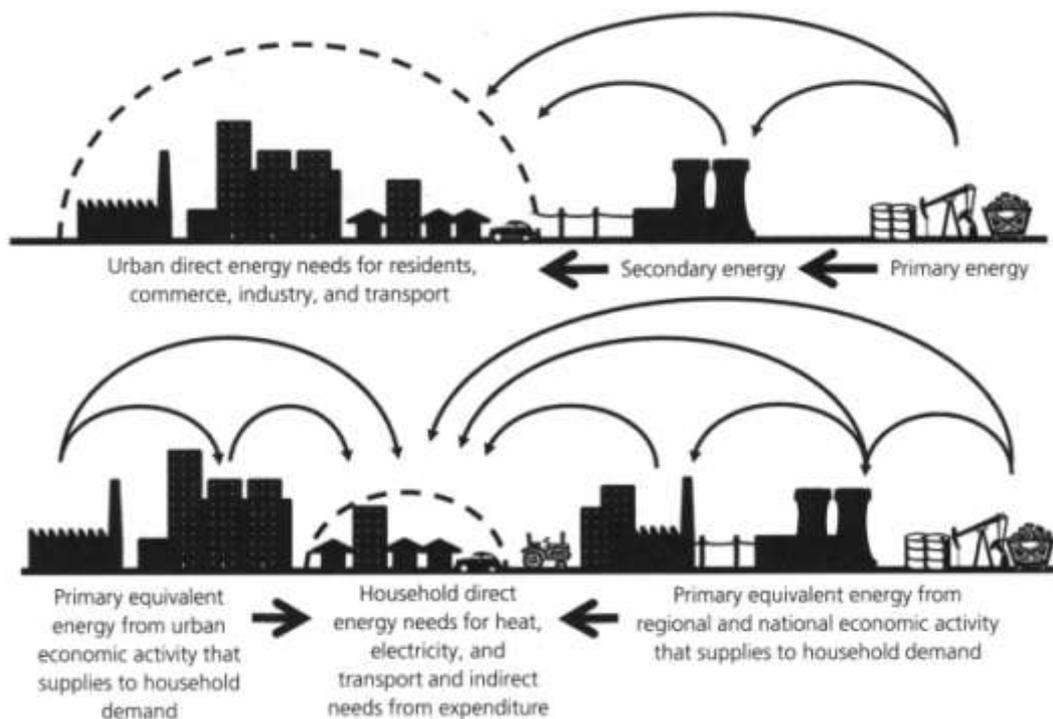
Le choix de limites spatiales plus larges pour le système urbain conduit donc à inclure des zones périurbaines dont les consommations énergétiques par habitant sont plus élevées. Ce choix conduit également à inclure dans la comptabilité de larges zones logistiques et industrielles fortement consommatrices.

Comptabilité basée sur la production versus comptabilité basée sur la consommation

Une première approche générale de l'évaluation de la demande énergétique et des émissions affecte l'énergie et les émissions aux aires urbaines où les biens et services sont produits. Cette comptabilisation est dite basée sur la production. Cette méthodologie ne prend

pas en compte les lieux où les biens et services sont consommés, ni les émissions incorporées associées avec la production des biens et des services [48].

À l'inverse, les inventaires de l'énergie et des émissions fondés sur la consommation attribuent les usages de l'énergie et les émissions aux lieux où les biens et les services sont consommés [49]–[51]. Lorsque la population d'une ville consomme plus que ce qu'elle produit à l'intérieur de ses propres frontières, elle devient alors un importateur net de biens et de services et son inventaire de consommation d'énergie et d'émissions est plus élevé lorsqu'il est basé sur la consommation que lorsqu'il est basé sur la production.



Comparaison des champs couverts par l'approche territoriale en termes de production (haut) et l'approche basée sur la consommation (bas) [52]

Le choix de la méthode de comptabilisation a un fort impact sur les résultats obtenus. Pour une même ville, la comptabilisation basée sur la consommation et celle basée sur la production peuvent varier jusqu'à un facteur 3,5 ainsi que le montre le tableau suivant. Ce tableau présente les résultats obtenus via les deux méthodes pour 5 villes américaines de tailles et de spécialisation variées. Les quatre premières villes, New York, Philadelphie, Denver et Sarasota consomment beaucoup plus d'énergie et émettent beaucoup plus de tonnes de CO₂e (tCO₂e) lorsque la comptabilité est en termes de consommation que lorsqu'elle est en termes de production. Cette forte différence est liée à l'importation massive de biens et de services, au sein desquels de l'énergie et des émissions sont incorporées. A Sarasota, la

différence entre les deux comptabilités atteint un facteur 3,5. Au contraire, le Comté de Routt dans le Colorado présente la tendance inverse, et les émissions comptabilisées en termes de production sont deux fois plus élevées que celles en termes de consommation. Cette tendance s'explique par la plus grande part de l'industrie (notamment minière et de production électrique) dans le Comté de Routt.

Ville	Population	PIB (M de \$)	Comptabilité en termes de production (tCO ₂ e)	Comptabilité en termes de consommation (tCO ₂ e)	Ratio comptabilité consommation / production
New York	8 363 710	658 701	90 600 732	136 904 792	1.51
Philadelphie	1 448 394	70 474	15 506 377	30 133 842	1.94
Denver	588 349	62 817	10 178 482	17 826 975	1.75
Sarasota	369 535	7 927	3 231 600	11 233 864	3.48
Routt	21 580	1 474	1 625 627	701 134	0.43

Différence entre comptabilité basée sur la consommation et la production pour 5 villes américaines (adapté de [53])

COMPARAISON DES COMPTABILISATIONS EN TERMES DE CONSOMMATION OU DE PRODUCTION

“CASBEE® FOR CITIES” – SYSTEME D’EVALUATION JAPONAIS

Le Japon s’est engagé depuis 2007 dans un ambitieux programme visant à décarboniser de façon significative l’économie japonaise d’ici à 2050. Dans ce cadre, un panel d’outils stratégiques est promu par le Cabinet du Premier Ministre pour le suivi de l’efficacité énergétique et environnementale urbaine, dont notamment l’outil « CASBEE® for Cities » dédié à l’échelle urbaine. Cet outil est explicitement dédié à l’évaluation à l’échelle de la ville, et vise à soutenir l’introduction de mécanismes de marché auxquels les villes prennent part [54]. Il a été mis en œuvre sur la plupart des grandes villes japonaises et est un des outils clés pour le soutien à la transition bas carbone des villes japonaises.

Pour évaluer les performances d’une ville, CASBEE® for Cities définit les frontières du territoire urbain sur lesquelles est menée l’évaluation. Sur cette zone, l’indicateur BEE (pour Built Environment Efficiency) mesure l’efficacité énergétique des bâtiments, un indicateur agrégé sous la forme d’un ratio de la qualité environnementale sur la charge environnementale. Plus ce ratio est élevé, plus la ville est durable. Pour améliorer son score, la ville peut soit chercher à améliorer la qualité environnementale « Q » à l’intérieur de la zone urbaine, soit chercher à diminuer les impacts et externalités négatives qu’elle exerce sur son environnement extérieur (environmental Load « L »). L’indicateur agrégé BEE est calculé à

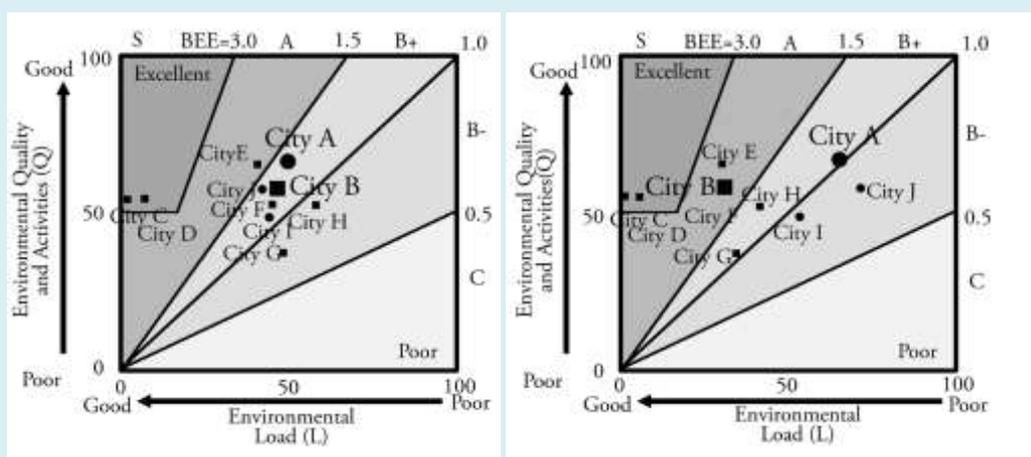
partir d'une grille d'analyse incluant une large palette de critères, recouvrant la durabilité urbaine au sens large. L'indicateur est flexible car la pondération de chaque critère résulte d'une concertation entre les différents partenaires locaux. Cette méthode de comptabilisation peut être appliquée dans des contextes variés, à des villes industrielles ou tertiaires, à des climats froids ou chauds.

CASBEE® for Cities offre deux méthodes de calcul pour la charge environnementale « Q ») :

- Suivant le principe du « pollueur-payeur », comptabilisation en termes de production, où les consommations énergétiques sont comptabilisées pour la zone dans laquelle elles ont lieu.

- Suivant le principe du « consommateur-payeur », comptabilisation en termes de consommation, où les consommations énergétiques pour la production de biens ou de services sont comptabilisées pour la zone dans laquelle les biens et services sont consommés.

En utilisant la première méthode (production), les villes industrielles obtiennent des scores plus faibles que les autres. Ce résultat incite les villes industrielles à continuer leurs efforts pour diminuer les consommations énergétiques. Cependant, l'ensemble du pays bénéficie des biens et services produits par les villes industrielles. La seconde méthode permet alors de rééquilibrer l'évaluation, en attribuant les consommations aux villes où les biens et services sont réellement consommés. Sur chacun des graphiques suivants, le score des différentes villes japonaises (anonymisées) est présenté dans une échelle de 1 à 5.



Les points représentent des villes industrielles. Les autres villes sont représentées par des carrés. A gauche, l'évaluation pour 10 villes japonaises avec une comptabilisation en termes de production. A droite, l'évaluation pour les mêmes villes avec une comptabilisation en termes de consommation.

Au travers de cet indicateur et de ces deux méthodes de comptabilisation, CASBEE® for cities permet de mesurer la performance environnementale des villes aujourd'hui et après la mise en œuvre de politiques publiques. En comparant ces valeurs, cette stratégie permet d'évaluer la pertinence et l'efficacité de politiques, et de présenter les résultats de façon lisible et compréhensible. Ce nouvel outil permet d'aider les autorités locales et les acteurs industriels à partager une compréhension commune et de coopérer dans la mise en œuvre de stratégies vers une société bas carbone.

Impact du choix du mode de comptabilisation sur les politiques publiques

Les méthodes de comptabilisation des consommations énergétiques et des émissions urbaines sont variables et fournissent des résultats très différents en fonction des villes. Ces méthodes cependant doivent en fin de compte servir de base à la mise en œuvre de politiques publiques. Une comparaison des méthodes de comptabilisation fondées sur la production et la consommation de Melbourne, Londres, et Pékin illustre les différents aspects d'une ville qui sont mis en lumière par chaque méthode de comptabilisation. Une méthode fondée sur la production met en lumière les fonctions d'une ville (la structure économique), tandis qu'une méthode basée sur la consommation reflète sa forme sociale et spatiale (géographie, structure, et préférences individuelles) [55].

En raison des différences significatives dans la portée du système urbain et dans les secteurs inclus dans les différents cadres d'analyse de comptabilisation, la comparaison de la demande énergétique et des émissions de gaz à effet de serre entre les villes est pratiquement impossible. Plusieurs initiatives internationales sont actuellement en cours pour développer un cadre d'analyse global de comptabilisation des émissions urbaines et à l'échelle locale (ICLEI, C40, Banque Mondiale, UN-HABITAT, PNUE), mais même avec un protocole cohérent, de nombreux défis demeureront en matière de disponibilité et de collecte des données.

International Local GHG Protocol – ICLEI

Un exemple de standardisation d'une méthode de comptabilité basée sur la production [56]

Le conseil international pour les initiatives écologiques locales (ICLEI) est une organisation internationale dédiée au développement durable et qui réunit plus de 1 000 villes, depuis les grandes métropoles jusqu'aux petites villes, dans plus de 85 pays. L'ICLEI soutient la mise en place à l'échelle internationale de stratégies et de politiques qui soutiennent les collectivités locales dans leurs actions pour le développement durable.

L'ICLEI a développé depuis 2010 le International Local GHG Protocol pour fournir aux collectivités locales une méthodologie simple pour quantifier les émissions de gaz à effet de serre au sein de leurs limites administratives. Cette méthode de comptabilisation est basée sur la production au sein d'un territoire. En développant une approche standardisée, l'ICLEI cherche à aider les collectivités locales à quantifier leurs progrès en termes d'émissions de gaz à effet de serre. La standardisation des méthodes ouvre la voie à de possibles comparaisons entre collectivités locales.

Depuis 2012, l'ICLEI amplifie le développement de ce protocole en unissant ses efforts avec le World Resource Institute, la Banque Mondiale, UN HABITAT et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement. La méthodologie issue de ce partenariat, le Global Protocol for Community-scale GHG Emissions, permet d'aller encore plus loin dans l'harmonisation des comptabilités carbone.

Ce nouveau protocole affiche les objectifs suivants :

- Aider les villes à préparer un inventaire exhaustif et crédible de leurs émissions
- Aider les villes à mettre en place des stratégies efficaces pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre au travers d'une compréhension fine de l'impact de leurs différentes activités
- Encourager la transparence des inventaires d'émissions de gaz à effet de serre
- Harmoniser les protocoles et standards de comptabilisation des émissions à l'échelle urbaine
- Aider les villes à démontrer l'impact significatif des actions locales sur les enjeux globaux

CHAPITRE III

LES MOTEURS DE LA CONSOMMATION

ENERGETIQUE URBAINE

La demande énergétique urbaine est influencée par une variété de facteurs physiques économiques et sociaux, par les niveaux de développement, et les trajectoires d'urbanisation spécifiques à chaque ville. Les facteurs clés incluent :

1. *l'environnement naturel* : le climat local et la demande de chaleur de refroidissement et d'éclairage ; la situation géographique et l'accès aux ressources naturelles ; l'écologie urbaine

2. *La structure spatiale* : la forme des villes ; l'accessibilité et la connectivité entre les différentes fonctions comme l'emploi et le logement ; la densité et son articulation ; la mixité des usages du foncier ; les infrastructures de transport

3. *Les infrastructures* : l'âge et l'état des systèmes d'infrastructures ; l'efficacité énergétique des infrastructures et des technologies ; les efficacités sectorielles et systémiques

4. *Les caractéristiques socio-économiques* : la structure économique et fonctionnelle de l'aire urbaine ; les facteurs démographiques tels que la taille des foyers, la structure d'âge, la population totale, la richesse et les revenus

5. *Les comportements* : les choix de style de vie ; la consommation ; les normes culturelles

Ces facteurs sont inter-reliés. Ils affectent la demande énergétique en fonction de la gouvernance et des institutions, des niveaux de développement et de la trajectoire d'urbanisation des villes. Des chemins de dépendance sont déterminés par l'histoire des villes. Leurs dotations en ressources initiales contraignent en partie leurs modèles de développement. Les structures de la morphologie urbaine comme les rues, les espaces publics

et les bâtiments (leur conception, leur emplacement et leurs fonctions) présentent une forte inertie.

Les villes sont également incluses dans des systèmes nationaux plus vastes. Leurs ressources en électricité proviennent du réseau national. Certains pays ont d'importantes ressources minières en charbon (États-Unis, Chine, Russie) et leurs villes reposent de ce fait sur de nombreuses centrales thermiques au charbon. Certaines villes ont des infrastructures de chauffage et de refroidissement urbain, qui permettent d'importantes économies d'échelle, de la cogénération et des systèmes économes en énergie, comme New York et certaines villes d'Europe centrale et orientale.

1. L'ENVIRONNEMENT NATUREL

Les facteurs qui influent sur la demande énergétique incluent :

1. Le climat local et les températures
2. La proximité aux ressources en eau, en nourriture, en énergie
3. La centralisation des ressources énergétiques, et la dépendance de ces systèmes centralisés aux énergies fossiles.

La transition vers les systèmes décentralisés fondés sur les énergies renouvelables – en particulier le solaire photovoltaïque pour l'électricité et l'éclairage urbain, le solaire thermique pour l'eau chaude etc. – peut réduire la dépendance aux énergies fossiles.

2. LA STRUCTURE SPATIALE URBAINE

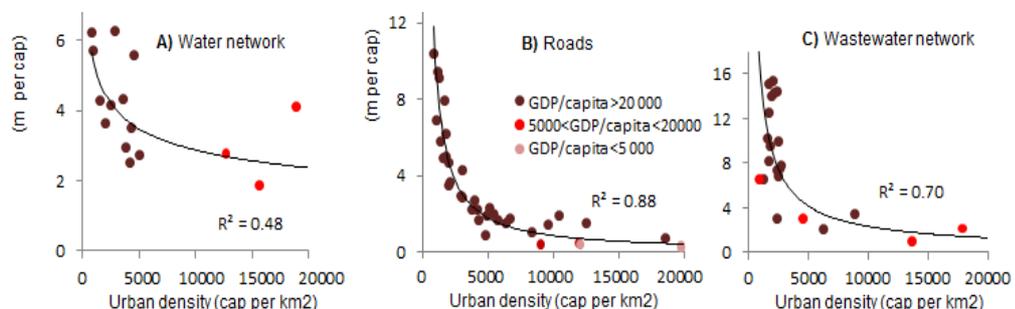
La structure spatiale des villes est déterminée par l'interaction des usages du foncier et des systèmes de transport. Elle inclue l'extension spatiale de la ville, la densité et son articulation, les motifs de rues (leur composition, leur configuration et leur constitution), la composition et l'articulation des îlots urbains et des bâtiments. Pour être efficaces, ces structures spatiales doivent être articulées à différentes échelles selon un principe général d'*invariance d'échelle* : elles doivent présenter un degré similaire de connectivité, de mixité, de complexité tant à l'échelle des grandes régions urbaines, qu'à celle des pôles de développement, des quartiers, des îlots urbains. La théorie des systèmes complexes permet de distinguer les structures à invariance d'échelle au moyen de distributions simples : les

distributions de Zipf-Pareto que nous avons déjà rencontrées dans la description du système mondial des villes.

Il existe une corrélation étroite entre la structure spatiale des villes et celle des infrastructures. La conception et la programmation des infrastructures sont parmi les instruments les plus puissants pour configurer la forme urbaine. Les études empiriques ont apporté des preuves tangibles sur les liens entre structure spatiale, connectivité et niveaux de demande énergétiques et d'émissions de CO₂. Six composantes de la forme urbaine influent sur la demande énergétique et les émissions de GES : (1) l'extension spatiale, sa fragmentation ou sa compacité ; (2) la densité et son articulation ; (3) la mixité des usages du foncier ; (4) la composition, la configuration et la constitution de la connectivité ; (5) l'accessibilité des destinations ; et (6) les modes de transport.

L'extension spatiale fragmentée accroît fortement la demande énergétique et les coûts d'infrastructures

L'extension spatiale, ou l'emprise spatiale de la ville, mesure la surface totale utilisée pour les activités urbaines. Le terme de *sprawl* décrit des développements urbains discontinus et fragmentés⁹, caractérisés par une faible densité, des usages des sols zonés et séparés, une dépendance à l'automobile, une grande extension spatiale, peu d'espaces publics [57]. La compacité des formes urbaines européennes traditionnelles est une des explications essentielles au développement de transports publics intégrés en Europe [58]. Une autre conséquence de l'extension spatiale fragmentée est que les infrastructures de services urbains sont considérablement plus longues que dans les formes plus compactes. Leur coût est ainsi accru, de même que leur consommation énergétique directe et leur énergie incorporée.



⁹ La partie 2 de ce rapport présentera plusieurs métriques, utiles pour les politiques publiques, permettant d'évaluer les niveaux de fragmentation, de compacité, d'expansibilité des formes urbaines

Liens entre densité urbaine et longueur d'infrastructure par habitant : réseau d'eau, réseau d'eau usée et réseau viaire [59]

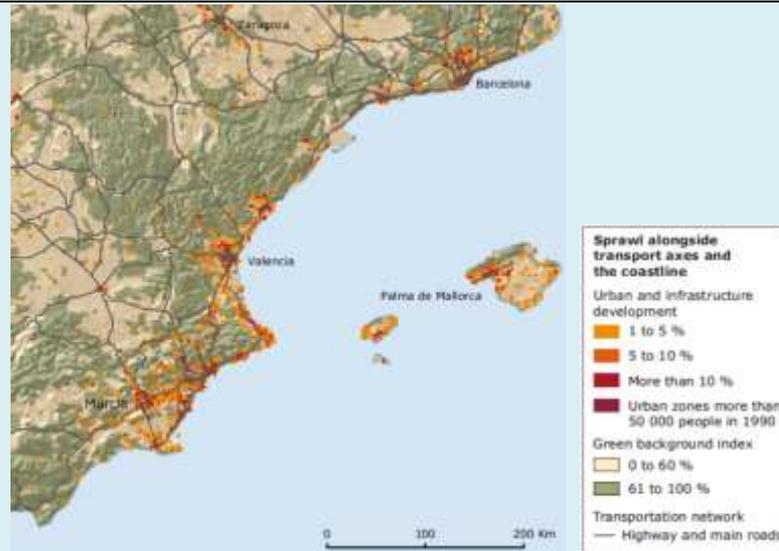
Les autres impacts de l'expansion spatiale sur la demande énergétique incluent :

- une utilisation plus grande de matériaux et d'énergie pour la construction et le fonctionnement de systèmes d'infrastructures dans des zones urbaines dispersées à faible densité, par exemple des systèmes de routes plus importants, plus de canalisations d'eau, plus de réseaux électriques, etc. ;
- des déplacements qui consomment plus d'énergie avec des trajets plus longs, et des transports logistiques plus importants ;
- des opportunités réduites pour mettre en place et utiliser des services de transport public.

Étalement urbain en France et en Europe et structuration le long des corridors de transit

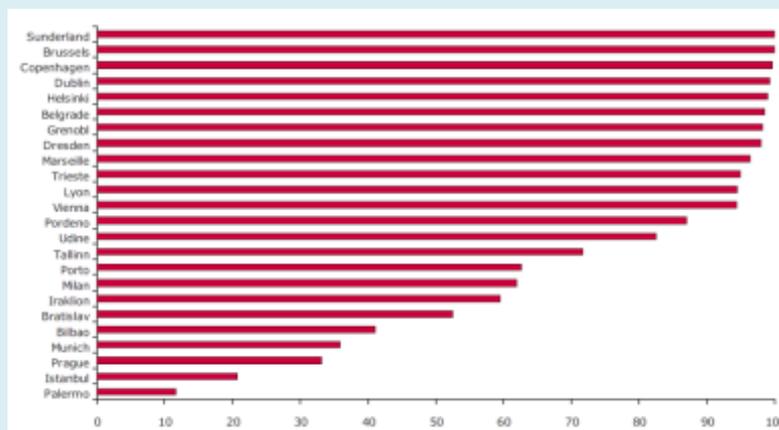
L'étalement urbain est l'une des tendances fortes de l'urbanisation mondiale. Les métropoles européennes et les métropoles françaises n'échappent pas à cette tendance. L'étalement urbain est renforcé par l'augmentation de l'offre de transport à moyenne et grande distance, qui contribue à la diminution des temps de trajets entre zones urbaines. Cette dynamique est clairement visible dans la carte suivante qui présente l'étalement urbain dans la vallée du Rhône et le long du littoral méditerranéen et sa correspondance avec les axes de transport. Les villes moyennes situées entre les grands pôles urbains bénéficient de l'amélioration des transports et voient leur population et leur taille croître (zone orange et zone rouge). Une dynamique analogue est à l'œuvre dans la plupart des régions métropolitaines d'Europe, comme sur la côte Est espagnole.



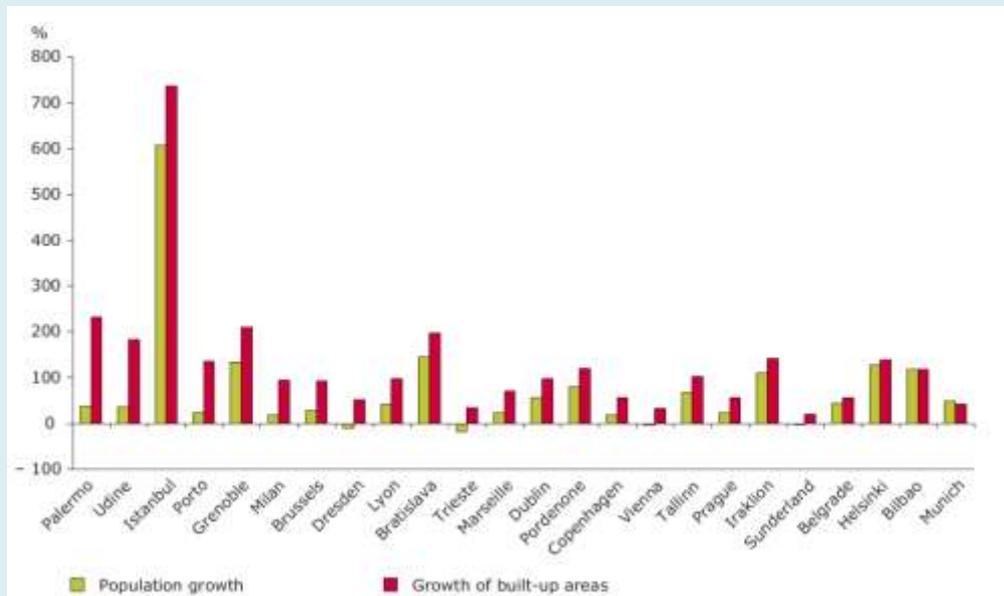


Etalement urbain dans la vallée du Rhône et sur la côte est espagnole le long des axes de transport [60]

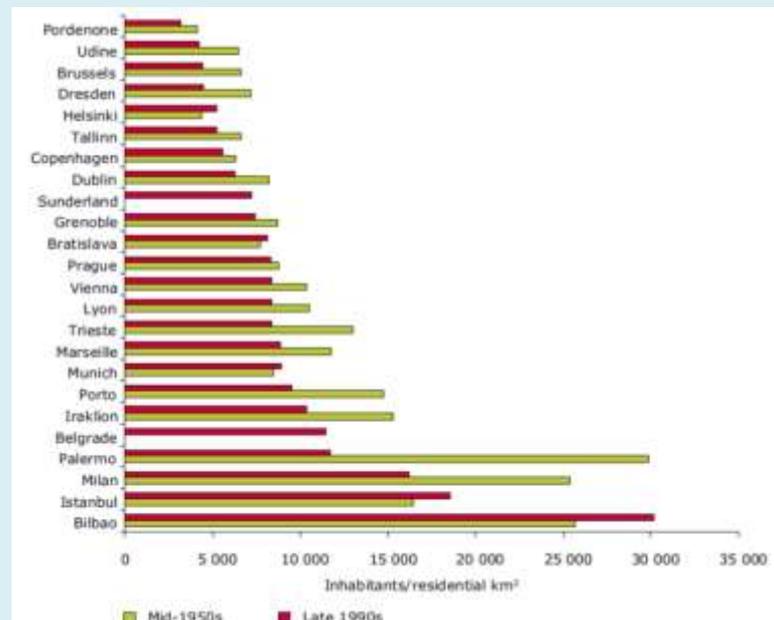
La dynamique de l'étalement urbain en France et en Europe est également visible sur les deux graphiques suivants. Le premier graphique présente la part des développements urbains à basse densité dans le développement urbain global depuis les années 1950 dans une série de villes européennes. A Lyon comme à Marseille, plus de 95% des développements urbains des 5 dernières décennies sont à basse densité. Enfin, le deuxième graphique montre la divergence nette entre croissance urbaine en termes de population et en termes spatiaux dans une série de villes européennes. Lyon a cru proportionnellement deux fois plus en taille spatiale qu'en population depuis 1950. A Marseille, ce ratio atteint trois. Cette divergence entre croissance démographique et croissance spatiale a des conséquences directes en termes de densité urbaine. Les baisses de densité urbaine sont présentées dans le dernier graphique. En vert, la densité urbaine moyenne dans une série de villes européennes dans les années 50. En rouge, la densité urbaine moyenne dans les années 1990.



Part des développements urbains (en %) à basse densité résidentielle dans la part globale des développements urbains résidentiels après 1950 dans une sélection de villes européennes [1]



Croissance des populations urbaines (vert) et des zones urbanisées (rouge) dans une sélection de villes européennes, en % depuis 1950 [61]

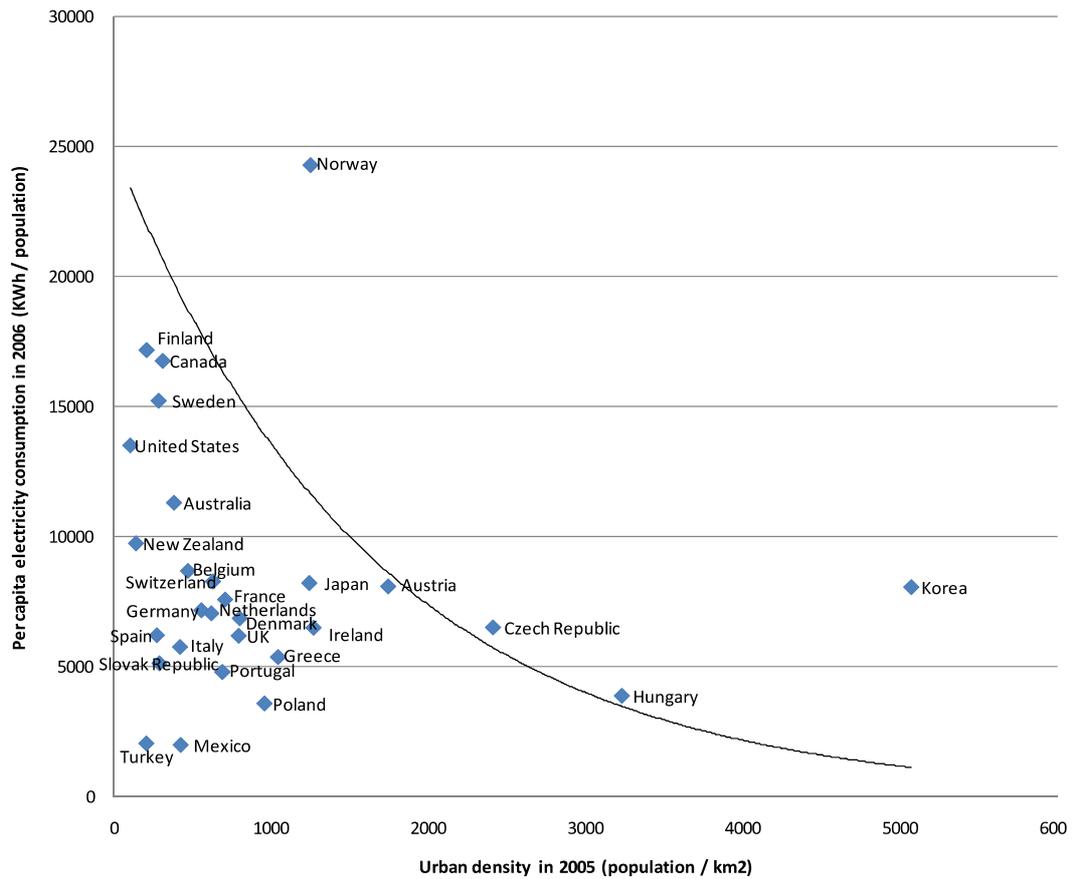


Evolution des densités urbaines (en habitant par km²) entre les années 50 (vert) et les années 90 (rouge) dans une sélection de villes européennes [61]

De fortes densités de population et des formes urbaines compactes réduisent la demande énergétique

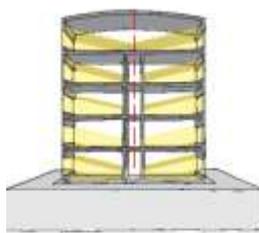
La faible densité accroît la demande énergétique. Tout d'abord, de faibles densités d'emplois, de commerces et de logements accroissent les distances moyennes de déplacement pour les trajets vers le travail et pour les trajets pour les achats [62]–[64]. Des densités plus fortes de population sont corrélées avec des émissions de gaz à effet de serre plus basses [62], [65]–[67]. Aux Etats-Unis, les foyers situés dans des zones denses (2 000 à 4 000 foyers/km²) émettent environ la moitié des émissions des foyers situés dans des zones à très basse densité (moins de 20 foyers/km²) [68]. Ensuite, de faibles densités rendent difficiles les transferts vers des modes de transport moins intensifs en énergie (par exemple le transport public, la marche et le vélo) [69]–[71]. De fortes densités de population et des formes urbaines compactes sont nécessaires pour assurer des transferts modaux de l'automobile vers le transport public. L'influence de la densité sur les choix modaux de transport est plus forte que celle des autres variables comme les facteurs économiques [62], [72]. De faibles densités contraignent les habitants à l'utilisation de la voiture. Des distances plus longues rendent la marche et les modes de transport non motorisés peu attractifs, tandis que le transport public ne peut pas exister de manière économiquement viable sans des niveaux minimaux de densité [62].

Tandis que des variations significatives sont causées par d'autres facteurs (en particulier les niveaux de revenu), il existe une relation forte mais non linéaire entre la forte densité et un recours plus important aux transports publics [73]. Les zones urbaines de forte densité présentent également des co-bénéfices économiques tels que l'utilisation plus efficace des infrastructures et de l'énergie [71]. Lorsque la densité s'accroît, la demande d'électricité par habitant décroît. Les zones urbaines du Japon sont à peu près cinq fois plus denses que celle du Canada, ce qui se traduit par une consommation d'électricité par habitant deux fois et demi inférieure. Les zones urbaines du Danemark sont de même environ quatre fois plus denses que celle de la Finlande, ce qui se traduit par une consommation d'électricité par habitant deux fois et demi inférieure [74].



Densité de population urbaine et consommation électrique [74]

La densité de population est fortement corrélée avec la densité du bâti, mais la densité du bâti est souvent confondue avec la verticalité, alors qu'il n'y a pas d'équivalence entre les gratte-ciel et la haute densité [75], [76]. Des zones urbaines de hauteur moyenne (inférieure à 7 niveaux) avec un fort coefficient d'emprise au sol ont généralement de plus fortes densités de bâti que des zones urbaines avec des immeubles de grande hauteur et de faibles emprises au sol. Les immeubles de grande hauteur obligent à espacer les bâtiments pour faire pénétrer la lumière. Plus ils sont hauts, plus ils doivent être espacés. De plus, le coût de construction par mètre carré de plancher s'accroît lorsque les bâtiments s'élèvent, en particulier à cause des coûts de structure et de matériaux [77], [78]. Les immeubles de grande hauteur entraînent des coûts énergétiques plus élevés pour le transport vertical mais aussi pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage en raison de leur faible ratio de volumes passifs, c'est-à-dire de volumes situés à moins de 6 mètres des enveloppes et qui peuvent, de ce fait, bénéficier des apports solaires et de la lumière naturelle [79], [80].



Les volumes passifs au sein d'un bâtiment sont situés à moins de 6 mètres de l'enveloppe, et offrent des avantages sur le plan bioclimatique [81]

Les logements autonomes de plain-pied ont des consommations énergétiques et des émissions de GES de plus forte intensité que les bâtiments de logements collectifs [82], [83]. Ainsi, d'importantes économies d'énergie finale sont possibles grâce à une combinaison de types de logement, en optimisant leur conception, leur emplacement et leur orientation [73].

La mixité à l'échelle de la ville, du quartier et de l'îlot crée des synergies qui réduisent la demande énergétique

La mixité dans les usages du foncier est une condition nécessaire pour le regroupement à l'échelle locale des activités économiques dans des environnements compacts. Elle tend à réduire l'agrégation des mouvements de véhicules et les émissions de gaz à effet de serre associées [84]. La mixité promeut également la marche beaucoup plus que les environnements urbains caractérisés par de hauts niveaux de mono fonctionnalité. Elle a un effet sur la demande énergétique et les émissions à trois échelles spatiales différentes.

- L'échelle urbaine : le zoning à l'échelle urbaine réserve de grandes zones de la ville à des usages uniques et spécifiques comme les bureaux dans les quartiers d'affaires, les commerces et les centres commerciaux dans les zones commerciales, et les logements dans les zones résidentielles. Ce type de zonage à grande échelle a d'abord caractérisé les villes américaines avant de se répandre aujourd'hui dans les pays émergents et notamment en Asie et en Chine. Ce zonage mono fonctionnel conduit à des distances de déplacement beaucoup plus grandes, en particulier entre les logements et les lieux de travail et entre les logements et les commerces, et il encourage de ce fait l'utilisation de l'automobile.
- *L'échelle du quartier* : la mixité des usages du sol à l'échelle des quartiers repose sur un mélange de bâtiments résidentiels, de bureaux, de commerces et d'aménités urbaines [85]. Elle a des impacts bénéfiques sur les *patterns* de

transport en décroissant les distances moyennes parcourues [86]. La présence de commerces et d'emploi au sein des quartiers conduits à des taux relativement faibles d'équipement en véhicules automobiles et à des distances de transfert plus courtes [72]. Les développements mixtes à l'échelle des quartiers ont un impact positif sur la réduction de la demande d'énergie de transport.

- *La mixité à l'échelle de l'îlot urbain* : à l'échelle de l'îlot et du bâtiment, la mixité consiste à développer des espaces pour les bureaux ou des commerces dans les îlots résidentiels sur le périmètre de l'îlot. Ce développement crée des rues aux frontières actives, accroît la vitalité de la zone urbaine, et crée un environnement urbain vivant [87]. Un co-bénéfice de la mixité à l'échelle de l'îlot est que les flux d'énergie peuvent être réutilisés et recyclés [88]. La présence de différents types de bâtiments et d'usages situés dans un îlot urbain donné conduit à une variété de courbes de charge de l'énergie : la demande en eau, les charges d'énergie de chauffage et de refroidissement sont différentes pour les logements, les bureaux et les commerces. Une diversité de profils de charge permet la mise en œuvre d'approches de synergie fondées sur l'échange, le recyclage et la réutilisation des flux de matières et d'énergie entre les différents usages [88].

La connectivité à maille fine est un support de la diversité urbaine

La connectivité peut être décrite par la composition, la configuration et la constitution¹⁰ des réseaux de rues [89]. La densité linéaire de rues (en km/km²) et la densité d'intersections

¹⁰ – *La composition*. Il s'agit de la géométrie des rues, de leur dessin en trois dimensions, de leurs modes d'assemblage, de leurs facteurs de forme reliant hauteur, largeur et longueur, de leur régularité ou de leur irrégularité. Ces rapports définissent à la fois les rapports de l'homme à la rue et le microclimat urbain.

– *La configuration*. Ce niveau d'analyse est plus abstrait et consiste à ne plus considérer les formes géométriques mais seulement la topologie, c'est-à-dire l'organisation des connexions des différents éléments entre eux. Par exemple, d'un point de vue topologique, un cube et une sphère sont identiques, puisque l'on passe de l'un à l'autre par une déformation progressive. En revanche ils ne sont pas identiques à une bouée, car on ne peut obtenir un trou à partir d'une sphère via une déformation continue. On peut procéder de la même façon pour les motifs de rues urbains. On ne considère plus alors que les nœuds et les liens du motif de rues sans se préoccuper de la courbure des rues et de la forme des nœuds. La perte d'information géométrique est compensée par une meilleure compréhension de la structure des relations. Celle-ci reste inchangée à travers toutes les déformations géométriques que l'on peut lui faire subir. On mesure alors des ratios, comme par exemple des indices de continuité et de connectivité, de complexité et de récursivité.

(en nombre d'intersections/km²) sont des indicateurs simples de densité de la connectivité. Un tissu urbain « à grain fin » caractérisé par de petits îlots présente une connectivité beaucoup plus élevée qu'un réseau urbain moderniste de super blocs. Il est beaucoup plus perméable pour le mouvement des véhicules et des piétons. Il permet de fréquents changements de direction et offre une expérience beaucoup plus diversifiée. Les villes qui ont un tissu urbain à maille fine (où les bâtiments sont rapprochés, les îlots sont de petite taille, et les rues sont étroites) encouragent la marche: les distances à parcourir sont plus courtes et le système de petits îlots permet au piéton de changer de direction facilement. À cela s'ajoutent la qualité et la diversité des espaces publics permise dans les tissus urbains à grain fin.

L'accessibilité est un support d'efficacité énergétique et un vecteur de croissance économique

L'accessibilité est un indicateur de la capacité à accéder aux ressources et aux opportunités économiques et sociales (activités de production et de consommation) dans les villes [90]–[92]. Elle accroît les interactions économiques et les effets d'économies d'agglomération. Elle est à la fois un support d'efficacité énergétique et un vecteur de croissance économique. Elle varie en fonction du temps de trajet et de la distance entre la destination et l'origine. L'accessibilité de proximité permet le développement de modes de transport multiples et la réduction de la demande énergétique et des émissions liées au transport. En outre, la demande en matériaux et l'énergie incorporée dans les infrastructures de transport sont inférieures dans les environnements urbains accessibles à ce qu'elles sont dans des environnements urbains étalés et à faible densité.

Distribution en longue traîne des aménités urbaines

L'exemple des parcs parisiens

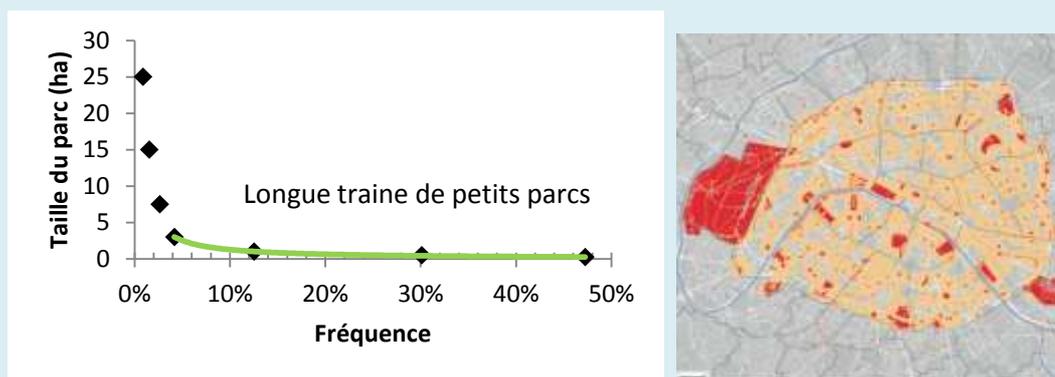
L'accessibilité et la proximité des aménités urbaines sont essentielles pour promouvoir des modes de déplacement sobres en énergie et en carbone. L'une des stratégies pour promouvoir la marche et les transports doux consiste à promouvoir une accessibilité à moins

– *La constitution.* A ce niveau d'analyse encore plus abstrait on s'intéresse non plus au détail des relations mais à la structure de la configuration, à son organisation hiérarchique en particulier, en développant des notions comme la profondeur hiérarchique du système, c'est-à-dire le nombre de ses niveaux hiérarchiques internes dans le cas d'un système de voies hiérarchisé par une logique de branchement des voies de niveau inférieur à celles de niveau supérieur comme en définit l'ingénierie des transports automobiles. Cette approche permet de classer les configurations en types.

de 500 m des aménités urbaines essentielles (espaces verts, commerces, santé, éducation, culture). Le *pattern* qui optimise l'accessibilité à ces aménités tout en tenant compte de la contrainte économique (le volume d'investissements disponible et le foncier sont par nature des ressources limitées) repose sur une distribution de type longue traîne de ces aménités : quelques aménités de grande taille réparties dans la ville (grands parcs, supermarchés, hôpitaux, université), et une longue traîne d'aménités de moyenne et petite taille (squares, commerces de proximité, médecins, crèches et écoles).

La distribution spatiale des parcs parisiens est typiquement une distribution de type longue traîne. Elle émerge d'une volonté politique forte et de réglementations urbanistiques, notamment à la fin du XIXe siècle, qui visaient à assurer pour chaque habitant la présence d'un espace vert à moins de 400m. Cet objectif d'accessibilité est atteint alors que les espaces verts (sans les bois) ne représentent qu'une part très faible de la surface urbaine totale (5%). Quelques grands parcs et bois assurent une diversité d'activités pour les habitants, et une longue traîne de squares de proximité offrent aux familles des lieux proches de divertissement (260 espaces verts de moins d'un demi hectare). Cette longue traîne de parcs suit mathématiquement une distribution de type longue traîne (loi de puissance inverse) [93], outil puissant d'optimisation pour la planification spatiale.

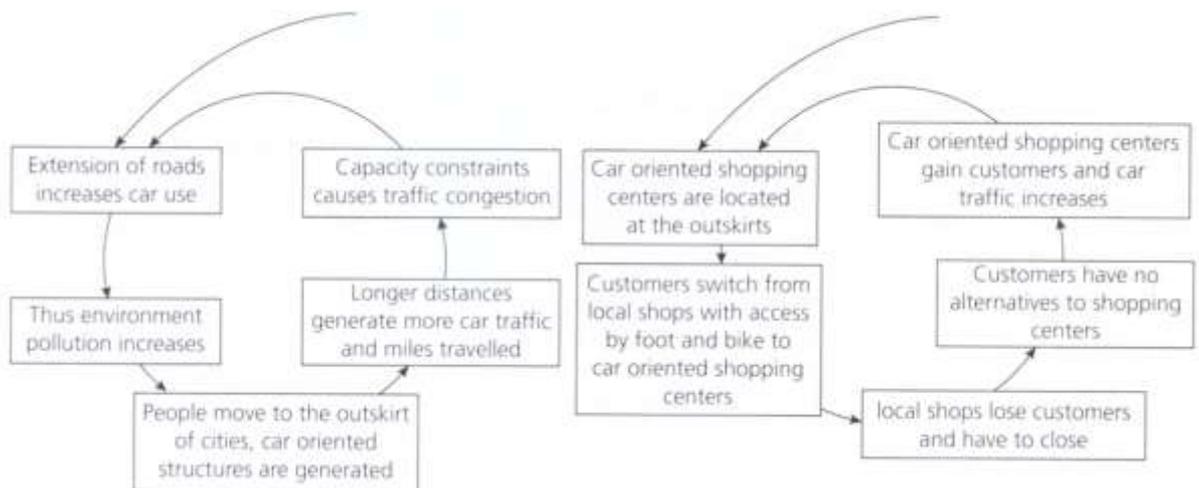
En comparaison, une ville comme Pékin est recouverte à 30% par des espaces verts, pour la plupart de grande taille. Du fait de l'absence de la longue traîne de petits parcs, les habitants sont en moyenne à 3km du premier parc public.



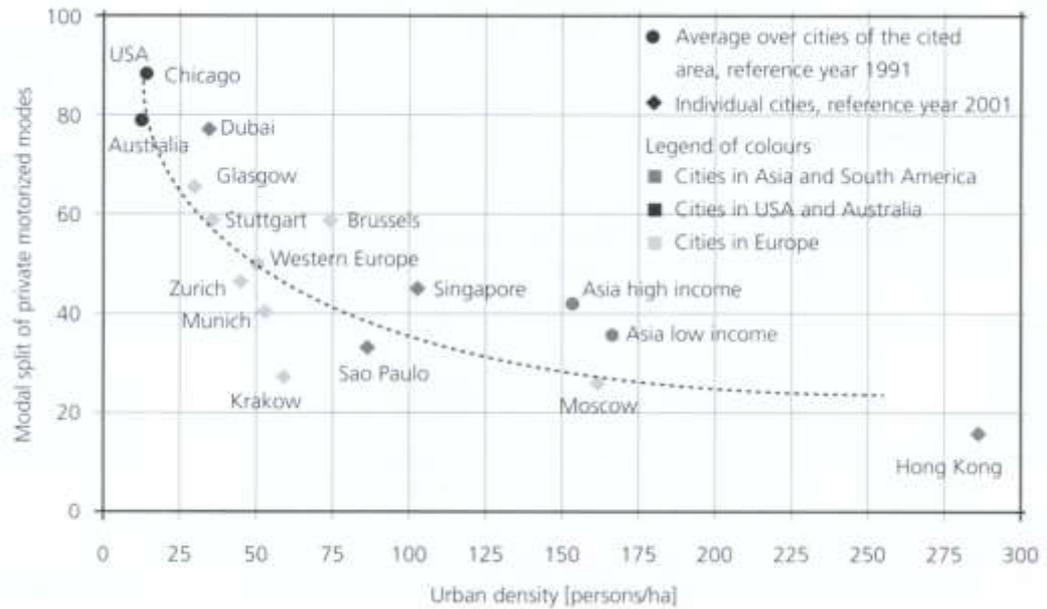
La distribution de type longue traîne des parcs parisiens (à gauche en vert) assure l'accessibilité à moins de 5 minutes de marche à plus de 80% des parisiens (orange) [93]

L'expansion du transport motorisé privé a accru la demande énergétique tout en décroissant la mobilité à cause de la congestion

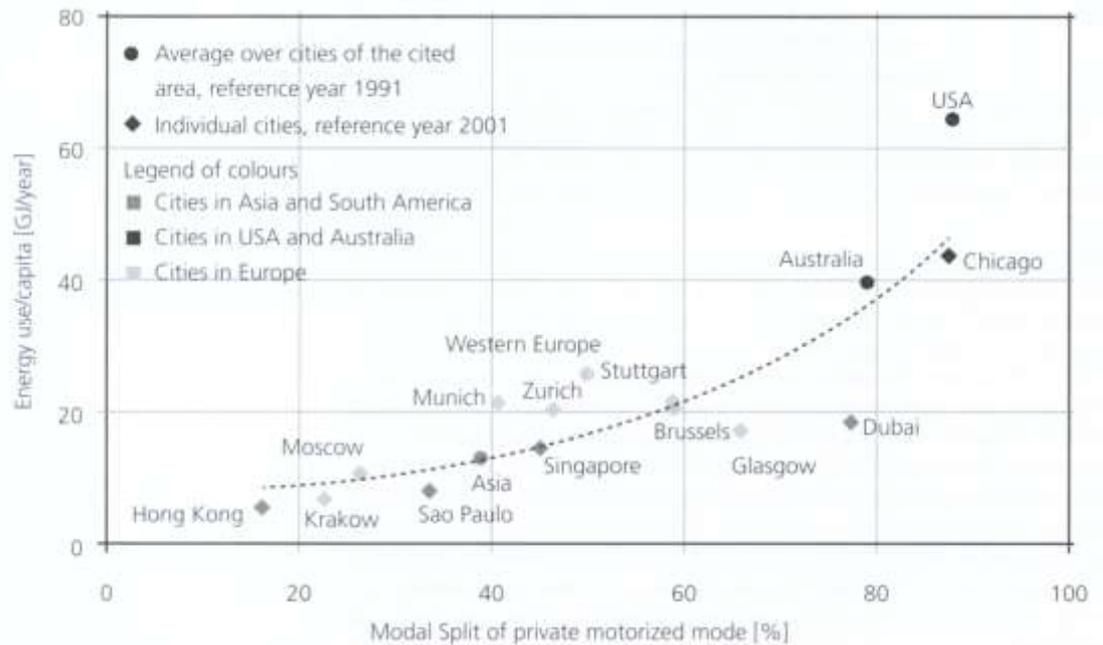
L'expansion du transport motorisé privé et des infrastructures au détriment des autres modes de transport a accru la demande énergétique et des émissions de gaz à effet de serre tout en décroissant la mobilité à cause de la congestion. Cette dynamique est particulièrement sensible aux États-Unis qui, avec 5 % de la population mondiale et 30 % de la flotte automobile mondiale, produisent 45 % des émissions de CO₂ globales liées aux voitures [94]. Les méga villes des pays émergents montrent une décroissance de l'ordre de 50 % de la mobilité malgré un quadruplement des infrastructures au cours des 50 dernières années [95].



Boucles de rétroaction dynamique négative entre l'étalement urbain, le trafic automobile, la qualité de l'environnement et la viabilité des magasins et commerces de proximité dans les zones urbaines [96]



Relation entre la densité urbaine et la part modale du transport privé motorisé (calculée à partir de la mobilité totale en incluant les modes non motorisés) pour des villes individuelles et pour la moyenne des villes de régions du monde [65], [97], [98]



Énergie moyenne utilisée par personne pour les transports (moyenne par pays et par région en 1991 et pour une sélection de villes en 2001) en fonction de la part modale du transport motorisé [65], [97], [98]

CHAPITRE IV

LES LEVIERS DE LA TRANSITION ENERGETIQUE URBAINE

Les effets d'échelle et de concentration

Les effets d'échelle et de concentration d'activités et de ressources dans les zones urbaines génèrent de la croissance économique, de l'innovation, et l'accroissement de la productivité des ressources. Les économies d'agglomération liées à la concentration d'individus et d'entreprises font des villes des lieux idéaux pour l'innovation, la création d'emplois et de richesse. Les villes sont les moteurs de l'activité économique et génèrent plus de 90 % de la valeur ajoutée brute globale [3]. Elles offrent des opportunités d'optimisation structurelle et un fort potentiel financier, de gouvernance et institutionnel pour mettre en œuvre des politiques créatives d'efficacité énergétique.

Toutefois, les villes du XXe siècle, façonnées par l'automobile et les énergies fossiles à bon marché, déplacent d'énormes quantités de matière et d'énergie. Des changements structurels profonds sont nécessaires à l'échelle de leurs structures spatiales et de leurs morphologies pour réduire ces déplacements de matière d'énergie.

Les villes déplacent d'énormes quantités de matière et d'énergie

Nos villes ressemblent à nos voitures. Elles déplacent d'énormes quantités de matière et d'énergie. Conduire une voiture, c'est déplacer son propre corps ainsi qu'une tonne de matériaux ou plus. À cela doit s'ajouter la quantité de matière déplacée pour fabriquer la voiture. Plus de 1 520 tonnes sont mises en mouvement au cours de l'extraction du minerai, du raffinage, du transport, de la fabrication et de l'assemblage des pièces. Le pot catalytique qui ne pèse que 9 kg mais contient quelques grammes de platine, nécessite à lui seul le déplacement de plus de 2 tonnes de matériaux ; c'est le poids des roches qu'il faut extraire pour produire quelques grammes de platine. Mais cette analyse ne concerne que l'objet voiture. Celui-ci dans une approche systémique, doit être analysé avec l'ensemble des infrastructures, des parkings et des autoroutes qui en permettront le mouvement. Pour faire rouler nos voitures, il faut déplacer des quantités de matières gigantesques.

La voiture distend la ville et en rend tous les services éloignés et inaccessibles pour les piétons. Elle impose, comme aux États-Unis, une croissance sans fin de son usage¹¹.

La densité permet de diviser par 2,5 la quantité de voitures, voire par 4 ou 5 dans les quartiers écologiques comme Malmö ou BedZed. En supposant un facteur 4, l'économie de matière pour fabriquer les voitures entre un monde urbain de 5 milliards d'habitants de type Los Angeles et un monde urbain de type Malmö ou BedZed est de plus de 5 000 milliards de tonnes de matière¹². Un taux de réduction de 60 % du niveau d'équipement (le passage du modèle Los Angeles au modèle Paris *intramuros*) permettrait d'économiser 28 % de la consommation nationale américaine de plomb, 24 % de la consommation de caoutchouc et des revêtements, 16 % des machines outils et du platine, 13 % du fer, 8 % de l'aluminium, du zinc, du verre et des semi-conducteurs, 7 % de l'acier et 4 % du cuivre. Cet allègement de la consommation matérielle de l'économie américaine permettrait de libérer les ressources pour des activités créatrices d'autres formes de richesses, comme la société de l'information et de la connaissance.

Les contraintes de la transition énergétique

Une période de transition prolongée sera nécessaire pour inverser les parts respectives d'énergies fossiles et non fossiles. La part d'énergie à bas niveau carbone devrait suivre, en fonction du temps une évolution d'abord lente, accélérant ensuite jusqu'à un point d'inflexion puis ralentissant en fin de transition. À l'échelle globale, pour inverser les parts respectives des énergies d'origine fossile et non fossile d'ici la fin du siècle, il faudrait que le point d'inflexion se situe en 2050, avec une part d'énergie non fossile de l'ordre de 50 %. En fait, si la part d'énergie non fossile se situe dans le monde entre 20 et 25 % à l'horizon 2035, comme le prévoit l'AIE, il paraît difficile au niveau mondial de dépasser une valeur comprise entre 30 à 40 % en 2050, même dans le cas d'un scénario très favorable aux énergies renouvelables. La transition globale, aboutissant à une large substitution des énergies fossiles par des énergies non fossiles sera donc de longue durée.

Au sein de cette transition globale, la situation énergétique en France est marquée par les spécificités suivantes :

¹¹ Dans une ville dense comme Paris *intramuros*, le taux d'équipements en voitures est inférieur à 40 %, dans l'Île de France il est de 70 %, à Los Angeles, il est supérieur à 100 % car les ménages ont plusieurs voitures.

¹² Aux États-Unis, l'industrie automobile et les secteurs associés consomment environ 70 % du plomb, 60 % du caoutchouc et des revêtements, 40 % des machines outils et du platine, 34 % du fer, 20 % de l'aluminium et du zinc, du verre et des semi-conducteurs, 14 % de l'acier et 10 % du cuivre.

- D'ici 2030, la demande d'énergie finale restera sensiblement stable ou diminuera (scénario post Grenelle) [99] ;
- La part du charbon est très faible ;
- La part du nucléaire est sensiblement plus importante qu'ailleurs dans le monde.

Cette situation se traduit notamment par une part des énergies fossiles de 50 % environ dans la fourniture d'énergie primaire et une intensité carbone (émissions de CO₂/PIB) particulièrement faible, soit environ la moitié de ce qu'elle est en Allemagne. La France reste néanmoins fortement dépendante des importations de pétrole qui représentent environ le tiers de sa consommation d'énergie primaire.

Les leviers d'action à l'échelle urbaine

Deux leviers d'action doivent être considérés à l'échelle urbaine :

- *réduire la consommation d'énergie*, en diminuant la demande urbaine (structures spatiales et morphologiques, diversifications des localisations, accessibilité de proximité) et en améliorant l'efficacité énergétique (lissage des pics) ;
- *réduire le contenu carbone de l'énergie consommée*, en développant l'utilisation d'énergies non fossiles à bas niveau carbone, ce qui va nécessiter des investissements importants. Des incertitudes majeures sont attachées à toutes les grandes options énergétiques. Le recours à un « mix énergétique » diversifié est nécessaire en raison de des incertitudes quant aux évolutions à venir. Aucune source d'énergie n'apparaît à elle seule en mesure de couvrir l'ensemble des besoins urbains.

En raison des limites à la fois de productivité énergétique par rapport à la densité énergétique de la demande urbaine, et de coût économique, la décarbonisation de l'énergie urbaine par des substitutions massives d'énergies renouvelables reste incertaine. Le rôle des combustibles fossiles restera important pendant encore une longue période, ce qui oblige à faire porter fortement l'accent sur la réduction de la demande et sur l'efficacité énergétique.

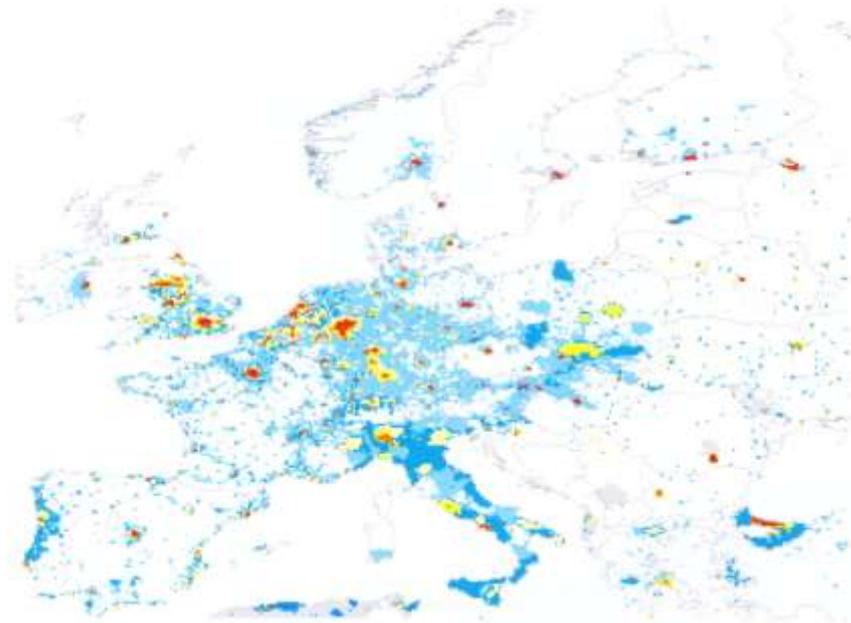
L'écart entre énergie consommée et potentiel de production locale en ville est très important ; pour que la production locale couvre une part significative des consommations urbaines, celles-ci devront au préalable être massivement réduites

Le concept de densité énergétique correspond à la quantité d'énergie produite ou consommée par unité de terrain. L'unité usuelle de densité énergétique est le Watt par mètre carré (W/m²). Elle se réfère à la disponibilité continue (en moyenne) de la puissance d'un Watt pendant une année.

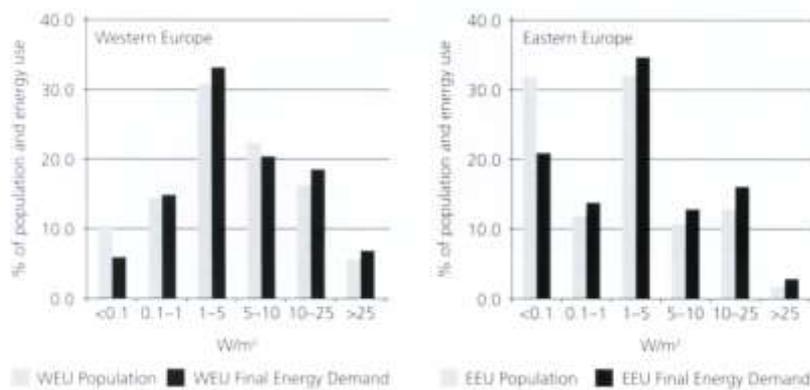
Les densités de demande et d'offre d'énergie ont co-évolué depuis le début de la Révolution Industrielle. L'un des avantages des combustibles fossiles dans le processus d'industrialisation a été leur densité énergétique élevée, ce qui a permis la production, le transport et le stockage de l'énergie avec une relative facilité, même dans des endroits exposés à une forte concentration de la demande d'énergie, comme les centres industriels et les zones urbaines en forte croissance. L'inadéquation la plus importante entre les densités de demande et d'offre énergétique renouvelable se situe dans les zones urbaines : la demande y est très concentrée avec de très importants pics de densité, tandis que les énergies renouvelables se caractérisent par des flux énergétiques très diffus. La densité de la demande d'énergie dans les zones urbaines est généralement comprise entre 10 W/m^2 et 100 W/m^2 . Elle peut atteindre $1\,000 \text{ W/m}^2$ dans les zones de gratte-ciel ou les quartiers d'affaires.

À l'opposé, les énergies renouvelables ont des densités d'offre énergétique typiques de quelques W/m^2 dans des conditions idéales (en supposant que tous les terrains peuvent être consacrés à exploiter les flux d'énergie renouvelables). Dans des conditions pratiques (en considérant les usages concurrents du foncier dans les zones urbaines) les énergies renouvelables peuvent produire typiquement entre $0,1$ et $0,5 \text{ W/m}^2$ ¹³. En conséquence, les énergies renouvelables récoltées localement dans des zones densément peuplées telles que les villes ne peuvent fournir qu'une très petite fraction (de l'ordre du pour cent) de la demande d'énergie en milieu urbain. Par conséquent, les énergies renouvelables doivent également être récoltées dans des endroits où les terrains et un potentiel de ressources renouvelables sont disponibles, et doivent ensuite être transportées sur de longues distances vers les centres urbains avec leurs densités de forte demande d'énergie.

¹³ Excepté pour la géothermie qui permet d'atteindre des intensités énergétiques plus élevées, mais nécessite des conditions particulières.



Densité de la demande énergétique (W/m^2) en Europe : les zones bleues et blanches indiquent les zones où les énergies renouvelables locales peuvent satisfaire la faible densité de demande énergétique (inférieure à 0,5 à $1 W/m^2$) ; les zones jaunes, rouges et brunes indiquent les hautes densités énergétiques au-dessus de 1, 5, 10, et $25 W/m^2$ respectivement [27]



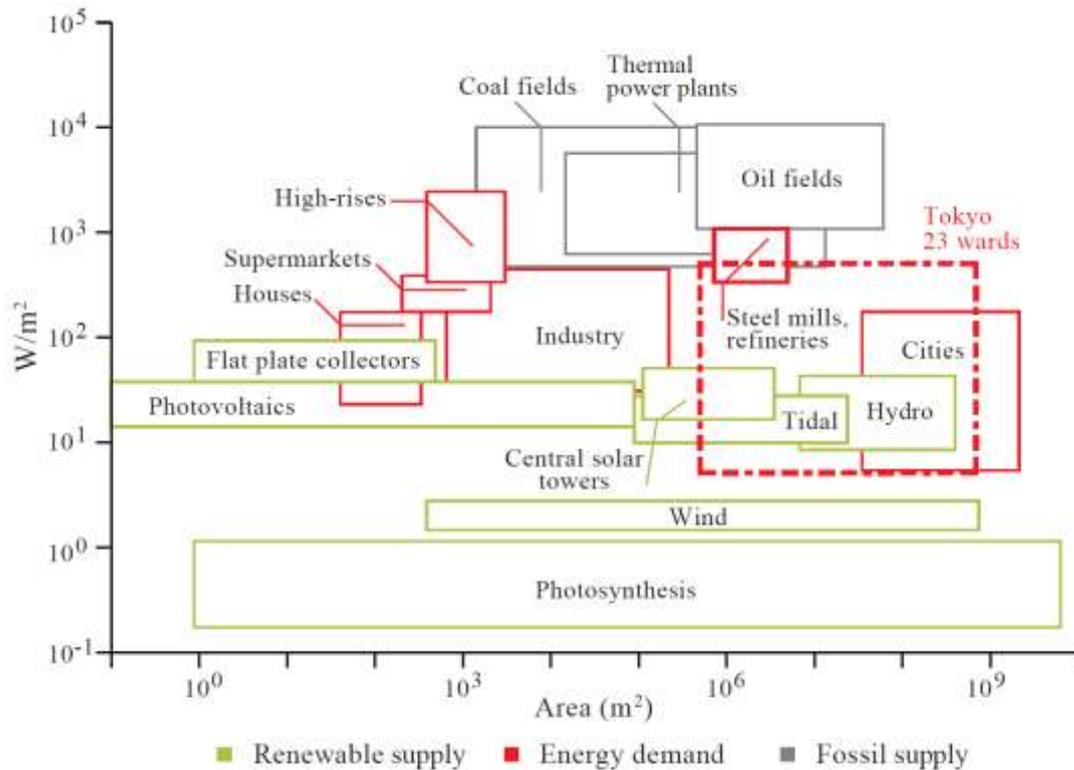
Distribution de la population (en gris) et de la demande énergétique finale (en noir) en pourcentage en fonction des classes de densité de demande énergétique finale pour l'Europe de l'Ouest (à gauche) et l'Europe de l'Est (à droite) [27].

Seulement 21 % (Europe de l'Ouest) et 34 % (Europe de l'Est) de la demande énergétique sont en dessous d'un seuil de densité de demande de $1 W/m^2$ qui permet de couvrir la demande par les énergies renouvelables locales. Les hautes densités énergétiques des villes demandent de grands *hinterlands* énergétiques qui peuvent être 100 à 200 fois plus grands que le territoire des villes elles-mêmes, ce qui nécessitera le transport sur de longues distances des énergies renouvelables.

Dans la figure suivante, l'intensité énergétique est présentée sur l'axe vertical, en W/m^2 . L'intensité énergétique typique (la puissance énergétique disponible par m^2) est fournie pour une large palette d'énergies. Sur l'axe horizontal figure la taille typique des installations de production énergétique.

Les capacités de production locale sont figurées en vert (renouvelable) et en gris (fossile) La photosynthèse, qui fournit des ordres de grandeur pour la croissance de la biomasse, et donc in fine l'usage de « bio-carburants » est susceptible de générer une puissance par m^2 de 0,2 à $1 W/m^2$, pour une taille généralement comprise entre zéro et la dizaine de milliers d'hectares. Le solaire photovoltaïque fournit entre 20 et $60 W/m^2$ pour des installations allant du panneau individuel à la dizaine d'hectares. Les champs pétroliers fournissent entre 1 000 et $10\,000 W/m^2$ pour des tailles typiquement comprises entre 1 et $10 km^2$.

Les consommations et les tailles typiques pour la consommation énergétique sont figurées par des carrés rouges. Une maison individuelle consomme typiquement entre 50 et $300 W/m^2$, pour une surface entre 50 et $500m^2$, un immeuble de grande hauteur entre 600 et $3\,000 W/m^2$ pour une surface entre 500 et $5000 m^2$. Le système ville consomme (énergie de fonctionnement, sans prendre en compte les biens et services importés) entre 10 et $200 W/m^2$, pour une surface de l'ordre du millier de km^2 .



Intensités énergétiques (en W/m^2) et taille typiques (en m^2) pour la production de différentes sources d'énergie, fossile (gris) et renouvelable (vert) et pour la consommation énergétique de différentes entités (rouge) [27]

L'ordre de grandeur typique des consommations énergétiques d'une mégalopole est de l'ordre de l'exaJoule ($1EJ = 10^8 J$). La consommation d'énergie finale dans les 23 *wards* de Tokyo est de 0,6 EJ, celle de la région métropolitaine est de 0,8 EJ [100], à comparer avec 0,6 EJ pour Londres (33 *boroughs*) [101] et 0,8 EJ pour New York¹⁴ [102]. L'intensité de la demande énergétique à Tokyo varie entre quelques W/m^2 et $200 W/m^2$. Les $25km^2$ les plus denses de Tokyo (4% de la surface de $600 km^2$ des 23 *wards* de Tokyo) consomment 18% de l'énergie finale de Tokyo [27].

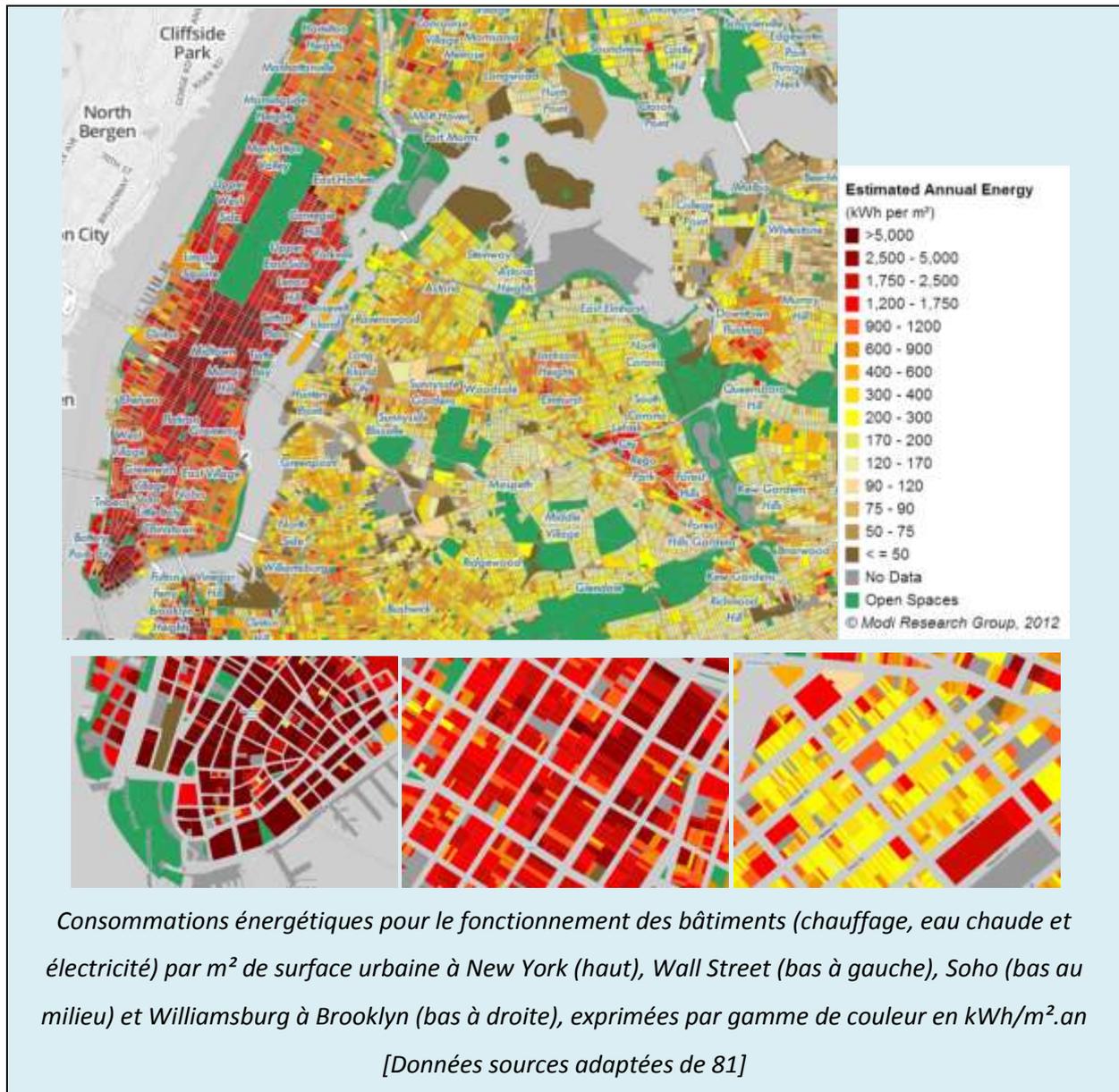
¹⁴ La consommation en énergie finale au sein des limites administrative de New York, à l'exclusion de l'aviation et du transport maritime était de 0.76 EJ en 2005 [48].

Intensité des consommations énergétiques urbaines

L'exemple de New York

Les équipes de Columbia University, New York, ont mené une analyse énergétique complète de la métropole de New York, avec un niveau de résolution très fin, au niveau du bloc urbain. Les consommations énergétiques recensées couvrent le chauffage, l'eau chaude ainsi que l'électricité [103]. Les cartes suivantes présentent les niveaux de consommation énergétique annuelle par m² de surface urbaine, exprimés en kWh par m² par an. La carte du haut fait logiquement apparaître le fait que les bâtiments de grande hauteur (Wall Street et Sud de Central Park) consomment davantage d'énergie ramenée au m² de surface urbaine que des bâtiments de plus faible hauteur comme à Brooklyn par exemple. Il est à noter que cette carte n'indique en aucun cas que les bâtiments de grande hauteur consomment davantage par m² de plancher que les bâtiments de plus faible hauteur. Les deux cartes suivantes présentent le quartier de Wall Street (gauche) et le quartier de Soho (droite). Les consommations énergétiques à Wall Street sont majoritairement au-delà de 5 000 kWh/m².an, équivalent en intensité énergétique à environ 570 W/m² ¹⁵. Dans le quartier de Soho, moins vertical que Wall Street, les consommations énergétiques varient entre 400 et 5 000 kWh/m².an, soit en intensité énergétique entre 45 et 570 W/m². Dans le quartier de Williamsburg à Brooklyn, les intensités énergétiques chutent entre 250 et 2 500 kWh/m².an, soit entre 30 et 300 W/m². Il est important de noter que ces consommations ne concernent que les usages énergétiques dans les bâtiments. Les consommations énergétiques pour le transport par exemple ne sont pas prises en compte. Les intensités énergétiques globales à New York sont donc encore au-delà des chiffres précédents.

¹⁵ Pour convertir une intensité énergétique en kWh/m².an en intensité énergétique moyenne au cours de l'année en W/m², il convient de la multiplier par 0,114.



En faisant l'hypothèse optimiste que toute l'énergie solaire incidente peut être captée, et l'hypothèse très optimiste d'une conversion de 20% des panneaux photovoltaïques, la puissance maximale produite varierait entre 22W/m² (Londres) et 31W/m² (Tokyo). Ces valeurs sont du même ordre que les intensités énergétiques moyennes consommées dans ces deux villes, en faisant l'hypothèse de larges capacités de stockage [27]. Cependant, les études internationales montrent que le taux de couverture possible en ville par des installations solaires est de l'ordre de 2%, y compris dans des zones à faible densité telles qu'Osnabrück en Allemagne [104]. Dans cette hypothèse optimiste, l'énergie solaire ne couvrirait qu'entre 1 et 3% de l'intensité énergétique de Tokyo ou de Londres [45].

Cette analyse rapide montre l'écart significatif entre les capacités de production locales d'énergie renouvelables et les consommations énergétiques typiques en ville. Cette analyse plaide

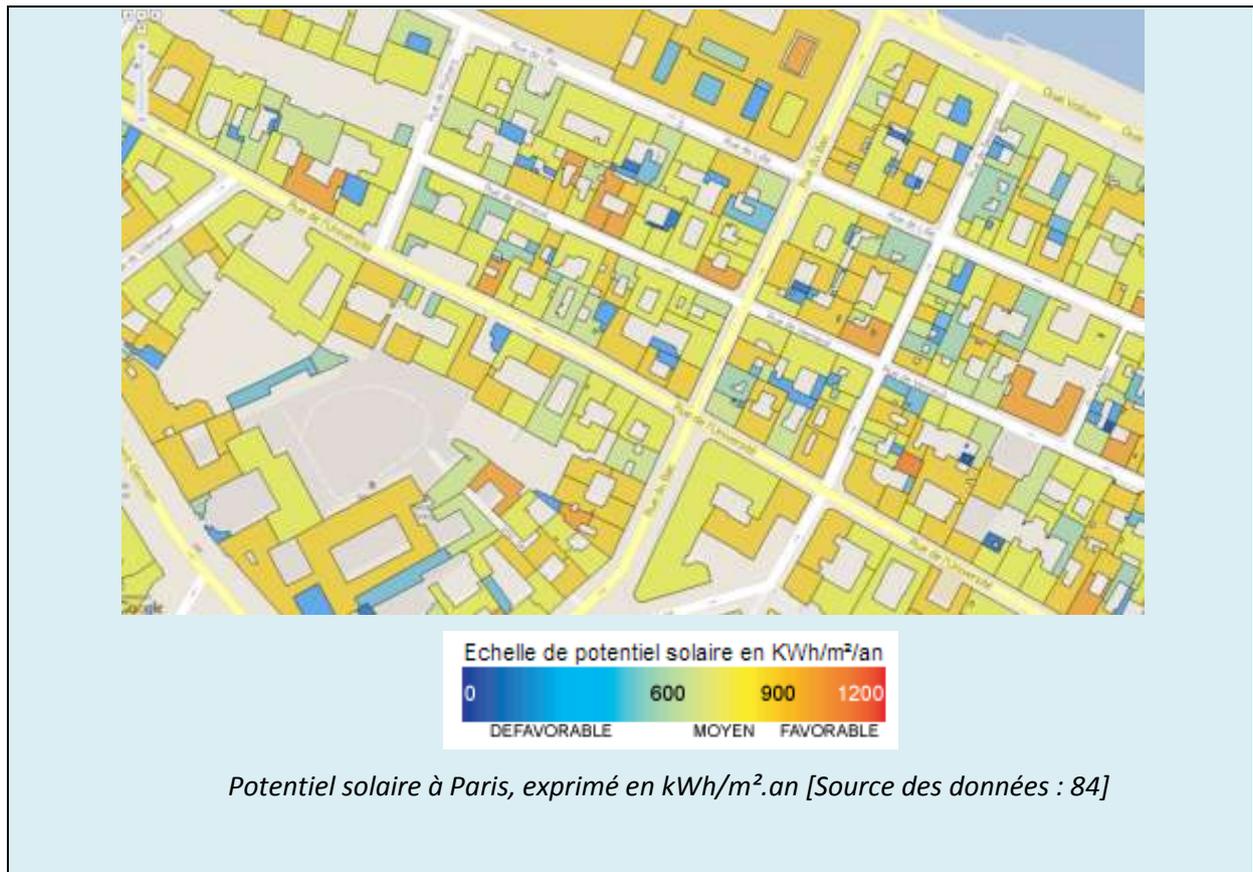
pour la mise en œuvre de stratégies amont de réduction des consommations énergétiques, préalables à la mise en place de stratégies d'énergie renouvelable.

Potentiel d'énergie solaire incidente

L'exemple du cadastre solaire de Paris

Dans le cadre du programme européen POLIS, la ville de Paris et l'APUR ont lancé un projet expérimental de cadastre solaire, qui permet d'évaluer à partir de la simulation du rayonnement solaire annuel le potentiel solaire des surfaces bâties [105]. Les deux cartes suivantes montrent à deux échelles différentes le potentiel de production d'énergie solaire à Paris, à deux échelles différentes, rive gauche dans le quartier Saint Germain (haut) et dans un secteur compris entre le quai Voltaire et la rue de l'Université (bas). Ces cartes montrent que le potentiel solaire est partout inférieur à 1 000 kWh/m².an (114 W/m²), et le plus souvent en dessous de 750 kWh/m².an (85 W/m²). Avec un rendement optimiste de 20% de panneaux photovoltaïques et une emprise au sol de 70% environ, le potentiel local de production d'énergie solaire photovoltaïque est inférieur à 12 W/m². Il est à mettre en regard des intensités de consommation énergétique de l'ordre de 100 à 500 W/m².





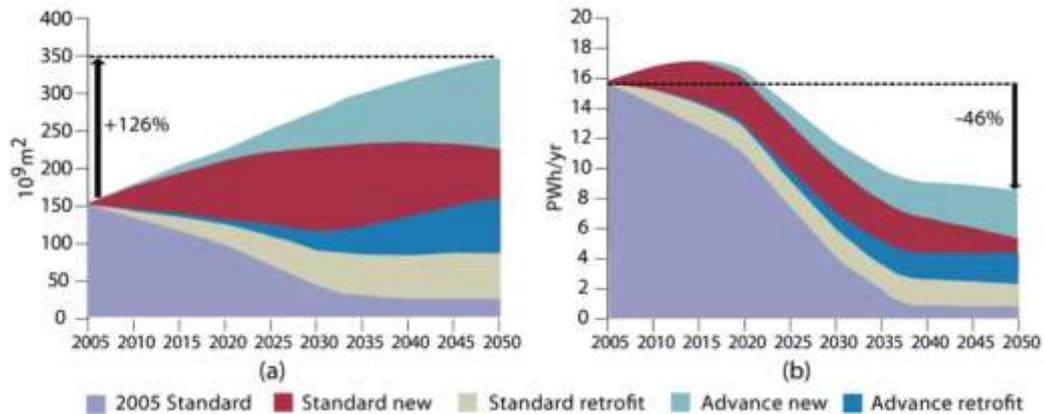
Les limites des solutions technologiques

La transition énergétique modifiera les conditions de transport et d'utilisation de l'énergie. Le recours accru à des énergies renouvelables intermittentes nécessite la mise en place de réseaux intelligents (*smart grids*) et de moyens de stockage. L'utilisation de sources d'énergie non fossiles obligera à nous tourner vers de nouveaux vecteurs d'énergie pour la mobilité. Dans le cas de véhicules automobiles, le passage à une propulsion électrique pose le problème du stockage de l'électricité par batteries et de l'autonomie du véhicule. Les progrès réalisés dans le domaine des piles à combustible ont suscité beaucoup d'espoir en ce qui concerne l'utilisation d'hydrogène comme vecteur énergétique mais les applications au secteur automobile semblent toutefois être reportées dans le temps.

Les solutions technologiques, outre leur coût et leurs incertitudes, ne pourront pas faire face à une demande urbaine en croissance exponentielle si, en parallèle, des actions sur la réduction de la demande ne sont pas mises en place.

Améliorer l'efficacité des bâtiments

L'analyse effectuée dans le cadre des scénarios du GEA démontre qu'une réduction de la consommation d'énergie finale mondiale pour le chauffage et le refroidissement d'environ 46 % est possible d'ici à 2050 par rapport à 2005 grâce à la pleine utilisation des meilleures pratiques d'aujourd'hui dans la conception, la construction et l'exploitation des bâtiments. Ceci peut être obtenu tout en améliorant le confort et avec une augmentation de la superficie de plancher globale de plus de 126 %.



La consommation mondiale finale d'énergie thermique dans les bâtiments (b) et la superficie globale (a) de 2005 à 2050 dans le scénario "GEA-efficacité" [45]

Explication des catégories d'efficacité : standard : stock actuel ; standard nouveau : nouveaux bâtiments construits selon les codes de construction actuels ou selon de nouveaux codes de construction (sans mesures supplémentaires) ; nouveau avancé : nouveaux bâtiments construits aux meilleurs niveaux de performance d'aujourd'hui ; rénovation : suppose des gains d'efficacité typiquement de l'ordre de 35 % ; rénovation avancée : rénovation aux meilleurs niveaux d'efficacité.

Il existe, cependant, un risque important de chemin de dépendance. Si des codes de construction stricts ne sont pas introduits universellement et si les rénovations énergétiques se développent sans être soumises aux meilleurs niveaux d'efficacité, la consommation d'énergie et les émissions de GES correspondantes peuvent être enfermées à de hauts niveaux pour de nombreuses décennies. Cela pourrait conduire à une augmentation de 33 % de la consommation mondiale d'énergie des bâtiments d'ici à 2050 au lieu d'une baisse de 46 %.

L'adoption à grande échelle des meilleures pratiques dans le secteur des bâtiments offrirait également un large éventail d'autres avantages : une amélioration de la sécurité énergétique, une augmentation de la productivité, de la qualité de l'air intérieur et de la santé, des valeurs de l'immobilier et de l'emploi. Les 57 000 milliards d'US \$ d'économies de coûts énergétiques cumulés

jusqu'en 2050 dans le chauffage et le refroidissement sont sensiblement supérieurs aux 15 000 milliards d'US \$ investissements nécessaires pour réaliser ces économies. La valeur des avantages supplémentaires dépasse de plus celle des économies d'énergie. Les co-bénéfices coïncident avec d'autres agendas politiques importants tels que l'amélioration de la sécurité énergétique, l'emploi, la réduction de la pauvreté, et l'augmentation de la compétitivité. Ces co-bénéfices fournissent des points d'entrée plus faciles pour les politiques locales que le changement climatique en soi [45].

Diminuer la consommation d'énergie dans le secteur des transports

Influencer la consommation d'énergie dans le secteur des transports implique d'agir sur les besoins de déplacement, sur des infrastructures et sur les transferts modaux, c'est-à-dire en définitive sur la structure spatiale urbaine et sur la localisation des activités, ainsi que sur l'efficacité énergétique des véhicules. Les politiques affectant la structure spatiale des villes auront un grand impact sur la demande de transport, les coûts d'infrastructures et la viabilité des différents modes de transport à l'échelle locale. La fréquence et la distance des trajets et le choix du mode de transport influent sur la consommation de carburant. La transition vers le transport durable peut suivre le cadre connu sous le nom *éviter – transférer – améliorer*. Ce cadre permet de regrouper divers instruments de politique en trois grands principes.

Il doit être appliqué dans l'ordre en diminuant d'abord la demande (*éviter*) par une forme urbaine plus compacte, plus dense, bien articulée autour des lignes et des hubs de transport en commun, avec une forte mixité des logements et des emplois. La densité et son articulation ainsi que l'intégration des différents modes de transport en commun favorisent le transfert modal (*transférer*). C'est seulement après que ces modifications structurelles ont permis de diviser la demande de transport par au moins deux que les options technologiques (*améliorer*) ont leur pleine efficacité.

Une transformation majeure des systèmes de transport est possible au cours des 30-40 prochaines années. Elle nécessitera une rupture avec la conception actuelle des infrastructures : avec des réseaux viaires à maille beaucoup plus fine, un réseau de rues continues à l'échelle piétonne créant un domaine public et non plus une ségrégation fonctionnelle des voies selon les vitesses, telle qu'elle est aujourd'hui développée par l'ingénierie routière. Elle nécessitera une amélioration de l'efficacité des véhicules, des modifications substantielles des carburants, et une transformation des comportements. À court terme, l'amélioration de l'efficacité énergétique globale du secteur des transports, l'introduction de carburants alternatifs à faibles émissions de carbone et de l'électricité, l'amélioration de la diversification, de la quantité et de la qualité des modes de transports publics, sont nécessaires. Des objectifs à moyen terme exigent la réduction des distances de déplacement dans les villes en mettant en œuvre un aménagement urbain compact qui améliore l'accessibilité aux

emplois et aux services et facilite l'utilisation de modes de transport non motorisés et le remplacement et l'adoption de nouveaux types de véhicules conçus pour des distances urbaines plus courtes.

Les objectifs de la politique des transports comprennent l'adoption de mesures pour accroître l'accessibilité et des services de mobilité urbaine abordables avec des infrastructures qui facilitent l'utilisation généralisée des options non – motorisés. La planification urbaine doit favoriser la compacité, réduire l'étalement et la fragmentation, encourager la mixité des usages du foncier. La forme et la conception des rues doivent créer un véritable domaine public avec des places, en favorisant la marche, le vélo, et leur intégration dans un réseau de modes de transport public. Les employeurs dans de nombreux secteurs peuvent réduire les déplacements domicile – travail des salariés par leurs décisions de localisation et peuvent fournir des incitations pour remplacer certains déplacements non essentiels à des fins de travail avec l'utilisation des technologies de l'information et de la communication.

Les politiques de parkings et les pools de voitures ainsi que le covoiturage, combinés avec la technologie de l'information peuvent devenir des politiques clés afin de réduire l'utilisation des voitures. L'utilisation efficace des capacités de la voirie, la consommation d'énergie et les coûts d'infrastructure pour les différents modes de transport doivent être pris en compte lors de la planification des transports.

Il existe encore beaucoup de pistes pour améliorer les technologies des véhicules conventionnels. Les technologies efficaces augmentent l'efficacité de conversion de l'énergie du combustible en travail en améliorant l'efficacité du groupe motopropulseur et en récupérant les pertes d'énergie et la réduction des charges (poids, roulement, résistance de l'air) sur le véhicule. Elles ont le potentiel de doubler la productivité du carburant des véhicules légers en diminuant la consommation de 7,5 litres aux 100 km en 2010 à 3,0 litres aux 100 km en 2050 [45].

L'émergence de technologies de propulsion électrique ou de véhicules électriques hybrides permet réduire à zéro les émissions d'échappement des véhicules sur une portée restreinte à environ 50 kilomètres dans des conditions urbaines. Les véhicules à batterie électrique peuvent atteindre un rendement très élevé (plus de 90 %, soit quatre fois l'efficacité d'un véhicule à moteur à combustion, mais en excluant la production et le transport de l'électricité), mais ils ont un rayon d'action limité et une autonomie réduite des batteries. Si les économies de carburant et les technologies hybrides sont déployées sur une grande échelle, des économies de carburant d'un facteur 2 peuvent être obtenues dans la prochaine décennie [45].

Un gisement d'efficacité inexploité : la forme urbaine

Le doublement à venir de la population urbaine mondiale implique de doubler les richesses disponibles sans accroître la consommation de ressources pour les produire. C'est un objectif extrêmement ambitieux. L'optimisation des structures spatiales et morphologiques des villes constitue le plus grand gisement d'économies d'énergies. Des villes plus denses, plus compactes, mieux connectées, plus ouvertes à la lumière, au soleil et au vent par leur morphologie peuvent créer bien-être et intensité des échanges sociaux et économiques tout en économisant des kilomètres carrés d'asphalte, de béton, d'électricité et d'eau perdus dans des réseaux trop longs, trop épars, trop disséminés dans les villes étalées et fragmentées contemporaines. Si la productivité du système urbain était multipliée par cinq, l'humanité pourrait continuer de s'urbaniser en créant des richesses et en diminuant la pauvreté tout en réduisant la pression exercée sur la planète. L'augmentation¹⁶ de la productivité des ressources dans le monde urbain est techniquement faisable et produirait des bénéfices macro économiques. La surexploitation des ressources n'est pas nécessaire pour atteindre nos niveaux de confort : 80 à 90 % des ressources sont en effet gaspillées¹⁷.

Les villes denses, compactes et connectées optimisent l'efficacité énergétique

Dans les voitures classiques, 80 à 85 % de l'énergie sont perdus avant de parvenir aux roues et seulement 1 % sert à déplacer le conducteur. Pourquoi ? Parce qu'une voiture classique est faite d'acier, matériau très lourd, et parce que pour accélérer cette masse il faut un moteur si gros qu'il tourne au-dessous de ses capacités la plupart du temps et utilise une si faible partie de sa puissance qu'il perd la moitié de son rendement¹⁸. La première action pour rendre les voitures plus efficaces a donc été de les alléger. L'utilisation de matériaux ultra résistants et légers, comme la fibre de carbone ou le titane et des alliages modernes permet de construire des voitures trois ou quatre fois

¹⁶ Nous reprenons à notre compte la démarche développée en 1997 par Ernst U. von Weizsäcker, Amory B. Lovins et L. Hunter Lovins dans leur rapport au Club de Rome, *Facteur 4, Deux fois plus de bien-être en consommant deux fois moins de ressources*. En seize ans toutefois, l'évolution de la situation planétaire, la dégradation accélérée de tous les écosystèmes, l'amplification du changement climatique ont imposé de revoir l'objectif déjà ambitieux de ce rapport à la hausse si l'humanité veut construire un second monde urbain sans accroître de manière excessive la pression anthropique.

¹⁷ Selon une étude réalisée par l'Académie américaine d'ingénierie, 93 % de la matière que nous achetons et « consommons » ne finit jamais sous forme de produits vendables. En outre 80 % des produits sont jetés après une seule utilisation.

¹⁸ De surcroît les 15 à 20 % de l'énergie qui parvient aux roues sont pour l'essentiel dissipés en chaleur. En conduite urbaine, environ un tiers réchauffe l'air déplacé par le véhicule (cette proportion atteint 60 à 70 % sur une autoroute), un tiers chauffe les pneus et la route, un tiers chauffe les freins.

plus légères – 400 kg pour une quatre à cinq places. Des pneus améliorés, portant un poids plus faible, permettraient de diviser par trois à cinq les pertes à leur niveau. Cette stratégie ultralégère a déjà été testée avec succès. La deuxième action a été l'amélioration de l'efficacité par une propulsion électrique hybride. En mettant en synergie les stratégies ultralégère et hybride, l'efficacité n'est pas multipliée par deux ou trois mais cinq.

Les stratégies qui multiplient par cinq la productivité énergétique des voitures ultralégères hybrides peuvent être transposées pour accroître la productivité énergétique des villes. Pour les villes, le facteur responsable des gaspillages et des pertes énergétiques est l'expansion spatiale : une ville étalée et fragmentée gaspille l'énergie pour assurer le transport des habitants sur de grandes distances, pour chauffer des pavillons de banlieue exposés sur cinq de leurs faces, pour approvisionner la ville, pour acheminer l'eau le long de réseaux étendus. La dépense énergétique varie avec la surface de la ville. Pour maintenir la même qualité de vie, la même accessibilité, la même densité d'interactions dans une ville en répartissant le même nombre d'habitants sur un rayon de 20 km au lieu de 5 km, il faudrait non pas quatre fois plus d'énergie mais 16 fois plus d'énergie. Le rêve de la mobilité sans cesse accrue s'est retourné contre les habitants des grandes régions mégalopolitaines. La qualité de vie suburbaine se paie d'un tel coût énergétique et en temps passé dans les transports qu'elle n'est plus assurée. Articuler la densité des villes autour de hubs ou de lignes de transports en commun permettrait d'accroître la productivité énergétique pour la même qualité de vie. Dans une ville articulée de manière plus compacte et plus dense, la cogénération, les énergies renouvelables, les réseaux intelligents peuvent alors fournir une énergie plus propre et dans des conditions plus efficaces (en récupérant les pertes et en lissant les pointes).

L'augmentation de la densité et de la compacité urbaine permet de diviser au moins par deux la demande énergétique, que ce soit pour les transports ou pour le confort thermique. L'efficacité des systèmes énergétiques et leur intégration permettent de diviser à nouveau par deux cette demande déjà réduite par l'optimisation de la forme urbaine. Au total, la demande énergétique peut être divisée par au moins quatre, c'est-à-dire réduite d'au moins 75 %. Une ville compacte et connectée, aux systèmes énergétiques optimisés est quatre fois plus efficace et l'énergie y est utilisée de manière quatre fois plus productive que dans une ville étalée et fragmentée.

Il existe un lien étroit entre la forme urbaine et les infrastructures. Dans la plupart des villes, la forme urbaine se développe selon une logique spatiale, économique et sociale, tandis que les infrastructures sont planifiées pour accompagner ce développement. La forme urbaine se réfère à la fois aux relations tridimensionnelles entre les éléments physiques de la ville, ses pleins et ses vides, ses éléments construits et ses réseaux, et à la localisation des activités ainsi qu'aux relations entre elles. Les infrastructures sont les réseaux qui supportent la vie urbaine (par exemple, les réseaux

d'eau potable, d'évacuation des eaux usées, d'énergie, le drainage des eaux de pluie, de gestion des déchets).

Plusieurs mesures permettent d'accroître l'efficacité de la forme urbaine.

Accroître la densité

Il existe de nombreuses preuves empiriques démontrant que l'accroissement de la densité de population associée à l'accroissement de la densité d'emploi réduit l'intensité énergétique et les émissions de transport. Aux États-Unis, doubler la densité résidentielle décroîtrait le nombre de kilomètres parcourus de 5 à 12 %, et jusqu'à 25 % si cet accroissement des densités était couplé avec de plus fortes concentrations d'emploi, avec des améliorations significatives des transports publics, avec une mixité accrue des usages du foncier et avec d'autres mesures de gestion de la demande de transport [106]–[108]. En prenant en compte les matériaux de construction pour les infrastructures, le fonctionnement des bâtiments, et le transport, le développement urbain à basse densité, fragmenté et déconnecté, mono fonctionnel (la plupart du temps résidentiel) est plus intensif en énergie et en émissions par habitant que le développement urbain compact, mixte et à haute densité. Aux États-Unis, 19,5 % des émissions de CO₂eq totales en 2010 étaient générées par les véhicules automobiles individuels (EPA2012). Une diminution de 5 % des kilomètres parcourus se traduirait par une économie de plus de 87 millions de tonnes d'émissions de CO₂eq.

Les seuils de densité

La littérature identifie des seuils de taille et de densité importants comme guides utiles pour la planification urbaine. L'importance de ces seuils s'étend aux infrastructures urbaines spécialisées, tels que les réseaux souterrains (métro) de transport qui ne sont, en règle générale, pas viables économiquement (en termes de clients et d'utilisateurs potentiels) en dessous d'un seuil de taille de la population d'un million d'habitants. Elle s'étend aussi à l'énergie (par exemple, le chauffage et le refroidissement urbains à base de cogénération) et aux réseaux de transport public, dont la faisabilité est encadrée par un seuil de densité brute de population de 5 000-15 000 habitants/km². Ces niveaux de densité n'impliquent pas des immeubles de grande hauteur, car ils peuvent être atteints par des structures compactes de moyenne hauteur comme à Paris (ou même de faible hauteur comme le montre l'exemple de Tokyo).

Accroître l'accessibilité

L'accessibilité dépend de la structure spatiale et des niveaux de congestion à l'intérieur de la ville. Une planification spatiale énergétiquement efficiente assure l'accessibilité entre les activités à l'intérieur de la ville par la *proximité* et non par la *mobilité*. Dans les tissus urbains traditionnels, une longue traîne de petites aménités irrigue le tissu urbain d'aménités accessibles à moins de 500 mètres de tous les habitants¹⁹. À l'opposé, la planification traditionnelle de l'ingénierie de transport essaie de maximiser la vitesse de déplacement entre les différentes activités. Elles essaie d'assurer l'accessibilité par la mobilité [109], [110].

Accroître l'accessibilité appelle à mettre en place des politiques spatiales qui découragent le gaspillage du foncier et l'extension spatiale fragmentée, qui restructurent et accroissent la densité et la mixité autour des hubs du système de transport dans un rayon de moins de 500 mètres afin de diminuer les déplacements urbains motorisés. Ces mesures, accompagnées de technologies innovantes et d'énergies alternatives, permettront de réduire sensiblement les émissions [111]–[114].

Dans les villes nord-américaines, qui sont très fortement dépendantes du transport automobile, les comportements de déplacement ont une faible élasticité aux mesures prises sur l'environnement construit. La réduction des passagers-kilomètres-transportés (PKT) est très fortement corrélée à l'accessibilité aux emplois [64], [107]. L'élasticité typique entre accessibilité des emplois et PKT dans les villes nord-américaines varie de -0,10 à -0,30.

Dans les villes plus compactes en Europe, comme Copenhague, l'accessibilité à la forte concentration des activités dans le centre-ville affecte considérablement les distances totales de déplacement [115]. En revanche, dans les villes déjà fortement motorisées, l'amélioration de l'accessibilité n'influence plus les modes de vie dépendants de l'automobile [116], ce qui confirme l'inertie des structures et des comportements urbains.

Accroître la connectivité

Une mesure simple de connectivité d'un réseau de rues est la densité linéaire de rues et la densité d'intersections. D'autres notions plus complexes liées à la structure et à la hiérarchie des réseaux entrent en ligne de compte. Ces notions plus complexes sont développées dans la suite de ce rapport. Une connectivité élevée des *patterns* de rue est corrélée positivement avec les moyens de

¹⁹ Les distributions rang taille en loi de puissance inverse (de Pareto-Zipf) caractérisent les aménités des villes traditionnelles, comme nous l'avons montré notamment sur l'exemple des parcs publics de Paris *intramuros*. Ce sont elles qui par leur invariance d'échelle et par leur longue traîne assurent un accord entre la taille des aménités, leur fréquence d'utilisation, et la distance moyenne des habitants.

transport non motorisés. Dans une approche simple de composition urbaine²⁰ la connectivité peut être décrite par la longueur et la largeur des rues, les types de rue, la taille des îlots, la densité d'intersections, le volume et la vitesse du trafic, la largeur des trottoirs, les voies réservées aux vélos, la conception des passages piétons, les services de bus [63], [117]. Pour les villes nord-américaines, la connectivité des réseaux a un impact plus grand sur le volume de passagers-kilomètres-transportés que la densité ou la mixité, entre -0.06 et -0.26 [106], [107]. Dans les villes nord-américaines l'élasticité de la marche par rapport à la surface et à la longueur des trottoirs est de l'ordre de 0,09 à 0,27 [106].

De nombreuses caractéristiques des rues, comme leur largeur, la conception de leurs intersections, la largeur de leurs trottoirs, leur nombre de voies de circulation, sont définies au moment de la construction du quartier et présentent une forte inertie au changement, en particulier si ces rues ont été conçues comme des voies routières dédiées exclusivement à l'automobile et non comme des rues aux usages économiques et sociaux mixtes et diversifiés. Il est néanmoins possible de faire évoluer les voies vers des environnements plus piétons en introduisant des dispositifs pour ralentir le trafic, en accroissant la largeur des trottoirs, en aménageant des voies cyclables, en fournissant des parkings pour les vélos, en ajoutant du mobilier urbain (des bancs, des arrêts et des abris pour le transport en commun) sans coûts excessifs.

Lors d'opérations de redéveloppement de grande ampleur, les réseaux de rues doivent être conçus de manière piétonne avec une continuité du domaine public, des îlots plus petits et un développement commercial sur le périmètre des îlots pour créer une intense activité économique et sociale dans les rues.

Accroître la mixité

La mixité a des effets à deux échelles. À grande échelle, un facteur important qui affecte l'intensité énergétique est la distribution spatiale de l'activité économique, car elle affecte les relations entre les lieux de travail et les zones résidentielles.

La distinction essentielle est entre les villes mono centriques qui concentrent l'activité dans le centre urbain et les structures urbaines polycentriques. Les impacts relatifs de ces différentes formes varient avec la taille des villes. Les études menées dans les pays nordiques suggèrent que, dans les villes les plus petites, un *pattern* centralisé de développement aura besoin de moins d'énergie pour le transport [115], [118], [119], tandis que des *patterns* polycentriques sont plus efficaces à des

²⁰ Approche qui ne prend pas en compte les caractéristiques plus complexes du réseau des rues que sont la configuration et la constitution de leur graphe, c'est-à-dire les relations qu'elles ont entre elles et leur hiérarchie d'échelle ou fonctionnelle

échelles régionales plus grandes [115], [120]. Les relations entre les localisations des zones résidentielles et d'emploi affectent également les modes de transport. Plusieurs études montrent des tendances fortes : les résidents des zones suburbaines ont des trajets plus longs et les accomplissent dans des véhicules privés ; à l'opposé les habitants des centres urbains denses ont des parts modales plus importantes de déplacements à pied et en vélo [115], [121]–[124]. À l'échelle des quartiers, la mixité des usages (à la fois verticale et horizontale) encourage les modes de transport non motorisés, car elle rend le déplacement à pied plus intéressant.

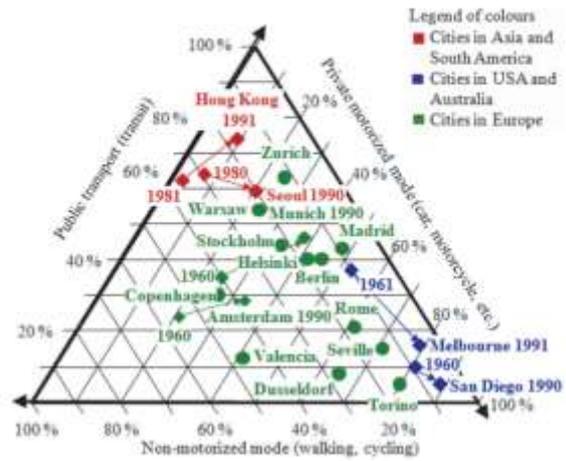
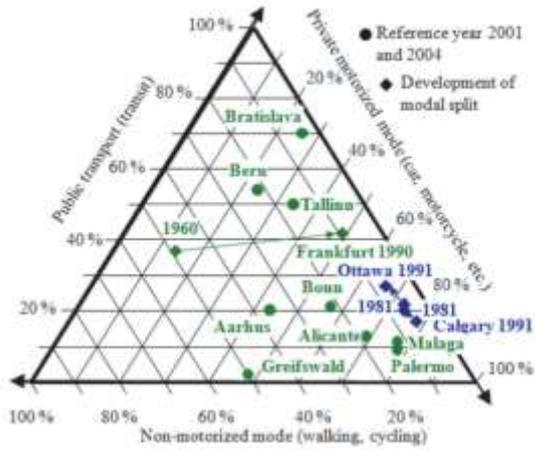
Limiter l'expansion urbaine

Limiter l'expansion et l'emprise urbaine est une des politiques les plus puissantes pour accroître l'efficacité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre. La consommation d'énergie de transport par habitant croît en effet beaucoup plus vite que la taille physique des villes²¹. Les implications et les stratégies pour limiter l'expansion urbaine seront développées en détail dans la suite de ce rapport.

Augmenter et diversifier les options de transport en commun

Accroître l'offre de transport en commun et la diversifier réduit fortement l'intensité énergétique de transport. En effet, les transports en commun ont une intensité énergétique par passager-kilomètre environ 4 à 10 fois inférieure à celle de la voiture moyenne [125]. La concentration de l'intensité urbaine autour des hubs de transport en commun amène de nombreux bénéfices énergétiques et économiques : elle réduit la quantité totale de déplacements ; elle encourage la marche ; elle améliore la viabilité économique et l'efficacité des réseaux de transport en commun ; elle renforce les effets positifs des économies d'agglomération en rapprochant les entreprises dans les hubs de transport. Cette structuration de la densité autour des infrastructures de transport en commun apporte également des co-bénéfices significatifs en termes de pouvoir d'achat des ménages et de santé publique [126].

²¹ Elle est fortement supra linéaire avec le rayon physique des villes (avec un exposant 1,3).



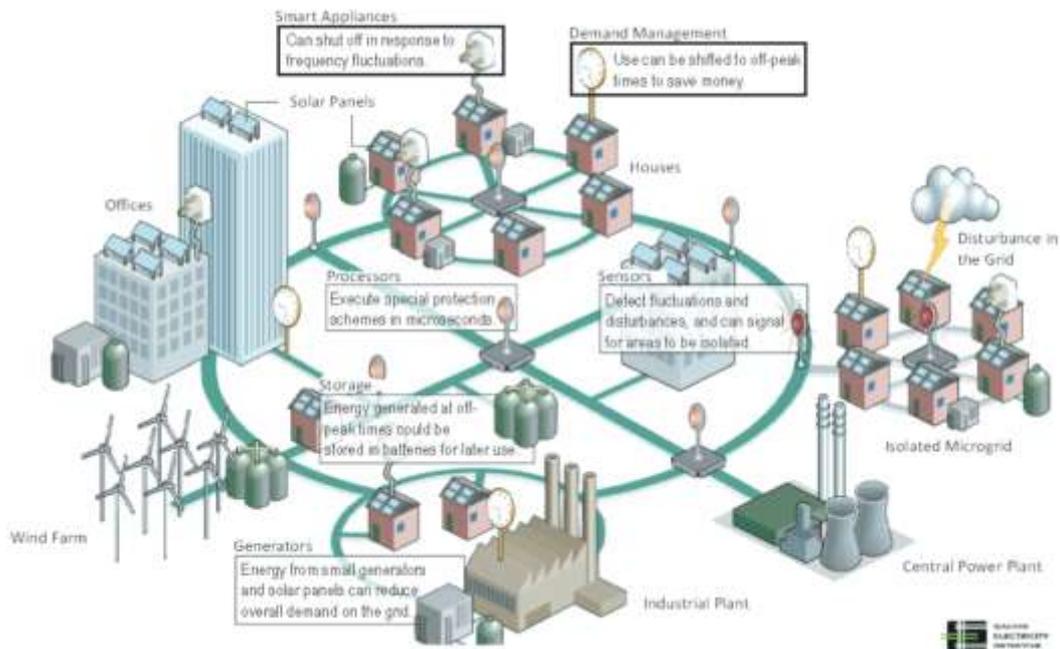
Évolution des parts modales des déplacements domicile travail dans les villes de taille moyenne avec une population inférieure à 1 million d'habitants (à gauche) et dans les villes avec une population supérieure à 1 million d'habitants (à droite) dans des économies à revenus élevés pour les années de référence 2001 et 2004 et tendance depuis 1960 [98], [127], [128]

Toutefois, la seule expansion des systèmes de transport en commun n'est pas suffisante. Ceux-ci doivent être intégrés les uns avec les autres pour offrir une continuité des parcours et une diversité d'options.

Accroître les espaces verts

Les puits de carbone urbains incluent des types de végétation variés incluant les bois urbains, les parcs, les jardins, les squares publics, les alignements d'arbres le long des avenues et les toitures végétalisées. En plus de la séquestration du carbone, les espaces verts fournissent des co-bénéfices nombreux : l'ombrage et le rafraîchissement de la ville, le drainage des eaux de pluie, la réduction de la pollution, le renforcement de la biodiversité et l'amélioration du bien-être des habitants [129]–[131]. Ces co-bénéfices constituent l'essentiel de l'apport des espaces verts à l'efficacité énergétique urbaine et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En effet, des études menées à Leipzig en Allemagne montrent que l'effet des espaces verts urbains est limité en comparaison de l'intensité des émissions urbaines [132]. Accroître les puits de carbone verts urbains conduit à des réductions des émissions mais celles-ci ne sont pas significatives par rapport aux émissions totales des villes. De nombreuses villes s'engagent toutefois dans le développement d'espaces verts et la plantation d'arbres dans le cadre de leur politique de lutte contre le changement climatique. Le développement des espaces verts est plutôt à envisager pour leur contribution à l'efficacité énergétique et au confort thermique des environnements urbains. Par leur ombrage et via le mécanisme d'évapotranspiration, ils refroidissent les villes et les bâtiments en réduisant les effets d'albédo et d'îlots de chaleur urbains. Ils ont également des bénéfices sociaux comme la fourniture d'espaces récréatifs favorisant l'inclusion sociale.

Accroître la synergie



Exemple de smart grid : un réseau intégré de micro-réseaux intelligents peut s'auto piloter grâce à des boucles de rétroaction.

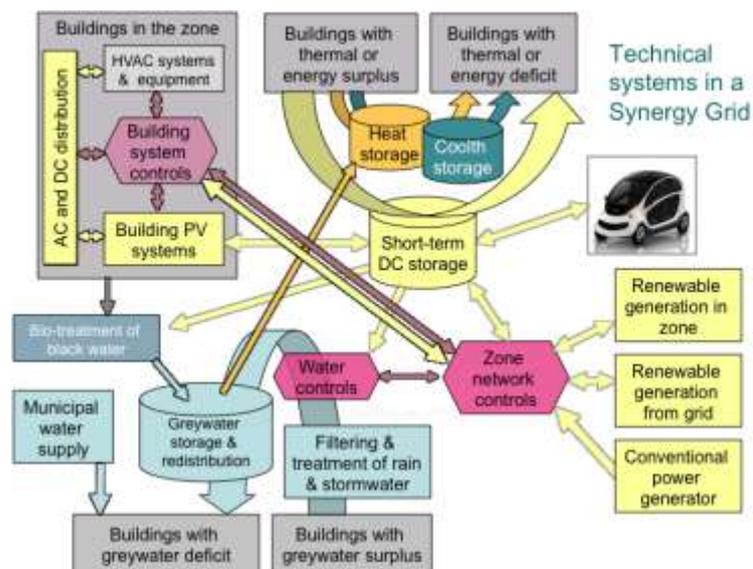
L'accroissement des synergies entre les différents flux d'énergie au sein de la ville est l'une des stratégies clé pour la transition énergétique. Les *smart grids* consistent à mettre en synergie et à gérer de façon intelligente la production et la demande d'électricité au cours du temps. Le déploiement des stratégies de type *smart grid* à l'échelle nationale est susceptible de contribuer de façon significative à la baisse des consommations électriques et des émissions de gaz à effet de serre. Le tableau suivant publié par le US Department of Energy présente les bénéfices directs et indirects en termes de consommation électrique et d'émissions de CO₂ en cas de déploiement complet de ces technologies d'ici à 2030 aux Etats Unis. Ce déploiement contribuerait directement à une baisse de 12% des consommations électriques, et indirectement à 6%.

Mechanism	Reductions in Electricity Sector CO ₂ Emissions	
	Direct (%)	Indirect (%)
Conservation Effect of Consumer Information and Feedback Systems	3	-
Joint Marketing of Energy Efficiency and Demand Response Programs	-	0
Deployment of Diagnostics in Residential and Small/Medium Commercial Buildings	3	-
Measurement & Verification for Energy Efficiency Programs	1	0.5
Shifting Load to More Efficient Generation	<0.1	-
Support Additional Electric Vehicles and Plug-In Electric Vehicles	3	-
Conservation Voltage Reduction and Advanced Voltage Control	2	-
Support Penetration of Renewable Wind and Solar Generation	<0.1	5
Total Reduction	12	6

Réductions potentielles de consommation électrique et d'émissions de CO₂ associées aux Etats Unis grâce aux technologies de type smart grids, en faisant l'hypothèse d'une pénétration de 100%
[133]

Les stratégies de type *smart grids*, centrées sur l'électricité, sont susceptibles d'être déployées sur tous les flux d'énergie au sein des villes, au sein d'une approche plus globale, intitulée *synergy grids* [88]. L'extension des stratégies synergétiques peut potentiellement s'appliquer à tous les flux énergétiques urbains et à toutes les entités urbaines, et augmenter encore le potentiel de réduction des consommations énergétiques urbaines :

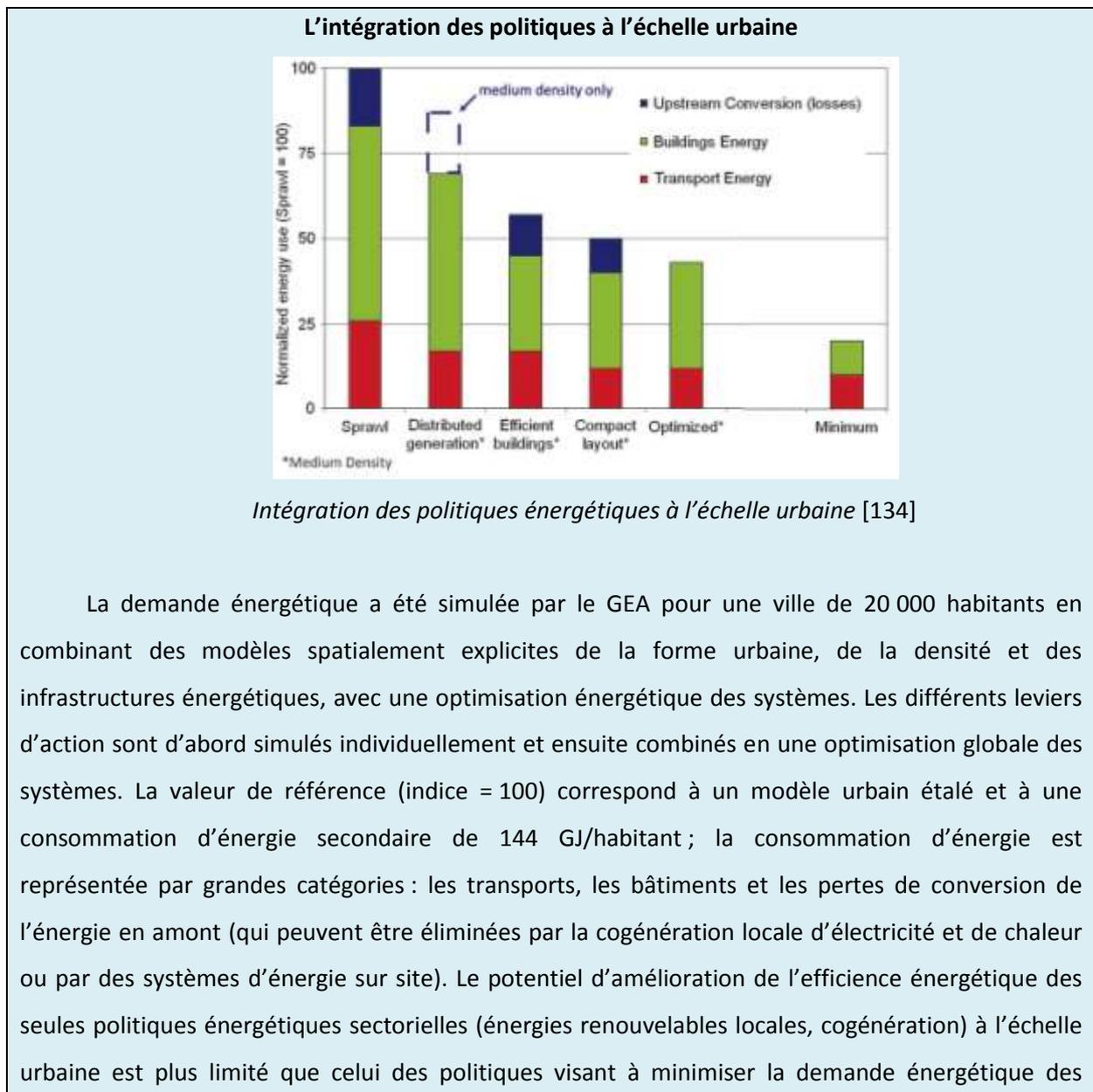
- les bâtiments présentant un déficit ou un surplus de chaleur
- les bâtiments avec un déficit ou un surplus d'eau chaude domestique
- les bâtiments avec un déficit ou un surplus d'eau grise
- les bâtiments ou les véhicules avec un déficit ou un surplus en courant continu (production d'énergie renouvelable)



Exemple de synergy grid [88]

La synergie des leviers d'efficacité énergétique

Les objectifs d'un développement urbain durable ne seront pas atteints par des stratégies isolées. Appliqués simultanément, les différents leviers d'action créent une forte synergie et ont un effet multiplicateur. Une ville à taille humaine, compacte, dense et bien connectée, associée à des transports efficaces et sobres en énergie, diminue à la fois le besoin de déplacements et le coût énergétique et carbone de chacun de ces déplacements. Diviser par deux le nombre des déplacements, en assurant l'accessibilité des emplois et des aménités essentielles par leur proximité et non par la mobilité, et diviser par quatre les émissions de carbone de chacun de ces déplacements par des transferts modaux vers des transports en commun, conduit à diviser par huit les émissions de carbone liées aux déplacements.



bâtiments ou des politiques de structuration spatiale (forte densité urbaine et usages mixtes) qui diminuent fortement la consommation d'énergie des transports. Les plus grands potentiels d'amélioration de l'efficacité peuvent être réalisés par une combinaison d'efficacité énergétique des bâtiments et de la forme urbaine à travers des politiques de densité. La forme urbaine compacte à elle seule peut diviser la consommation énergétique par 2. L'efficacité des bâtiments a un potentiel de réduction d'environ 45 %.

L'optimisation simultanée de la forme et des flux par des *patterns* urbains efficaces et résilients est essentielle pour améliorer la productivité des ressources. Formes et flux urbains ne peuvent pas être optimisés séparément. Une ville étalée, fragmentée, avec une densité inférieure à 5 000 habitants/km² ne permet pas de recourir de manière efficace à des systèmes de transport en commun ou au chauffage urbain et à la cogénération.

De nombreuses stratégies permettent, chacune prise individuellement, de diviser par deux la demande énergétique, c'est-à-dire de doubler la productivité de chaque unité d'énergie. La mise en synergie de ces stratégies permet des gains de productivité encore supérieurs. Cependant, il suffit que l'optimisation n'ait pas été faite à une certaine échelle pour rendre vains ou coûteux les efforts d'optimisation ultérieurs. D'où l'importance essentielle des formes et des *patterns* urbains. L'efficacité des dispositifs technologiques se trouve multipliée et leur coût diminué si les formes urbaines sont au préalable optimisées. Dans les climats froids, des formes de bâtiments compactes, ayant un facteur de forme (c'est-à-dire un rapport entre surface d'enveloppe sur volume intérieur) faible peuvent diviser par deux les pertes radiatives à travers l'enveloppe et diviser ainsi par deux les besoins de chauffage. C'est l'inverse dans les climats chauds et humides où il faut au contraire augmenter les volumes « passifs », c'est-à-dire les volumes à moins de six mètres des enveloppes qui peuvent être éclairés et ventilés naturellement. Dans les climats tempérés, les stratégies bioclimatiques résultent donc d'un arbitrage fin entre volumes passifs et compacité du bâti. L'optimisation des formes permet de diviser par deux les besoins de chauffage et de rafraîchissement ; ces besoins énergétiques ainsi diminués peuvent être en partie couverts par des énergies renouvelables. En revanche, il est très coûteux de rattraper une mauvaise conception initiale des formes par des dispositifs technologiques.

Les villes sont des systèmes complexes et les bénéfices économiques des actions sur leurs différents éléments se multiplient au lieu de s'ajouter. Diviser par deux la demande énergétique en optimisant la forme urbaine ; la diviser à nouveau par deux en optimisant la technologie des bâtiments et des transports ; diviser une nouvelle fois par deux les besoins en énergie en optimisant les systèmes énergétiques, conduit à une division par huit. Cette cascade d'efficacité énergétique ne

peut cependant avoir lieu que si les politiques publiques mettent en place en amont des actions qui gèrent la réduction de l'énergie urbaine de manière intégrée et non pas dissociée en approches techniques indépendantes. L'amélioration de la productivité des ressources nécessite une forte intégration. Le défi de la transition énergétique urbaine doit être pensé dans sa globalité, et non silo par silo. La ville ne doit pas être approchée de manière exclusivement spécialisée et sectorielle.

En résumé, la transition énergétique urbaine doit s'appuyer sur la synergie et la mobilisation intégrée de quatre leviers clé :

1) Orienter le développement de la forme urbaine vers des structures spatiales et des morphologies énergétiquement efficaces par une intégration de la planification spatiale du foncier et des infrastructures, et par des mécanismes de marché adaptés

La forme urbaine est un des leviers les plus puissants de réduction de la demande énergétique. La densité accroît la productivité énergétique en permettant des améliorations simultanées de l'accessibilité par la proximité, et des qualités de confort thermique de la texture urbaine. Accroître la densité des villes contribue à la réduction des besoins de déplacements et soutient la mise en place de systèmes de transport en commun. En France, les îlots traditionnels compacts sont trois à quatre fois plus denses que les barres et les tours modernistes. Ils sont 16 fois plus denses que les lotissements pavillonnaires. La densité articulée permet d'atteindre avec des îlots traditionnels des facteurs de compacité volumétrique des bâtiments (Surface/Volume) de l'ordre de 0,25 optimisant à la fois les besoins de chauffage et de refroidissement. Un bon ratio d'aspect des rues (hauteur/largeur) et une bonne orientation des rues en fonction à la fois des points cardinaux et des vents dominants, permettent d'atteindre une très grande efficacité à la fois pour la lumière naturelle et la ventilation passive. Aucune ville n'est cependant identique et les projets doivent s'inscrire dans un climat, une topographie, un rapport à l'espace, éventuellement à la mer, aux fleuves, aux montagnes, et toujours en rapport à une société et ses modes d'interaction.

2) Optimiser les dispositifs passifs, la technologie constructive et favoriser les transferts modaux vers la marche, le vélo et les transports en commun par la réglementation de la construction et les incitations fiscales, et par le développement de systèmes de transport en commun intégrés

La ville bien orientée et dessinée peut bénéficier au maximum des apports solaires, lumineux, de rafraîchissement, et de ventilation passifs. La technologie constructive (et notamment l'isolation thermique) peut amplifier ces gains passifs et diviser par quatre les consommations énergétiques des bâtiments. Les taux de consommation dans le label français Effinergie²² sont cinq fois inférieurs à ceux des tours des années soixante dix²³. Ils sont plus de trois fois inférieurs à ceux des immeubles conformes à la réglementation thermique de 1989.

3) Optimiser le rendement des systèmes énergétiques (production, conversion et distribution) et réduire leurs facteurs d'émissions par une conception intégrée des réseaux donnant une large place aux énergies renouvelables

Les énergies renouvelables distribuées dans le tissu urbain peuvent fournir plus de 20 % de l'énergie (chauffage solaire passif, biogaz, microcentrales et éoliennes, panneaux solaires) si la demande énergétique a déjà été optimisée en amont. L'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique permet de diminuer les consommations d'énergie fossile et nucléaire.

4) Réduire le gaspillage des consommateurs par des campagnes de sensibilisation, une interface directe pour l'utilisateur, et un signal prix lisible

Des comportements sobres des habitants et des consommateurs peuvent réduire la consommation énergétique d'une ville d'un facteur 2. L'exemple du chauffage urbain à Paris montre que les systèmes collectifs sans comptage et tarification individuelle conduisent à des gaspillages responsables d'une augmentation des consommations énergétiques d'un facteur 2,5. Du fait de la tarification individuelle et d'une interface adaptée (contrôle direct de l'utilisateur), les habitants chauffés à l'électricité ne consomment en effet en moyenne que la moitié de leur consommation

²² 50 kWh/m²/an pour les cinq usages de l'énergie que sont le chauffage, l'eau chaude sanitaire, les auxiliaires de ventilation et de chauffage, l'éclairage, la climatisation

²³ 257 kWh/m²/an sans tenir compte du comportement des habitants et 327 kWh/m²/an en tenant compte de ces comportements

théorique²⁴. Les habitants chauffés au chauffage urbain consomment quant à eux en moyenne 1,3 fois leur consommation théorique.

L'effet multiplicatif de l'intégration des différents leviers

Les leviers de réduction de la demande énergétique urbaine ne s'additionnent pas mais multiplient leurs effets pour diminuer les consommations. Il faut toutefois respecter un ordre pour bénéficier de la synergie de ces leviers. La technologie seule ne peut pallier les excès de demande liés à des formes urbaines étalées et fragmentées. La mise en place de nombreuses technologies sobres en énergie, comme la cogénération, ne peut se faire de manière efficace et rentable qu'au-dessus de certains seuils de densité. Seule la compacité et la densité, un dessin bioclimatique de la ville et la mixité des usages (fonctionnels et énergétiques) permettent de mettre en place avec succès à la fois des systèmes de mobilité et des systèmes de bâtiments passifs économes en énergie. Ce n'est que dans une ville à grain fin, conçue pour les piétons, où tous les services essentiels sont accessibles à moins de cinq minutes de marche, que l'accessibilité par la proximité peut diminuer de manière sensible la dépendance à la voiture et la consommation énergétique de transport. Ce n'est que dans une ville bien dessinée que le rapport optimal des pleins et des vides peut conduire à des formes de bâtiments et de rues favorisant un éclairage naturel, des apports solaires en hiver et un rafraîchissement passif en été. C'est sur la base de cet urbanisme à la fois dense et bioclimatique, qui caractérise tous les tissus vernaculaires d'avant la révolution industrielle que peut se développer le gain multiplicatif constitué par des technologies de composants de bâtiments performants. Ces mêmes composants installés sur des tours massives sont des solutions non durables qui ne peuvent pas compenser par la technologie les besoins très importants de bâtiments mal dessinés, mal implantés et mal conçus. Il en est de même pour les systèmes de production, de conversion et de distribution de l'énergie. Concevoir des systèmes énergétiques urbains nouveaux, fondés sur la production locale d'énergies renouvelables, avec un fort taux de recyclage, caractéristiques des écosystèmes en boucle, n'est possible que dans des formes urbaines bien conçues et dessinées.

²⁴ La consommation théorique est calculée en fonction du climat, du type de bâtiment (forme, orientation, etc.) et de sa technologie constructive (isolation, vitrages, etc.)

Références

- [1] T. Chandler, *Four thousand years of urban growth: an historical census*. Lewiston, N.Y., U.S.A.: St. David's University Press, 1987.
- [2] D. Satterthwaite, *The Transition to a Predominantly Urban World and its Underpinnings*. IIED, 2007.
- [3] United Nations Human Settlements Programme, *Cities and climate change: global report on human settlements, 2011*. Nairobi, London, Washington, D.C.: UN-Habitat ; Earthscan, 2011.
- [4] United Nations, "World Urbanization Prospects, the 2009 Revision: Highlights," Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, 2010.
- [5] A. Grübler, B. O'Neill, K. Riahi, V. Chirkov, A. Goujon, P. Kolp, I. Prommer, S. Scherbov, and E. Slentoe, "Regional, national, and spatially explicit scenarios of demographic and economic change based on SRES," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 74, no. 7, pp. 980–1029, Sep. 2007.
- [6] IIASA, "International Institute for Applied System Analysis (IIASA) GGI Scenario Database Version 2.0.1," 2009. [Online]. Available: <http://www.iiasa.ac.at/Research/GGI/DB>.
- [7] H. Tisdale, *The Process of Urbanisation*. 1942.
- [8] World Bank, "World Development Report 2009: Reshaping Economic Geography," World Bank, Washington, D.C., 2009.
- [9] IEA, *World Energy Outlook 2008 Edition*, 2008th ed. Paris, France: International Energy Agency, 2008.
- [10] G. B. West, J. H. Brown, and B. J. Enquist, "A general model for the origin of allometric scaling laws in biology," *Science*, vol. 276, no. 5309, pp. 122–126, Apr. 1997.
- [11] G. B. West, J. H. Brown, and B. J. Enquist, "The Fourth Dimension of Life: Fractal Geometry and Allometric Scaling of Organisms," *Science*, vol. 284, no. 5420, pp. 1677–1679, Jun. 1999.
- [12] P. Frankhauser, *La Fractalité des structures [sic] urbaines*. Paris: Anthropos : Economica, 1994.
- [13] P. A. Longley, M. Batty, and J. Shepherd, "The Size, Shape and Dimension of Urban Settlements," *Transactions of the Institute of British Geographers*, vol. 16, no. 1, pp. 75–94, Jan. 1991.
- [14] C. Genre-Grandpierre, "Forme et fonctionnement des réseaux de transport: approche fractale et réflexions sur l'aménagement des villes," Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté. UFR des Sciences du langage, de l'homme et de la société, France, 2000.
- [15] B. J. L. Berry and W. L. Garrison, "Alternate Explanations of Urban Rank–Size Relationships," *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 48, no. 1, pp. 83–91, Mar. 1958.

- [16] P. Krugman, "Confronting the Mystery of Urban Hierarchy," *Journal of the Japanese and International Economies*, vol. 10, no. 4, pp. 399–418, Dec. 1996.
- [17] G. B. West and J. H. Brown, "The origin of allometric scaling laws in biology from genomes to ecosystems: towards a quantitative unifying theory of biological structure and organization," *J Exp Biol*, vol. 208, no. 9, pp. 1575–1592, May 2005.
- [18] M. Batty, *Cities and Complexity: Understanding Cities Through Cellular Automata, Agent-Based Models and Fractals*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2005.
- [19] M. Batty, "The Size, Scale, and Shape of Cities," *Science*, vol. 319, no. 5864, pp. 769–771, Feb. 2008.
- [20] E. H. Decker, S. Elliott, F. A. Smith, D. R. Blake, and F. S. Rowland, "Energy and material flow through the urban ecosystem," *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 25, no. 1, pp. 685–740, Nov. 2000.
- [21] D. Pumain, "Urban Systems Dynamics, Urban Growth and Scaling Laws: The Question of Ergodicity," in *Complexity Theories of Cities Have Come of Age*, J. Portugali, H. Meyer, E. Stolk, and E. Tan, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 91–103.
- [22] H. A. Simon, "On a Class of Skew Distribution Functions," *Biometrika*, vol. 42, no. 3–4, pp. 425–440, Dec. 1955.
- [23] X. Gabaix, "Zipf's law for cities: An explanation," *Quart J Econ* 1999, pp. 739–768.
- [24] B. T. Robson, *Urban growth : an approach*. Methuen.
- [25] D. Pumain and F. Moriconi-Ebrard, "City size distributions and metropolisation," *GeoJournal*, vol. 43, no. 4, pp. 307–314, Dec. 1997.
- [26] D. Pumain, F. Paulus, C. Vacchiani-Marcuzzo, and J. Lobo, "An evolutionary theory for interpreting urban scaling laws," *Cybergeo : European Journal of Geography*, Jul. 2006.
- [27] A. Grübler, *Energizing sustainable cities assessing urban energy*. London; New York: Routledge, 2013.
- [28] A. Grubler and D. Fisk, "Summary and conclusion," in *Energizing Sustainable Cities: Assessing Urban Energy*, A. Grubler and D. Fisk, Eds. Routledge, 2013, pp. 175–189.
- [29] L. Bourdic and S. Salat, "Rank size distributions of urban systems in developed countries," Paris, Urban Morphology Institute Working Paper, 2013.
- [30] L. Bourdic and S. Salat, "National, Regional and Sub-regional rank size analysis of the Chinese Urban System," Urban Morphology Institute Working Paper, 2013.
- [31] D. Da Mata, U. Deichmann, J. V. Henderson, S. V. Lall, and H. G. Wang, *Examining The Growth Patterns Of Brazilian Cities*. World Bank Publications, 2005.

- [32] L. M. A. Bettencourt, J. Lobo, D. Helbing, C. Kühnert, and G. B. West, "Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 104, no. 17, pp. 7301–7306, 2007.
- [33] J. Lobo and D. Strumsky, "Metropolitan patenting, inventor agglomeration and social networks: A tale of two effects," *Journal of Urban Economics*, vol. 63, no. 3, pp. 871–884, 2008.
- [34] L. M. A. Bettencourt, "The origins of scaling in cities," *Science*, vol. 340, no. 6139, pp. 1438–1441, Jun. 2013.
- [35] A. V. D. Woude, A. Hayami, and J. D. Vries, *Urbanization in History: A Process of Dynamic Interactions*. Oxford University Press, 1995.
- [36] F. Guerin-Pace, "Rank-Size Distribution and the Process of Urban Growth," *Urban Stud*, vol. 32, no. 3, pp. 551–562, Apr. 1995.
- [37] N. Nakicenovic, *Global energy perspectives [...] [...]*. Cambridge [u.a.: Cambridge Univ. Press, 1998.
- [38] A. Grübler, *The rise and fall of infrastructures: dynamics of evolution and technological change in transport*. Physica-Verlag, 1990.
- [39] B. Tal, "Capitalizing on the Upcoming Infrastructure Stimulus." CIBC World Market, 2013.
- [40] R. Dobbs, H. Pohl, D.-Y. Lin, J. Mischke, N. Garemo, J. Hexter, S. Matzinger, R. Palter, and R. Nanavatty, "Infrastructure productivity: How to save \$1 trillion a year," McKinsey Global Institute, Jan. 2013.
- [41] R. J. Cole, "Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems," *Building and Environment*, vol. 34, no. 3, pp. 335–348, May 1998.
- [42] A. Horvath, *Construction materials and the environment*, vol. 29. 2004.
- [43] IPCC, "Climate Change 2013, The Physical Basis," 2013.
- [44] Great Britain, *The economics of climate change: the Stern review*. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2007.
- [45] GEA, *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 2012.
- [46] S. Barles, "Urban Metabolism of Paris and Its Region," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 13, no. 6, pp. 898–913, Dec. 2009.
- [47] S. Salat, *Les Villes et les Formes*. Hermann, 2011.
- [48] C. Kennedy, J. Steinberger, B. Gasson, Y. Hansen, T. Hillman, M. Havránek, D. Pataki, A. Phdungsilp, A. Ramaswami, and G. V. Mendez, "Methodology for inventorying greenhouse gas emissions from global cities," *Energy Policy*, vol. 38, no. 9, pp. 4828–4837, Sep. 2010.

- [49] G. P. Peters, "From production-based to consumption-based national emission inventories," *Ecological Economics*, vol. 65, no. 1, pp. 13–23, März 2008.
- [50] E. G. Hertwich and G. P. Peters, "Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, no. 16, pp. 6414–6420, 2009.
- [51] S. J. Davis and K. Caldeira, "Consumption-based accounting of CO₂ emissions," *PNAS*, Mar. 2010.
- [52] T. Baynes, M. Lenzen, J. K. Steinberger, and X. Bai, "Comparison of household consumption and regional production approaches to assess urban energy use and implications for policy," *Energy Policy*, vol. 39, no. 11, pp. 7298–7309, 2011.
- [53] A. Ramaswami and A. Chavez, "What Metrics Best Describe the Energy Efficiency and Carbon Emissions of Cities? Insights from Theory and Data from 20 US Cities," *Environmental Research Letters*, Jan. 2013.
- [54] S. Murakami, S. Kawakubo, Y. Asami, T. Ikaga, N. Yamaguchi, and S. Kaburagi, "Development of a comprehensive city assessment tool: CASBEE-City," *Building Research & Information*, vol. 39, no. 3, pp. 195–210, 2011.
- [55] A. Grubler, X. Bai, T. Buettner, S. Dhakal, D. Fisk, T. Ichinose, J. Keirstead, G. Sammer, D. Satterthwaite, N. Schulz, N. Shah, J. Steinberger, and H. Weisz, "Urban Energy Systems," in *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*, Cambridge / New York: IIASA, Austria and Cambridge University Press, 2012.
- [56] ICLEI, C40, WRI, "Global Protocol for Community-scale GHG emissions," May 2012.
- [57] O. Gilham, "What is Sprawl?," in *The Urban Design Reader*, M. Larice and E. Macdonald, Eds. Routledge, New York, 2007, pp. 287–307.
- [58] P. B. Goodwin, S. Hallett, F. B. Laube, and G. Stokes, "Transport: The New Realism," Transport Studies Unit, University of Oxford, Oxford, U.K., Technical Report, 1991.
- [59] D. B. Müller, G. Liu, A. N. Løvik, R. Modaresi, S. Pauliuk, F. S. Steinhoff, and H. Brattebø, "Carbon emissions from infrastructure development," *Nature Climate Change*, vol. Submitted, 2013.
- [60] European Environment Agency and European Commission, *Urban sprawl in Europe: the ignored challenge*. Copenhagen, Denmark : Luxembourg: European Environment Agency ; Office for Official Publications of the European Communities, [distributor], 2006.
- [61] M. Kasanko, J. Barredo Cano, C. Lavallo, M. McCormick, L. Demicheli, V. Sagris, and A. Brezger, "Are European Cities Becoming Dispersed? A Comparative Analysis of 15 European Urban Areas," 2006. [Online]. Available: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/125>. [Accessed: 11-Oct-2013].

- [62] L. D. Frank and G. Pivo, "Impacts of mixed use and density on utilization of three modes of travel: single-occupant vehicle, transit, and walking," *Transportation research record*, pp. 44–44, 1994.
- [63] R. Cervero and K. Kockelman, "Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 2, no. 3, pp. 199–219, 1997.
- [64] R. Ewing and R. Cervero, "Travel and the Built Environment: A Synthesis," *Transportation Research Record*, vol. 1780, no. 1, pp. 87–114, Jan. 2001.
- [65] J. R. Kenworthy and F. B. Laube, "Patterns of Automobile Dependence in Cities: An International Overview of Key Physical and Economic Dimensions and Some Implications for Urban Policy," vol. 33, pp. 691–723, 1999.
- [66] E. L. Glaeser and M. E. Kahn, "The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development," *Journal of Urban Economics*, vol. 67, no. 3, pp. 404–418, May 2010.
- [67] T. A. Clark, "Metropolitan density, energy efficiency and carbon emissions: Multi-attribute tradeoffs and their policy implications," *Energy Policy*, vol. 53, pp. 413–428, Feb. 2013.
- [68] U.S. Department of Transportation, "2009 National Household Travel Survey," U.S. Department of Transportation, Washinton, D.C., 2009.
- [69] T. Bunting, P. Fillion, and H. Priston, "Density Gradients in Canadian Metropolitan Regions, 1971-96: Differential Patterns of Central Area and Suburban Growth and Change," *Urban Studies*, vol. 39, no. 13, pp. 2531–2552, Dec. 2002.
- [70] B. E. Saelens, J. F. Sallis, and L. D. Frank, "Environmental correlates of walking and cycling: Findings from the transportation, urban design, and planning literatures," *Annals of Behavioral Medicine*, vol. 25, pp. 80–91, Apr. 2003.
- [71] A. Forsyth, J. M. Oakes, K. H. Schmitz, and M. Hearst, "Does Residential Density Increase Walking and Other Physical Activity?," *Urban Stud*, vol. 44, no. 4, pp. 679–697, Apr. 2007.
- [72] R. Cervero and M. Duncan, "'Which Reduces Vehicle Travel More: Jobs-Housing Balance or Retail-Housing Mixing?," *Journal of the American Planning Association*, vol. 72, no. 4, pp. 475–490, 2006.
- [73] P. Rickwood, G. Glazebrook, and G. Searle, "Urban Structure and Energy—A Review," *Urban Policy and Research*, vol. 26, no. 1, pp. 57–81, Apr. 2008.
- [74] L. Kamal-Chaoui and A. Roberts, "Competitive cities and climate change," OECD Publishing, Paris, OECD Regional Development Working Papers 2, 2009.
- [75] V. Cheng, "Understanding density and high density," in *Designing High-Density Cities*, London; Sterling, VA: Earthscan, 2009.
- [76] S. Salat, *Cities and Forms*. Hermann, 2011.

- [77] D. H. Picken and B. D. Ilozor, "Height and construction costs of buildings in Hong Kong," *Construction Management and Economics*, vol. 21, no. 2, pp. 107–111, Feb. 2003.
- [78] I. Q. Blackman and D. H. Picken, "Height and Construction Costs of Residential High-Rise Buildings in Shanghai," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 136, no. 11, pp. 1169–1180, 2010.
- [79] C. Ratti, N. Baker, and K. Steemers, "Energy consumption and urban texture," *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 7, pp. 762–776, 2005.
- [80] S. Salat, "Energy loads, CO2 emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behaviour," *Build. Res. Informat.*, vol. 37, no. 5–6, pp. 598–609, 2009.
- [81] North Shore City, "Mixed use town center. Good solutions guide for mixed use development in town centers," 2005.
- [82] P. Myers, R. O'Leary, and R. Helstroom, "Multi Unit Residential Buildings Energy & Peak Demand Study," *Energy News*, vol. 23, no. 4, pp. 113–116, 2005.
- [83] A. Perkins, S. Hamnett, S. Pullen, R. Zito, and D. Trebilcock, "Transport, Housing and Urban Form: The Life Cycle Energy Consumption and Emissions of City Centre Apartments Compared with Suburban Dwellings," *Urban Policy and Research*, vol. 27, no. 4, pp. 377–396, 2009.
- [84] L. Lipper, W. Nabb, A. Meybeck, and R. Sessa, "'Climate-Smart' Agriculture: Policies, Practices and Financing for Food Security, Adaptation and Mitigation," Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2010.
- [85] L. Bourdic, S. Salat, and C. Nowacki, "Assessing cities: a new system of cross-scale spatial indicators," *Building Research & Information*, vol. 40, no. 5, pp. 592–605, 2012.
- [86] E. McCormack, G. Scott Rutherford, and M. Wilkinson, "Travel Impacts of Mixed Land Use Neighborhoods in Seattle, Washington," *Transportation Research Record*, vol. 1780, no. 1, pp. 25–32, Jan. 2001.
- [87] E. Hoppenbrouwer and E. Louw, "Mixed-use development: Theory and practice in Amsterdam's Eastern Docklands," *European Planning Studies*, vol. 13, no. 7, pp. 967–983, 2005.
- [88] N. Larsson, S. Salat, L. Bourdic, and F. Hovorka, "From Smart Grids to Synergy Grids," in *Proceedings of the World Sustainable Building Conference*, Helsinki, 2011.
- [89] S. Marshall, *Streets & patterns*. London; New York: Spon, 2005.
- [90] W. G. Hansen, "How Accessibility Shapes Land Use," *Journal of the American Institute of Planners*, vol. 25, no. 2, pp. 73–76, May 1959.
- [91] D. R. Ingram, "The concept of accessibility: A search for an operational form," *Regional Studies*, vol. 5, no. 2, pp. 101–107, Jul. 1971.

- [92] M. Wachs and T. G. Kumagai, "Physical accessibility as a social indicator," *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 7, no. 5, pp. 437–456, Oct. 1973.
- [93] C. Schattner, L. Bourdic, and S. Salat, "Scaling of green spaces in Paris and accessibility," Paris, Working Paper, 2012.
- [94] J. DeCicco and F. Fung, *Global Warming on the Road: The Climate Impact of America's Automobiles*. 2006.
- [95] F. Moavenzadeh and M. . Markow, *Moving Millions. Transport Strategies for Sustainable Development in Megacities*, vol. 14. EUA: Springer, 2007.
- [96] G. Sammer, "Transport Systems," in *Energizing Sustainable Cities: Assessing Urban Energy*, A. Grubler and D. Fisk, Eds. Routledge, 2013, pp. 135–154.
- [97] J. R. Kenworthy and F. Laube, "The Millennium Cities Database for Sustainable Transport," Perth, International Union of Public Transport (UITP), Brussels and Institute for Sustainability and Technology Policy (ISTP), 2001.
- [98] J. Vivier, "Mobility in Cities Database: Analysis and Recommendations," Brussels, Report for the International Association of Public Transport, 2006.
- [99] DGEC, "Synthèse, Scénarios prospectifs. Énergie – Climat – Air à l'horizon 2030," 2011.
- [100] Tokyo Metropolitan Government, "Environmental White Paper 2006," Tokyo, 2006.
- [101] Mayor of London, *Green light to clean power: the Mayor's energy strategy*. London: Greater London Authority, 2004.
- [102] C. A. Kennedy, A. Ramaswami, S. Carney, and S. Dhakal, "Greenhouse gas emission baselines for global cities and metropolitan regions," in *Cities and climate change*, France, 2009.
- [103] B. Howard, L. Parshall, J. Thompson, S. Hammer, J. Dickinson, and V. Modi, "Spatial distribution of urban building energy consumption by end use," *Energy and Buildings*, vol. 45, pp. 141–151, Feb. 2012.
- [104] D. Ludwig, M. Klärle, and S. Lanig, "Automatisierte Standortanalyse für die Solarnutzung auf Dachflächen über hochaufgelöste Laserscanningdaten," 2008.
- [105] APUR, "Cadastre solaire," <http://www.cadastresolaire.paris.fr/>, 2013. .
- [106] D. Salon, M. G. Boarnet, S. Handy, S. Spears, and G. Tal, "How do local actions affect VMT? A critical review of the empirical evidence," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 17, no. 7, pp. 495–508, Oct. 2012.
- [107] R. Ewing and R. Cervero, "Travel and the Built Environment: A Meta-analysis," *Journal of the American Planning Association*, vol. 76, no. 3, pp. 265–294, 2010.
- [108] National Research Council, *Cities transformed: demographic change and its implications in the developing world*. National Academies Press, 2003.

- [109] J. A. Black, A. Paez, and P. A. Suthanaya, "Sustainable Urban Transportation: Performance Indicators and Some Analytical Approaches," *Journal of Urban Planning and Development*, vol. 128, no. 4, pp. 184–209, Dec. 2002.
- [110] J. Levine, J. Grengs, Q. Shen, and Q. Shen, "Does Accessibility Require Density or Speed?," *Journal of the American Planning Association*, vol. 78, no. 2, pp. 157–172, 2012.
- [111] D. Banister, K. Anderton, D. Bonilla, M. Givoni, and T. Schwanen, "Transportation and the Environment," *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 36, pp. 247–270, 2011.
- [112] S. Hankey and J. D. Marshall, "Impacts of urban form on future US passenger-vehicle greenhouse gas emissions," *Energy Policy*, vol. 38, no. 9, pp. 4880–4887, Sep. 2010.
- [113] K. Axhausen, "Accessibility Long Term Perspectives," *Journal of Transport and Land Use*, vol. 1, no. 2, pp. 5–22, Nov. 2008.
- [114] I. Salomon and P. L. Mokhtarian, "What happens when mobility-inclined market segments face accessibility-enhancing policies?," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 3, no. 3, pp. 129–140, May 1998.
- [115] P. Næss, "Accessibility, Activity Participation and Location of Activities: Exploring the Links between Residential Location and Travel Behaviour," *Urban Stud*, vol. 43, no. 3, pp. 627–652, Mar. 2006.
- [116] R. Kitamura, T. Akiyama, T. Yamamoto, and T. Golob, "Accessibility in a Metropolis: Toward a Better Understanding of Land Use and Travel," *Transportation Research Record*, vol. 1780, no. 1, pp. 64–75, Jan. 2001.
- [117] C. Lee and A. V. Moucon, "The 3Ds+R: Quantifying land use and urban form correlates of walking," *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, vol. 11, no. 3, 2006.
- [118] P. Naess, "Urban Planning and Sustainable Development," *European Planning Studies*, vol. 9, no. 4, pp. 203–524, 2001.
- [119] P. Hartoft-Nielsen, *Residential Location and Travel Behaviour*. Hørsholm: Danish Forest and Landscape Research Institute., 2001.
- [120] R. Cervero, "Stockholm's Rail-served Satellites," *Cities*, vol. 12, no. 1, pp. 41–51, 1995.
- [121] M. J. H. Mogridge, "Transport, Land Use and Energy Interaction," *Urban Studies*, vol. 22, no. 6, pp. 481–492, 1985.
- [122] V. Fouchier, "Urban Density and Mobility in the Isle-de-France," in *Ministerio de Fomento, Proceedings of the Eight Conference on Urban and Regional Research*, Madrid, España., 1998, pp. 285–300.
- [123] P. W. G. Newman and Kenworthy, *Cities and Automobile Dependence: a Sourcebook*. London, UK: Gower Technical, 1989.

- [124] B. B. Zhou and K. M. Kockelman, "Self-selection in home choice: Use of treatment effects in evaluating relationship between built environment and travel behavior," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2077, no. 1, pp. 54–61, 2008.
- [125] ADEME, "Comparateur eco-déplacements." [Online]. Available: <http://www.ademe.fr/eco-comparateur/>.
- [126] G. W. Heath, R. C. Brownson, J. Kruger, R. Miles, K. E. Powell, and L. T. Ramsey, "The effectiveness of urban design and land use and transport policies and practices to increase physical activity: a systematic review," *Journal of Physical Activity & Health*, vol. 3, p. S55, 2006.
- [127] "Urban Audit." [Online]. Available: www.urbanaudit.org.
- [128] W. Steingrube and R. Boerdlein, "Greifswald – die Fahrradstadt, Ergebnisse der Befragung zur Verkehrsmittel der Greifswalder Bevölkerung 2009 (Greifswald – The Bicycle City, Results of a survey for the modal split of the Greifswald population) .," Institut für Geographie und Geologie der Universität Greifswald, Greifswald, Germany, 2009.
- [129] N. Heynen, M. Kaika, and E. Swyngedouw, *In the Nature of Cities. Urban Political Ecology and the Politics of Urban Metabolism*. London / New York: Routledge, 2006.
- [130] S. . Gill, J. . Handley, A. . Ennos, and S. Pauleit, "Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure," *Built Environment*, vol. 33, no. 1, pp. 115–133, 2007.
- [131] R. I. McDonald, "Global urbanization: can ecologists identify a sustainable way forward?," *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 6, pp. 99–104, Mar. 2008.
- [132] M. W. Strohbach, E. Arnold, and D. Haase, "The carbon footprint of urban green space—A life cycle approach," *Landscape and Urban Planning*, vol. 104, no. 2, pp. 220–229, Feb. 2012.
- [133] R. G. Pratt, "The Smart Grid: An Estimation of the Energy and CO2 Benefits. U.S.," Department of Energy., 2010.
- [134] J. Keirstead and N. Shah, "Urban energy systems planning, design and implementation," in *Energizing Sustainable Cities: Assessing Urban Energy*, A. Grubler and D. Fisk, Eds. Routledge, 2013, pp. 155–162.

PARTIE II

STRUCTURES SPATIALES URBAINES ET TRANSITION

ENERGETIQUE

MESSAGES CLES DE LA PARTIE

1. La structure spatiale des villes a été profondément modifiée au cours des dernières décennies, et marquée par l'étalement urbain, la fragmentation et la déconnection des territoires. Le développement urbain à faible densité, est un phénomène généralisé à l'échelle mondiale dans les pays développés et dans les pays émergents. Les villes françaises sont passées du modèle de la ville dense et accessible à un modèle de l'agglomération élargie, distendue, fragmentée, discontinue et hétérogène. En France, un citoyen sur quatre vit aujourd'hui dans ces franges périurbaines à basse densité, aux limites de la ville et de la campagne et qui couvrent maintenant 10 % du territoire national.
2. L'étalement urbain et la fragmentation des territoires résultent d'une combinaison de facteurs socio-économiques. L'un des principaux moteurs est la différence de prix entre le foncier rural agricole et le foncier urbain. Le deuxième moteur de l'étalement et de la fragmentation est lié à la voiture individuelle et au faible coût de l'énergie. Ceux-ci ont conjointement causé l'augmentation des distances moyennes parcourues. Enfin, les politiques successives de zonage territorial ont conduit à la spécialisation et à la mono-fonctionnalité des territoires. La séparation des fonctions a contribué en retour à la fragmentation des territoires et au renforcement de la dépendance à l'automobile.
3. L'étalement urbain et la fragmentation des territoires ont un impact très fort sur les consommations énergétiques, notamment pour les transports. La densité urbaine moyenne, mais également la distribution de la densité au sein d'un même territoire, influent de façon considérable sur les distances moyennes parcourues, et donc sur les consommations énergétiques et sur les émissions carbone liées au transport.
4. La consommation énergétique pour les transports croît plus vite que l'expansion spatiale avec une élasticité de 1,3. L'analyse de 34 villes européennes révèle que les facteurs qui influencent le plus la croissance de la consommation sont l'homogénéité dans la distribution de la densité (évaluée par des mesures d'entropie) qui accroît la consommation, et l'articulation plus ou moins polycentrique de la densité (évaluée par des mesures de coefficient de hiérarchie spatiale) qui diminue la consommation. Sur les quatre facteurs qui influencent la demande énergétique de transport, un est économique, trois sont spatiaux et les deux qui présentent les plus fortes élasticités sont l'homogénéité spatiale (élasticité positive) et l'articulation de la densité (élasticité négative). Ces analyses indiquent les deux stratégies qui ont le plus d'impact sur la consommation énergétique de transport: limiter l'expansion spatiale; articuler la densité de manière polycentrique.

5. La faible densité urbaine est par ailleurs souvent liée à un urbanisme mono-fonctionnel (de type maison individuelle, ou de type grands ensembles), pour lequel les consommations énergétiques pour le bâtiment sont les plus élevées. Les consommations énergétiques totales par habitant varient ainsi d'un facteur 3 entre les zones urbaines denses et compactes et les zones urbaines étalées et fragmentées.
6. L'étalement et la fragmentation urbaine ont un impact fort sur le pouvoir d'achat des ménages et la compétitivité des entreprises au travers des consommations énergétiques. Ils ont également un coût élevé pour la collectivité, car ils contribuent à l'augmentation des coûts d'infrastructure par habitant, jusqu'à 4 fois plus élevés dans les zones à faible densité.
7. Le rôle des pouvoirs publics tant à l'échelon national que local dans la lutte contre l'étalement urbain et dans l'articulation polycentrique de la densité autour des hubs de transport en commun est crucial. La Caisse des Dépôts par son rôle d'investisseur de long terme est à l'articulation des différents mécanismes agissant sur la mise en œuvre d'une planification intégrée du foncier et des infrastructures qui oriente sur le temps long la structure spatiale des territoires.

CHAPITRE I

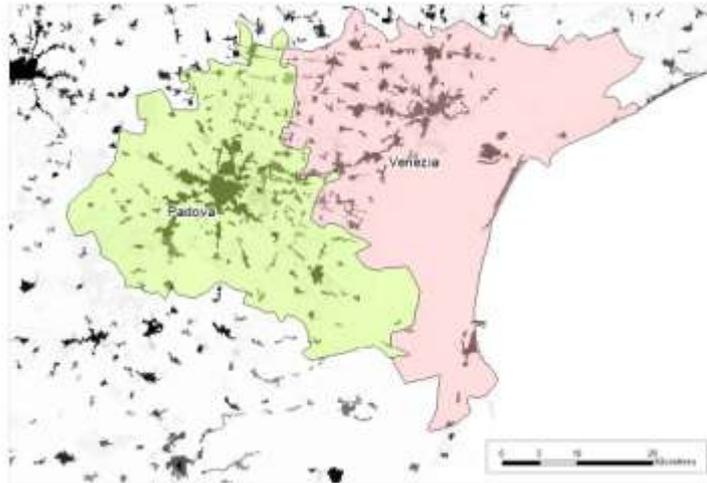
EVOLUTION DES STRUCTURES SPATIALES URBAINES



Carte de nuit de l'Europe de l'Ouest

Comprendre les relations entre la structure spatiale des villes et l'énergie est un des principaux défis de la planification urbaine durable. Ces relations interviennent à plusieurs échelles : les grandes régions urbaines, les villes, les tissus étudiés par la morphologie urbaine, les groupes d'îlots, les îlots, les rues et les bâtiments. À toutes les échelles, ce qui importe est moins la nature des éléments eux-mêmes (la localisation des activités résidentielles et économiques, la forme géométrique des rues, le découpage du sol en îlots et en parcelles, les bâtiments) que la manière dont ils sont reliés et leur interdépendance spatiale. Cette partie décrit la structure spatiale à très grande échelle. Elle met en évidence l'apport d'une quantification fine de la forme urbaine en complément d'indicateurs socio-économiques plus classiques dans un contexte d'urbanisation étalée et fragmentée. Les vitesses importantes permises par l'automobile ont favorisé l'étalement urbain, la déconcentration des habitations, et l'urbanisation des zones périurbaines. En plus d'une vitesse supérieure à celle des transports en commun, l'automobile permet une accessibilité presque uniforme sur le territoire, alors que les transports en commun structurent le territoire en un réseau hiérarchisé de nœuds et de liens, en concentrant la densité autour du réseau. Ils nécessitent de plus une densité minimale pour bien fonctionner. L'automobile a provoqué une urbanisation diffuse, fragmentée, consommant beaucoup d'espace, accroissant fortement la demande en énergie à la fois pour les transports avec

une augmentation tendancielle des distances parcourues et pour les consommations énergétiques élevées liées au chauffage de maison isolées.



Étalement et fragmentation urbaine à Mestre et Padoue (Italie)

L'urbanisation rapide des dernières années a étendu l'emprise physique de nombreuses villes bien au-delà de leurs limites administratives, en constituant des agglomérations étalées et fragmentées connues sous le nom de zones métropolitaines. Malgré leur absence de statut légal, les zones métropolitaines en dehors des villes historiques, comportent beaucoup plus d'habitants que les cœurs urbains. L'expansion spatiale périphérique explique une grande partie de la croissance économique et des changements sociaux. Les *patterns* de développement métropolitain affectent en retour les modes de consommation, la demande de transport, et la distribution des richesses. Comprendre la croissance et le changement des économies urbaines et de leur intensité énergétique implique de comprendre la croissance et la transformation des zones métropolitaines.

L'urbanisme moderniste a provoqué une transformation sans précédent de la forme urbaine : il a aboli la rue, dissocié les bâtiments, défait le tissu urbain. Les formes modernistes de tours et de barres, qui ont remplacé les îlots à cours, sont à la fois moins denses et énergétiquement beaucoup moins efficaces que les formes historiques. La transformation simultanée des tissus urbains et des structures spatiales à grande échelle a eu un impact considérable sur nos modes de vie et sur nos consommations énergétiques. Les densités urbaines se sont distribuées en gradients où la densité devient de plus en plus faible au fur et à mesure que la ville se diffuse dans des régions de plus en plus vastes. Celles-ci fusionnent parfois en entités continentales comme la grande mégalopole de l'Est des États-Unis qui compte cent millions d'habitants et regroupe deux mégalopoles jointives de cinquante millions d'habitants chacune : l'une dont le centre de gravité économique est New York ; l'autre centrée autour de Chicago. Cette mutation des densités et des formes peut s'analyser à deux échelles complémentaires : celle du tissu morphologique et celle des structures spatiales.

1. LE DECLIN DES DENSITES URBAINES

Au début de l'ère chrétienne, Rome avait une population de 1 million d'habitants dans les limites des murs de la ville qui enfermaient un peu plus de 15 km², soit 70 000 hab/km², c'est-à-dire la population de Dallas dans moins d'un cinquantième de sa surface. Ce type de densité a caractérisé les plus importantes cités du monde jusqu'au début du XX^e siècle. Les densités urbaines avaient toujours été jusqu'alors de l'ordre de 10 000 à 20 000 habitants au km². Peu de villes étaient moins denses tandis que quelques-unes l'étaient beaucoup plus. On pense que la densité de Babylone était de 30 000 hab/km² en 430 avant J.-C. ; Gènes comptait 60 000 hab/km² à la fin du Moyen Âge et Edinbourg était pratiquement aussi dense en 1750.

Les villes sont ainsi des points d'intensité maximale dans les zones de peuplement humain. Dans les termes de Lewis Mumford, une ville est un « point de concentration maximale du pouvoir et de la culture d'une communauté»[1]. Ainsi que le remarque Spiro Kostof, l'intensité et la concentration n'ont rien à voir avec les valeurs absolues de population mais avec la densité du peuplement [2]. La grande majorité des villes du monde préindustriel étaient petites. Sur les 3 000 villes du Saint Empire romain germanique seulement 12 à 15 (dont Cologne et Lübeck) avaient plus de 10 000 habitants. Il y avait très peu de grandes métropoles dans l'Antiquité et parmi elles Rome au II^e siècle et Chang'an au VIII^e siècle ont été les seules cités d'un million d'habitants. Au Moyen Âge ces tailles prodigieuses pour l'époque sont atteintes par Constantinople, Cordoue et Palerme, les deux dernières atteignirent environ 500 000 habitants au XIII^e et XIV^e siècles. Bagdad a pu compter un million d'habitants avant d'être détruite par les Mongols en 1258. Nankin au XV^e siècle et à la fin de l'ère impériale Pékin, Suzhou et Canton étaient de très grandes villes. Pékin resta la plus grande ville du monde (et celle où le PIB par habitant était le plus élevé) jusqu'à 1 800, avec une population de 2 à 3 millions d'habitants avant d'être dépassée par Londres. Ses seules rivales au XVII^e siècle étaient Istanbul, Agra et Delhi. Mais à l'exception de ces quelques très grandes villes, le monde urbain était à la fois limité et dense. Ce n'est plus le cas aujourd'hui.

La ville a aujourd'hui changé d'échelle et la répartition spatiale de la densité s'est trouvée profondément transformée. C'est l'agglomération élargie, distendue, fragmentée, discontinue, hétérogène, qui constitue désormais la ville. Les périphéries lointaines des agglomérations sont de plus en plus atteintes par l'urbanisation. En France, un citoyen sur quatre vit aujourd'hui dans ces franges périurbaines, aux limites de la ville et de la campagne et qui couvrent maintenant 10 % du territoire national. En France, l'étalement périphérique des agglomérations se poursuit : la distance domicile travail a quasiment doublé entre 1980 et 2010 et la surface urbanisée a été multipliée par

trois pendant que la population urbaine doublait. La couronne périphérique émiétée pèse déjà en population, en moyenne, la moitié de la ville agglomérée et pourrait, d'ici quinze ans, peser autant qu'elle. Le plus souvent anarchique, cette urbanisation en tâche d'huile s'accompagne d'une dispersion excessive qui renchérit les coûts collectifs, allonge les temps de déplacement, accroît la consommation d'énergie, à l'encontre du développement durable.

En France, comme en Europe, comme dans l'ensemble du monde, les densités démographiques urbaines diminuent quels que soient les niveaux de revenu et les tailles des villes. Ces densités restent toutefois quatre fois plus élevées dans les pays à bas revenus (11 850 habitants/km² en moyenne en 2000) que dans les pays à hauts revenus (2 855 habitants/km² en 2000). Les zones urbaines d'Asie ont connu le plus fort déclin en densité de population au cours des années quatre-vingt-dix. La trajectoire de la Chine est à cet égard révélatrice de tendances très lourdes à la diminution de la densité dans les pays émergents. Au cours des deux décennies entre 1990 et 2010, les surfaces urbaines de la Chine ont été multipliées par 3,3, sous l'effet d'une croissance presque totalement concentrée dans les franges urbaines (de l'ordre de 95%), de plus en plus discontinue et fragmentée. La surface urbaine chinoise a été multipliée par 1,8 tous les 10 ans, tandis que la densité démographique urbaine diminuait d'un quart tous les dix ans, pour être divisée par deux en 20 ans. Ces densités sont aujourd'hui aux alentours de 5 700 c'est-à-dire très près du seuil critique au-dessous duquel la mise en place de stratégies d'efficacité énergétique comme le transport en commun ou le chauffage urbain deviennent économiquement non rentables. Comme l'Asie et l'Afrique ne sont qu'au début de leur transition urbaine, on peut s'attendre à un déclin prononcé de la densité dans ces zones du monde. En parallèle, la surface construite par personne augmente.

La diminution des densités urbaines au cours du XX^e siècle est une rupture historique de grande ampleur liée aux transports et aux énergies fossiles. Le développement de la voiture privée a eu une influence décisive sur l'évolution des formes urbaines. Comme la voiture privée n'est pas confinée à un certain nombre de trajets prédéterminés à la différence du transport public, elle a permis le développement urbain isotrope de zones qui étaient restées jusque-là inaccessibles. Les zones accessibles seulement en voiture ont tendu à se différencier de plus en plus des zones accessibles par le transport public, créant deux morphologies urbaines en compétition. La motorisation de masse a d'autre part compromis l'accessibilité des centres traditionnels, réduisant ainsi leur viabilité économique. Elle a de plus provoqué dans les centres la congestion du trafic, la pollution de l'air et la pollution sonore, réduisant ainsi à la fois l'efficacité du transport public et la qualité de la vie urbaine.

Aujourd'hui la densité des centres historiques reste de l'ordre de 10 000 à 20 000 hab/km² mais la densité des grandes zones mégapolitaines a chuté tout en faisant l'objet d'une répartition fragmentée. Cette chute des densités s'est accompagnée d'une grande consommation de territoires et d'une explosion des demandes énergétiques. La population de Saint Louis aux États-Unis par exemple n'est que 40 % de ce qu'elle était il y a un siècle alors que celle de l'aire métropolitaine occupe un territoire treize fois supérieur.

2. ÉTALEMENT URBAIN, DENSITÉ ET FRAGMENTATION : ENJEUX CLEFS DE STRUCTURE SPATIALE URBAINE

Qu'est-ce que l'étalement urbain

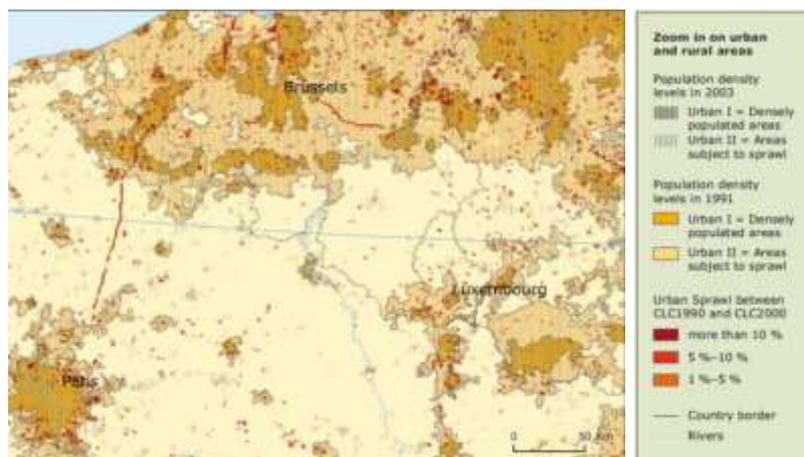
Selon les termes de l'Agence Européenne de l'Environnement [3], l'étalement urbain est un phénomène physique d'expansion spatiale des zones urbaines à faible densité. Ce phénomène incrémental de développement urbain est nourri par les conditions du marché foncier, et s'effectue au dépend des zones agricoles notamment. L'étalement urbain suit principalement deux *patterns* spécifiques.

- L'expansion sur les franges urbaines (*edge-growth*) qui contribue à la perte de compacité des zones urbaines

- L'expansion par bonds successifs (*leap-frog growth*) qui contribue à l'augmentation de la fragmentation urbaine.

L'étalement urbain est caractérisé par une faible densité urbaine, une forte fragmentation, et un manque de planification urbaine et de contrôle du découpage foncier du territoire. L'étalement urbain est à l'origine un phénomène typiquement nord-américain, associé au développement rapide et à faible densité de la *suburbia* au début du 20^{ème} siècle. Il est lié à la démocratisation de la voiture individuelle et au mythe de la maison individuelle avec jardin.

Contrairement à l'Amérique du Nord, et notamment du fait de leur histoire plus longue, les villes européennes se sont historiquement développées de façon plus compacte autour d'un cœur dense. Cette compacité de la ville européenne a rendu possible le développement de réseaux de transports publics efficaces. Le milieu du 20^{ème} siècle a cependant constitué un tournant majeur pour les villes européennes. De la même façon qu'en Amérique du Nord, la démocratisation de la voiture individuelle a radicalement modifié les mécanismes de croissance urbaine et généralisé l'étalement urbain à toute l'Europe.



Carte du Nord-Est de la France, du Luxembourg, de la Belgique et du Nord-Ouest de l'Allemagne avec les différents niveaux de densité urbaine. Cette carte montre le développement de zones urbaines à faible densité loin des centres urbains, avec un développement particulièrement important le long de l'axe TGV Paris-Bruxelles²⁵.

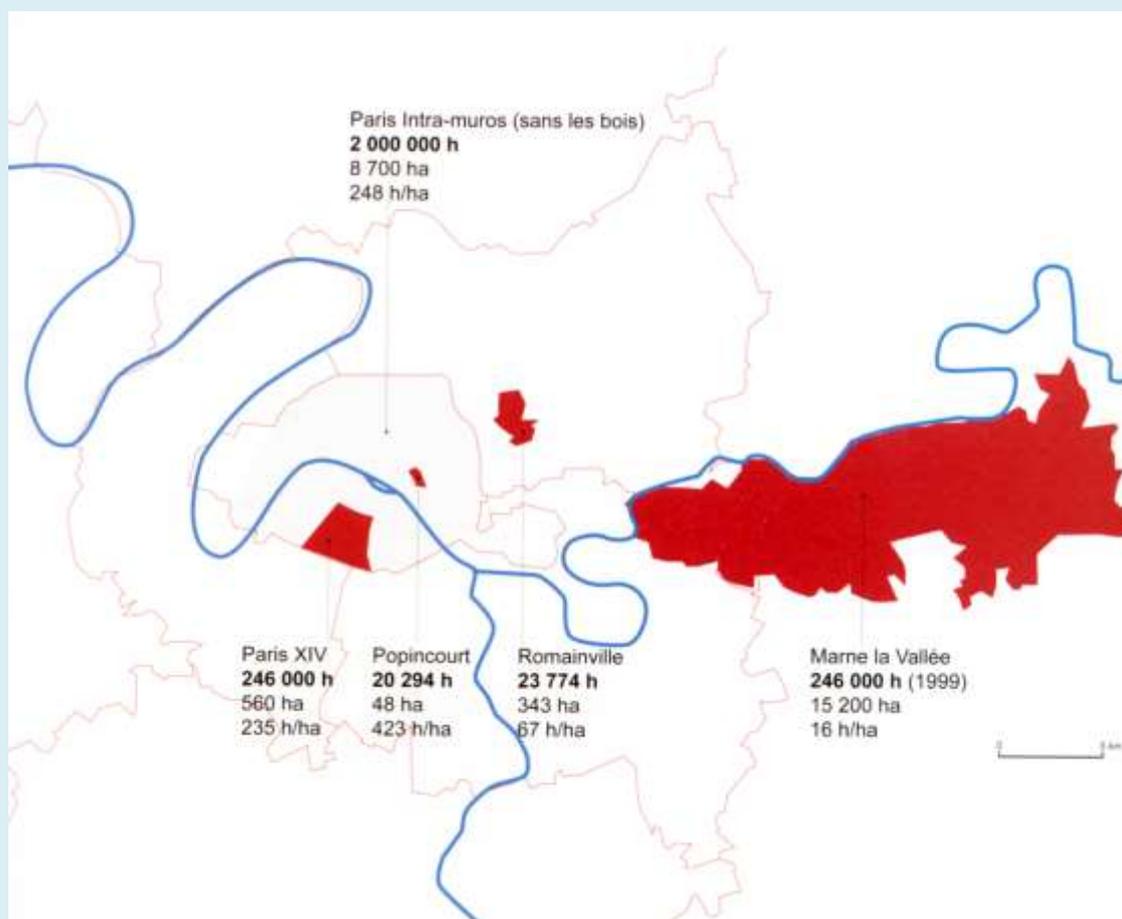
Densités urbaines : le danger des moyennes et l'importance des distributions spatiales

La valeur de la densité urbaine dépend de l'échelle de résolution à laquelle elle est mesurée, tant à la très grande échelle qu'aux petites échelles. Plus l'on *zoome* dans la carte des densités, plus on voit apparaître des fluctuations et des variations à petite échelle.

À très grande échelle tout d'abord la densité varie avec les limites des territoires mesurés. Paris apparaît ainsi comme une des capitales les plus denses d'Europe. Avec 2,16 millions d'habitants sur 85 km², Paris intra-muros a une densité moyenne de 25 500 habitants/km². Cette densité dépasse même 40 000 dans certains quartiers. Manhattan, dont la surface est d'environ 60 km² a une densité moyenne de 25 800 hab/km². La forme urbaine de Paris dont la hauteur ne dépasse pas 21 m est très différente de la verticalité de certains quartiers de Manhattan. Mais sitôt franchi le périphérique tout change. Saint-Ouen compte 10 100 habitants/km², le Val-de-Marne 5 000 habitants/km². De même à New York, dès que l'on quitte Manhattan, les densités diminuent très fortement, sous les 5000 voire sous les 2500 habitants/ km².

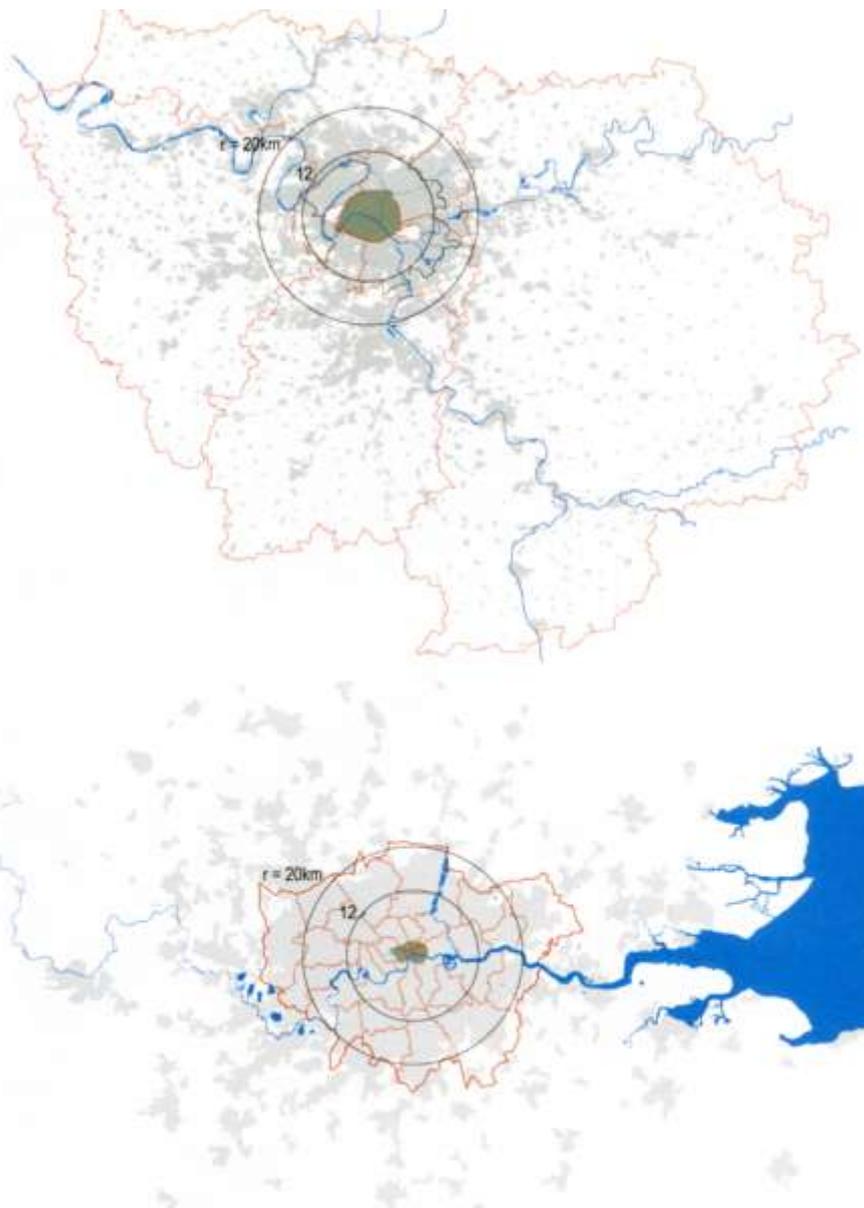
²⁵ L'étalement urbain sur le tracé de la ligne TGV Paris-Bruxelles est amplifié autour des « gares des betteraves ».

Le changement d'échelle et de densité de Paris



Variation de la densité dans le Grand Paris [4]

« Au cours du dernier siècle, Paris a dépassé ses limites pour former une agglomération où se rassemblent des territoires divers coupés par des infrastructures de transports et des forêts, où les parties habitées coexistent avec des zones agricoles, des pôles d'emplois, des secteurs naturels, des plates-formes logistiques. Le centre ancien, la Ville de Paris, ne représente plus que 5 % du territoire urbanisé et doit composer avec d'autres centralités. Aux grandes villes historiques de la banlieue sont venues s'ajouter des urbanisations nouvelles souvent marquées par des polarités dédiées à des usages spécifiques : transports, loisirs, consommation, travail. L'ensemble dessine une vaste nébuleuse, organisée selon la figure de la constellation, caractérisée par une augmentation exponentielle des dimensions, des distances et des temps de parcours. [...] Avec deux conséquences : la distance au centre, régie pendant des siècles par la règle implicite de ne pas excéder une heure de marche, soit cinq kilomètres, est largement dépassée ; du coup, la forme de la ville autrefois compacte est généralement limitée nous échappe. Son dessin n'est plus mémorisable, ses limites sont incertaines, son identité est en cause. » [4]

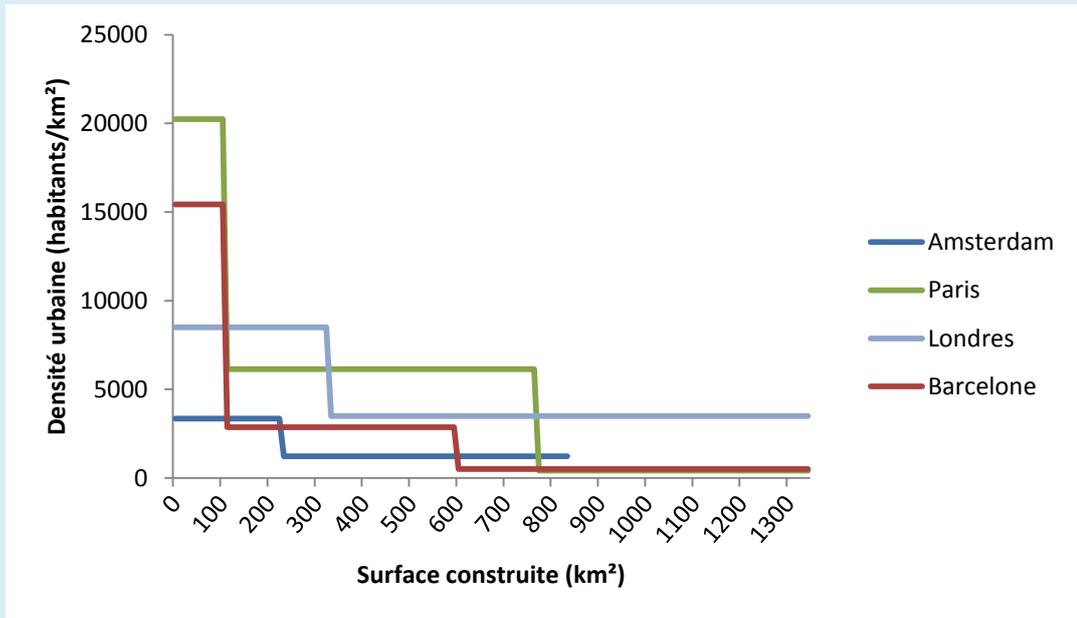


Les métropoles de Paris et Londres

Le Grand Londres, rassemblé dans la Greater London Authority, compte 8,28 millions d'habitants sur un territoire de 1 580 km², c'est-à-dire une densité de 5 200 habitants/km². La métropole parisienne avec 8,5 millions d'habitants sur 1 450 km² a une densité de 5 800 habitants/km². Si l'on compare maintenant les agglomérations, Londres est plus dense que Paris : 9,9 millions d'habitants sur 2 700 km² pour Paris, soit 3 600 habitants/km² ; 9,4 millions sur 2 260 km² pour Londres, soit 4 100 habitants/km².

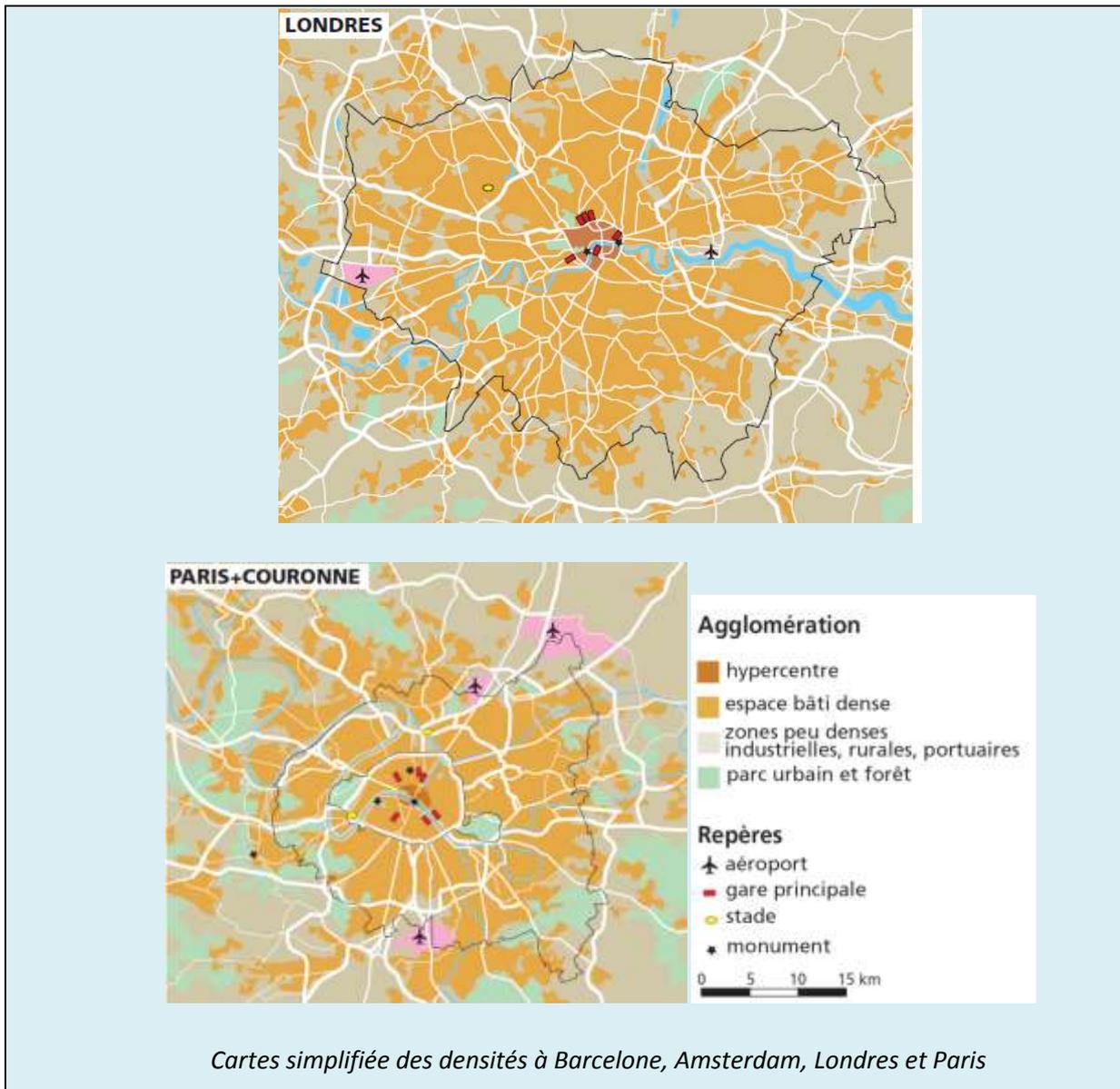
Variation des densités au sein de 4 métropoles européennes

Le graphique suivant montre les variations de densité au sein de quatre villes européennes. Le cœur dense de ces villes contraste avec la périphérie proche davantage étalée, souvent en dessous du seuil de 5000 hab/km². Les cartes suivantes présentent à la même échelle les villes correspondantes.

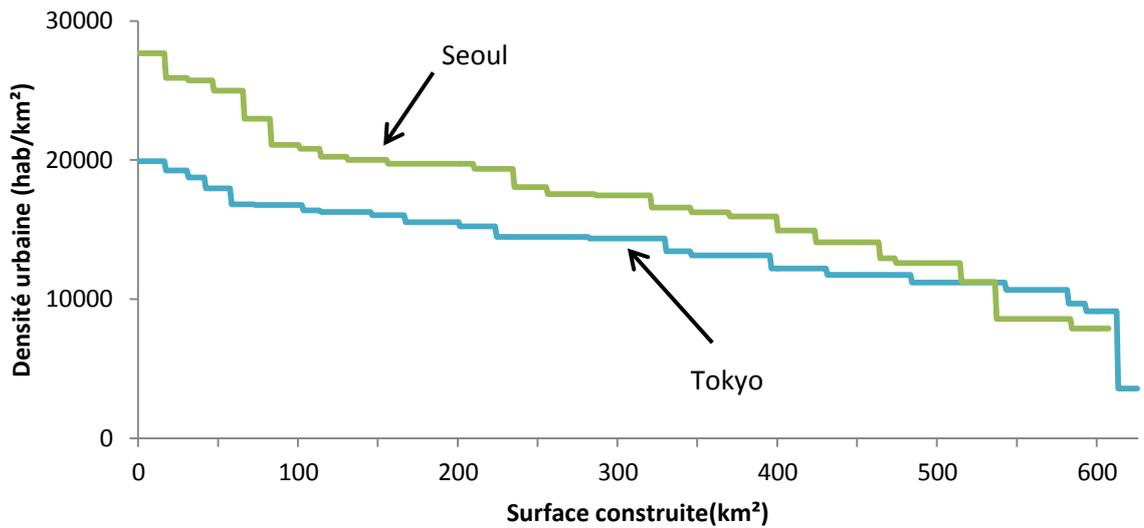


Profil simplifié des densités à Amsterdam, Paris, Londres et Barcelone

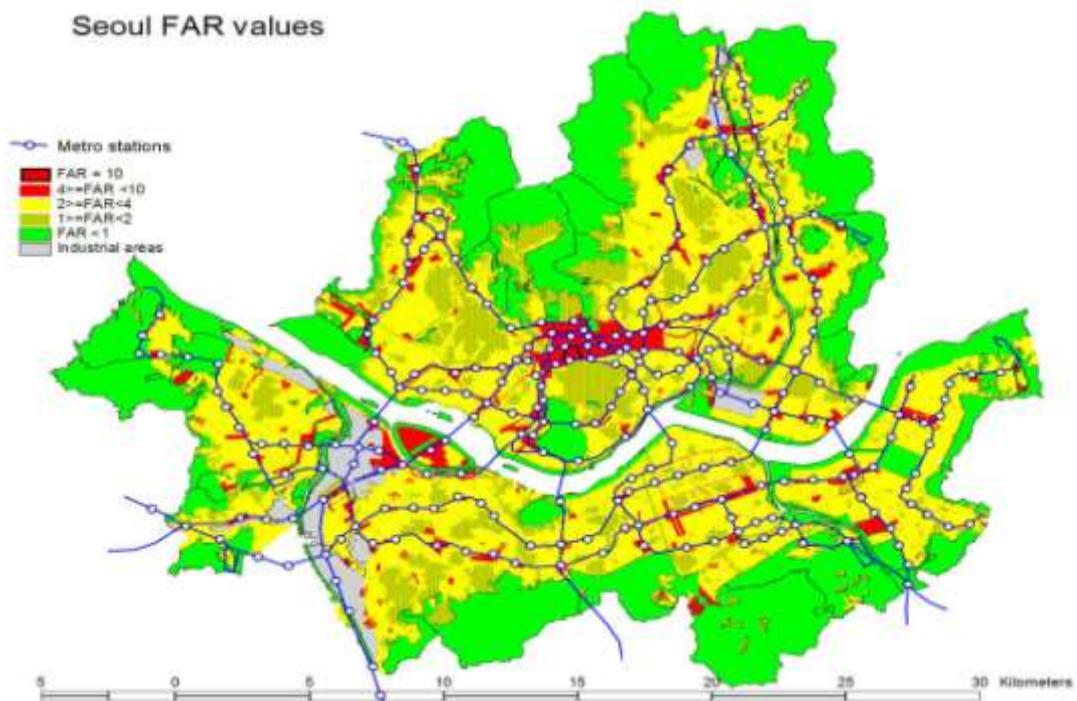




Séoul et Tokyo ont une densité beaucoup plus élevée que Paris ou Londres pour leurs premiers 10 millions d'habitants qui sont, dans chacune de ces deux villes, concentrés dans 600 km² ; avec cependant des formes urbaines très différentes : constituées à Tokyo d'un semis régulier de petites maisons ; à Séoul de bâtiments plus compacts et plus élevés, dès que l'on sort de quartiers traditionnels comme Bukchon. Mais dans ces deux villes, la densité est articulée par une maille viaire extrêmement fine avec des distances moyennes entre intersections de l'ordre de 50 mètres, et organisée le long des lignes et autour des hubs de transport en commun. La forte densité moyenne de Séoul n'empêche pas la pénétration de grandes coulées vertes, à l'intérieur de la ville, grâce à la topographie de montagnes et des collines.

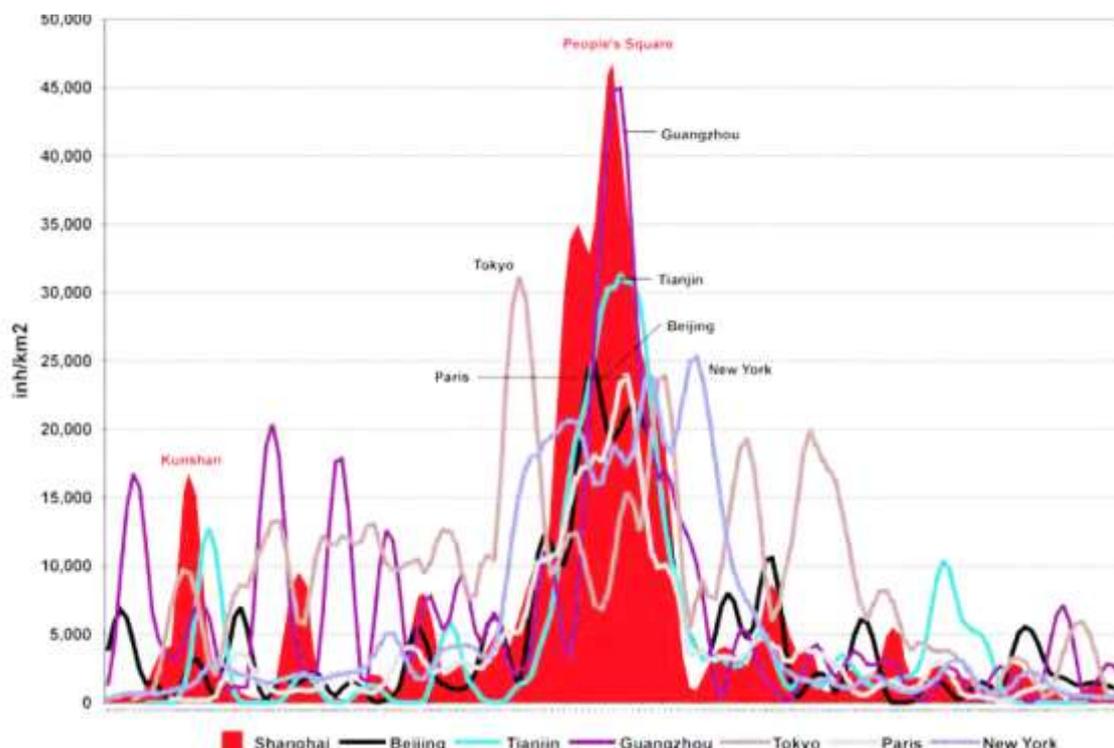


Profils de densité à Tokyo et Seoul



Séoul concentre 10 millions d'habitants sur une surface de 600 km², avec une densité articulée le long et autour des hubs du transport en commun, et organisée par une maille viaire très fine.

L'analyse par grands plateaux de densité masque des variations locales importantes qui sont révélées par une analyse spatiale sous la forme de coupes transversales.



Densités de population à Paris et dans un certain nombre de grandes régions métropolitaines en 2000 [5]. La densité est mesurée dans des rayons de 4 km en utilisant des données de densité de degrés de résolution comparables, calculées sur des gradients de 1 km avec des SIG basés sur les recensements de 2000 ou 1999.

Les profils radiaux de densité révèlent les fluctuations de grande échelle. Celle-ci n'est pas plate, mais révèle des creux et des bosses selon un *pattern* régulier : celui-ci ressemble à une onde qui s'amortit avec la distance au centre d'impact qui est ici le centre historique dense²⁶. Si l'on zoomait à l'intérieur de ce profil en vague, on découvrirait de nouvelles vaguelettes : la densité varie à toutes les échelles. On peut montrer que cette caractéristique de la densité en fait une distribution fractale répartie de manière non homogène sur le territoire.

Ces profils de densité révèlent également la différence qui sépare Paris et New York des grandes métropoles asiatiques. Paris et New York présentent de plus fortes concentrations centrales, suivies d'une densité périphérique faible voire très faible, alors que les métropoles asiatiques sont polycentriques, avec le polycentrisme le plus accusé à Tokyo.

²⁶ Cette forme caractéristique correspond à une distribution fractale comme le montrent des travaux récents [6], [7].

Densité et verticalité

La densité urbaine se distingue du COS (Coefficient d'Occupation des Sols) qui est une notion administrative définissant le nombre de m² maximal pouvant être construits sur une parcelle. Le problème du COS est qu'il ignore l'environnement direct de la parcelle et peut donner des indications trompeuses sur la densité. Une tour entourée de périphériques comme en Chine peut avoir un COS élevé mais une densité urbaine très faible, or c'est bien le nombre de personnes que peut accueillir la ville dans un minimum d'espace qui nous intéresse et non l'entassement des gens sur une parcelle, elle-même isolée. Un COS élevé n'est donc pas synonyme d'une densité élevée, surtout dans les développements modernistes où jusqu'à 90 % du sol est laissé vacant non hélas pour des espaces verts mais bien souvent pour des autoroutes urbaines et des parkings. Les quartiers constitués de tours et de barres sont en général très peu denses du fait de la taille des infrastructures nécessaires à leur desserte. En effet, si 65 % du sol est occupé par le bâti au centre de Paris contre 10 % à Pudong – le centre d'affaires de Shanghai – il faut multiplier par 6,5 la hauteur des bâtiments de Pudong pour obtenir la même densité qu'à Paris. De plus, les routes pour faire transiter par un point unique la population considérable de ces tours doivent être bien plus grandes que la maille dense de rues des quartiers traditionnels. À de rares exceptions près comme Tokyo, où les tours de Shinjuku s'insèrent dans un tissu urbain complexe, dense, stratifié verticalement, multifonctionnel, les tours semblent appeler avec elles une forme urbaine autoroutière, comme en témoigne le grand échangeur aux abords du quartier d'affaires de Boston. On observe ainsi que, paradoxalement, de nombreux quartiers de Hong Kong sont moins denses en volume construit que le Paris haussmannien malgré leurs tours de 40 étages.

On observe une forte corrélation entre la densité et des typologies urbaines caractéristiques. Avec une densité à l'îlot voisine de 1, les grands ensembles sont 4 fois plus denses que le pavillonnaire individuel (densité de 0,25) mais 4 fois moins denses que les centres anciens traditionnels (densité entre 4 et 5). Au total, il existe à Marseille ou à Paris, comme dans la plupart des villes françaises, un facteur 16 entre le centre ancien dense et la périphérie pavillonnaire.

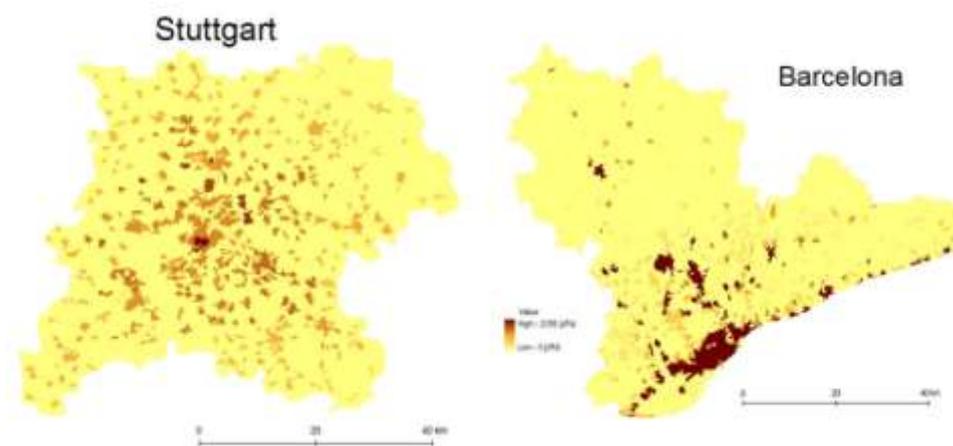
Fragmentation urbaine : clusters, entropie et hiérarchie

Les travaux de Tsai [8] montrent qu'en plus de la taille globale de la ville et de la densité de population, le degré d'inégalité de répartition de la population au sein de l'aire urbaine et le degré de *clustering* jouent un rôle important sur les *patterns* de transport urbain [9]. Un degré d'inégalité de répartition de la population au sein de l'aire urbaine peut être compris comme une forte concentration de la population dans une faible proportion de l'espace urbanisable. Le degré de

clustering, ou de fragmentation de la tache urbaine, peut être compris comme la propension des zones denses à être voisines les unes des autres.

La répartition des populations à l'intérieur de la ville rend compte de la concentration dans un faible nombre de zones ou cellules²⁷ [9]. Elle peut être caractérisées par plusieurs méthodes, dont l'indice de Gini utilisé en économie, ou des métriques de type entropie. L'entropie est utilisée en sciences physiques et en théorie de l'information pour indiquer le degré de désordre du système étudié. Elle peut dans l'analyse urbaine rendre compte de l'intensité de la concentration de la population. Cet indicateur varie entre 0 (population concentrée en une seule cellule) et 1 (distribution uniforme de la population).

Les distributions spatiales de type longue traîne ont été présentées en détail dans la première partie de ce rapport, avec les analyses rang taille menées sur les systèmes urbains (Zipf). Au niveau intra-urbain, cette loi se trouve également vérifiée, quel que soit le découpage sous-jacent [9]. Batty [10] avec d'autres auteurs utilise l'exposant de la loi de puissance comme indicateur de la configuration spatiale des densités de population. A l'échelle de la ville, une valeur élevée de l'indicateur de hiérarchie est caractéristique d'une distribution plutôt mono-centrique. A l'échelle plus locale, une forte hiérarchie indique l'existence de zones très peu urbanisées au cœur des agglomérations.

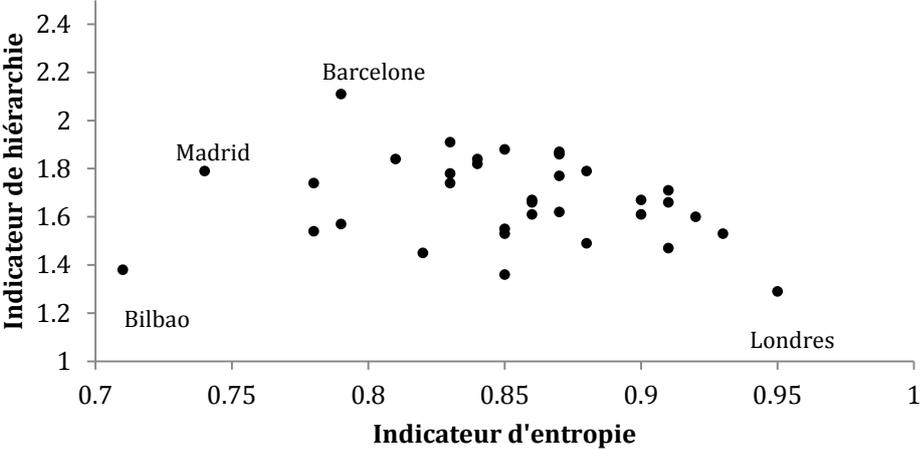


Un exemple de structure spatiale urbaine faiblement hiérarchisée (Stuttgart) et de structure urbaine très hiérarchisée (Barcelone) selon une loi rang-taille [9]

Les concepts d'entropie et de hiérarchie semblent conceptuellement et intuitivement assez proches. Le graphique suivant, basé sur les données de Le Néchet [9], qui présente ces deux indicateurs pour 34 agglomérations européennes montre cependant le contraire : il n'existe pas de

²⁷ L'aire urbaine est divisée en cellules carrées de tailles identiques pour lesquelles on calcule les densités respectives.

corrélation statistiquement significative entre ces deux indicateurs. Ces deux indicateurs apportent donc des informations complémentaires quant à la distribution spatiale de la population au sein des agglomérations. La suite de cette partie montrera notamment l'impact de ces paramètres sur les consommations énergétiques.

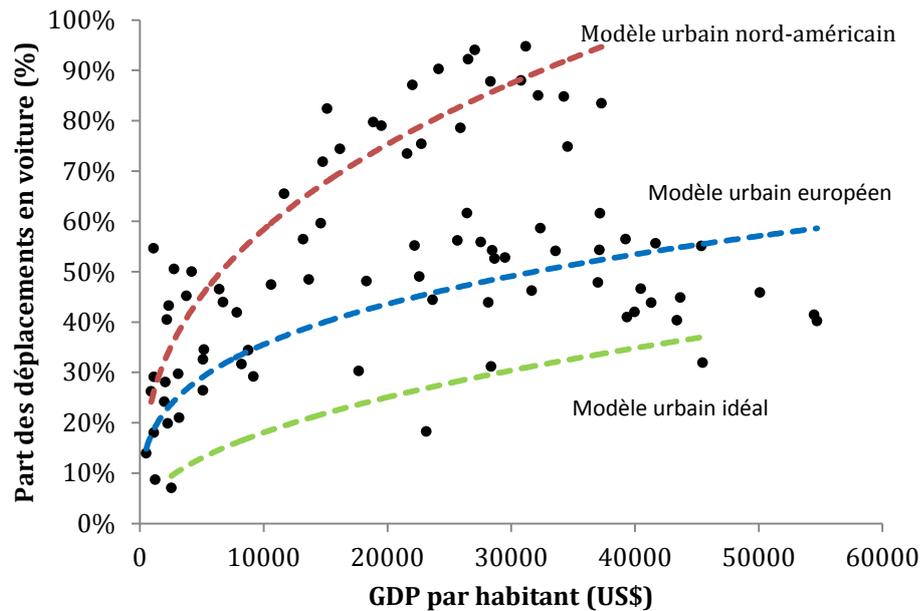


Indicateurs d'entropie et de hiérarchie pour 34 agglomérations européennes

3. DYNAMIQUE DES STRUCTURES SPATIALES EN FRANCE ET EN EUROPE

Trois types de villes : la ville piétonne, la ville du transport en commun et la ville automobile

Trois types de villes résument la croissance historique des villes européennes : la ville piétonne, la ville du transport en commun et la ville automobile [11].



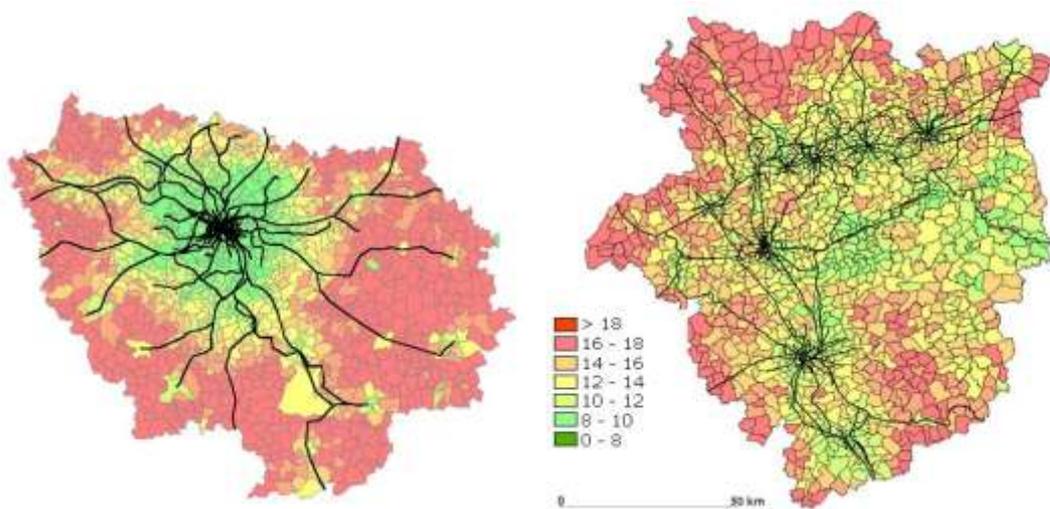
*Part modale de la voiture en fonction du PIB par habitant dans une série de villes mondiales
(données UITP 1995)*

Dans la ville piétonne la superficie de la ville est limitée à quelques centaines d'hectares, les densités de population sont fortes, de l'ordre de 10 000 à 20 000 hab/km². Tous les cœurs des villes européennes tiennent ainsi dans un mile carré voire parfois moins. Le centre ancien d'origine romaine de Turin dessine un rectangle de 770 mètres sur 710 mètres. La croissance démographique à cette époque se traduisait par une densification de l'aire urbaine. Cette ville piétonne se caractérise par une maille viaire très serrée avec une grande densité d'intersections, des distances entre intersections de l'ordre de 70 mètres favorisant la multiplication des choix de trajets et la diversification des activités dans un tissu urbain complexe et fractal offrant un grand linéaire de façade favorisant les échanges sociaux.

La ville du transport en commun s'est développée ensuite avec l'apparition de la bicyclette, du tramway et du rail urbain dans les pays industrialisés entre 1860 et 1940. Les villes mesurent alors 10

à 15 km de diamètre lorsqu'elles sont compactes, ou s'étendent plus loin en étoile le long des axes de transport en commun. Les densités de population deviennent plus faibles, entre 5 000 et 10 000 hab/km² comme on l'observe dans la première couronne parisienne. Les mailles viaires commencent à se distendre en périphérie mais présentent une grande stabilité que l'on soit à Manhattan, Paris ou Hong Kong sur l'île Victoria. La densité d'intersections demeure élevée et la distance entre intersections est de l'ordre de 120 mètres.

Enfin la ville de l'automobile apparaît en Europe après la Seconde Guerre Mondiale. Les villes s'étalent dans l'espace dans un rayon de 30 à 50 km avec en périphérie des densités de population qui descendent à 1 000 à 2 000 hab/km².



Distance moyenne parcourue par habitant et par jour en km-équivalent automobile dans l'Ile de France et dans la région Rhin Ruhr. Dans les zones rouges, la part modale de la voiture est très élevée (source LVMT).

Dans les pays européens ces trois types de villes s'organisent en schémas radioconcentriques ou en organisations polycentriques. Les périphéries européennes qui conservent la mémoire des villages et des parcellaires ruraux gardent des mailles viaires raisonnables, tandis qu'aux États-Unis comme dans les villes modernistes comme Brasilia, la logique automobile impose une maille supérieure à 400 m de côté, celle préconisée par Le Corbusier, qui chasse le piéton de ce qui n'est plus une rue mais une autoroute. Les densités d'intersections s'effondrent et sont divisées par vingt par rapport à la ville du transport en commun. Le schéma de la dépendance automobile est inscrit de manière irréversible dans la forme du tissu urbain. Dans le Nord de Pékin, dans les nouvelles villes

chinoises, la maille atteint jusqu'à des tailles de l'ordre de 800 m enfermant dans des infrastructures géantes ce qui autrefois aurait été subdivisé en des dizaines de rues.

Étalement et fragmentation

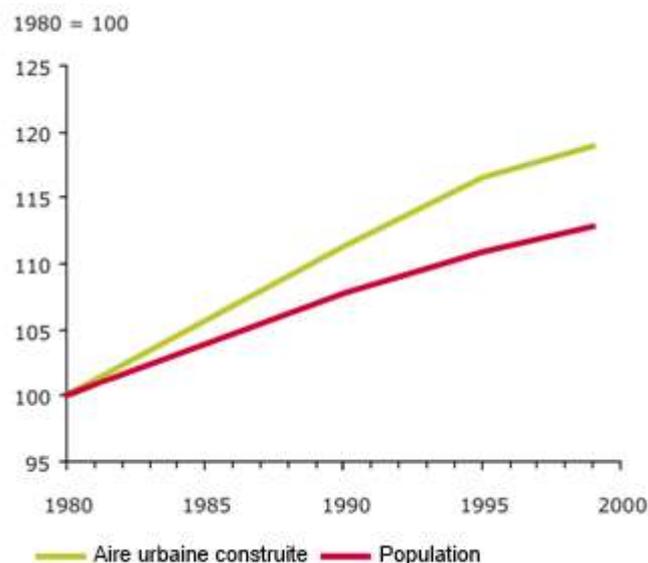
Le quartier traditionnel et l'étalement suburbain s'opposent dans leur apparence, dans leurs fonctions et dans leur caractère durable. Le quartier traditionnel, sous des formes multiples, diverses, changeant avec les cultures et les climats, est la forme de la ville jusqu'à la fin de la seconde guerre mondiale. Caractérisé par des usages mixtes, des communautés accueillantes aux piétons et une population variée – c'est une forme durable de croissance urbaine. Il a permis l'urbanisation, sans détruire l'environnement et sans exiger comme la *suburbia* une quantité exponentielle de ressources (notamment foncières) et d'énergie pour assurer son fonctionnement.

L'étalement suburbain ignore en revanche l'enracinement historique et l'expérience humaine. À l'inverse du quartier traditionnel qui a évolué de manière organique à partir de l'interaction séculaire d'une culture humaine et d'un paysage contraignant par la topographie et le rythme de ses saisons, l'étalement suburbain est une création quasi instantanée et artificielle. Sa fausse rationalité est une création idéale projetée sur un territoire abstrait pour un homme unidimensionnel et isolé, considéré seulement comme un consommateur et non plus comme le citoyen d'une communauté vivante.

L'étalement est une forme de croissance dysfonctionnelle. Il consomme l'espace à un taux alarmant tout en provoquant des problèmes de congestion et en exacerbant les inégalités et la ségrégation spatiale. À la ville historique bien définie a ainsi succédé l'étalement sans fin des périphéries sans que celles-ci parviennent à constituer de nouveaux centres. La morphologie urbaine est essentielle dans leur échec. Les périphéries récentes constituent aujourd'hui la plus grande partie du territoire des mégalo-poles ; elles concentrent la majorité de leurs populations. Elles ne sont ni assez bien délimitées, ni assez denses pour favoriser l'intégration des formes et la mixité des fonctions sur des territoires restreints. Elles sont fragmentées. Les opérations sont venues les unes après les autres occuper un territoire ouvert. Chacune porte la marque de l'époque de sa réalisation et ne renvoie souvent qu'à une seule image. D'où une série de juxtapositions parfois conflictuelles qui ne sont le plus souvent reliées que par les grands tracés préexistants marqués par les objectifs de circulation rapide. Les articulations restent faibles et les fragments coexistent avec indifférence. Le grand ensemble avoisine le vieux bourg, l'hypermarché se branche sur les voies rapides.

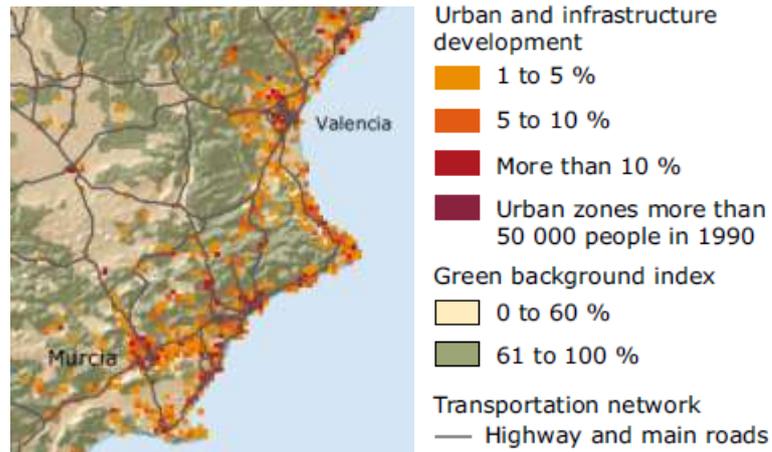
L'étalement urbain en France et en Europe au cours des dernières décennies

Le processus d'urbanisation en Europe a suivi plusieurs phases au cours des dernières décennies, avec une suburbanisation rapide après guerre, suivie par une désurbanisation, et plus récemment une ré-urbanisation. Historiquement, la croissance urbaine est principalement tirée par la croissance démographique. L'étalement urbain des dernières décennies en Europe ne peut cependant être expliqué par la croissance démographique seule. Comme le montre la figure suivante, la croissance des zones urbaines a été beaucoup plus rapide que la croissance démographique entre 1980 et 2000.



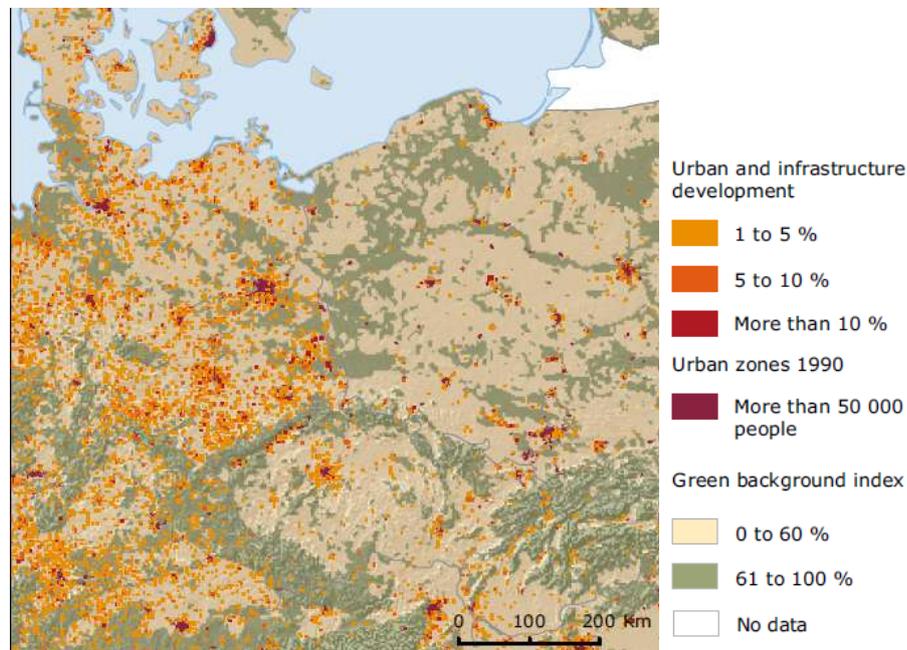
Comparaison entre croissance des zones urbaines et croissance démographique urbaine entre 1980 et 2000 en Europe (Belgique, République Tchèque, Danemark, France, Allemagne, Lettonie, Lituanie, Pays-Bas, Pologne, Slovaquie et Espagne), base 100 en 1980 [3]

Les données actuelles montrent que l'étalement urbain a été un invariant du développement urbain européen des 50 dernières années. L'étalement urbain le plus ancien a eu lieu dans les régions à forte densité démographique et à forte activité économique (Belgique, Pays-Bas, Sud et Ouest de l'Allemagne, Nord de l'Italie et région parisienne). De façon plus récente, notamment au cours de la période 1990-2000, un étalement urbain important a eu lieu les zones à forte croissance économique ayant bénéficié des aides régionales européennes. Le développement des infrastructures de transport a particulièrement contribué à ce phénomène, avec le développement rapide de petites villes rurales péri-urbaines. L'étalement urbain a également tendance à se développer le long du littoral, comme c'est le cas sur la côte est espagnole où près de 50% des sols sont maintenant artificialisés. Ce phénomène est inquiétant dans ce type de zone où les éco-systèmes naturels sont fragiles.



Étalement urbain entre Murcie et Valence entre 1990 et 2000 [3]

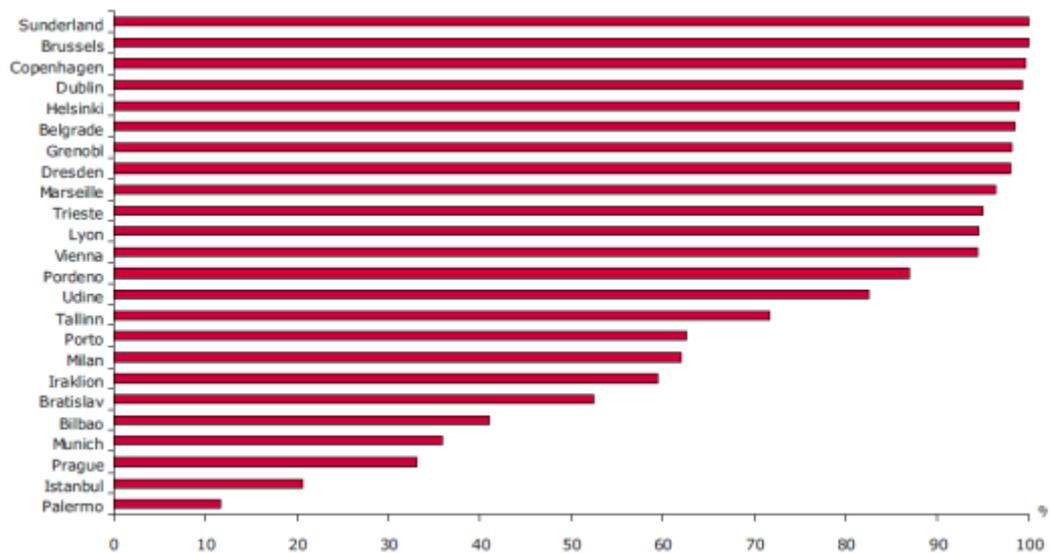
L'étalement urbain en Europe au cours des dernières décennies a suivi les dynamiques économiques et la dynamique d'unification européenne. Les investissements en provenance de l'Ouest sur la période 1990-2000 ont fait de l'Allemagne de l'Est une des zones de développement économique le plus rapide. En comparaison, l'adhésion de la Pologne à l'Union Européenne est plus récente, ainsi que le soutien économique correspondant. Ces différences en termes de développement économique sont clairement visibles en termes d'étalement urbain, comme le montre la carte suivante.



Développement économique et étalement urbain, une comparaison entre l'ex Allemagne de l'Est et la Pologne sur la période 1990-2000 [3]

Le climax de l'étalement urbain a été atteint dans la décennie 1950-1960, avec une moyenne annuelle de 3.3% d'expansion spatiale des zones urbaines. Au cours des décennies suivantes, l'étalement urbain a perduré sur les franges urbaines au dépend du foncier rural à proximité des zones urbaines [12]–[14]. Dans la décennie 1990-2000, la croissance spatiale des zones urbaines et des infrastructures associées a consommé 8 000 km², l'équivalent de la surface du Luxembourg. De plus, cette croissance spatiale s'est concentrée dans les zones où la croissance avait déjà été forte entre 1970 et 1990.

Les données disponibles montrent que les villes européennes se sont étendues de plus de 78% en surface depuis les années 1950, pour une croissance démographique de seulement 33%. Cette dynamique a contribué à la diminution globale de la compacité des villes européennes. Sous l'influence du mouvement architectural moderniste, les quartiers denses de hauteur moyenne de la ville traditionnelle européenne ont été progressivement remplacés par des barres de logements et par des logements individuels détachés ou semi-détachés. Au sein des zones étudiées par le projet MOLAND, plus de 90% des zones résidentielles construites après 1950 sont des zones à faible densité, avec moins de 80% de l'espace au sol occupé par les bâtiments et les infrastructures [3]. Sur 24 villes, seules 5 ont atteint un taux de plus de 50% de nouvelles zones résidentielles denses ; toutes sont des villes dans le sud ou dans l'Europe centrale.



Part des zones à faible densité urbaine (en %) dans les zones résidentielles construites depuis les années 1950 dans une sélection de villes européennes [3]

CHAPITRE II

LES CAUSES DE L'ÉTALEMENT URBAIN

La lutte contre l'étalement urbain présuppose une compréhension fine des mécanismes qui en sont à l'origine ou qui y contribuent. L'étalement résulte d'une combinaison de facteurs, liés au développement économique et au développement des réseaux de transport. L'étalement urbain européen est largement relié au développement et à la modernisation du transport de passagers et du fret, ainsi qu'aux prix élevés du foncier déjà urbanisé. L'attractivité des centres-villes a diminué parallèlement à l'amélioration de la qualité de vie dans les zones rurales et péri-urbaines. Cette combinaison de facteurs fait de l'étalement urbain un défi majeur pour les villes européennes, et notamment pour les villes petites et moyennes.

Prix du foncier et croissance économique

Les différences de prix sont élevées entre le foncier rural d'une part et d'autre part le foncier déjà urbanisé ou les friches industrielles, pour lesquelles s'ajoutent des coûts de dépollution élevés. Cette différence de prix du foncier alimente l'étalement urbain. Dans la plupart des nouveaux projets urbains, le coût d'acquisition du foncier agricole demeure relativement faible. La conversion de ce foncier en foncier urbain permet de générer des profits de court terme importants, dans tous les cas plus élevés que les profits de court terme potentiels sur des friches urbaines et industrielles, y compris lorsque ces zones ne sont pas polluées. D'après l'Agence Européenne de l'Environnement [3], cette différence de coûts de foncier est particulièrement marquée en Europe occidentale : France, Royaume Uni, Allemagne et Benelux. Le maintien délibéré et artificiel de prix bas sur le foncier agricole est renforcé par l'usage des outils d'expropriation. L'une des conséquences visibles de ce phénomène est le développement rapide de villages initialement ruraux à proximité des zones urbaines et leur transformation en zones résidentielles ou commerciales.

La croissance économique est bien entendu le principal moteur de l'étalement urbain. Le développement des technologies de l'information, avec l'augmentation rapide de la part du télétravail dans les sociétés européennes, est susceptible d'amplifier encore dans les décennies à venir l'étalement urbain [15]. Les investissements européens dans les transports à longue distance entre les pôles urbains, et notamment au travers du programme Trans European Transport Networks sont également susceptibles d'influencer l'évolution des formes urbaines européennes.

Étalement urbain et création de valeur de court terme pour les collectivités locales

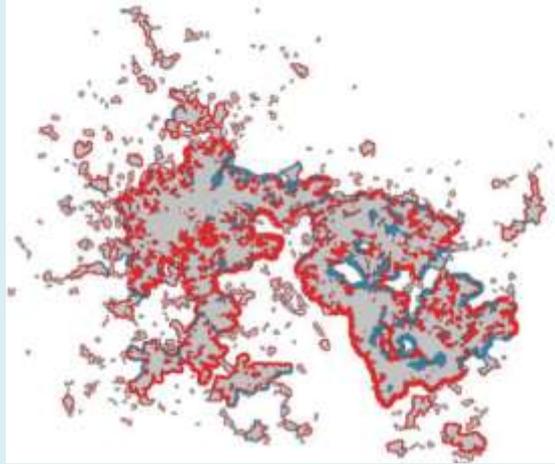
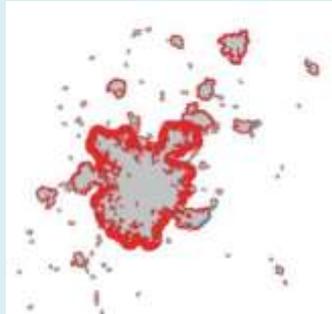
L'un des principaux moteurs de l'étalement urbain en Europe et plus généralement dans le monde est la différence de prix entre le foncier rural agricole et le foncier urbain. La meilleure stratégie de profit à court terme consiste à convertir le foncier rural agricole à bas coût en foncier urbain résidentiel ou commercial. Ce mécanisme de création de valeur à court terme est à l'heure actuelle généralisé dans toute l'Europe, en Amérique du Nord, et dans tous les pays émergents. Le pays émergent où ce phénomène de conversion massive du foncier rural en foncier urbain est le plus frappant est la Chine. Les municipalités, les collectivités locales et les acteurs publics plus généralement ont un rôle clef à jouer sur ce processus de conversion des terres agricoles en zones résidentielles ou commerciales. Les acteurs publics, au travers de mécanismes réglementaires ou fiscaux ont le pouvoir de freiner ce processus.

La compétition forte entre les villes qui visent à attirer davantage d'emplois ou de services, contribue à l'assouplissement des contrôles, voire à la mise en place de mécanismes incitatifs pour les commerces et les industries prêtes à investir. En ce sens, la compétition économique entre les différentes villes nourrit l'étalement urbain.

La dynamique de conversion de foncier rural en foncier urbain, génératrice de valeur de court terme, nécessite des mécanismes de régénération du foncier à urbaniser sur les franges urbaines. Une fois l'extension urbaine faite, le maintien de la dynamique nécessite de rendre la nouvelle frange urbaine accessible. Cette dynamique d'étalement s'accompagne donc le plus généralement d'investissements dans les infrastructures de transport, le plus souvent routier. L'amélioration de la mobilité rend facilement accessibles les nouvelles franges urbaines, qu'il est alors intéressant économiquement d'urbaniser.

Régénération du stock de foncier immédiatement disponible en Chine

Amindarbari et Sevtsuk [16] ont mesuré les contraintes à l'expansion spatiale en Chine (parcs, zones protégées, etc.) à Chengdu et Guangzhou et mesuré la quantité de foncier rural directement accessible et immédiatement urbanisable. En 2000, le foncier disponible dans chacune des villes était respectivement de 74% et 88% des superficies urbaines d'alors. En 10 ans, ces deux villes se sont respectivement étendues de 70,1% et 87,5%. En d'autres termes, tout le foncier accessible a été urbanisé au cours de la décennie. Les mêmes mesures ont été faites pour ces deux villes en 2010. Le foncier immédiatement disponible dans chacune des deux villes est respectivement de 70,1% et 87,5%. Il est très probable qu'au cours de cette décennie, ce stock de foncier sera également entièrement consommé.



« Expandabilité » à Chengdu (gauche) et Shanghai (droite) en 2010. En rouge, la part de foncier urbanisable pour une croissance spatiale hypothétique de 100%, en bleu le foncier inconstructible [16]

Infrastructures de transport, étalement et fragmentation

Le développement urbain dans les pays industrialisés dans la seconde moitié du XX^e siècle a été réalisé autour de l'automobile. Promesse d'accessibilité généralisée, l'automobile a en réalité tout éloigné en distendant et en faisant éclater les tissus urbains. L'augmentation de la vitesse des déplacements s'est accompagnée d'une augmentation plus que proportionnelle des distances à parcourir, ce qui a accru les temps de déplacement au-delà même de la loi traditionnelle d'une heure en moyenne [17], [18]. Une organisation spatiale de plus en plus zonée et diluée a enfermé les villes dans une dépendance à l'automobile et les pays dans une dépendance énergétique aux énergies fossiles et en premier lieu au pétrole.

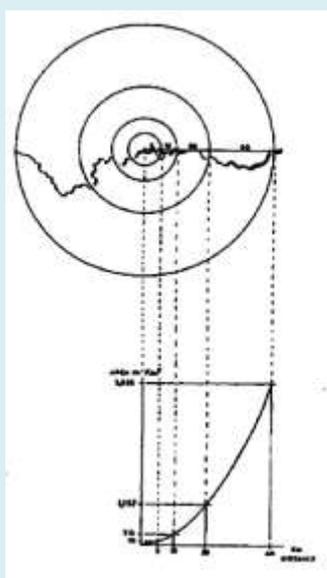
Alors que les plus grands pays industrialisés sont prisonniers de cette dépendance et qu'il faudra plus d'un siècle pour réduire l'étalement suburbain réalisé en à peine quelques décennies, les pays émergents sont tentés par la motorisation de masse qui provoque déjà l'apparition de très grandes régions mégalopolitaines à très faible densité.

La mobilité urbaine définit l'extension spatiale de la ville et son gradient de densité

Les travaux de Zahavi [17], [18] ont beaucoup enrichi la compréhension de la relation entre ville et mobilité en dégagant deux lois empiriques de l'observation d'un ensemble de données très vastes allant du village africain aux grandes métropoles américaines.

La première est la constance des budgets temps de transport quotidien. Dans toutes les villes du monde, quel que soit leur niveau de développement, et donc la vitesse de leurs moyens de transport, le temps quotidien destiné à la mobilité est d'environ une heure. La limite de la ville est d'abord temporelle avant d'être spatiale. « La raison même de la ville est de favoriser les interactions entre les individus en offrant une proximité non pas géographique mais temporelle » [19]. Accéder à des vitesses supérieures permet alors l'expansion de l'aire urbaine puisque la même proximité temporelle peut être en théorie assurée avec des éloignements plus grands. En théorie, la marche à pied permet de parcourir 3 à 5 km par heure, le vélo et le transport en commun entre 9 et 15 km par heure et la voiture entre 30 et 50 km/h. Le temps quotidien passé hors domicile et le nombre de déplacements par personne et par jour connaissent tous deux une grande stabilité. Pour des raisons de répartition stochastique des localisations et des déplacements, la limite temporelle d'une heure de déplacement définit le diamètre de la ville. Les villes ont cru à la mesure de ce que leurs moyens de transport permettaient de parcourir en une heure. Tout Venise tient ainsi dans un carré d'un mile (1,6 km) de côté qui ne représente que quatre à cinq blocs du Central Business District d'Irvine.

La seconde constance établie par Zahawi est celle du budget monétaire destiné aux transports quotidiens. Sa stabilité n'est pas aussi évidente que celle de la constance temporelle car le budget monétaire destiné aux déplacements augmente avec la motorisation, passant de 3 à 5 % pour un ménage non motorisé à 10 à 15 % selon les pays et les niveaux de revenus.



Augmentation de la taille urbaine en fonction de la distance au centre [20]

Le schéma montre les surfaces atteintes à travers les siècles par une heure de trajet en utilisant différents modes : 5 km à pied (au début du XVIII^e siècle), 10 km en voiture à cheval (au début du XIX^e siècle), 20 km en transport public (au début du XX^e siècle) et 40 km en voiture ou réseau express régional (au XX^e siècle). À ce schéma établi en 1990 par Echenique [20], il manque l'impact sur les formes urbaines des autoroutes géantes et des trains à très grande vitesse de la fin du XX^e siècle et du début du XXI^e siècle. Désormais, ce n'est plus 40 km mais 200 à 300 km qui peuvent être parcourus en une heure, ce qui constitue une rupture d'un facteur 5 par rapport au doublement des évolutions précédentes.

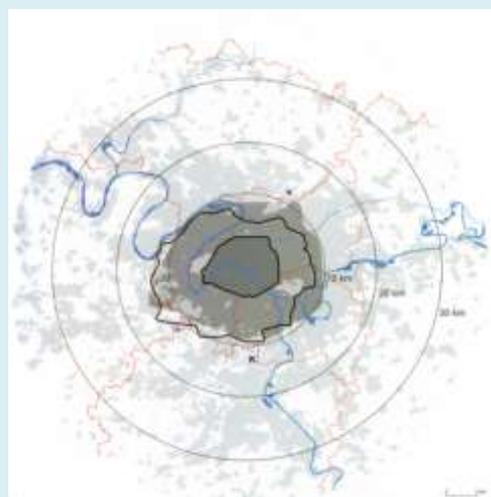
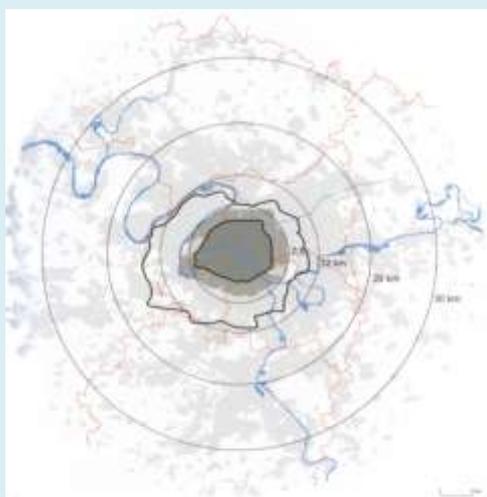
D'où l'apparition de régions mégapolitaines géantes comme au Japon la gigantesque conurbation qui relie Tokyo et Osaka en une urbanisation continue. Aux États-Unis, ce sont les autoroutes qui autorisent la dilatation des distances parcourues en une heure, qui sont de fait très supérieures à 40 km.

Le schéma d'Echenique ne prend d'autre part pas en compte l'apparition de régions mégapolitaines polycentriques. C'est parce qu'elle a plusieurs centres historiques (New York, Philadelphie et Toronto par exemple) que la mégapole Nord-Est qui regroupe 50 millions d'habitants est devenue une mégapole géante polycentrique.

En raison de leur fragmentation croissante en fonction de leur éloignement au centre, les surfaces aujourd'hui couvertes par les mégapoles sont supérieures aux calculs d'Echenique. Celui-ci remarque : « alors que les zones du Londres métropolitain qui peuvent être atteintes depuis le centre en une heure de trajet ont été multipliées par 64 en trois siècles, la population de ces zones n'a pas été multipliée par plus de 16. Le résultat est que la densité moyenne a été divisée par 4 au cours de la même période». [20]

Paris par homothéties

Au fur et à mesure de sa croissance, Paris s'est entouré de sept enceintes successives avant que la ville de l'automobile ne les déborde largement. Les enceintes de Philippe Auguste puis de Charles V entre le Louvre et la Bastille définissent un cœur dense entre 2 et 3 km de diamètre. L'enceinte des Fermiers généraux qui va de l'Étoile à Nation ne fait guère plus de 5 km du Nord au Sud même si elle s'étend nettement plus d'Est en Ouest. L'enceinte fortifiée de 1840 devenue notre boulevard périphérique enferme sur 10 km de diamètre ce qui sera la ville du tramway et du métro. Dans un diamètre de 15 km qui déborde l'enceinte, on trouve aujourd'hui encore le cœur le plus dense et l'agglomération regroupant 3,5 millions d'habitants sur 213 km².



Au-delà dans un diamètre de 24 km d'abord la densité baisse sensiblement avec 5,5 millions d'habitants sur 450 km². Enfin après plusieurs homothéties successives on parvient à l'agglomération de 60 km de diamètre regroupant 9 millions d'habitants.

Les agrandissements successifs provoqués par le recul des limites temporelles ont profondément marqué l'histoire urbaine de Paris, en particulier dans les dessins concentriques des boulevards :

- Les Grands Boulevards, construits à la place de l'enceinte de Louis XIII,
- Les boulevards construits à la place du mur des Fermiers généraux,
- Les boulevards des Maréchaux construits à la place du chemin de ronde interne (élargi) de l'enceinte de Thiers,
- Le boulevard périphérique construit légèrement à l'extérieur des boulevards des Maréchaux.

Signe de la pertinence de l'analyse de Zahawi : appliquée à Paris, elle recouvre exactement les dilatations par homothétie proposées récemment par Philippe Panerai [4]. La nouvelle ville des transports en commun était à l'étroit en 1918 dans l'enceinte de Thiers édiflée quatre-vingt ans plus

tôt. Avec le démantèlement de l'enceinte, les lignes de métro sont prolongées à partir de 1924 jusqu'aux communes limitrophes dessinant un Paris agrandi à 15 km de diamètre, soit la taille maximale de la ville des transports en commun. C'est aussi la taille de la ville du vélo, ce que Philippe Panerai appelle la ville du Vélib' et que confirme le projet d'extension du Vélib' parisien.

Au-delà de 15 km de diamètre, les transports en commun ne fonctionnent plus vraiment. La chute de la densité, l'écartement des mailles sous l'effet de la géométrie radioconcentrique défait la couverture totale à moins de 400 m qui caractérise le centre de Paris.

Développement des transports et ségrégation de l'usage des sols

Un effet de l'amélioration des transports est une tendance à accroître la ségrégation des usages du sol et à augmenter les flux de trafic entre eux. Avec le zonage moderniste et l'émergence des transferts de masse, le domicile et le lieu de travail sont devenus de plus en plus séparés. Les activités dans les centres villes se diversifient de plus en plus mais certaines activités, et surtout la production, quittent le centre pour s'installer en périphérie, ce qui provoque d'intenses déplacements quotidiens au sein même de la périphérie. Avec la croissance des mégalo-poles, celles-ci se fragmentent en unités mono fonctionnelles en fonction de l'accessibilité, de la densité et du prix du foncier. Cette dispersion, cette ségrégation et cette spécialisation ne sont pas le seul résultat de politiques de zonage (elles apparaissent dans des villes sans planification) mais elles sont la conséquence inévitable des transports [20]. Or, ce déclin des densités a un impact considérable sur la demande énergétique et sur les coûts d'infrastructures et de réseaux.

Modes de consommation

Le changement des modes de consommation est également lié au phénomène d'étalement urbain. Les économies d'échelles permises par les stratégies de la grande distribution ont radicalement modifié le secteur commercial au cours des dernières décennies. Dans les années 1950 la majeure partie des commerces étaient de petite taille et situés à proximité voire au sein des zones résidentielles, et la majeure partie des déplacements liés étaient effectués à pied. A l'heure actuelle, les grands centres commerciaux, le plus souvent suburbains, ont capté la majeure partie des parts de marché au dépend des commerces de proximité. Ces centres commerciaux, entourés de parkings, sont situés à des distances qui imposent l'usage de la voiture. En conséquence, l'expansion des zones commerciales et industrielles est en moyenne deux fois plus rapide que l'expansion des zones résidentielles [3].

La question de l'accessibilité et de la proximité aux commerces est fondamentale, et touche à l'organisation structurelle de la ville. Elle est à mettre en regard avec l'analyse des parcs parisiens

présentée dans le chapitre suivant de ce rapport. L'accessibilité généralisée et la proximité aux commerces dans les années 1950 étaient rendues possibles en ville grâce à la longue traîne de petits commerces. De la même façon que la proximité des espaces verts à Paris est rendue possible par une longue traîne de petits squares et jardins.

Le lien entre modes de consommation et étalement urbain crée des effets de renforcement par rétroaction. Le développement des centres commerciaux suburbains contribue à l'émergence de zones commerciales mono fonctionnelles à basse densité et à la dilatation des formes urbaines. Mais la baisse de la densité résidentielle en retour contribue à la disparition des petits commerces de proximité, au bénéfice des grands centres commerciaux. En effet, différentes études ont montré que les commerces de proximité n'étaient généralement rentables et viables qu'au-dessus d'un seuil de densité situé autour de 5 000 habitants au km².

Déterminants sociaux

Enfin, une palette de facteurs sociaux est susceptible de contribuer à l'étalement urbain et notamment au développement de zones résidentielles suburbaines à basse densité. L'idéal de la maison individuelle avec jardin à l'extérieur de la ville est fortement présent, y compris dans la conscience collective européenne. Ce type de maison apparaît également comme un investissement stratégique, avec un prix d'achat limité et un potentiel de plus value foncière plus important que dans le cas des cœurs urbains [14], [21]. La dévitalisation des centres villes, notamment au travers de la disparition des commerces de proximité, contribue à accentuer ce phénomène. Les problèmes de pollution de l'air et de bruit, plus intenses dans les cœurs denses, y participent également.

CHAPITRE III

IMPACTS DE L'ÉVOLUTION DES STRUCTURES SPATIALES

1. IMPACTS DE L'ÉTALEMENT URBAIN ET DE LA FRAGMENTATION SUR LES CONSOMMATIONS ÉNERGETIQUES

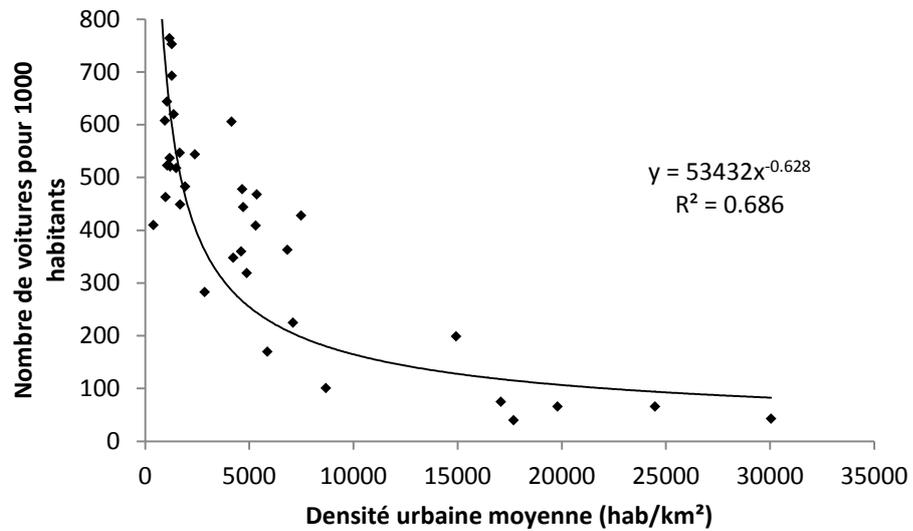
L'énergie comme traceur de la qualité de l'urbain

Le phénomène d'étalement urbain est généralisé à l'échelle mondiale, tant dans les pays développés que dans les pays émergents, tant dans les grandes métropoles que dans les petites et moyennes villes. L'un des principaux impacts de l'étalement et de la fragmentation urbaine est une augmentation des consommations énergétiques, notamment pour les transports. Cette partie montre en quoi les différentes caractéristiques de l'étalement urbain contribuent à cette augmentation. En premier lieu, la densité urbaine moyenne à l'échelle de la ville contribue à l'augmentation des distances moyennes parcourues par habitant, à la part modale de la voiture, au taux de motorisation, et *in fine*, à l'augmentation des consommations énergétiques pour les transports. Elle contribue également à l'augmentation des consommations énergétiques globales, notamment du fait de l'efficacité thermique moindre des tissus urbains peu denses. Mais la densité moyenne n'est pas le seul paramètre de forme urbaine à prendre en compte. Cette partie montre, avec à l'appui de la démonstration une étude fondée sur 34 villes européennes, que la distribution de la densité au sein des villes, et notamment l'entropie et la hiérarchisation de cette distribution, jouent un rôle fondamental sur les consommations énergétiques.

Étalement, structure spatiale et distances moyennes parcourues

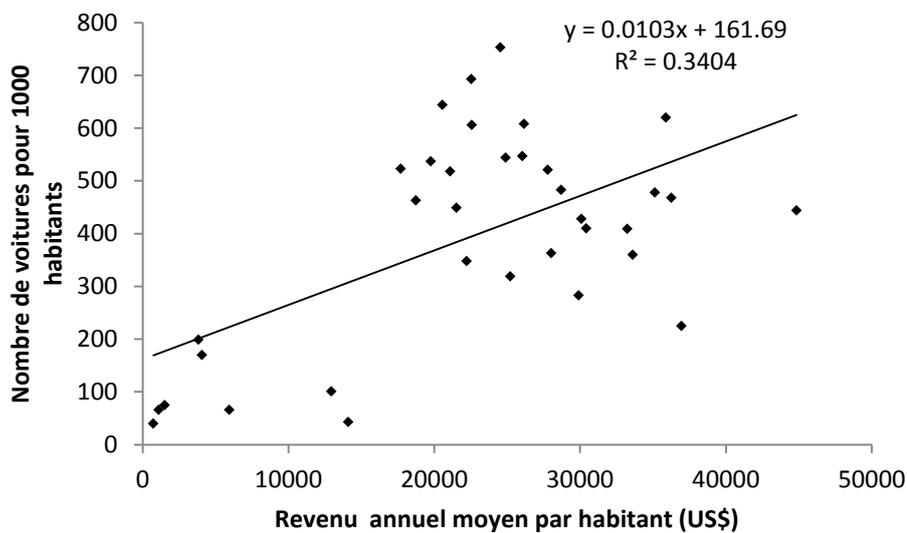
Il existe un consensus sur la contribution de l'étalement urbain et plus généralement des basses densités urbaines à l'augmentation des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre. L'étalement urbain, la basse densité urbaine, la dépendance à la voiture individuelle et l'augmentation des consommations en énergie fossile ont constitué un cercle vicieux pour le développement urbain des dernières décennies. La généralisation de la voiture individuelle, en contribuant à l'augmentation des distances moyennes parcourues [22], contribue à dilater, déstructurer et dédensifier les structures urbaines. En retour, les faibles niveaux de densité, en limitant la diversité des modes de transport et en empêchant le développement des transports en commun, contribuent à augmenter la part de la voiture dans les transports. Le graphique suivant

montre ce phénomène, avec une corrélation forte entre densité urbaine et nombre de voitures par habitant.



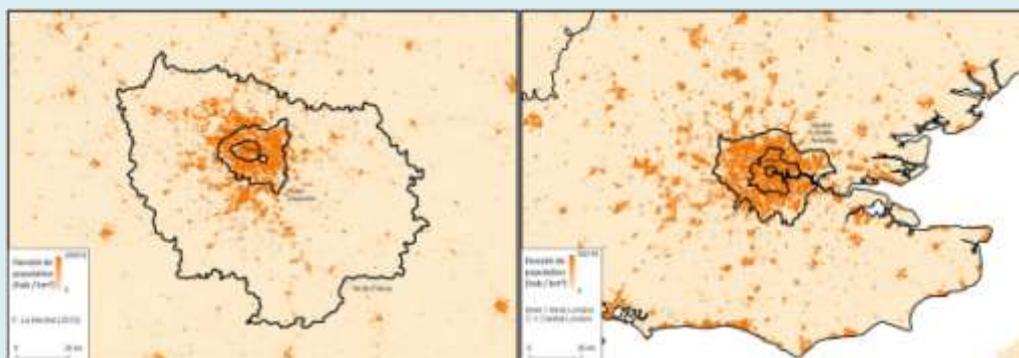
Nombre de voitures pour 1000 habitants et densités moyennes dans 30 métropoles mondiales en 2000 [23]

Il est intéressant de noter que la corrélation entre nombre de voitures pour 1000 habitants et densité est plus forte qu'entre nombre de voitures pour 1000 habitants et revenu moyen par habitant. Ce dernier point est présenté dans le graphique suivant.

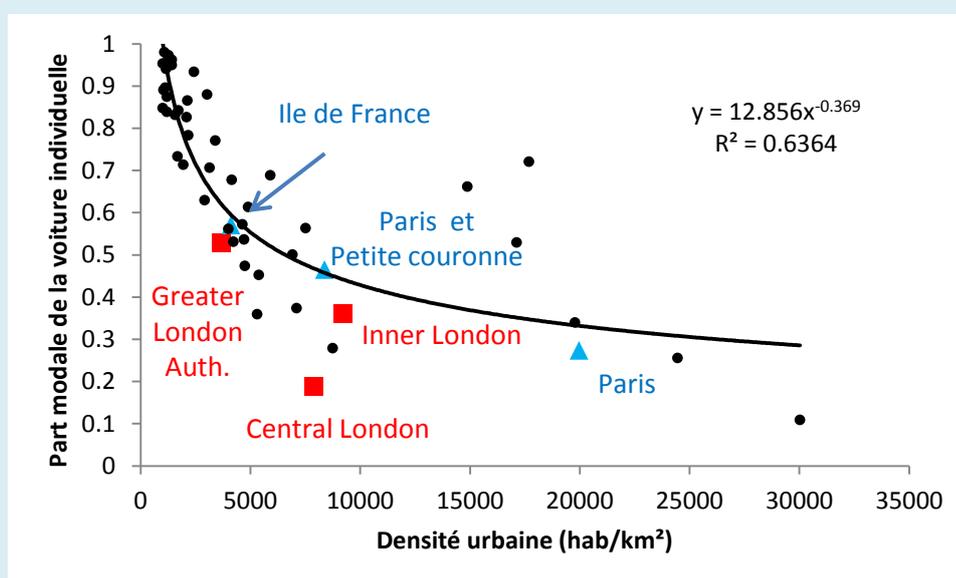


Nombre de voitures pour 1000 habitants et revenu annuel moyen par habitant (US\$) en 2000 [23]

Densité et part modale des véhicules particuliers : Paris et Londres



Densité démographique dans les métropoles parisiennes et londonniennes



Densité et part modale des véhicules particuliers [9], [24]

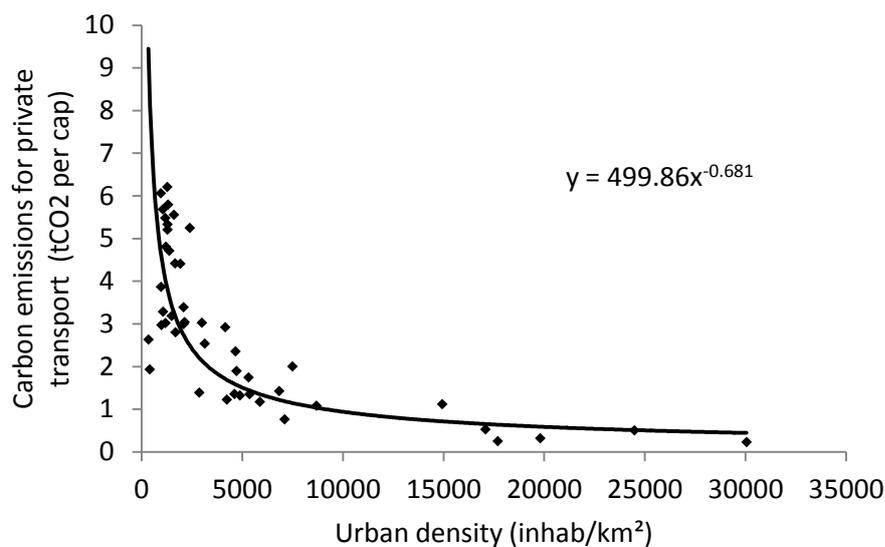
La part modale du transport motorisé effectué en voiture particulière croît très fortement lorsque la densité diminue. La figure ci-dessus montre la courbe qui relie la part modale de la voiture particulière à la densité pour 46 villes dans le monde. La relation est également vraie lorsque l'on considère une même entité urbaine à différentes échelles. Paris et Londres sont positionnés sur la courbe à trois échelles différentes :

- La zone centrale (respectivement Paris intra-muros et l'intérieur de la ring-road à Londres, *Central London*).
- La zone dense (respectivement Paris plus les trois départements de petite couronne et Londres plus les boroughs les plus centraux, *Inner London*).
- La région urbaine (l'Ile-de-France et le Grand Londres).

Dans le cas de Paris, l'hypothèse de Kenworthy et Laube [24] se trouve vérifiée : à une plus grande densité correspond une plus grande utilisation des transports en commun. Dans le cas de Londres, l'hyper centre est un centre d'affaires d'une telle importance que les habitants l'ont presque déserté, ce qui se traduit par une faible densité résidentielle. Des politiques publiques fortes ont, de plus, limité l'utilisation de la voiture dans l'hyper centre. Greater London et Inner London suivent ensuite la courbe de Kenworthy et Laube.

Densité urbaine moyenne et énergie de transport

Le lien entre densité urbaine et consommation énergétique per capita pour les transports est très bien documenté depuis les travaux de Newman et Kenworthy [25]. Ces travaux, ainsi que la plus grande part des études réalisées depuis, montrent une corrélation forte entre ces deux paramètres, et donc par voie de conséquence entre la densité urbaine et les émissions carbone per capita pour les transports. Le graphique suivant montre cette corrélation avec un échantillon de 49 villes mondiales [23].



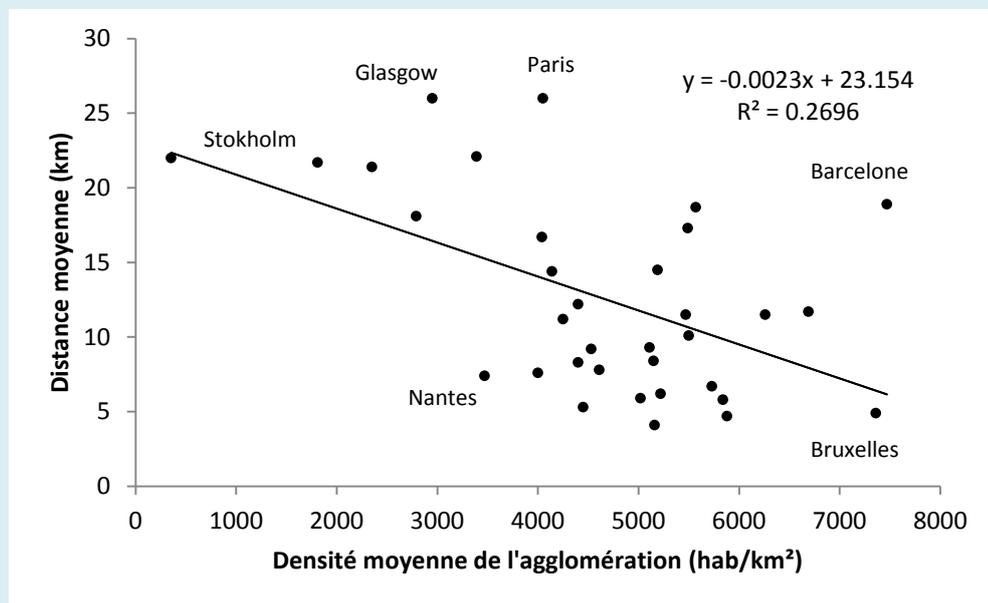
Emissions carbone pour le transport et densité moyenne de 49 villes mondiales en 2000 [23]

Densité urbaine et distance moyenne entre les habitants

La distance moyenne à vol d'oiseau entre deux individus au sein d'une ville peut être calculée selon la formule suivante, où d_{ij} représente la distance entre deux individus et N le nombre total d'individus :

$$Distance_{moy} = \frac{1}{N} \sum_{i < j}^N d_{ij}$$

Une première approximation de la distance moyenne entre deux individus au sein de 34 villes européennes a été calculée par Le Nechet [9]. Cette base de données permet de montrer une corrélation négative entre densité moyenne et distance moyenne entre deux individus au sein d'une ville, comme le montre le graphique suivant.



Densité moyenne et distance moyenne entre deux individus pour 34 agglomérations européennes

Les niveaux de densité urbaine influent largement sur la répartition des modes de transport au sein des villes. Alors que dans les zones à forte densité (au-delà de 25 000 habitants par km²), les transports en commun et les transports non motorisés jouent une place prépondérante, la part modale de la voiture individuelle augmente fortement dans les zones à basse densité (en dessous de 5000 habitant par km²), et atteint des sommets dans les zones à très basse densité (en dessous de 2500 habitants par km²), totalement dépendantes à la voiture individuelle. Les parts modales théoriques en fonction des niveaux de densité sont présentées dans le tableau suivant.

Densité urbaine (hab/km ²)	Très basse <2,500	Moyenne 5,000-10,000	Haute>25,000
Parts modales			
<i>Voiture individuelle</i>	80%	50%	25%
<i>Transports publics</i>	10%	25%	50%
<i>Transports non motorisés</i>	10%	25%	25%
Utilisation moyenne de la voiture (km/cap.an)	>10,000		<5,000
Utilisation des transports publics (voyages/cap.an)	<50		>250

*Parts modales respectives des différent modes de transport en fonction des seuils de densité,
interprétation des données adaptée de [25]*

L'équation suivante dérive d'une analyse multi-variée menée sur 42 villes mondiales [23]. L'analyse multi-variée prend en compte une série de variables, donc la taille spatiale de la ville, la population, le produit régional brut, le développement des infrastructures, le nombre de voitures par habitant, le cout moyen des transports, les vitesses relatives de la voiture et des transports en commun, ou encore la part des emplois dans le centre urbain. Elle montre que parmi tous ces paramètres, le contrôle de l'étalement urbain et de la densité est le levier déterminant pour diminuer les consommations énergétiques globales pour le transport à l'échelle urbaine.

$$E_{transport} = C_0 \cdot R^{1.3} \cdot PIB^{0.33} \cdot pop^{0.12}$$

L'équation présente les trois paramètres corrélés de façon significative avec la consommation globale pour les transports : le rayon moyen de la ville (R), le produit régional brut de la ville (PIB) et la population (pop). Trois interprétations simples dérivent de cette équation :

- A rayon urbain et PIB constant, une augmentation de 1% de la population (et donc une densification de la ville) contribue à augmenter de seulement 0,1% la consommation totale d'énergie pour les transports.

- A rayon urbain et population constante, une augmentation du PIB contribue à augmenter de 0,3% la consommation totale d'énergie pour les transports.

- Enfin, à PIB et population constante, une augmentation du rayon de 1% (et donc un étalement urbain) contribue à augmenter de 1,3% la consommation totale d'énergie pour les transports.

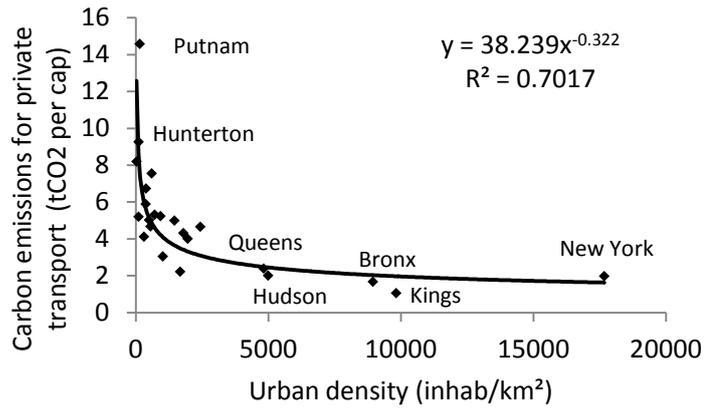
L'impact relatif de l'étalement urbain sur la consommation totale d'énergie pour les transports est donc respectivement 13 fois et 4 fois plus important que celui de la croissance démographique et de la croissance économique. La contribution de l'étalement urbain aux consommations de transport

est la seule contribution supra linéaire (exposant 1,3). Les contributions de la croissance économique et de la croissance démographique au contraire sont très infra-linéaires.

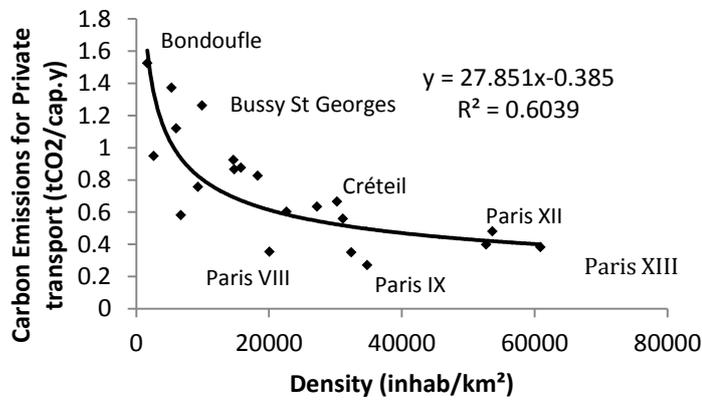
Densité à l'échelle infra-urbaine et énergie de transport

Ce rapport a montré précédemment les dangers de ne considérer que la densité urbaine moyenne. En effet, la densité varie dans une large gamme au sein d'une même ville. Plus que la densité moyenne, c'est la distribution de la densité au sein des villes qui influe le plus fortement sur les *patterns* de transport et les consommations énergétiques associées. Le calcul de la densité moyenne à l'échelle d'une ville est très sensible au choix des limites géographiques choisies pour la ville : limites administratives, limites de la tache urbaine, etc. [23]. Eidlín [26] utilise une comparaison marquante entre la métropole de New York et la métropole de Los Angeles. Prise dans son ensemble, la métropole de New York est en effet moins dense que celle de Los Angeles. En effet, la métropole de New York est constituée d'un cœur très dense autour de l'île de Manhattan et de Brooklyn, mais la densité locale chute très rapidement à mesure que l'on s'éloigne de ce cœur. A l'opposé, la densité à Los Angeles est basse mais relativement homogène sur la métropole. Comme l'on peut s'y attendre, les consommations énergétiques pour les transports sont beaucoup plus faibles à New York qu'à Los Angeles. Ce résultat va à l'encontre de ce que les densités moyennes pourraient laisser penser.

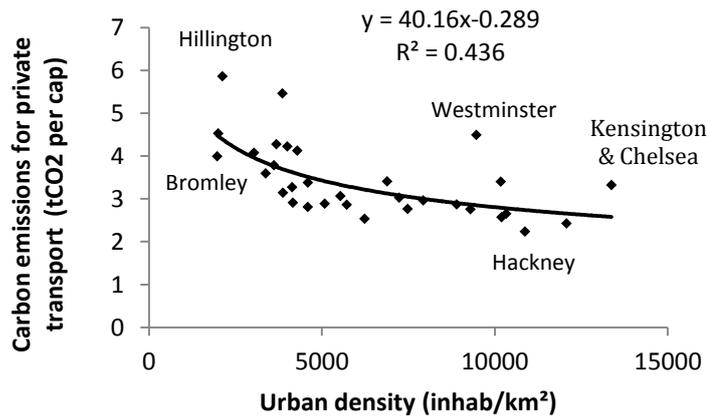
Bradford [27] montre que la distribution de la densité et son gradient sont davantage corrélés aux parts modales des transports publics et des transports non motorisés que la densité moyenne à l'échelle de la ville. Les analyses de corrélation entre consommation énergétique pour le transport, émissions associées et densité urbaines, menées sur des échantillons urbains plus réduits, de la taille du quartier, montrent une forte corrélation au sein même des villes. Les trois graphiques suivants montrent un *pattern* similaire pour New York, Paris et Londres. Pour ces trois villes, l'analyse est fondée sur des échantillons plus petits : les *counties* pour la métropole de New York, les *boroughs* pour le Grand Londres et les IRIS pour le Grand Paris. A chaque fois, les analyses montrent une corrélation forte, non linéaire, de type loi de puissance inverse.



Emissions de carbone par habitant pour le transport dans les comtés de New York [23]

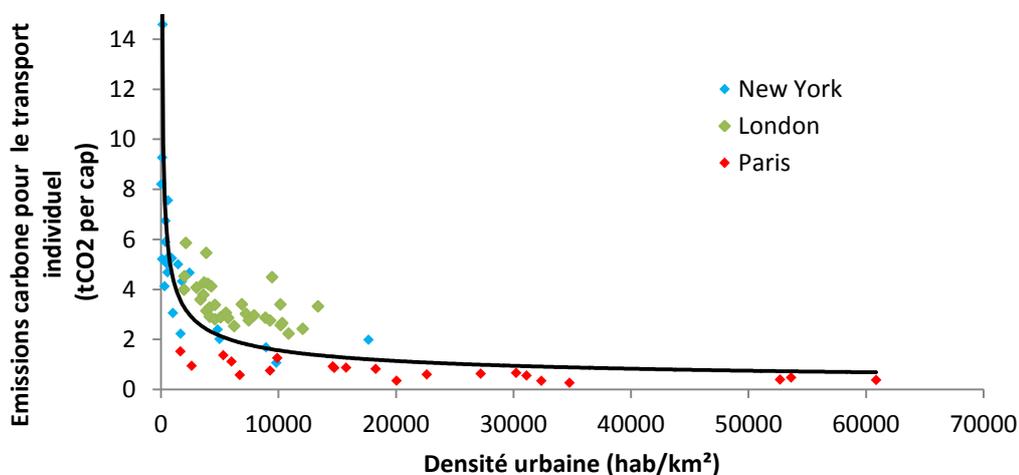


Emissions de carbone par habitant pour le transport dans des IRIS du Grand Paris [23]



Emissions de carbone par habitant pour le transport dans les Boroughs du Grand Londres [23]

Lorsque ces trois analyses sont présentées sur le même graphique, on retrouve une tendance similaire pour les différentes tailles d'échantillon (IRIS, comté ou *boroughs*).

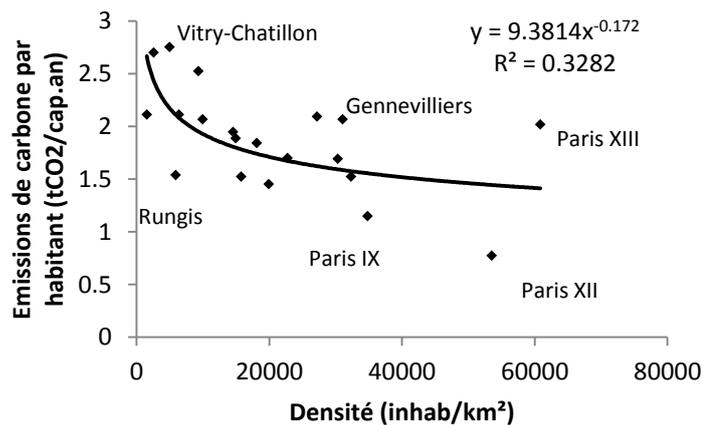


Superposition des émissions de carbone par habitant pour le transport et des densités urbaines dans le Grand Londres, la métropole de New York, et le Grand Paris [23]

Les analyses multi-variées dans les villes denses telles que Londres, Paris ou New York [23], [28] montrent qu'au sein de ces villes, la densité urbaine est le paramètre qui influe le plus sur les distances moyennes parcourues (PKT) et les consommations énergétiques par habitant pour le transport. La corrélation est non linéaire : plus la densité est basse, plus l'impact relatif d'une baisse de densité est important. Ces résultats sont confirmés par Cervero et Pivo [22], [29] qui concluent que l'influence de la densité urbaine sur les parts modales est plus forte que celles des autres variables, tant celles touchant à la forme urbaine (mixité notamment) que les variables économétriques.

Densité urbaines et autres consommations d'énergie

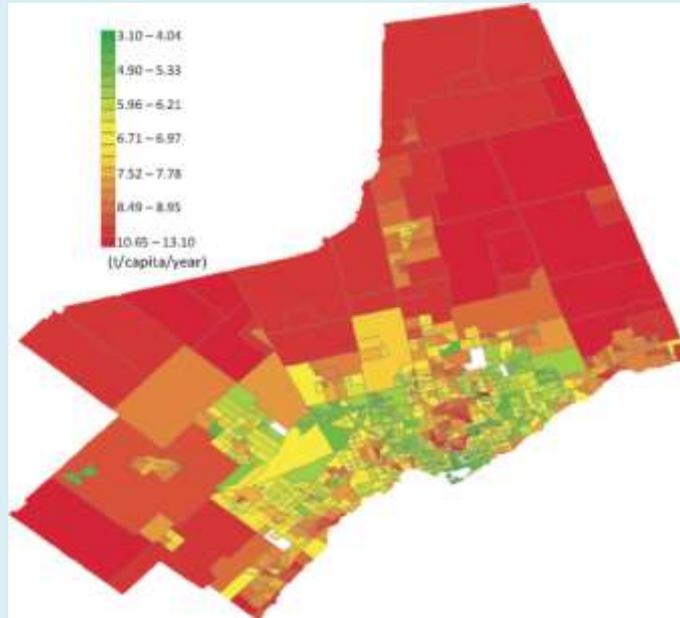
La corrélation entre densité, étalement urbain et consommations énergétiques n'est cependant pas limitée aux consommations de transport. Les travaux de l'APUR sur les consommations énergétiques des bâtiments résidentiels en Ile de France montrent que l'impact de la densité est également notable sur les consommations énergétiques totales par habitant, en incluant notamment le chauffage et les émissions carbone associées. Le graphique suivant basé sur les données de l'APUR montre cette corrélation.



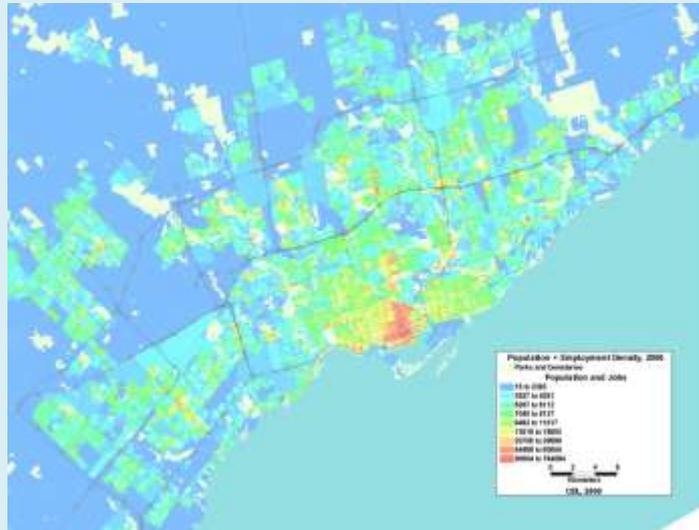
Densité urbaine à l'IRIS et émissions de carbone par habitant [analyse basée sur les données de 28]

Densité urbaine et émissions carbone à Toronto

Les deux cartes suivantes de Toronto présentent les émissions de carbone par habitant à Toronto, ainsi que la densité urbaine. La superposition des deux cartes est clairement visible.



Les émissions totales de GES de Toronto (en tCO₂e/an) [30]



Carte de densité (population et emplois) à Toronto (CDL 2009)

Structures spatiales, potentiel de réduction des consommations énergétiques et transition énergétique

Les zones à faible densité, notamment du fait de leur dépendance structurelle à la voiture individuelle, mais également du fait des inefficiences thermiques des tissus résidentiels détachés, ont un potentiel limité de réduction des consommations énergétiques. Les options qu'il est possible de déployer dans les zones à basse densité urbaine sont en moindre nombre. Le déploiement de systèmes efficaces et rentables de transports en commun, le déploiement de systèmes de cogénération, le développement des synergies entre les flux d'énergie, et le maintien de commerces de proximité ne sont possible qu'au dessus d'un seuil donné de densité (généralement admis autour de 5000 hab/km²). L'accent est principalement mis à l'heure actuelle sur les technologies et la décarbonation de l'offre énergétique (cogénération, *smart grids*, synergies thermiques, développées dans la partie suivante). Cependant, les structures spatiales de la plus grande part des territoires urbains, peu denses, fragmentés et étalés, sont inadéquates pour le déploiement de ces stratégies.

Impact de la distribution spatiale intra-urbaine sur le transport : entropie et hiérarchie

La densité moyenne à l'échelle de la ville et à l'échelle infra-urbaine influe sur les *patterns* de transport, et sur les consommations énergétiques associées. Cependant, la distribution de la population, et donc la distribution de la densité démographique, a également une influence significative sur le transport. Cette section s'appuie sur les analyses d'entropie et de hiérarchie menées par Le Nechet sur 34 métropoles européennes [9].

L'entropie est utilisée en sciences physiques et en théorie de l'information pour indiquer le degré de désordre du système étudié. Elle peut dans l'analyse urbaine rendre compte de l'intensité de la concentration de la population. L'entropie est calculée à partir d'un découpage des aires urbaines basée sur une grille de pas de 200 m, selon la formule suivante :

$$Entropie = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{p_i}{P_N} \log \left(\frac{p_i}{P_N} \right)}{\log N}$$

Où N correspond au nombre de cellules de l'aire urbaine, P_N la population totale, et p_i la population de la cellule i. Cet indicateur varie entre 0 (population concentrée en une seule cellule) et 1 (distribution uniforme de la population).

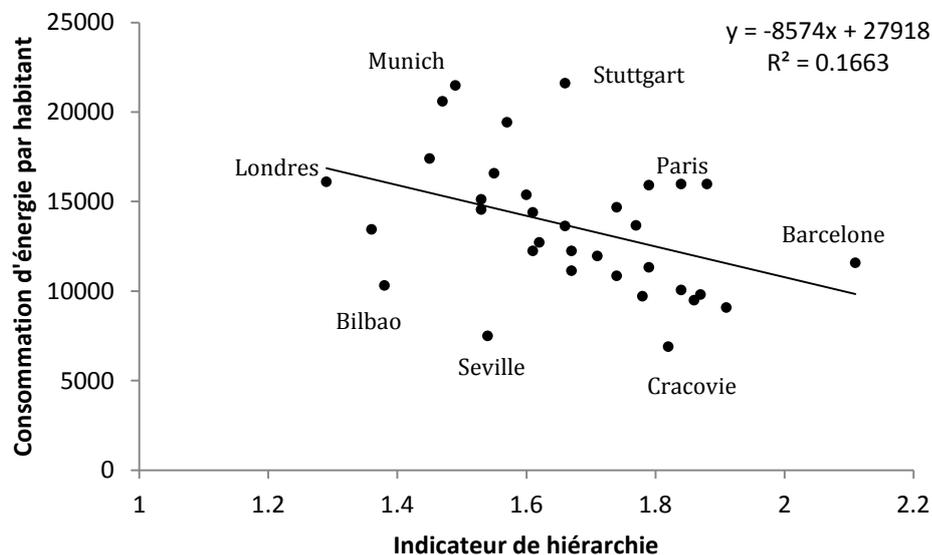
La distribution intra-urbaine des densités peut également être analysée avec des méthodes de type rang-taille, de façon analogue aux systèmes urbains présentés en première partie de ce rapport. Une loi de puissance inverse permet d'approcher de façon satisfaisante les distributions de densité au sein des 34 agglomérations étudiées. La population de chaque cellule est calculée, et les cellules

sont alors classées de 1 à N par ordre décroissant de population. En notant p_k la population de la $k^{\text{ème}}$ cellule la plus peuplée, la distribution de population tend à respecter la loi suivante :

$$p_k = P_0 k^{-\alpha}$$

P_0 est une constante qui dépend de la population totale de la ville. L'indicateur de hiérarchie (coefficient alpha) s'obtient avec une régression linéaire de type log-log. A l'échelle de la ville, une valeur élevée de l'indicateur de hiérarchie est caractéristique d'une distribution plutôt mono-centrique. A l'échelle plus locale, une forte hiérarchie indique l'existence de zones très peu urbanisées au cœur des agglomérations.

A l'aide d'une analyse multi-variée fondée sur un modèle linéaire, Le Nechet montre l'impact de ces deux indicateurs sur les consommations énergétiques pour le transport [9]. L'un des résultats les plus significatifs de l'analyse multivariée en linéaire est la corrélation négative entre le coefficient de hiérarchie et la consommation d'énergie. Plus le coefficient de hiérarchie d'une ville est élevé, moins elle consomme d'énergie, avec les deux cas extrêmes de Barcelone et de Londres. On remarque également l'influence du PIB : les villes qui sont au-dessus de la droite d'ajustement moyenne sont les villes les plus riches, tandis que les villes aux PIB les plus faibles sont au-dessous de la droite.



Influence de l'indicateur de hiérarchie sur la consommation énergétique par habitant, régression partielle (données extraites de [9])

Le choix d'un modèle linéaire est cependant discutable, et nous choisissons ici de présenter les résultats obtenus sur la base des données de Le Nechet, mais en utilisant un modèle non linéaire à rendement d'échelle constant²⁸, qui présente une série d'avantages sur le plan analytique : (1) le modèle correspond davantage aux données considérées²⁹ ; (2) le modèle fait davantage sens physiquement et permet de faire le lien avec les travaux issus des théories de la complexité ; (3) l'interprétation de ce modèle est plus aisée en termes d'élasticités.

Les paramètres explicatifs que nous utilisons ici pour les 34 métropoles européennes sont le PIB par habitant³⁰, la distance moyenne (*dist*) entre individus, la hiérarchie (*hier*) et l'entropie (*entrop*). L'analyse multi-variée montre l'influence significative de ces 4 paramètres sur la consommation d'énergie par habitant pour les transports³¹ et permet de valider le modèle suivant :

$$Energie = C_0 PIB^{0.32} dist^{0.12} hier^{-0.55} entrop^{0.89}$$

Notons que l'analyse multi-variée valide également le rôle de la densité moyenne à la place de la distance moyenne entre individus, de façon moins significative statistiquement cependant³², avec le modèle suivant :

$$Energie = C_0 PIB^{0.35} dens^{-0.14} hier^{-0.52} entrop^{0.86}$$

Ce dernier modèle permet d'affiner le modèle simple reliant énergie de transport et densité initié par Kenworthy et Newman [25] par des paramètres de forme infra-urbains. Il montre qu'au-delà de paramètres agrégés, la fragmentation et la distribution spatiale de la densité au sein des structures urbaines influent sur la consommation énergétique par habitant pour le transport. L'utilisation croisée de la hiérarchie et de l'entropie permet de pousser la discussion plus loin que l'opposition ville mono-centrique versus ville polycentrique.

²⁸ Cette fonction est analogue à la fonction de production de type Cobb Douglas largement utilisée en économie pour relier facteur de production et production.

²⁹ La part de la variance expliquée par le modèle à élasticité constante est plus grande que celle expliquée par le modèle linéaire.

³⁰ Le Nechet utilise le taux de motorisation (nombre de véhicules pour 1000 habitants), lui-même corrélé de façon significative au PIB par habitant.

³¹ Test de Fisher concluant (F=8,1) et variables explicatives décorrélées entre elles. A titre de comparaison, le test de Fisher pour une régression multivariée appuyée sur un modèle linéaire est moins concluant (F=6.7).

³² Test de Fisher F=7.2. A titre de comparaison, la régression multi-variée appuyée sur un modèle linéaire aboutit à un test de Fisher F=5.13

- L'augmentation de l'entropie au sein de l'agglomération contribue à l'augmentation des consommations de transport par habitant avec une élasticité de l'ordre de 0,86. Ce résultat montre que l'homogénéisation de la population sur toute la surface urbaine (l'entropie maximale égale à un correspond à une totale absence d'ordre et de structure spatiale avec une répartition uniforme) augmente fortement la consommation énergétique. Il laisse donc à penser que des variations fortes de densité (gradient) au sein des agglomérations ne sont pas forcément néfastes sur le plan énergétique. Si l'on reprend l'exemple de New York et Los Angeles, ces deux villes ont des densités moyennes proches à l'échelle de l'agglomération, mais des consommations énergétiques par habitant bien différentes, plus faibles à New York. L'entropie, plus élevée à Los Angeles (répartition homogène de la densité) qu'à New York (concentration de la densité à Manhattan et Brooklyn notamment), permet d'expliquer la différence de consommation énergétique par habitant observée.

- L'élasticité négative de l'indicateur de hiérarchie infra-urbaine apporte une information supplémentaire sur la répartition des densités. Une hiérarchisation plus forte des densités au sein de l'agglomération contribue à diminuer les consommations énergétiques pour le transport. Ce résultat montre la pertinence tant des agglomérations mono-centriques que polycentriques, qui présentent toutes deux une hiérarchie forte des densités, mais une distribution spatiale différente. Il montre surtout l'efficacité supérieure des structures présentant une forte hiérarchie d'échelle, des structures présentant un ordre spatial hiérarchique. La partie suivante décrira plus en détail les liens fondamentaux qui unissent l'efficacité dans la dissipation de l'énergie et la création de structures hiérarchiques, liens qui ont été mis en évidence par la thermodynamique des structures dissipatives loin de l'équilibre, ce que sont de manière générale les systèmes énergétiques urbains dont le système de transport est un sous-système.

On peut noter dans ce résultat que les deux variables qui ont les élasticités les plus fortes sur la consommation énergétique de transport sont les deux variables qui caractérisent la forme spatiale urbaine : l'entropie spatiale (c'est-à-dire l'homogénéité et le désordre dans la distribution des densités) et la hiérarchie spatiale (c'est-à-dire la structure et l'ordre dans la distribution des densités). Ces deux variables agissent dans des sens opposés. Plus le système urbain se structure, plus il utilise l'énergie efficacement et moins il a besoin d'énergie. Plus le système se déstructure, plus il s'homogénéise et plus il a besoin d'énergie pour fonctionner. Ce résultat est absolument général et traduit pour les villes une loi fondamentale de la physique.

De manière concrète, une variable économique, le PIB et trois variables spatiales influent sur la consommation énergétique de transport avec une élasticité plus importante pour les deux variables les plus structurelles (celles qui décrivent la structure spatiale). La dilatation spatiale, mesurée par la distance moyenne entre deux individus, correspond à une demande énergétique plus forte.

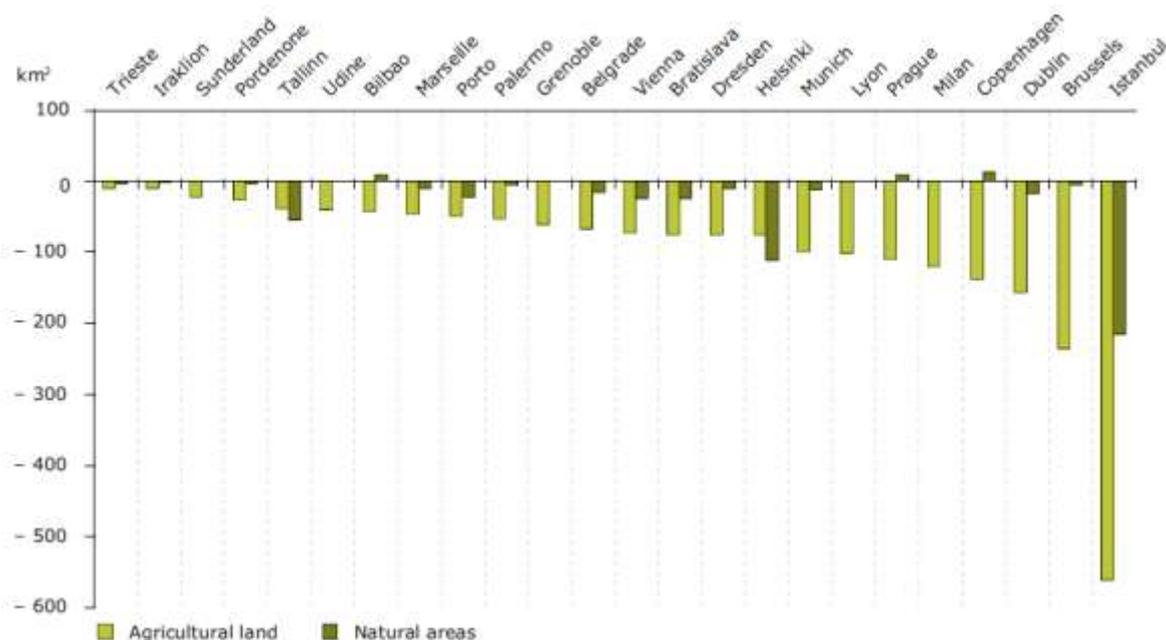
L'entropie de la structure spatiale (degré élevé d'homogénéité et de désordre spatial) est corrélée positivement avec la consommation d'énergie. Plus une distribution spatiale urbaine s'approche de l'urbanisation diffuse, plus la consommation d'énergie est importante. Enfin, l'exposant de la loi rang taille, indiquant le degré de hiérarchie de la distribution est négativement relié à la consommation énergétique. Une valeur faible de cet indicateur indique une distribution a-hiérarchique. Au contraire, plus cet exposant est élevé, plus l'ordre complexe intra-urbain est hiérarchisé : un petit nombre de cellules concentre une grande partie de la population. Le résultat indique donc une efficacité énergétique supérieure des structures urbaines hiérarchiques. Les villes les plus hiérarchisées ont simultanément un recours moindre au mode automobile, illustrant les mutualisations énergétiques permises par la construction d'infrastructures de transport collectif.

Ces résultats mettent en évidence la pertinence d'une approche multidimensionnelle, c'est-à-dire ne cherchant pas à résumer les villes à une variable unique et l'utilité d'indicateurs morphologiques, en complément d'indicateurs socio-économiques plus classiques.

2. AUTRES IMPACTS DE L'ÉTALEMENT URBAIN ET DE LA FRAGMENTATION

Impact de la structure spatiale sur la consommation de terres arables et de ressources

L'étalement urbain récent dans les villes européennes a majoritairement eu lieu au dépend des terres agricoles, comme le montre le graphique suivant pour une sélection de villes européennes. La conversion du foncier rural sur les franges urbaines en foncier urbain est en effet encouragée par le marché. Les incitations économiques pour les propriétaires sont évidentes car cette conversion de terres agricoles en foncier urbain permet un profit important à très court terme. En Pologne, le prix des terres agricoles a augmenté de 40% en moyenne entre 2004 et 2006. La conversion de terres agricoles en foncier urbain a des conséquences majeures sur la biodiversité. Elle hypothèque également les capacités futures des villes à assurer une production agricole locale pour leurs habitants.

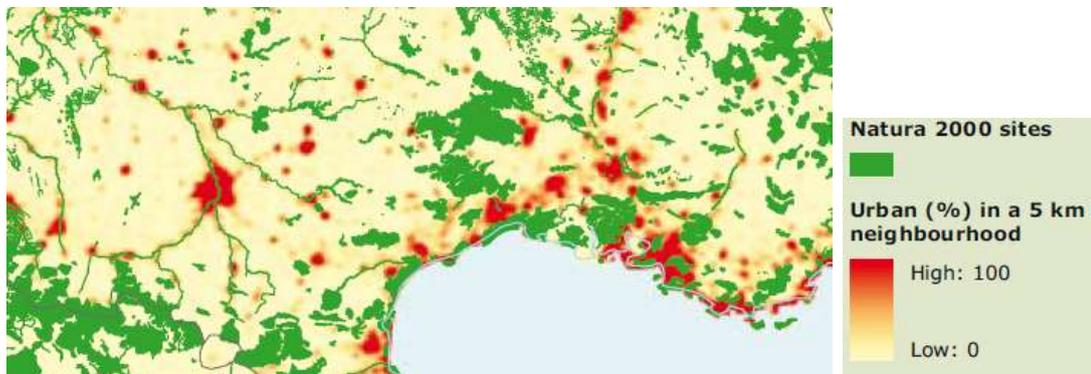


Part de l'étalement urbain sur les terres agricoles et les zones naturelles dans une sélection de villes européennes [3]

Étalement urbain et pressions sur les écosystèmes et les zones naturelles protégées

L'impact de l'étalement urbain sur les zones naturelles protégées est inquiétant à l'échelle européenne. Les zones naturelles et les écosystèmes périurbains jouent un rôle fondamental pour les équilibres locaux. Ils assurent des fonctions essentielles en termes de production agricole, d'habitat pour les espèces naturelles, de tourisme, ou encore en termes de gestion des ressources en eau. L'étalement urbain à proximité de ces zones fragiles est susceptible de perturber ces équilibres éco-

systemiques. La carte suivante montre la proximité entre les développements urbains et les sites fragiles (sites Natura 2000) dans la région méditerranéenne.



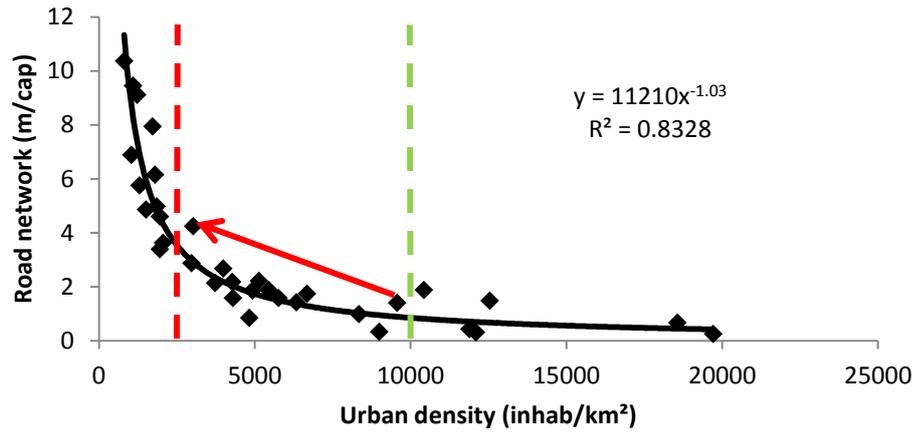
Pression urbaine sur les sites Natura 2000 dans la région méditerranéenne française [3]

Par ailleurs, même lorsque l'urbanisation ne se rapproche pas directement des sites naturels fragiles, la fragmentation urbaine a des conséquences indirectes sur les équilibres éco-systémiques locaux. Le développement des réseaux de transport entre les zones urbaines fragmentées augmente le nombre de barrières artificielles qui morcellent de façon difficilement réversible le territoire et contribuent à la dégradation des écosystèmes.

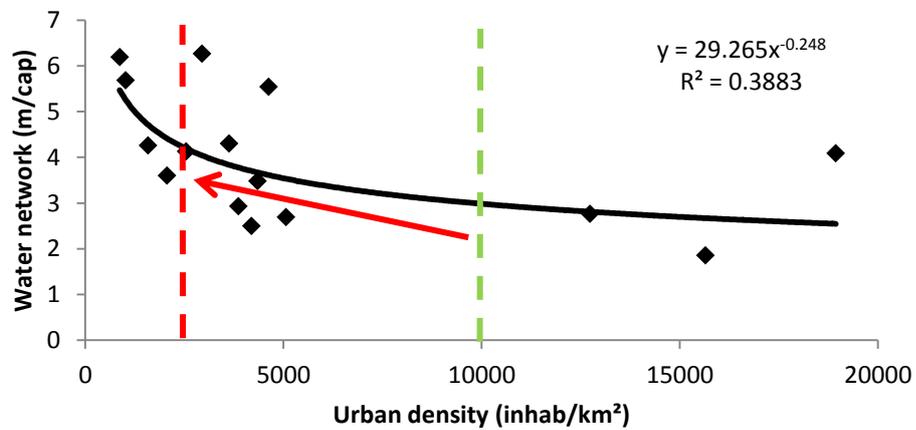
Impacts économiques

D'un point de vue micro-économique, l'étalement urbain a un impact fort sur le pouvoir d'achat, la compétitivité des entreprises et le coût des infrastructures. Pour les ménages, l'étalement urbain, en dilatant les distances de transport, contribue fortement à l'augmentation du budget transport. Couplée à l'augmentation des prix du carburant, la dépendance des ménages à la voiture individuelle dans les zones à faible densité a des conséquences significatives en termes de précarité énergétique. Cette précarité énergétique liée au transport s'ajoute aux difficultés financières des ménages déjà fragiles. Les tensions prévisibles sur les énergies fossiles rendront ce phénomène encore plus sensible dans les années et décennies à venir. Pour les entreprises, les coûts de transport et de congestion qui dérivent de la faible densité urbaine pèsent en termes de compétitivité économique.

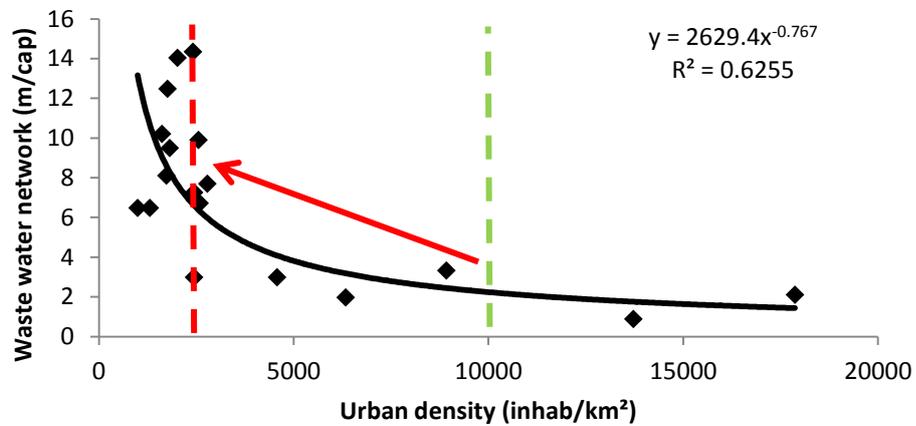
En termes de coûts d'infrastructures, l'étalement urbain coûte extrêmement cher à la collectivité. Les trois graphiques suivants, adaptés de Müller et al. [31], montrent la corrélation entre longueur des infrastructures habitant (en mètres/capita) et la densité urbaine (en habitant au km²). La relation entre densité et longueur d'infrastructures par habitant est fortement non linéaire.



Relation entre densité urbaine et longueur du réseau viaire par habitant [31]



Relation entre densité urbaine et longueur du réseau d'eau par habitant [31]



Relation entre densité urbaine et longueur du réseau d'assainissement par habitant [23]

Les zones à faible densité nécessitent une quantité significativement plus élevée d'infrastructures par habitants que les zones denses. Les lignes pointillées figurent deux niveaux de densité caractéristiques des villes européennes :

- 10 000 habitants par km² (ligne verte), équivalent à un cœur urbain moyennement dense (la densité moyenne de Paris intra-muros varie entre 22 000 et 24 000 habitants au km²)

- 2 500 habitants au km², qui correspondent à la densité moyenne d'une zone résidentielle péri-urbaine.

Le tableau suivant présente les différences en termes de longueurs d'infrastructure et donc de coût par habitant pour ces deux situations type. Ces différences vont de +41% pour le réseau de distribution d'eau à +317% pour le réseau viaire.

	Réseau viaire (m/hab)	Réseau d'eau (m/hab)	Réseau d'assainissement (m/hab)
Densité de 10 000 hab/km ²	0.85	2.98	2.24
Densité de 2 500 hab/km ²	3.54	4.21	6.49
Différence relative	+317%	+41%	+190%

CHAPITRE IV

QUELLES POLITIQUES ET STRATEGIES POUR FAVORISER L'EMERGENCE DE STRUCTURES SPATIALES URBAINES SOBRES EN ENERGIE ET DURABLES ?

Les chapitres précédents ont montré la diversité des causes de l'étalement urbain et examiné ses différents impacts. La lutte contre l'étalement urbain est essentielle pour assurer un futur durable pour les villes françaises et européennes. Une évolution dans le bon sens de la structure spatiale des villes au cours des prochaines décennies sera un levier essentiel pour le succès de la transition énergétique. Au contraire, si les dynamiques actuelles d'étalement urbain et de déstructuration spatiale des villes ne sont pas contrées ou pour le moins ralenties, la transition vers une société plus durable sera compromise.

La complexité et la variabilité des contextes urbains empêchent l'adoption de stratégies ad-hoc de lutte contre l'étalement urbain. L'émergence des structures spatiales urbaines est due à un large éventail de facteurs économiques, réglementaires, sociaux, ou encore financiers. Les stratégies doivent donc nécessairement prendre en compte l'intégralité des facteurs spécifiques à chaque contexte. Par ailleurs, du fait de l'influence de facteurs exogènes, la lutte notamment contre l'étalement urbain ne peut être menée à l'échelle uniquement de la ville et des collectivités locales. Les problèmes induits par l'étalement urbain imposent une réponse forte et intégrée de la part de tous les acteurs, de l'échelon local à l'échelon national, à l'échelon européen. Les villes françaises s'inscrivent en effet dans le système des hiérarchies de tailles des villes européennes qui est intégré par une loi de Zipf. Les cartes montrées dans ce chapitre montrent clairement que les villes françaises appartiennent à des *systèmes de villes* qui débordent les frontières nationales, en particulier le triangle Paris-Londres-Bruxelles et au delà son extension vers Rotterdam et le Randstad, ce qui explique l'étalement urbain le long de l'axe de TGV Paris-Bruxelles. Les réponses doivent donc s'inscrire dans un cadre européen.

Outils et stratégies à l'échelon européen

Les investissements dans le domaine des transports, et plus particulièrement des routes, sont déterminants pour la structure spatiale des territoires. L'orientation des fonds structurels et les fonds de cohésion de l'Union Européenne peut potentiellement nourrir ou au contraire aider à contenir l'étalement urbain [3]. Les investissements dans les autoroutes et les connections routières attirent

de façon systématique de nouveaux développements urbains le long des nouveaux axes. L'interdépendance entre usage du foncier et réseaux de transports est complexe, et influencée par les *patterns* de mobilité. La création de nouveaux développements suburbains sans planification de transports publics enferme ces nouveaux développements dans un cercle de dépendance à la voiture individuelle.

Mais les fonds structurels d'intervention peuvent également contribuer à redévelopper les cœurs urbains et à les rendre plus attractifs pour les habitants, le secteur public et les investissements privés, contribuant alors à soutenir le développement de villes plus compactes. L'investissement dans les transports sur rail peut par exemple contribuer à la densification autour des arrêts [32]. Cette réflexion sur la place et le rôle des transports dans l'aménagement du territoire et de leurs impacts sur la structure spatiale des villes est également nécessaire à l'échelon national.

Outils et stratégies à l'échelon national et local

Le rôle des pouvoirs publics tant à l'échelon national que local dans la lutte contre l'étalement urbain est fondamental. Aux deux échelles, il présuppose une prise de conscience forte des externalités négatives liées à l'étalement urbain, présentées en détail dans ce rapport. La lutte contre l'étalement urbain et la fragmentation des territoires nécessite une refonte des mécanismes de création de valeur à court terme qui s'appuient sur la conversion du foncier rural en foncier résidentiel ou commercial et qui contribuent au financement des collectivités locales.

Dans quatre régions européennes (Land du Bade-Wurtemberg, région flamande, canton de Bâle Campagne et communauté autonome basque), l'ACAD³³ a observé que la nécessité de diminuer le rythme de consommation des espaces agricoles est clairement affichée comme une priorité par les pouvoirs publics. Les pays disposant des meilleurs outils d'observation (données cadastrales numérisées, SIG) ont généralement les objectifs les plus ambitieux [33]. Le Bade-Wurtemberg a ainsi prévu de diviser par trois d'ici à 2020 son rythme actuel de consommation d'espace agricole. Dans des régions qui, comme la Flandre, ne possèdent pas ces outils ou qui, comme la France, n'ont pas fini de les mettre en place, la mise en œuvre des politiques se heurte à l'impossibilité de les appuyer sur des objectifs chiffrés.

L'importance du pouvoir accordé aux communes françaises dans la gestion de leur urbanisme apparaît comme une exception. Dans les quatre pays observés, marqués il est vrai par un fort fédéralisme, la gestion et l'aménagement du territoire sont partagés entre différents niveaux d'autorités administratives et politiques. En matière d'urbanisme, la concertation y est donc la règle.

³³ Association des consultants en aménagement et développement des territoires

Dans les quatre régions observées, le zonage n'a qu'un effet limité sur la capacité à contenir l'étalement urbain. D'une part parce que les plans d'urbanisme peuvent être révisés régulièrement. D'autre part parce que le zonage ne fait pas apparaître l'utilisation effective des sols. Une zone classée « à urbaniser » à un moment donné peut en effet être encore en grande partie rurale ou, à l'inverse ne laisser que peu de possibilités d'expansion, la majeure partie du terrain étant déjà aménagée. Trois des régions observées (Flandres, Pays Basque, Bade-Wurtemberg) imposent, pour les logements neufs, des règles de densité minimales (soit en nombre de logements, soit en surface de plancher). Ces règles, que certaines communes françaises commencent à imposer, permettent d'arriver à une véritable densification (20 à 70 logements par hectare).

Versement pour sous-densité

Le versement pour sous-densité est réservé aux zones urbaines ou zones à urbaniser dans les Plans locaux d'urbanisme ou les Plans d'occupation des sols. Cet outil est destiné à permettre une utilisation plus économe de l'espace et à lutter contre l'étalement urbain. Ce dispositif permet aux communes et EPCI compétents en matière de PLU et qui le souhaitent d'instaurer un seuil minimal de densité par secteur. En deçà de ce seuil, les constructeurs devront s'acquitter d'un versement égal au produit de la moitié de la valeur du terrain par le rapport entre la surface manquante pour que la construction atteigne le seuil minimal de densité et la surface de la construction résultant de l'application de ce seuil.

Politique de ville compacte : l'exemple de Portland, Oregon

En 1972, Portland a adopté un ensemble de lois extrêmement strictes contre l'étalement urbain et pour préserver les terres agricoles, pilier de l'économie de l'Oregon. Ce paquet législatif a réussi à contrer la tendance à l'étalement urbain et à faire baisser de façon significative le taux de conversion de foncier rural en foncier urbain. Cette stratégie a contribué à la fois à la protection des terres agricoles et des écosystèmes locaux.

Une série de grandes entreprises dont Hewlett-Packard, Intel et Hyundai ont par la suite investi massivement à Portland, et assuré que la proximité de la nature avait contribué à leur choix d'implantation. Contrairement à la plupart des pronostics d'alors, la ville ne s'est pas effondrée économiquement avec l'augmentation des prix du foncier, bien au contraire, avec l'émergence au cours des dernières décennies d'un écosystème d'entreprises high-tech, et une croissance démographique de plus de 500 000 personnes pour l'Oregon.

Les outils mis en œuvre chez certains de nos voisins méritent donc d'être observés avec attention si l'on veut que la France apprenne à mieux gérer ses paysages et ses terres agricoles. Région la plus vertueuse dans le domaine, le Land du Bade-Wurtemberg mène par exemple une politique ambitieuse (communication, aides aux études préalables) visant à sensibiliser les communes aux vertus de la densité (économies en terme d'infrastructures et d'équipements publics, sobriété énergétique, protection de la biodiversité, etc.).

Les encadrés suivant présentent différentes stratégies mises en œuvre pour lutter contre l'étalement urbain et contribuer à la redensification et à la réintensification des territoires.

Stratégies pour une ville compacte: l'exemple de Munich [3]

Munich, capitale de la Bavière, est la 3^{ème} ville d'Allemagne. La surface totale de l'agglomération est de 791 km² et la population résidentielle en 1990 était de 1,69 millions d'habitants. Munich est l'une des seules villes européennes où l'extension spatiale de la ville a cru moins vite que sa population. Par ailleurs, le niveau de fragmentation de la ville reste limité par rapport à la plupart des villes européennes. Suite aux importantes destructions dues aux bombardements de la deuxième guerre mondiale, la reconstruction a été fondée sur un *mix* de deux approches. Une partie des zones détruites a été reconstruite à l'identique dans le centre historique, mais une partie, en périphérie du centre, n'a pas été reconstruite, et a laissé sa place à des espaces verts et à un périphérique autoroutier.

Dans les années 1960, le développement de la voiture individuelle et l'augmentation des flux migratoires des zones rurales vers Munich ont contribué à l'augmentation de la pression foncière. Au même moment, le gouvernement fédéral ratifiait une nouvelle loi sur la construction. Ces différents moteurs ont amené les autorités de l'agglomération munichoise à évoluer d'un modèle traditionnel de planification urbaine à un modèle plus intégré, en mettant en place une série de recommandations touchant à tous les aspects de l'urbain, tels que l'économie, le social, l'éducation, la culture, mais également la planification urbaine. Le premier plan de développement urbain intégré a vu le jour en 1963.

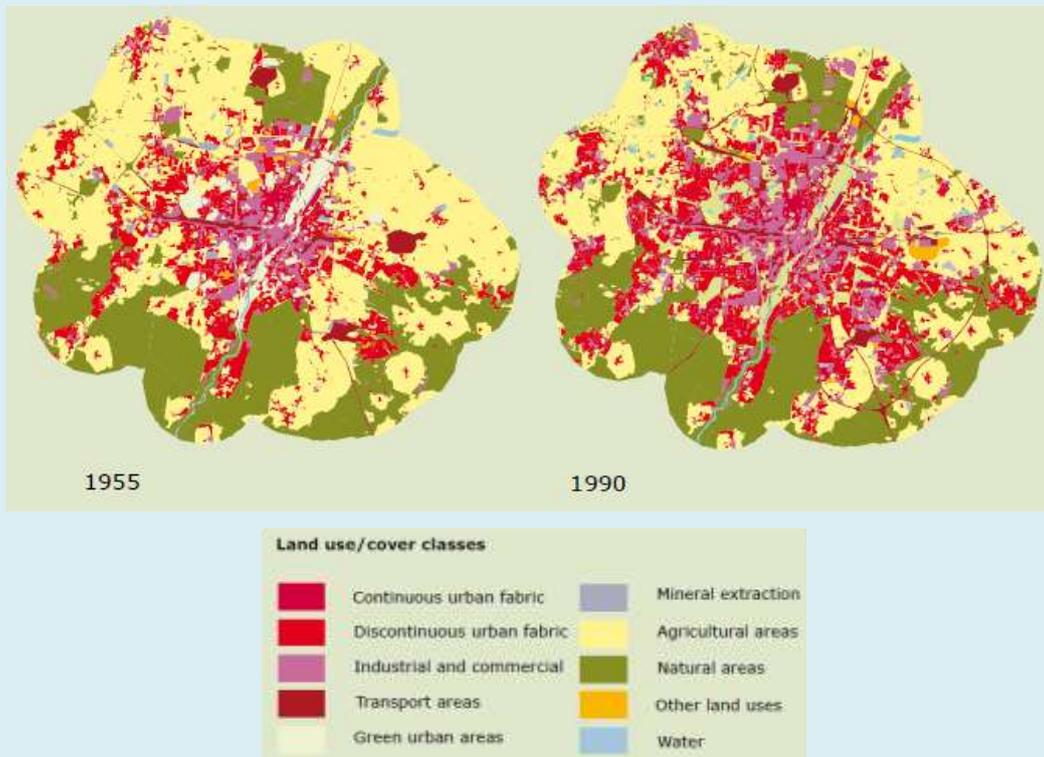
Les deux décennies suivantes ont vu émerger une concertation forte entre les municipalités de l'agglomération. Quatre objectifs clés de planification spatiale intégrée ont permis à Munich de limiter l'étalement urbain et de demeurer relativement compacte :

- un équilibre entre les intérêts économiques, sociaux et environnementaux
- un développement urbain prioritairement à l'intérieur des zones urbaines, et non en périphérie, notamment grâce à la présence de nombreuses friches urbaines (militaires, industrielles, ferroviaires et aéroportuaires)

- un développement ambitieux des transports en commun et un développement limité du réseau routier

- la préservation de grands espaces verts autour de la ville

Grace à cette série de mesures, l'expansion spatiale de l'agglomération munichoise a été contenue, comme le montrent les deux cartes suivantes.



Evolution de l'extension spatiale de Munich entre 1955 et 1990 [3]

Les leçons à tirer de l'expérience munichoise pour la conservation d'un modèle urbain compact et pour limiter l'étalement urbain sont les suivantes :

- intégration du plan de développement urbain

- coopération régionale

- participation de tous les acteurs au processus de planification urbaine

- effort ciblé et prioritaire sur les friches urbaines

- amélioration constante des transports en commun et limitation du nombre de nouvelles routes

- maintenir la ville compacte et urbaine d'une part et conserver les espaces verts existants d'autre part

- garantir la disponibilité des ressources, notamment financières, pour la mise en œuvre des différentes stratégies.

Build in My Back Yard – BIMBY [34]

Le projet français BIMBY ("Build in My Back Yard"), soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche, vise à la définition, à court terme, d'une nouvelle filière de production de la ville, qui soit capable d'intervenir là où les filières "classiques" sont incapables d'intervenir : au sein des tissus pavillonnaires existants, qui représentent la grande majorité des surfaces urbanisées en France et certainement en Europe.

L'hypothèse centrale du projet BIMBY est la suivante : c'est la capacité des acteurs de l'urbain (habitants, techniciens, élus) à mobiliser le foncier des tissus pavillonnaires existants qui permettra de financer le renouvellement et la densification progressive de ces quartiers. On observe en effet que dans de nombreux cas, l'intérêt des individus (notamment à diviser un terrain pour mieux valoriser son bien sur le marché immobilier) peut aller dans le sens des intérêts de la collectivité (à proposer une offre diversifiée de logements individuels sur son territoire sans engendrer d'étalement urbain) :

- si l'on sait encourager, maîtriser et canaliser ces initiatives individuelles par la définition de règles d'urbanisme adéquates et la mise à disposition d'un conseil au particulier en matière d'architecture et d'urbanisme dense.

- si l'on cible les moments où les intérêts individuels et collectifs se rejoignent, notamment au moment des ventes des maisons individuelles ou à l'occasion des événements et des projets de vie des habitants.



Une nouvelle maison construite entre deux maisons, après division de la parcelle de droite, créant un front de rue et préservant l'intimité des maisons voisines [34]

Dans les quartiers bien situés des agglomérations, la somme de la valeur du terrain créé par division parcellaire et de la maison amputée de ce terrain est supérieure à la valeur de la maison initiale. L'opération permet à son propriétaire de mieux valoriser son patrimoine et d'en mobiliser tout ou partie afin de financer ses projets. Elle permet à la commune de créer un terrain à bâtir dans un quartier déjà desservi et équipé. Ce sont ainsi des dizaines de milliers de terrains à bâtir qui pourraient ainsi être libérés chaque année dans les tissus pavillonnaires construits ces dernières décennies, sans engendrer aucun étalement urbain et à un coût minime pour la collectivité.

Rôle des investisseurs institutionnels : structure spatiale et transition énergétique

Les investisseurs institutionnels, et notamment la Caisse des Dépôts, ont un rôle clé à jouer pour que l'évolution de la structure spatiale des territoires contribue au développement durable et à la transition énergétique. La Caisse des Dépôts, de par son rôle fondamental d'investisseur de long terme et pour l'intérêt général, est à l'articulation des différents mécanismes qui sont à l'origine et orientent sur le temps long la structure spatiale des territoires. Les investissements dans le domaine des transports sont en premier lieu susceptibles d'influencer de façon significative l'évolution des formes urbaines, et ce tant dans un sens vertueux (améliorer l'accessibilité et contribuer aux mobilités douces) que dans le sens inverse (augmenter les distances moyennes parcourues et contribuer in-fine à la dilatation des structures spatiales). Dans son rôle d'investisseur institutionnel dans l'immobilier, et notamment le résidentiel, la Caisse des Dépôts dispose d'un levier puissant pour contribuer à l'émergence de formes urbaines compactes, sobres et efficaces sur le plan énergétique, résilientes et socialement inclusives. Enfin, son rôle d'accompagnement et d'appui stratégique auprès des collectivités locales qui vise à accompagner le développement et la modernisation des territoires permet également d'agir indirectement sur les mécanismes de production de la ville.

L'accompagnement des territoires dans la lutte contre le changement climatique et le soutien à la transition énergétique constituent une des priorités de la Caisse des Dépôts. La Caisse des Dépôts dispose d'une situation privilégiée au cœur des mécanismes de création de la ville, et d'une diversité de leviers d'action. Le développement et le renforcement des synergies entre les différents projets soutenus et les différents champs d'intervention de la Caisse des Dépôts sont susceptibles de favoriser l'émergence de formes urbaines et de structures spatiales plus durables qui supportent la transition énergétique.

Références

- [1] L. Mumford, *The culture of cities*. New York: Harcourt, Brace, Jovanovich, 1970.
- [2] S. Kostof, *The city assembled: the elements of urban form through history*. Boston: Little, Brown, 1992.
- [3] European Environment Agency and European Commission, *Urban sprawl in Europe: the ignored challenge*. Copenhagen, Denmark : Luxembourg: European Environment Agency ; Office for Official Publications of the European Communities, [distributeur], 2006.
- [4] P. Panerai, *Paris métropole: formes et échelles du Grand-Paris*. Paris: Villette, 2008.
- [5] World Bank, "Metropolitan Dynamics in Shanghai and the Yangtze Delta Region," 2007.
- [6] Y. Chen and Y. Zhou, "Scaling laws and indications of self-organized criticality in urban systems," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 35, no. 1, pp. 85–98, Jan. 2008.
- [7] C. Yanguang, "A Wave-Spectrum Analysis of Urban Population Density: Entropy, Fractal, and Spatial Localization," *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2008.
- [8] Y.-H. Tsai, "Quantifying Urban Form: Compactness versus 'Sprawl'," *Urban Stud*, vol. 42, no. 1, pp. 141–161, Jan. 2005.
- [9] F. Le Néchet, "Consommation d'énergie et mobilité quotidienne selon la configuration des densités dans 34 villes européennes.," *Cybergeo : European Journal of Geography*, May 2011.
- [10] M. Batty, "Polynucleated Urban Landscapes," *Urban Stud*, vol. 38, no. 4, pp. 635–655, Apr. 2001.
- [11] K. H. Schaeffer and E. Sclar, *Access for All: Transportation and Urban Growth*. Columbia University Press, 1980.
- [12] M. Antrop, "Landscape change and the urbanization process in Europe," *LANDSCAPE AND URBAN PLANNING*, vol. 67, no. 1–4, pp. 9–26, 2004.
- [13] H. W. Richardson and C.-H. C. Bae, *Urban Sprawl in Western Europe and the United States*. Ashgate Publishing, Ltd., 2004.
- [14] C. Couch and J. Karecha, "Controlling urban sprawl: Some experiences from Liverpool," *Cities*, vol. 23, no. 5, pp. 353–363, Oct. 2006.
- [15] I. Audirac, "Information Technology and Urban Form: Challenges to Smart Growth," *International Regional Science Review*, vol. 28, no. 2, pp. 119–145, Apr. 2005.
- [16] R. Amindarbari and A. Sevtsuk, "Measuring Growth and Change in Metropolitan Form," *City Form Lab at the Singapore University of Technology and Design UAA 2013*, 2013.
- [17] Y. Zahavi, "Travel time budgets and mobility in urban areas," May 1974.
- [18] Y. Zahavi and A. Talvitie, "Regularities in travel time and money expenditures," *Transportation Research Record*, no. 750, 1980.

- [19] J. Allaire, "Choisir son mode de ville : formes urbaines et transports dans les villes émergentes," *Cahiers de global chance*, vol. 21, pp. 66–70, 2006.
- [20] M. H. Echenique, A. D. J. Flowerdew, J. D. Hunt, T. R. Mayo, I. J. Skidmore, and D. C. Simmonds, "The MEPLAN models of Bilbao, Leeds and Dortmund," *Transport Reviews*, vol. 10, no. 4, pp. 309–322, 1990.
- [21] J. Wu, "Environmental amenities, urban sprawl, and community characteristics," *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 52, no. 2, pp. 527–547, Sep. 2006.
- [22] L. D. Frank and G. Pivo, "Impact of mixed use and density on utilization of three modes of travel: single occupant vehicle, transit, walking," *Transportation Research Record*, no. 1466, 1994.
- [23] L. Bourdic, "Urban density and private transport energy consumption - From global trends to local solutions," Imperial College, London, Center for Environmental Policy, 2011.
- [24] J. R. Kenworthy and F. B. Laube, "Patterns of automobile dependence in cities: an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy," *Transportation Research Part A*, vol. 33, pp. 691–723, 1999.
- [25] P. W. G. Newman and J. R. Kenworthy, "Gasoline Consumption and Cities: A Comparison of U.S. Cities with a Global Survey," *Journal of the American Planning Association*, vol. 55, no. 1, pp. 24–37, Mar. 1989.
- [26] E. Eidlin, "What Density Doesn't Tell Us About Sprawl," University of California Transportation Center, University of California Transportation Center, Working Paper, Oct. 2010.
- [27] C. Bradford, "Density Calculations for U.S. Urbanized Areas, Weighted by Census Tract," *Austin Contrarian*, 2008.
- [28] APUR, "Formes urbaines en Ile de France et émissions de gaz à effet de serre," Atelier Parisien d'Urbanisme, 2009.
- [29] R. Cervero, "Transit Transformations: Private Financing and Sustainable Urbanism in Hong Kong and Tokyo." Working paper, Pacific Basin Research Center, Soka University of America, 2008.
- [30] J. R. VandeWeghe and C. Kennedy, "A Spatial Analysis of Residential Greenhouse Gas Emissions in the Toronto Census Metropolitan Area," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 11, no. 2, pp. 133–144, 2007.
- [31] D. B. Müller, G. Liu, A. N. Lovik, R. Modaresi, S. Pauliuk, F. S. Steinhoff, and H. Brattebo, "Carbon emissions from infrastructure development," *Nature Climate Change*, 2013.
- [32] S. Handy, "Smart Growth and the Transportation-Land Use Connection: What Does the Research Tell Us?," *International Regional Science Review*, vol. 28, no. 2, pp. 146–167, Apr. 2005.
- [33] ACAD, "Lutte contre l'étalement urbain: enseignements des voisins de la France," 2012.

[34] “Le projet BIMBY en quelques mots.” [Online]. Available: <http://bimby.fr/2011/01/le-projet-de-recherche-bimby-en-quelques-mots>. [Accessed: 25-Oct-2013].

PARTIE III

LA TRANSITION DES SYSTEMES ENERGETIQUES

MESSAGES CLES DE LA PARTIE

1. Les parties précédentes ont montré que l'évolution de la structure spatiale des villes était susceptible de générer des contraintes à la transition énergétique sous la forme de chemins de dépendance, de phénomènes d'inertie et d'effets de seuil. Les villes cependant, par la concentration et l'échelle des activités, des habitants et des ressources, et par l'intensité et la complexité des interactions entre les acteurs économiques, offrent des opportunités systémiques d'accroissement de l'efficacité énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'échelle urbaine sera le niveau organisationnel dominant de l'innovation et de la transition énergétique. La transition énergétique dans les territoires nécessite la mobilisation de tous les échelons de gouvernance locale et de tous les acteurs.
2. Les politiques de planification intégrée de l'énergie urbaine doivent viser en priorité à une diminution de la demande énergétique, en mettant en œuvre les effets de levier d'efficacité énergétique suivants : (1) la structure spatiale, la forme urbaine et la densité ; (2) la qualité de l'environnement construit et les politiques de transport ; (3) l'amélioration des systèmes énergétiques. Agir sur le premier levier, en encourageant la ville compacte permet de diviser par deux les consommations énergétiques. Agir sur le deuxième levier en améliorant la qualité de l'environnement construit permet de diminuer les consommations énergétiques de 40%. Dans un second temps, et après une diminution préalable des niveaux de demande énergétique, les efforts doivent porter sur des stratégies axées sur l'offre énergétique pour en diminuer l'intensité carbone et la dépendance aux énergies fossiles. Les études montrent qu'une approche intégrée qui associe planification spatiale, rénovation énergétique et optimisation de l'offre énergétique permet de diviser par 4 la consommation énergétique urbaine finale.
3. L'intégration de ces politiques énergétiques urbaines est donc nécessaire. Elle doit se fonder sur la coordination de la planification spatiale et foncière avec la planification énergétique, ainsi qu'avec les politiques sectorielles concernant l'industrie, les bâtiments, le transport, la nourriture, la santé, l'environnement, le climat, la sécurité, afin que ces politiques se soutiennent mutuellement.
4. Les villes concentrent une grande diversité d'activités. D'importantes économies d'énergie sont possibles en augmentant les synergies entre les usages. La diversité de la gamme énergétique urbaine depuis les procédés industriels de haute température jusqu'à la basse température de chauffage des logements permet la maximisation de l'efficacité énergétique grâce à des échanges de flux d'énergie, que ce soit par des systèmes de

cogénération classiques ou par des procédés plus complexes d'utilisation de la chaleur "en cascade".

5. L'optimisation de l'offre énergétique passe notamment par une utilisation accrue des énergies renouvelables au sein du portfolio énergétique. Cependant, il existe un décalage très important entre les densités de demande énergétique en milieu urbain (en W/m^2) et les densités locales de production possible d'énergies renouvelables. Ce décalage implique de concevoir le rôle des énergies renouvelables en milieu urbain non comme un déploiement généralisé de micro-unités dans le tissu urbain, mais sous la forme de systèmes relativement centralisés, avec les problématiques classiques de conversion et de distribution d'énergie.

CHAPITRE I

L'INTEGRATION DES SYSTEMES ENERGETIQUES ET LA TRANSITION

1. LES SPECIFICITES DES SYSTEMES ENERGETIQUES URBAINS

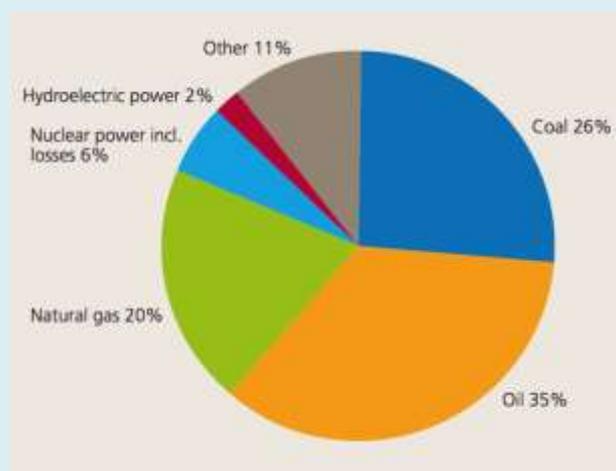
Le système énergétique urbain fournit les services (par exemple l'électricité, le chauffage, le refroidissement et le transport) nécessaires au fonctionnement de la ville. L'interdépendance de la ville et de son système énergétique est évidente. Un système énergétique inefficace peut être un frein au développement économique, à l'intégration sociale et à la croissance d'une zone urbaine. Par *système énergétique urbain*, nous entendons le système intégré complet de l'énergie (l'électricité et les carburants, ainsi que parfois la chaleur) fournie à l'intérieur des limites urbaines, la conversion de ces vecteurs énergétiques, la fourniture des services d'énergie finale, ainsi que les flux et le retraitement des déchets. Ce système comprend des ressources (par exemple le gaz naturel ou le pétrole), des technologies (par exemple la cogénération de chaleur et d'électricité) et des réseaux (par exemple les réseaux de chaleur et d'électricité).

Les villes sont le bon niveau d'intégration et d'optimisation des systèmes énergétiques. En effet, malgré l'apparente individualité de chaque ville, les données empiriques suggèrent que des lois d'échelle pour ces services urbains s'étendent à tout le spectre des villes [1], ce qui permet d'optimiser les nouvelles technologies en fonction des économies d'échelle spécifiques à la dimension urbaine. Les flux de ressources naturelles et énergétiques du XX^e siècle étaient largement indépendants et non intégrés. Les données et les technologies de gestion des systèmes manquaient pour mettre en œuvre les économies d'échelle. Les processus de production, de conversion, de distribution de l'énergie et la demande énergétique n'étaient pas intégrés. Les avancées récentes de la recherche en gestion des données et en optimisation en temps réel des systèmes par les technologies de l'information, permettent désormais de lever les barrières technologiques à cette intégration. Une transition systémique est devenue possible. Elle implique un renouvellement de la conception des infrastructures énergétiques.

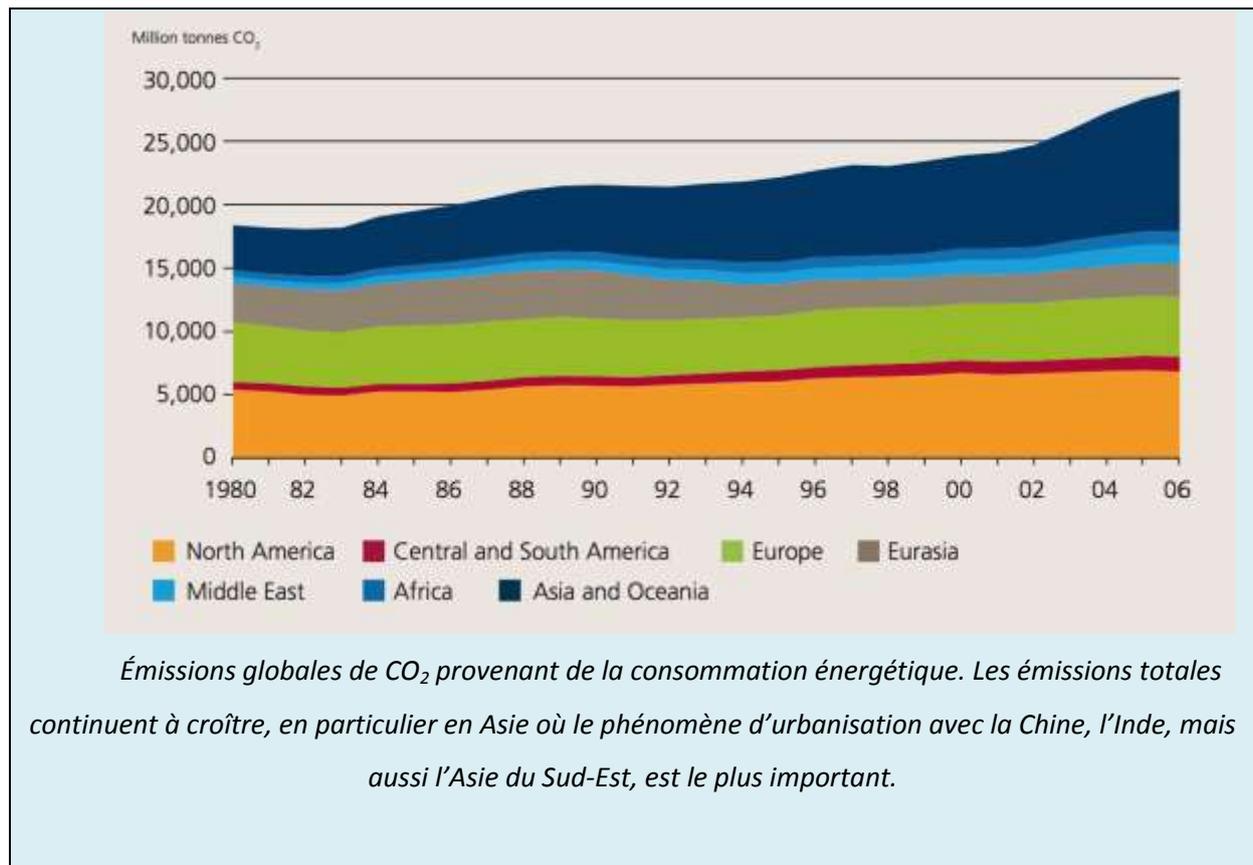
L'énergie et les émissions globales

Les trois quarts des émissions globales de CO₂ sont attribuables aux villes selon les Nations Unies et 60 % de la consommation énergétique selon l'AIE. Les émissions mondiales totales se montent à 30.000 millions de tonnes de CO₂ par an. Avec les autres émissions de GES, les émissions totales sont de 50.000 millions de tonnes équivalent CO₂. Selon les prévisions de l'Agence Internationale de l'Énergie, les émissions de CO₂ provenant de la consommation d'énergie vont continuer à croître pour atteindre 42.000 millions de tonnes en 2030 et 62.000 millions de tonnes en 2050, ce qui est cohérent avec une projection de doublement de la population urbaine mondiale en 2050.

La consommation énergétique est très inégalement répartie dans le monde. La consommation énergétique moyenne par habitant des États-Unis est plus du double de celle de L'union Européenne (respectivement 90.000 kWh contre 43.000 kWh), ce qui donne une première indication sur les performances énergétiques très contrastées de deux modèles urbains différents.



L'énergie globale consommée est de 140.000 TWh. Les énergies fossiles sont dominantes et représentent 80% de la consommation totale pour seulement 10% pour les énergies renouvelables.



L'échelle urbaine va devenir le niveau organisationnel dominant de l'innovation énergétique. L'intégration a en effet joué un rôle clé dans l'amélioration de l'efficacité des processus industriels au cours des années 70 et 80. Si un cadre de marché favorable est mis en place, des transformations similaires dans l'intégration de l'utilisation des ressources énergétiques vont se produire. Il existe un potentiel considérable pour fournir des services énergétiques urbains équivalents ou supérieurs avec des flux de ressources réduits. La réduction de l'intensité des ressources par unité de service peut être de 20 % à 50 % selon les secteurs [2].

Les systèmes énergétiques urbains ne sont pas fondamentalement différents des autres systèmes énergétiques : tous doivent répondre à une demande d'énergie et mobiliser un ensemble diversifié de ressources et d'options technologiques. Toutefois, les systèmes urbains ont des caractéristiques distinctes [3]:

- une densité élevée de population,
- une densité élevée d'activités avec la densité énergétique et la pollution associées,
- un important degré d'ouverture (et même d'interdépendance avec des systèmes à plus grande échelle) en termes d'échanges de flux d'informations, d'habitants et de ressources,
- une forte concentration des ressources en capital économique et humain qui peuvent être mobilisées pour l'innovation et la transition.

Les zones urbaines sont caractérisées par de fortes densités spatiales de demande énergétique³⁴, qui correspondent à leurs concentrations élevées de population et à leur faible niveau de production et d'extraction énergétique. Les villes sont des lieux de gestion, d'échange et d'utilisation des ressources énergétiques, plutôt que de d'extraction ou de production d'énergie. Dans l'économie actuelle fondée sur les combustibles fossiles, les villes dépendent des ressources mondiales. Cette caractéristique a des conséquences profondes pour l'utilisation locale de l'énergie et pour les politiques.

Les niveaux élevés de la demande énergétique urbaine offrent un important potentiel d'économies d'échelle dans les systèmes énergétiques, de l'approvisionnement au transport et à la distribution. Comme les villes concentrent une grande diversité d'activités, d'importantes économies de synergie sont également possibles. La large gamme énergétique urbaine depuis les procédés industriels de haute température jusqu'à la basse température de chauffage des logements permet la maximisation de l'efficacité énergétique grâce à des échanges entre les flux d'énergie dans le système, que ce soit par des systèmes de cogénération classiques ou par des procédés plus complexes d'utilisation de la chaleur " en cascade ". Ces synergies ne peuvent cependant être mises en œuvre que si les *patterns* d'utilisation de l'énergie dans une ville sont suffisamment diversifiés et intégrés dans une planification spatiale de la mixité des profils énergétiques des bâtiments et des activités.

Ce chapitre développe les points suivants :

1. Il existe un potentiel considérable d'intégration de tous les systèmes énergétiques urbains, y compris l'électricité, la chaleur, le transport, l'eau et les déchets.
2. Cette intégration peut s'appuyer sur les leçons de l'intégration des processus industriels qui a été réalisée il y a une vingtaine d'années.
3. Nous disposons aujourd'hui d'algorithmes de modélisation et d'optimisation beaucoup plus puissants que ceux qui étaient disponibles dans la recherche industrielle dans les années 1990 ainsi que de nouveaux outils de modélisation multi-échelle.
4. Les villes disposent aujourd'hui de moyens beaucoup plus puissants pour collecter en temps réel l'information spatiale.
5. Nous avons aujourd'hui une idée beaucoup plus claire de la manière dont les optimisations globales peuvent émerger des propriétés d'auto organisation d'un système.

³⁴ Les densités spatiales de consommation énergétique correspondent à la quantité d'énergie consommée par unité d'aire urbaine. Elles sont souvent exprimées en W/m². La consommation d'énergie prise en compte dans les calculs de densité énergétique est fondée sur les méthodologies de comptage territorial basées sur la production.

2. LA COMPLEXITE DES SYSTEMES ENERGETIQUES URBAINS

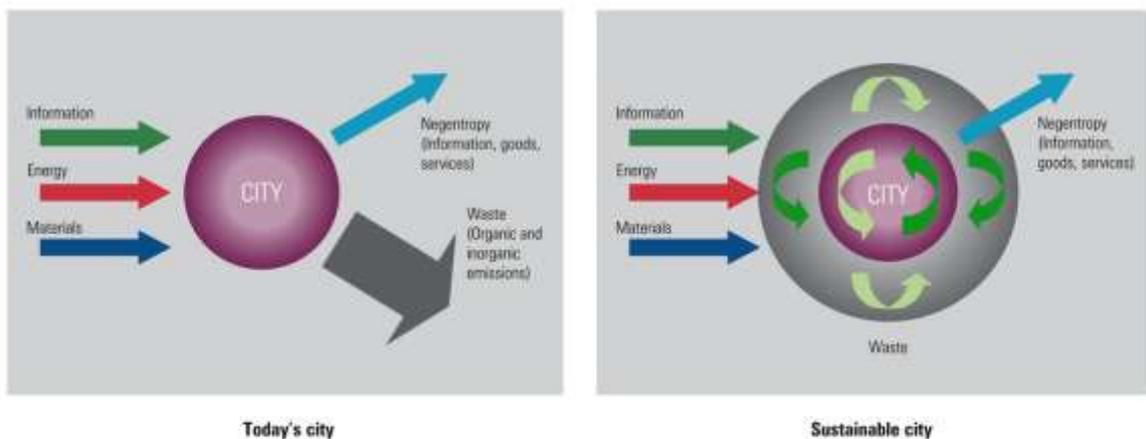
La transition énergétique ne pourra réussir que si nous comprenons comment les réseaux techniques s'intègrent dans les réseaux sociaux et économiques plus vastes. La transition des systèmes énergétiques urbains peut être analysée dans une perspective physique à partir d'approches thermodynamiques, métaboliques et de systèmes complexes, ainsi que dans une perspective sociale et économique. Comment alors définir les systèmes énergétiques urbains pour intégrer la complémentarité de ces différents points de vue ? Ils sont les processus combinés d'acquisition et d'usage de l'énergie dans une société et une économie donnée.

Cette définition met en lumière trois caractéristiques:

1. *Processus combinés* : Fournir des services énergétiques requiert différentes étapes incluant l'extraction des ressources, le raffinage, le transport, le stockage et la conversion en service final. Alors que l'environnement urbain peut être physiquement séparé de ces processus, ils doivent être intégrés dans l'analyse globale car ils sont utilisés pour répondre à la demande urbaine. Les visions thermodynamique et métabolique de la ville la décrivent à juste titre comme un système ouvert. Certains inventaires urbains d'émissions de gaz à effet de serre incluent ainsi les émissions liées à la génération de l'électricité hors de la ville et peuvent être étendus pour inclure une grande variété d'émissions amont ou liées au cycle de vie.
2. *D'acquisition et d'usage* : Les systèmes énergétiques représentent un équilibre entre l'offre et la demande. Ils doivent être conçus et optimisés à travers l'intégration de la demande et de l'offre. Les villes étaient autrefois conçues comme des centres passifs de demande qui devaient être approvisionnés par des sources extra urbaines. Les évolutions récentes démontrent des opportunités significatives pour générer de l'énergie à l'intérieur de la ville sous forme d'énergies renouvelables.
3. *Dans une société et une économie données* : Un système énergétique est un système socio technique qui ne comprend pas seulement des canalisations, des carburants et des équipements d'ingénierie. Les marchés, les institutions, la culture, le comportement des consommateurs et d'autres facteurs affectent la manière dont les infrastructures techniques sont construites et fonctionnent. Les systèmes énergétiques urbains doivent être vus dans un cadre plus large et prendre en compte le contexte local.

3. INTEGRATION DES SYSTEMES ENERGETIQUES : ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE ET EXERGIE

L'idée de métabolisme urbain repose sur la comparaison des flux urbains avec ceux d'un organisme vivant. Elle a d'abord été formalisée dans le domaine de l'écologie industrielle. À partir de l'article de Wolman [4], les chercheurs ont analysé les flux d'énergie, de nourriture, d'eau, de déchets et d'autres matériaux pour comprendre les impacts physiques urbains. Des formes d'énergie et de matériaux très ordonnés entrent dans le système urbain, comme du béton, de l'acier, de l'électricité, du gaz naturel. Des matériaux et de l'énergie très désordonnés quittent le système urbain, sous la forme de déchets incluant la chaleur résiduelle.



Métabolisme urbain linéaire et circulaire

Pour maintenir leur fonctionnement, les villes ont jusqu'à présent eu recours à un métabolisme linéaire où elles s'emparent de matériaux et d'énergie, où elles les consomment, où elles les convertissent, puis les rejettent sous forme de déchets dans les écosystèmes environnants [5]. Refermer en boucle ce métabolisme linéaire et recycler l'énergie et les matériaux en cascade permettrait d'accroître le caractère durable des villes. Ces stratégies fondées sur un métabolisme circulaire sont regroupées sous le terme d'approche *exergétique*. Des approches de planification énergétique fondées sur l'exergie ont été mises en œuvre, notamment à Rotterdam, et sont décrites dans cette section.

La planification énergétique fondée sur l'exergie

Cullen et Allwood [6] ont montré que la plus grande partie de la consommation énergétique est perdue sous forme d'énergie résiduelle non fonctionnelle. De ce fait, la demande d'énergie utile peut être réduite par un usage plus efficient de l'énergie, c'est-à-dire par des stratégies de basse exergie. Ces stratégies consistent en le recyclage en cascade des flux énergétiques en fonction de leur qualité (électrique, mécanique, thermique) pour améliorer l'ensemble du processus énergétique. Il s'agit de parvenir à une adaptation optimale des diverses catégories de demande énergétique avec les procédés de conversion d'énergie. Cette adaptation est obtenue par l'analyse exergétique. Celle-ci prend en compte les différences de qualité dans les formes d'énergie (quelle forme d'énergie est la plus adéquate pour accomplir une tâche particulière) et définit l'efficacité par rapport à la limite supérieure de la conversion énergétique permise par la seconde loi de la thermodynamique.

L'exergie de la chaleur est le travail théorique maximal qui peut être obtenu en amenant la chaleur à l'équilibre thermique avec l'environnement par un processus réversible [10]. Lors de l'évaluation du potentiel thermique d'une région, il est nécessaire de prendre la qualité de la chaleur en compte. Les industries locales, par exemple, peuvent avoir besoin de températures plus élevées que les habitations. La mise à niveau de la chaleur renouvelable à faible température à une température plus élevée au moyen d'une pompe à chaleur nécessite de l'énergie supplémentaire, alors que les industries utilisatrices de chaleur à haute température peuvent avoir de la chaleur résiduelle basse température disponible pour commencer une *cascade* de chaleur. La distribution de l'exergie doit donc faire un usage optimal de la chaleur à haute température [10].

Le potentiel d'amélioration des approches fondées sur l'exergie est de l'ordre de 50%

L'exemple de Vienne en Autriche illustre la valeur de l'analyse des flux d'exergie pour capturer le potentiel d'amélioration des systèmes énergétiques. La ville de Vienne génère une grande partie de ses besoins en électricité dans la ville elle-même, ce qui permet l'utilisation de la chaleur résiduelle par le réseau de chauffage urbain. En conséquence, l'efficacité du système énergétique de Vienne (mesurée simplement par des relations entrées- sorties) semble très élevée : 85 % de l'énergie secondaire est livrée en énergie finale et près de 50 % peut être utilisée comme énergie utile pour fournir les besoins de services énergétiques de la ville. Cette efficacité apparente élevée indique un faible potentiel d'amélioration. Cependant, l'analyse des flux d'exergie montre que l'efficacité énergétique entre énergie secondaire et utile est seulement d'environ 17 % [7]. L'analyse

des flux d'exergie suggère un potentiel d'amélioration significatif, par exemple à travers une utilisation de la chaleur en cascade qui corresponde mieux à la qualité exergetique des vecteurs énergétiques par rapport aux régimes de température requis par les utilisations finales.

Des analyses similaires ont été menées en Suisse à Genève, dans la ville suédoise de Malmö, et à Londres [8]. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant.

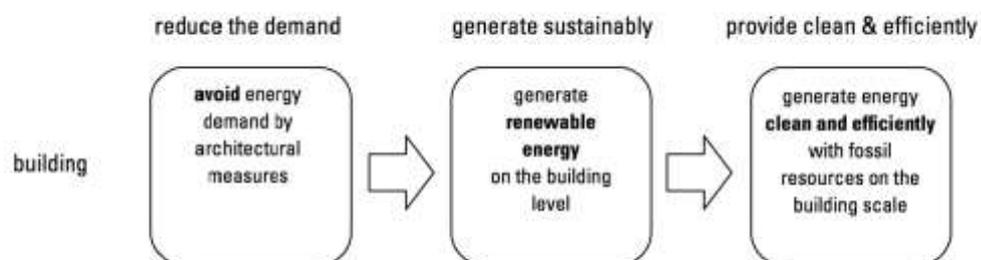
	Exergie utile comme pourcentage d'énergie	
	Secondaire	primaire
Genève (CH)	23.2	15.5
Vienne (A)	17.2	
Malmö (S)	21.2	12.7
Londres (UK)	11.3	6.2

Ces résultats confirment que les systèmes énergétiques urbains pourraient être améliorés considérablement par à une approche thermodynamique. Nakicenovic et al. [9] ont suggéré un potentiel d'amélioration théorique de 95% pour les pays de l'OCDE. Ce qui laisse penser que, dans les contraintes réelles de mise en œuvre, le potentiel d'amélioration pourrait être d'au moins 50%.

La stratégie traditionnelle en trois étapes

Depuis la fin des années quatre-vingt, les approches durables dans les zones urbaines ont suivi une stratégie en trois étapes:

1. Réduire la consommation
2. Utiliser des énergies renouvelables
3. Répondre à la demande restante de manière propre et efficace



Stratégie traditionnelle en trois étapes [10]

Cette stratégie semble constituer une recommandation logique pour une approche environnementale de l'énergie. Cependant, au cours des vingt ans où elle a été utilisée, elle n'a pas conduit à la durabilité requise. En particulier, le degré de pénétration des sources d'énergie renouvelables, la deuxième étape, est resté faible. En réalité, les efforts ont surtout porté sur la troisième étape, qui en pratique est souvent considérée comme étant la première.

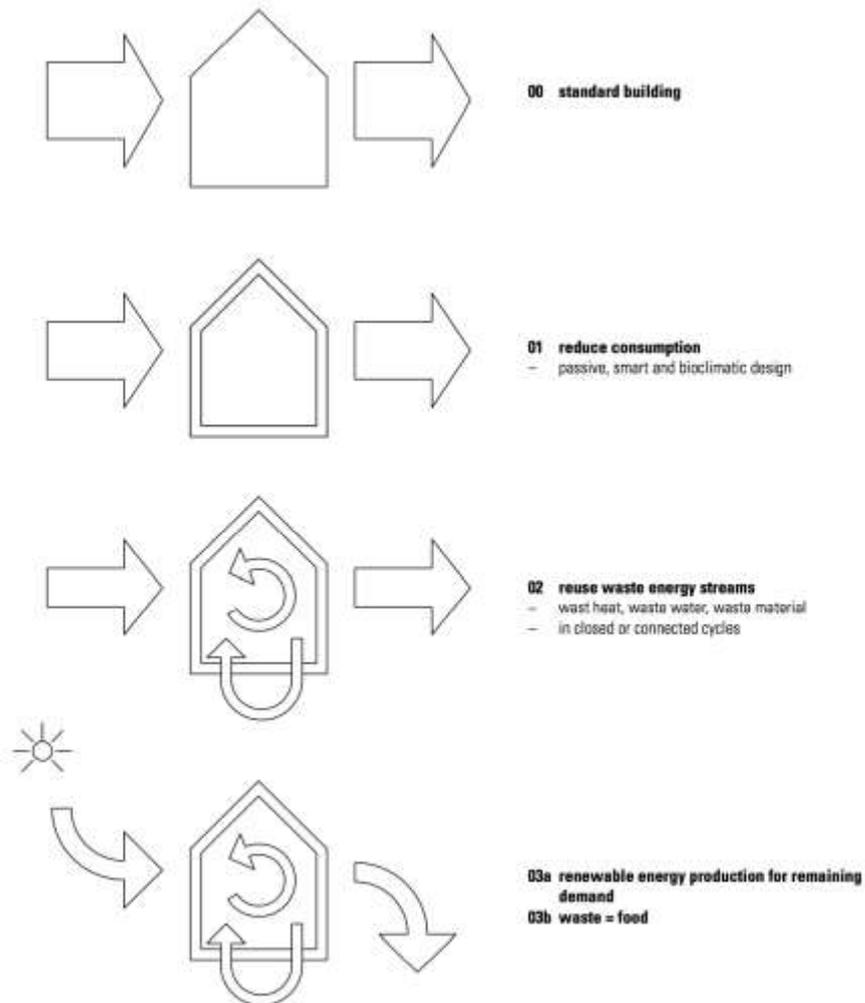
Que si peu d'usage soit fait du soleil, du vent et d'autres sources d'énergie renouvelables a beaucoup à voir avec le fait que cette étape suit sans transition une réduction sous-optimale de la consommation d'énergie, alors que la densité de demande urbaine est plusieurs ordres de grandeur supérieure à l'intensité de production locale possible d'énergie renouvelable. Une étape intermédiaire importante n'a pas été explicitement mentionnée. Il est donc temps de reformuler la stratégie.

La nouvelle stratégie

La nouvelle stratégie en ajoute une étape intermédiaire importante entre la réduction de la demande et le développement de sources durables. Elle incorpore une stratégie de recyclage de l'énergie résiduelle :

1. Réduire la demande (en utilisant une conception bioclimatique intelligente)
2. Réutiliser les flux d'énergie résiduelle
3. Utiliser des sources d'énergie renouvelable et s'assurer que l'énergie résiduelle est réincorporée dans la boucle énergétique
4. Répondre à la demande restante de manière propre et efficace

NEW STEPPED STRATEGY



Nouvelle stratégie exergétique en quatre étapes [10]

La nouvelle stratégie comprend une nouvelle deuxième étape qui permet l'utilisation optimale des flux résiduels : la chaleur résiduelle, les eaux usées et les déchets.

- La stratégie est mise en œuvre non seulement pour chaque bâtiment individuel, mais aussi à travers la création de boucles successives aux échelles des groupes de bâtiments, des quartiers et à la grande échelle de la ville. Les flux résiduels provenant d'une chaîne peuvent être utilisés dans une chaîne à l'échelle supérieure. Par exemple, les eaux usées peuvent être purifiées et la boue fermentée peut former du bio-gaz, qui peut être réutilisé dans la chaîne d'énergie.

En complément à l'étape 3, les déchets qui ne peuvent pas être traités dans le cycle technique doivent être restitués à l'environnement. Cela ne peut se faire que si les déchets sont sans danger (non toxiques) et s'ils peuvent former des éléments nutritifs pour les micro-organismes.

L'étape 4 continuera à être nécessaire pour les années à venir, mais ne sera finalement plus nécessaire.

L'ancien système énergétique versus le système énergétique durable

Une quantité importante d'énergie primaire entre dans les villes, mais en même temps beaucoup de chaleur est perdue (dans l'air, l'eau ou le sol) tandis que les résidus sont très peu utilisés. Une source telle que le gaz naturel est livrée à tous les équipements publics et privés. Si l'on prend en compte la qualité de l'énergie (exergie) il s'agit d'une perte potentielle importante d'énergie. Une flamme de gaz entre 1200 à 1500°C est beaucoup plus appropriée pour les procédés industriels de haut niveau (qui ont réellement besoin de telles températures élevées) que pour chauffer un logement à 20°C. Si un logement est conçu de manière intelligente alors une température de 25 à 40°C est plus que suffisante pour le chauffage ; cette température est libérée sous forme de chaleur par de nombreux types de processus (par exemple, des serres ou des systèmes de refroidissement dans les bureaux). D'autres équipements nécessitent des températures plus élevées, mais celles-ci pourraient être obtenues en utilisant la chaleur résiduelle provenant d'autres procédés à encore plus haut niveau de qualité énergétique. Un système plus durable, fondé sur l'utilisation de la chaleur résiduelle (un système à faible exergie) demanderait nettement moins d'énergie primaire; cette énergie primaire ne serait utilisée que par les fonctions de plus de haute qualité. Cette stratégie est très efficace. Limiter les apports d'énergie primaire aux besoins résiduels qui demeurent après une utilisation de l'énergie en cascade et après l'intégration des boucles aux différentes échelles, permettrait des gains d'efficacité considérables.

L'intégration systémique ascendante des échelles

1) Du bâtiment au quartier

Si la nouvelle stratégie est appliquée uniquement à un bâtiment individuel, elle va générer un bâtiment plus durable, mais sans utiliser les synergies possibles avec les autres bâtiments. Après cette première optimisation, il est utile de déterminer si les flux résiduels du bâtiment peuvent être utilement employés. Cela se fait déjà par exemple en recyclant la chaleur de l'air ventilé. Cependant, il est beaucoup plus difficile de purifier les eaux usées de chaque bâtiment pour récupérer du biogaz. Après l'étape 2, il reste une forte densité de demande énergétique, trop importante pour des sources d'énergie renouvelables même après des optimisations de bâtiments individuels.

Une meilleure stratégie est de considérer un ensemble de bâtiments et de déterminer si l'énergie peut être échangée, ou stockée ou utilisée en cascade. En d'autres termes, si au niveau d'un bâtiment individuel toute la chaleur résiduelle a été recyclée, la demande restante de chaleur ou de refroidissement peut probablement être résolue par des bâtiments avec un motif (*pattern*) différent

des besoins énergétiques : les bâtiments avec un excès de l'énergie requise ou qui produisent de la chaleur ou du froid. Voici quelques exemples :

Un exemple d'échange : en raison de la production de chaleur interne, les bureaux modernes ont des besoins de froid dès que la température extérieure dépasse 12° C. À ces températures les logements ont encore besoin d'être chauffés. Il existe ainsi des possibilités d'échange de chaleur au printemps et en automne. Un autre exemple est la combinaison de supermarchés (qui ont toujours besoin de refroidissement) avec des logements (qui ont des besoins de chauffage fréquents).

Un exemple de stockage de l'énergie au niveau des groupes de bâtiments : la chaleur et le froid sont disponibles en excès seulement quand la demande est faible. Pour un équilibre énergétique optimal, l'énergie doit être conservée pendant les saisons où l'échange mentionné dans le premier exemple n'est pas nécessaire.

Un exemple de cascade : une serre capture beaucoup d'énergie solaire passive qui disparaît généralement sous forme de chaleur dans l'air. Un échangeur de chaleur pourrait permettre à ce flux de chaleur résiduelle (habituellement à environ 30 ° C) d'être utilisé pour chauffer des logements, à condition que ces logements soient bien isolés et fassent usage d'un système de chauffage à basse température.

Si tous les flux résiduels au niveau des groupes de bâtiments sont utilisés de manière optimale, il devient alors possible de voir si l'énergie primaire peut être générée de façon durable. Bien que des panneaux solaires, des capteurs solaires ou une pompe à chaleur puissent être installés dans chaque bâtiment, il est beaucoup plus économique de les configurer au niveau du groupe de bâtiments.

2) Du quartier au district

Si un projet peut être abordé à un niveau encore plus élevé, le niveau du district, des divergences potentielles dans le bilan énergétique au niveau du quartier (par exemple une demande excédentaire de chaleur résiduelle ou de froid) peuvent être résolus. À l'échelle du district, d'autres fonctions sont disponibles avec un autre profil de demande, et par conséquent complètent le *pattern* de mixité énergétique. Comme au niveau du groupe de bâtiments, il est également possible d'échanger, de stocker et d'utiliser l'énergie en cascade. Les équipements importants à l'échelle des districts, tels que les centres commerciaux, les piscines et les salles de concert ont des *patterns* énergétiques tellement spécifiques que par la combinaison d'un certain nombre de ces différents équipements, l'équilibre énergétique peut être réalisé.

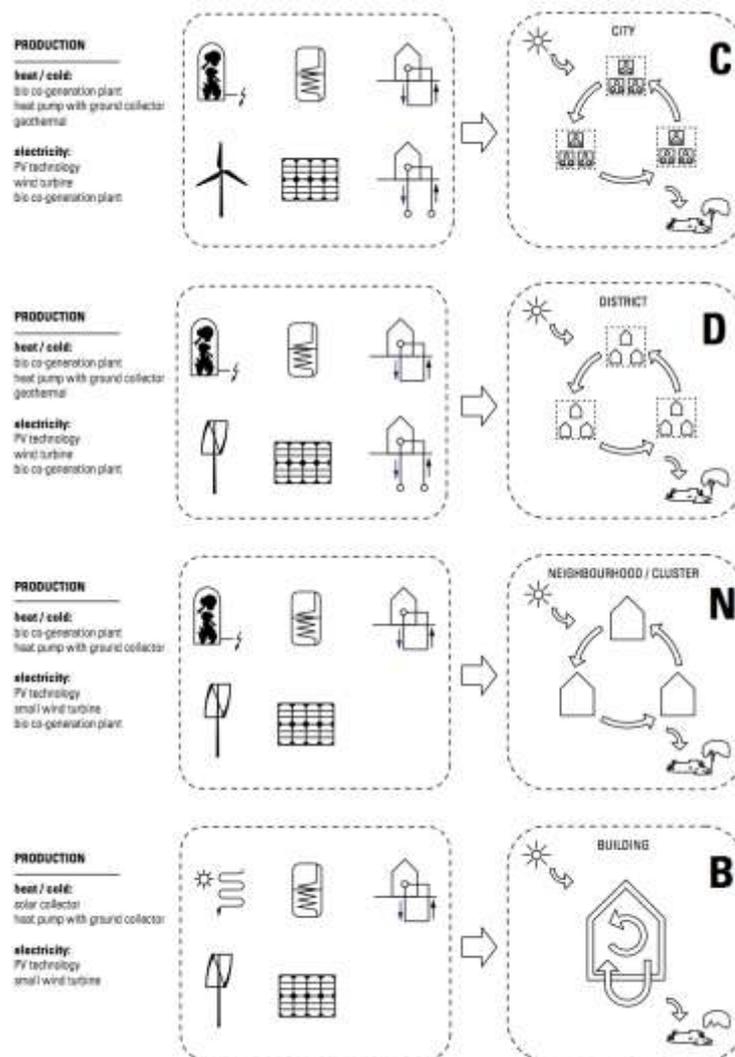
En plus de l'échange, du stockage et de la cascade énergétique, une autre option est possible au niveau du quartier : les *implants énergétiques*. Il s'agit d'ajouter une fonction pour compléter les maillons manquants dans la chaîne d'approvisionnement en énergie. Une fois que les équipements

existants ont été ajustés de façon optimale les uns aux autres, pour régler la demande résiduelle, il suffit d'ajouter un équipement qui nécessite un supplément de chaleur sur une base annuelle (par exemple une piscine) ou qui nécessite du froid (par exemple une patinoire).

La fourniture de l'énergie renouvelable peut alors être abordée au niveau du district. Des projets à forte intensité de capital sont plus appropriés au niveau du district, par exemple les installations qui recyclent le bio-gaz à partir des eaux usées et la cogénération pour produire simultanément chaleur et électricité. L'énergie géothermique n'est également réalisable que sur une grande échelle.

3) Du district à la ville et à la région urbaine

La prochaine étape à un niveau supérieur est la ville ou la région urbaine, une échelle à laquelle nos équipements actuels sont généralement à régulation centralisée.



Stratégie exergetique à l'échelle urbaine [10]

Hart van Zuid : Le recyclage des flux de chaleur résiduelle [10]



Cartographie du potentiel thermique de Hart van Zuid à Rotterdam [10].

Le projet du quartier au sud de Rotterdam Hart van Zuid («Le Cœur du Sud») explore les possibilités de création d'un district neutre en carbone. Hart van Zuid englobe trois quartiers, chacun avec un caractère et un programme fonctionnel différents. La zone Motorstraat fait partie du quartier Ikazia. L'objectif est de construire deux nouveaux collèges dans le cadre du développement de Motorstraat. Ceci constitue une opportunité pour développer un quartier multifonctionnel, équilibré d'un point de vue énergétique. Quelles fonctions peuvent-elles être combinées de manière durable, en tenant compte de l'énergie, et des enjeux sociaux et économiques? L'ajout de logements améliore l'intégration sociale assurant une utilisation du quartier tout au long de la journée. L'ajout de bureaux renforce la mixité. Pour atteindre un équilibre énergétique la piscine de 50 m peut être associée à une nouvelle patinoire. Le refroidissement d'un côté produit de la chaleur sur l'autre; cette chaleur est généralement perdue dans l'air extérieur. La chaleur résiduelle de la patinoire pourrait être utilisée pour fournir la demande permanente de chauffage de la piscine avec l'utilisation d'un stockage thermique pour créer l'équilibre énergétique. La demande restante pour la chaleur peut être satisfaite en utilisant une combinaison de capteurs solaires et de serres.

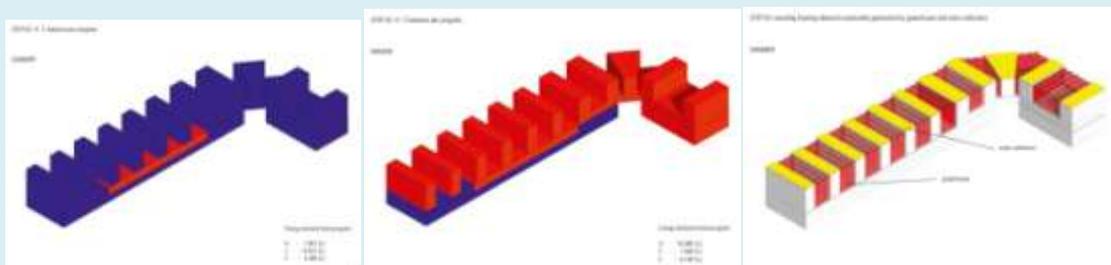
Les étapes suivantes ont été suivies :

Étape 0 : Faire un inventaire de la consommation d'énergie actuelle.

Étape 1: Réduire la consommation d'énergie. Les techniques les plus avancées en matière d'économie d'énergie seront utilisées. La nouvelle demande totale de chaleur est de 26 741 GJ, de froid 21 106 GJ et d'électricité 13 245 GJ.

Étape 2 : Réutilisation des flux résiduels. Équilibrer la relation chaleur - froid par l'ajout de nouvelles fonctions : piscine de 50 m (besoin permanent de chaleur), patinoire (besoin permanent pour le refroidissement) ainsi que les logements et les bureaux. Le rapport chaleur - froid devient 1:0,8 La demande de chaleur couverte par le stockage thermique est de 21 106 GJ. La demande de chaleur résultante est de 5 635 GJ.

Étape 3 : Production d'énergie renouvelable. La demande de chaleur résultante peut être entièrement satisfaite par l'ajout de capteurs solaires sur les toits et l'incorporation d'une serre (avec une production de chaleur de 5,635 GJ et une production d'électricité supplémentaire de 563 GJ). Les panneaux photovoltaïques produiront 1 761 GJ. La demande d'énergie électrique résultante est de 12 047 GJ. Elle sera générée de manière durable à une plus grande échelle. Le quartier dans son ensemble deviendra un complexe hautement efficace.



Étapes 1, 2 - Été : demande d'énergie de l'ensemble du programme, chaleur (H): -7 801 GJ, froid (C): -13 637 GJ, électricité: -6 496 GJ; *Hiver* : demande d'énergie de l'ensemble du programme, chaleur (H): -18 940 GJ, froid (C): -7 468 GJ, électricité: -6 749 GJ; *droite, étape 3* - la demande qui en résulte peut être générée de façon durable [10].

Zuidplein : réaménagement, augmentation de la densité et de la diversification des usages du foncier dans un quartier existant avec une planification axée sur l'exergie [10]

Le groupe de bâtiments de Zuidplein à Rotterdam est un exemple de synergie entre planification spatiale et énergétique. Le projet vise à rendre attractif un îlot urbain, qui comprend un mélange de développement urbain des années soixante et d'architecture des années quatre-vingt. C'est aujourd'hui principalement un centre commercial, fréquenté par les habitants du sud de la ville, avec un mélange inhabituel d'infrastructures (la deuxième station de bus la plus fréquentée des Pays-Bas) et un théâtre. Mais l'îlot n'a pas d'activités après les heures d'ouverture. Il ne développe aucune interaction avec le quartier environnant. Dans le même temps, les bâtiments consomment une grande quantité d'énergie, pour le chauffage en hiver et pour la climatisation en été. Comment ce problème de développement urbain, couplé avec les objectifs de réduction de CO₂ de Rotterdam, peut-il être transformé en un futur développement attractif?



Quatre étapes ont été suivies :

Étape 0. Faire un inventaire de la consommation d'énergie actuelle.

Étape 1. Réduire la consommation. De nouvelles fonctions seront ajoutées : magasins, 20.000m², supermarché 6.000m². Le théâtre Zuidplein et l'intersection des infrastructures seront rénovés. Une meilleure isolation du centre commercial existant améliorera significativement la situation.

Étape 2. Réutiliser les flux d'énergie résiduelle. L'ajout de logements permettra de créer un meilleur équilibre entre les besoins de chaleur et de froid. L'utilisation de la chaleur résiduelle produite par le supermarché pour la consommation d'énergie le matin et le soir dans les logements réalise un équilibre parfait de la demande et des flux résiduels réutilisables : 1m² de supermarché peut chauffer 7m² de logements. Si 665 appartements sont ajoutés, la proportion de chaleur et de froid devient 1:1,08 en supposant que l'on stocke la chaleur et le froid.

Étape 3. Production d'énergie renouvelable. La demande restante pour la chaleur peut être résolue par l'ajout de serres sur le premier étage, celles-ci pourraient être les zones publiques (ou des serres pour la culture des tomates) ou par l'ajout de panneaux photovoltaïques. Les panneaux photovoltaïques peuvent être installés sur le toit pour fournir de l'électricité pour l'ensemble du centre commercial. L'énergie restante requise pourrait être générée de façon durable à un niveau à plus grande échelle.

Les méthodes de planification urbaine de l'exergie

La cartographie du potentiel énergétique

La cartographie du potentiel énergétique contribue à la planification spatiale d'environnements urbains plus économes en énergie. Les ressources d'énergies renouvelables disponibles localement sont cartographiées pour diriger le développement spatial urbain là où il est le plus efficace en termes de système énergétique. La cartographie du système énergétique permet de contribuer à prendre en compte la production et la demande locale d'énergie à différents niveaux d'exergie pour réaliser un équilibre demande locale / offre locale qui laisse très peu d'énergie à importer de l'extérieur du système énergétique. Il s'agit de réaliser une véritable mixité énergétique à l'échelle locale.

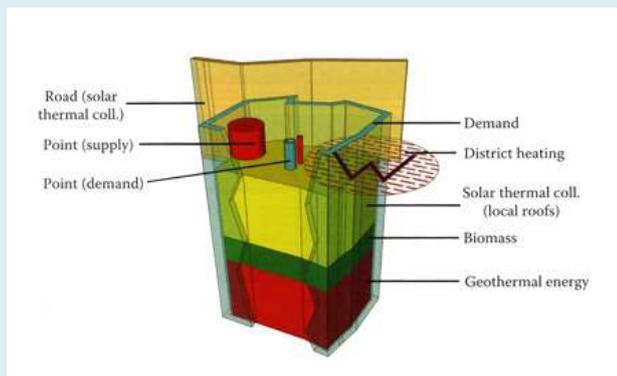
La cartographie du potentiel énergétique commence par l'analyse des sources et des cartes contenant des informations climatiques, topographiques, géophysiques. A l'étape suivante, ces données sont transformées en cartes de potentiel énergétique pour les carburants, la chaleur et le froid et pour l'électricité, en prenant en compte le niveau auquel ces sources d'énergie peuvent être récoltées (par exemple les hautes altitudes pour l'énergie éolienne ou la profondeur pour les puits géothermiques). Tous les potentiels sont quantifiés pour chaque carte spécifique. Les cartes visualisent la *richesse* ou la *pauvreté* énergétique des régions urbaines et identifient l'emplacement des sources spécifiques, ce qui permet de diriger le processus d'aménagement du territoire en faisant la différence entre les plans à énergie positive et ceux à énergie négative.

La cartographie thermique

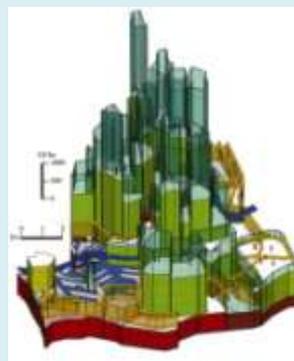
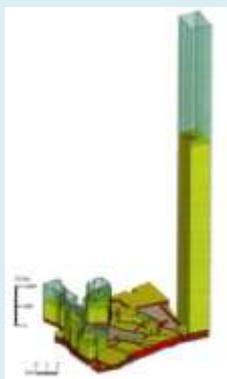
Le but de la cartographie thermique est de fournir une représentation géographique des différentes sources et puits thermiques ainsi que des infrastructures d'une région, en montrant le solde net énergétique - ou mieux encore exergétique - afin de fournir aux planificateurs les éléments nécessaires à la conception d'un plan énergétique thermique.

La cartographie du potentiel énergétique et la cartographie thermique

Les figures suivantes extraites de Stremke et Dobbelsteen [11] présentent la cartographie du potentiel énergétique et la cartographie thermique. La cartographie du potentiel énergétique consiste en une pile de cartes de potentiel, qui montrent les caractéristiques géographiques d'un type spécifique de potentiel énergétique, par exemple la disponibilité de chaleur géothermique ou les potentiels de production d'électricité des éoliennes en fonction de la vitesse du vent local moyen.

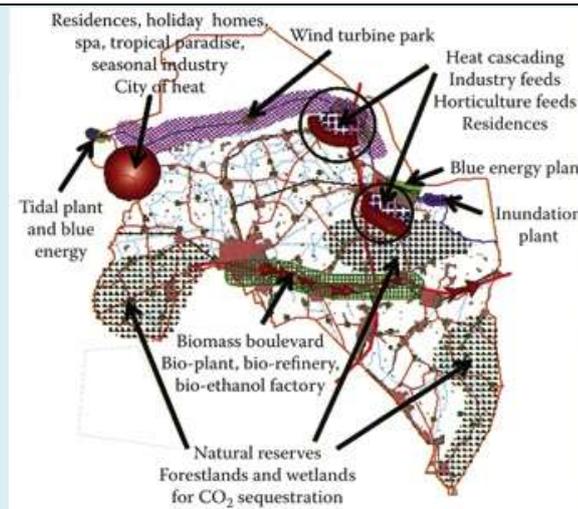


Exemple de carte thermique 3D [11]. La demande de chaleur est décrite par les contours élevés; la fourniture de chaleur remplit le puits résultant, en comprenant de l'énergie géothermique, de la biomasse et de l'énergie solaire.



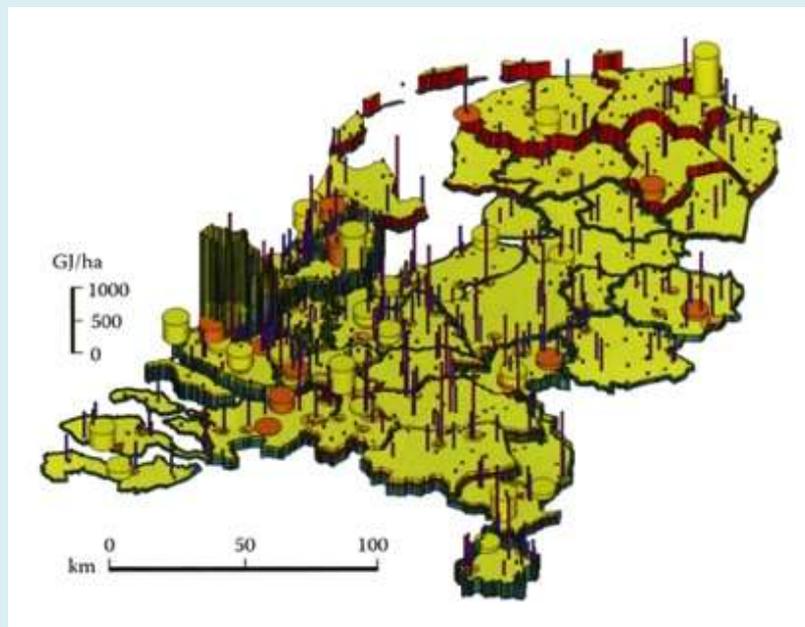
Cartes de potentiel thermique pour la région d'Emmen (à gauche) et la ville de Rotterdam (à droite) [11]

Cette méthode permet la mise en œuvre de stratégies de planification énergétique à l'échelle régionale, comme le montre la figure ci-dessous.



Le plan de développement spatial repose sur l'étude du potentiel énergétique de Groningen [11]

Ces méthodes de cartographie ont permis de réaliser une carte thermique de la Hollande, où les sources de chaleur les plus importantes et les puits ont été cartographiés: demande de chaleur, potentiel des capteurs solaires, des sources ponctuelles, de la biomasse, potentiel géothermique, potentiel de l'échangeur de chaleur géothermique et potentiel de stockage souterrain de chaleur.



Carte composite de la demande et du potentiel de chaleur pour les Pays-Bas [11].

4. LES VILLES SONT DES SYSTEMES METABOLIQUES PRESENTANT DES ECONOMIES D'ECHELLE SPATIALE

Le métabolisme urbain présente des effets d'échelle supra linéaires et infra linéaires

Les propriétés des villes changent graduellement avec leur taille. A chaque doublement de la population urbaine, une ville contient en moyenne 10 à 20 % de volume d'infrastructures par habitant en moins. Elle présente aussi un accroissement de 10 à 20 % des taux de production de richesses et d'innovation. Alors que suite à un doublement de la population, on aurait pu s'attendre à un doublement du volume d'infrastructure et du PIB, on observe donc que le volume d'infrastructure n'a pas doublé, mais que le PIB a plus que doublé. On parle dans le premier cas d'infralinéarité (le volume total d'infrastructures augmente relativement moins vite que la population), et dans le deuxième cas de supralinéarité (le PIB augmente relativement plus vite que la population). On parle alors d'économies d'agglomération, ou d'économies d'échelle spatiale. Ces effets s'appliquent lorsque l'on considère la ville comme un tout, à la fois mélange de populations et marché du travail unifié. Ils s'appliquent aux villes lorsqu'elles sont définies comme des zones métropolitaines fonctionnelles.

Les villes réalisent des économies d'échelle lorsqu'elles croissent en population et, simultanément, elles atteignent des gains de productivité socio-économique. Lorsque nous comparons deux villes aux tailles de populations différentes, au sein d'un même système urbain (par exemple au sein de la même nation) nous tendons à trouver que la ville la plus peuplée est un peu plus dense, et que son volume de réseaux d'infrastructures par habitant (routes, canalisations et câbles) est plus petit. Nous trouvons aussi que la plus grande ville est habituellement plus riche (mesuré par le PIB par habitant ou par les salaires), et qu'elle est plus productive culturellement et technologiquement, par exemple en termes d'entreprises créatives ou de brevets déposés. Ces effets sont universels, en ce sens qu'ils sont observés à travers les villes de nombreux systèmes urbains, des États-Unis à la Chine, et du Brésil à l'Allemagne. Ils s'appliquent aussi à travers le temps.

Ces propriétés dérivent de la nature économique et sociale des réseaux urbains. Les infrastructures permettent aux liens sociaux d'acquérir une structure en évolution ouverte, qui accroît et organise les interactions entre individus et entre entreprises et individus. Les propriétés d'échelle des villes avec la taille de leur population peuvent être dérivées à partir de quatre hypothèses simples [1], [12]–[14].

1. Les villes articulent les réseaux économiques et sociaux entre eux d'une manière telle que chaque urbain peut se connecter en principe avec tous les autres habitants de la ville. Ceci détermine le coût du mouvement des habitants, des biens et de l'information.

2. Les réseaux d'infrastructures sont *décentralisés*, ce qui signifie qu'ils sont construits graduellement au fur et à mesure que la ville croît, avec des quantités de nouvelles infrastructures ajoutées proportionnellement aux densités spatiales urbaines typiques. Ceci signifie que le réseau d'infrastructures évolue graduellement lorsque la taille de la population s'accroît ou lorsque les technologies changent.

3. Les efforts des individus pour rester connectés socialement sont indépendants de la taille de la ville.

4. Le produit socio-économique des villes, de la production économique à l'innovation, est proportionnel au nombre d'interactions sociales réalisées par unité de temps. Celles-ci sont proportionnelles en moyenne à la densité des habitants dans les réseaux publics.

Dans des conditions de basse densité, l'énergie de transport est supra linéaire et présente des déséconomies d'échelle

Un autre apport de la science des villes est que nous pouvons prédire la quantité d'énergie dépensée dans les processus de transport (non seulement d'habitants, mais aussi de biens, d'information, de services, etc.). À l'inverse des économies d'échelle spatiale et matérielle des systèmes complexes biologiques, l'énergie urbaine dissipée dans les transports s'accroît plus rapidement que la taille démographique des villes. Elle se comporte, en fait, comme les revenus ou l'innovation. Ces déséconomies d'échelle ont été mises en évidence dans les villes américaines, canadiennes et australiennes dans des contextes de basse densité uniforme. Dans ces villes dont la plus grande partie est au-dessous du seuil de densité de 5000 habitants/km², des systèmes de transports en commun ne peuvent pas être mis en place de manière économiquement efficace. L'inclusion de villes européennes dans l'analyse révèle des résultats plus contrastés.

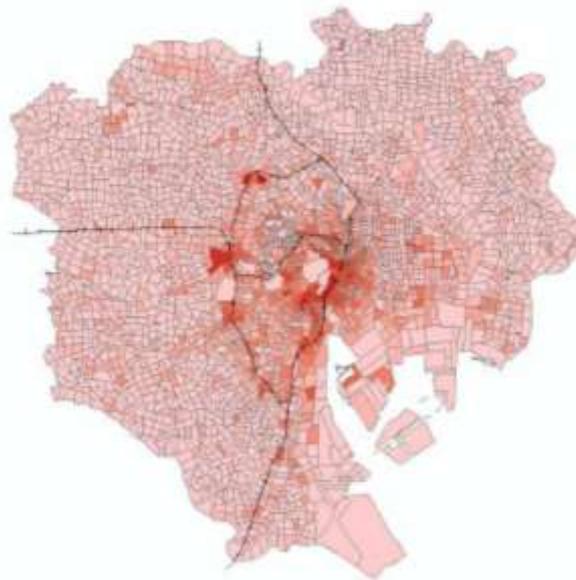
Le coût d'opération des infrastructures urbaines s'accroît plus rapidement que la taille des villes. Cet effet a été mesuré par exemple en termes de pertes résistives dans les réseaux électriques des villes allemandes [14]. Il apparaît également sous la forme d'une congestion plus grande dans les plus grandes villes, qui est toujours pire dans les artères les plus larges que dans les petites rues [15], [16]. Cette non linéarité des effets de taille par rapport à la dissipation de l'énergie ou des flux de trafic suggère une approche stratégique différente des problèmes de forme et de coûts

d'infrastructure. Plutôt que d'agrandir les infrastructures, il est plus efficient d'améliorer la structure de leur réseau en la rendant plus complexe et en renforçant sa hiérarchie d'échelle.

La science des villes nous donne également des clés sur la manière dont l'utilisation de l'énergie dans les transports peut-être minimisée. Elle nous indique en particulier qu'une mesure de l'efficacité de la connectivité de la ville, le ratio de la production socio-économique urbaine à l'énergie dissipée par les transports, est indépendante de la taille démographique de la ville. C'est probablement une des raisons les plus importantes pour lesquelles les villes présentent de telles diversités d'échelle. Les gains d'agglomération socio-économique des villes les plus peuplées sont proportionnels à leurs coûts énergétiques dissipatifs. L'accroissement des coûts de congestion semble inséparable des avantages des agglomérations.

Effets d'échelle au sein des villes

Les effets d'échelle qui caractérisent les régions urbaines les plus peuplées sont certes réels mais comprendre leur dynamique requiert une analyse à des échelles plus fines que celles de grandes variables agrégées. La densité urbaine et la production de valeur économique sont des variables à la répartition spatiale intra urbaine très hétérogène, présentant des pics et des creux à toutes les échelles, selon un modèle rugueux que l'on peut définir comme fractal. Sur seulement 1 square mile (soit 2,56 km²), la City de Londres produit 12 % du PIB de Londres et 8,5 % du PIB de la Grande-Bretagne en présentant également un pic important de demande énergétique. A Tokyo, sur les 600 km² que représentent les 23 wards, 25 km² consomment 18 % de l'énergie finale de la ville.



Cartographie de la demande d'énergie thermique à Tokyo

L'analyse des effets d'échelle doit être conduite aux échelles intra urbaines pour isoler les sous-systèmes urbains aux différentes échelles, et jusqu'aux plus fines, et les classer par taille démographique, économique, en termes d'emplois, et en poids énergétique. Cela permettrait d'entrer dans la boîte noire de la théorie des *économies d'agglomération*, qui présente souvent la taille comme un générateur d'effets d'échelle uniformément positif, sans comprendre que les plus grandes villes ne sont pas seulement caractérisées par leur taille mais par la présence de cœurs denses, connectés et concentrés qui sont les véritables moteurs de l'innovation et de la création de richesse, comme la City de Londres ou Manhattan. Ce sont les sous-systèmes urbains les plus concentrés sur les surfaces les plus réduites qui présentent à la fois la plus forte connectivité, le plus fort potentiel d'interaction, et la plus grande création de valeur économique.

5. LES MODELES SOCIO TECHNIQUES DES SYSTEMES ENERGETIQUES URBAINS

Une vision purement physique ou biologique des systèmes énergétiques urbains ne permet cependant pas de comprendre les processus socio-économiques qui déterminent la conception et le fonctionnement réel de ces systèmes. Les villes sont en effet d'abord et avant tout des systèmes sociaux et économiques. Leurs infrastructures supportent leur position dans des réseaux locaux et globaux d'activités sociales et économiques. Les villes sont des nœuds dans le mouvement perpétuel des flux, des mouvements et des échanges, médiatisés par les infrastructures. Dans la suite de cette section nous examinerons certaines des théories principales utilisées pour interpréter les systèmes énergétiques urbains comme des systèmes socio techniques. Depuis le niveau des technologies de l'énergie domestique à petite échelle, jusqu'au développement et à l'évolution de grandes infrastructures en réseau comme les systèmes de chaleur ou d'électricité de quartier, les théories des systèmes socio techniques nous permettent de comprendre les limites des modèles physiques et d'être conscients de l'interpénétration de la technique avec la politique, la culture et l'économie dans la conception et le fonctionnement des réseaux énergétiques.

Les technologies d'énergie domestique et la diffusion des technologies innovantes

Pour que les technologies aient un impact, il faut qu'elles commencent à être adoptées par les individus et à être utilisées dans leur vie quotidienne. La diffusion de l'innovation est « le processus par lequel l'innovation est communiquée à travers certains canaux et au cours d'une certaine durée parmi les membres d'un système social » [17]. Les utilisateurs potentiels peuvent d'abord évaluer les avantages relatifs de la technologie, sa compatibilité, sa complexité, sa capacité à être mise à l'essai et son observabilité. Les études de diffusion de l'innovation notent qu'il existe différents types de comportements dans l'adoption des technologies, chacun avec des préférences et des tolérances au risque différentes. Ceux qui adoptent tôt les technologies sont caractérisés par de hauts niveaux de savoir qui leur permettent de comprendre les nouvelles technologies et par le désir de les expérimenter. Par exemple, dans le cas des chauffe-eau solaires, ceux qui les ont adoptés en premier les considéraient comme étant « moins risqués financièrement et socialement, moins complexes, plus compatibles avec leurs valeurs personnelles et moins observables par les autres » [18]. Une fois que ces individus ont adopté avec succès la technologie, ils commencent à en parler aux autres et ceci aide à étendre la technologie. En d'autres termes, une bonne technologie ne s'étend pas purement selon ses mérites propres, elle a besoin d'être évaluée, mise à l'essai et ensuite déployée à travers des réseaux sociaux.

Une fois qu'une technologie a été adoptée dans l'environnement domestique, la question suivante est de savoir comment elle va être utilisée. Le sociologue Max Weber a proposé une typologie utile des comportements sociaux lorsqu'ils sont appliqués à la consommation énergétique domestique [19]. Le premier mode de comportement, celui qui est préféré par les économistes, est le comportement *rationnel* « dans lequel les acteurs cherchent à atteindre des buts de manière rationnelle et calculée », par exemple, éteindre la lumière afin d'économiser de l'argent. D'une manière alternative, la rationalité du comportement peut viser à atteindre certaines *valeurs*, c'est-à-dire éteindre la lumière afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de protéger l'environnement. Toutefois, il existe également deux modes importants de comportement non rationnel : le comportement *affectif*, provoqué par les sentiments d'un individu à un moment donné ; et le comportement *traditionnel* ou les habitudes de base (par exemple éteindre la lumière en quittant la maison).

Ce que montre cette brève discussion des comportements de consommation d'énergie domestique, est que l'on ne doit pas s'attendre à ce que la technologie énergétique soit passivement adoptée et utilisée par les consommateurs comme ses concepteurs l'ont prévu à l'origine. Il n'existe pas de déterminisme technologique et les utilisateurs amènent leur propre signification à la technologie et l'utilisent au sein de réseaux complexes de normes sociales, de valeurs personnelles et de contexte de prise de décision.

Les grands systèmes techniques

Les systèmes énergétiques urbains contiennent également ce qui peut être décrit comme de grands systèmes techniques, c'est-à-dire « des réseaux socio techniques spatialement étendus et fonctionnellement intégrés, comme le réseau électrique, les chemins de fer, et les systèmes téléphoniques » [20]. Une ville ne consiste pas en maisons et en lieux de travail indépendants les uns des autres ; chacun avec ses propres systèmes énergétiques. Ces bâtiments et ces activités humaines sont connectés les uns avec les autres par l'électricité, le gaz, la chaleur, et les réseaux de transport. Comme ces systèmes sont grands et complexes, ils sont longs à construire et il est difficile de les changer rapidement. De ce fait, nous devons comprendre l'évolution de ces grands systèmes techniques pour évaluer de manière réaliste le potentiel de transformation dans une ville donnée.

L'étude classique dans ce domaine est *Networks of Power : Electrification in Western Society, 1880 – 1930* [21]. Le livre montre comment, bien que les transformations physiques d'un système électrique puissent être représentées par un diagramme de réseaux, l'explication de ces changements nécessite de prendre en considération « de nombreux champs d'activités humaines, en

incluant le technique, le scientifique, l'économique, le politique, et l'organisationnel » ; en d'autres termes, « les systèmes électriques sont des artefacts culturels » [21]. Hughes décrit le développement des systèmes électriques dans différentes villes du monde, incluant Chicago, Berlin et Londres, en notant en particulier le rôle des constructeurs de systèmes comme Thomas Edison, qui furent capables non seulement de développer la technologie mais aussi un système support d'institutions qui rendaient nécessaire l'utilisation de l'innovation.

Cette approche analytique a été très influente et a souligné que les technologies qui ont réussi sont le résultat de l'interaction entre la société et la technologie. Une vision plus moderne de ce problème peut être trouvée dans la littérature sur les transitions technologiques à des niveaux multiples (pour une analyse, voir [22]). Selon les approches les plus contemporaines, les transitions des systèmes technologiques – en incluant les systèmes d'énergie urbaine – ne sont pas le résultat d'un seul constructeur de systèmes déterminé, aussi talentueux qu'il puisse être. La littérature sur les transitions technologiques démontre au contraire comment des facteurs à trois niveaux – le *paysage* socio technique plus large (par exemple les tendances sociétales, les forces politiques, les cycles économiques) ; des combinaisons spécifiques de technologies, d'institutions et de *patterns* d'utilisation, appelées *régimes* ; et à petite échelle, des *niches* expérimentales – doivent co - évoluer pour qu'une technologie particulière se développe.

Les perspectives socio techniques sur les systèmes d'énergie urbaine, à la fois au niveau des technologies individuelles et à celui des grandes infrastructures intégrées, démontrent deux leçons fondamentales. Tout d'abord, le potentiel des artefacts technologiques peut seulement se réaliser de concert avec leurs utilisateurs. En d'autres termes, créer des systèmes énergétiques urbains plus efficaces pour la transition énergétique ne sera pas possible en inventant seulement de nouvelles technologies, aussi performantes soient-elles. Même si de telles technologies existent, elles doivent être adoptées par les consommateurs et utilisées d'une manière qui s'inscrive dans leurs désirs et leurs besoins personnels, tout en étant contrainte par les déterminants culturels, les institutions et l'économie. Ensuite, les grandes infrastructures – comme les réseaux énergétiques – évoluent lentement et ont besoin de la coordination de nombreux facteurs. Les inventeurs, les entreprises et les politiciens peuvent proposer des solutions, mais comme tout élément constitutif d'un réseau, ces solutions doivent s'inscrire dans le contexte plus large des facteurs sociaux, culturels et économiques. Comprendre et transformer les performances des systèmes d'énergie urbaine, requiert une appréciation de ces facteurs.

6. LES VILLES EFFICIENTES : FAIRE PLUS AVEC MOINS D'ENERGIE

Les caractéristiques systémiques de la consommation d'énergie en milieu urbain sont généralement des leviers d'efficacité globale plus importants que l'optimisation individuelle des composants du système. Par exemple, la part modale des transports publics et des transports non motorisés dans la mobilité urbaine est un levier plus important de réduction de l'énergie de transport que l'efficacité de la flotte de véhicules urbains. Des environnements urbains plus denses et compacts, avec des habitations multifamiliales et une part modale élevée de mobilité non-automobile utilisent moins d'énergie totale (même sans rénovation thermique) que des environnements urbains à basse densité dépendants de l'automobile, constitués de maisons individuelles à basse énergie ou même à énergie positive. Les politiques urbaines doivent répondre à la fois aux caractéristiques systémiques et individuelles dans la consommation d'énergie en milieu urbain et les différents effets de levier à long terme des mesures systémiques et des mesures individuelles doivent être pris en compte par les décideurs [23].

En termes de gestion de la demande énergétique en milieu urbain, la qualité de l'environnement bâti (efficacité énergétique des bâtiments) et la structure spatiale compacte et la densité qui, dans une large mesure, déterminent la consommation énergétique des transports ont à peu près le même potentiel de réduction, voisin pour chacun de 50%. En outre, l'intégration énergétique des systèmes (cogénération, cascades thermique) peut offrir des gains d'efficacité substantiels, mais occupe le deuxième rang après l'efficacité des bâtiments et la compacité d'une structure spatiale dense, comme le montrent les comparaisons empiriques entre différentes villes [7]. Le potentiel de la planification de l'exergie est énorme : l'efficacité dans l'utilisation de l'énergie urbaine est généralement inférieure à 20% de la frontière d'efficacité thermodynamique, ce qui suggère un potentiel d'amélioration de plus d'un facteur cinq [7]. Cependant ce potentiel théorique est difficile à mettre en œuvre du fait de barrières institutionnelles et de l'absence d'un cadre de marché adapté.

L'amélioration de l'efficacité systémique de l'énergie urbaine devrait donc devenir la plus haute priorité. Dans l'environnement construit, la réglementation thermique s'est montrée très efficace pour la construction neuve mais son impact global est réduit par un faible taux de renouvellement du parc de bâtiments existants (de l'ordre de 1% par an). À l'opposé, le potentiel des mesures liées à l'offre énergétique, et en particulier aux énergies renouvelables, est, dans les limites spatiales et fonctionnelles immédiates des systèmes urbains, limité par les hautes densités énergétiques des environnements urbains actuels. Les énergies renouvelables pourront être pleinement déployées dans le système énergétique urbain lorsque celui-ci aura fait l'objet d'une

forte diminution de la demande par des stratégies systémiques, comme par exemple le recyclage de la chaleur résiduelle par des cascades de flux d'exergie. Dans le système énergétique urbain actuel non intégré, les énergies renouvelables localement récoltées peuvent, au mieux, fournir quelques points de pourcentage dans l'offre énergétique en milieu urbain. Sans gains d'efficacité ambitieux, *l'empreinte énergétique* des villes qui importeront des énergies renouvelables à grande échelle, sous forme centralisée (biocarburants ou électricité) sera vaste et risque de produire des dommages collatéraux causés par l'utilisation des sols à grande échelle pour produire de l'énergie en concurrence avec la nourriture [7].

En raison de l'incertitude et des changements auxquels sont soumis tous les systèmes urbains, mais aussi de la grande inertie dans la transformation de leurs infrastructures, qui est beaucoup plus lente que les cycles d'innovation technologiques actuels, il est également nécessaire d'éviter les chemins de dépendance à certaines solutions technologiques qui risquent d'être rapidement dépassées.

L'amélioration de l'efficacité énergétique en milieu urbain s'appuie en définitive sur une plus grande intégration et flexibilité de l'offre et de la demande, en intégrant la planification énergétique et la planification spatiale, et sur la construction progressive d'un système complexe ascendant dont nous avons tenté de donner un exemple à travers les projets de planification énergétique menés à Rotterdam. Enfin, la résilience des systèmes et la sécurité énergétique sont des problèmes pour de nombreuses villes, car elles ont diminué au cours des dernières décennies. Dans un monde incertain, les problèmes de sécurité doivent être intégrés de plus en plus dans les politiques urbaines de l'énergie et dans la transition vers la durabilité.

CHAPITRE II

LES STRATEGIES DE PLANIFICATION ENERGETIQUE

INTEGREE

Une approche intégrée de la conception des systèmes énergétiques urbains est nécessaire. Les politiques énergétiques urbaines doivent être coordonnées avec la planification spatiale et avec celle des usages du foncier, ainsi qu'avec les politiques sectorielles concernant l'industrie, les bâtiments, le transport, la nourriture, la santé, l'environnement, le climat, la sécurité, afin que ces politiques se soutiennent mutuellement. Seule une approche intégrée peut répondre aux multiples défis à la fois techniques, économiques et sociétaux liés à l'énergie urbaine. L'action la plus importante est d'améliorer l'efficacité systémique car elle apporte des améliorations significatives dans tous les secteurs. La gestion de la demande, et en particulier l'effacement des pics et la réutilisation en cascade de l'énergie résiduelle, renforce la flexibilité de l'offre et sa diversification en permettant la production d'énergies renouvelables locales et intermittentes qui est sinon impossible à demande constante ou croissante en raison de la forte densité énergétique des environnements urbains.

1. LA PLANIFICATION ENERGETIQUE URBAINE DOIT ETRE SYSTEMIQUE ET INTEGREE

Les politiques de planification énergétique urbaine durable doivent être systémiques et intégratives : elles doivent intégrer la planification du foncier et des infrastructures de transport au-delà des limites administratives traditionnelles ; elles doivent intégrer les flux de ressources urbaines, en incluant l'eau, les déchets, et l'énergie, ce qui permet d'améliorer l'efficacité en réintégrant les flux résiduels dans les boucles de matière et d'énergie sous forme par exemple de récupération de chaleur ; elles doivent intégrer aux échelles locales une offre intermittente et variable d'énergies renouvelables aux fluctuations locales de la demande (par exemple par des micros réseaux) ; cette intégration locale de l'offre et de la demande permet d'importants changements systémiques de l'efficacité par exemple par la cogénération et l'utilisation de l'énergie en cascade. Ces stratégies d'intégration et de décentralisation des infrastructures d'énergie offre également la possibilité d'améliorer la résilience et la sécurité des systèmes énergétiques urbains.

Les villes peuvent améliorer l'efficacité de leurs systèmes énergétiques urbains en utilisant simultanément les trois voies suivantes :

1. réduire la demande : en accroissant la densité démographique et d'emploi et la connectivité de la structure spatiale ; en encourageant la co-localisation des activités ; en améliorant la qualité de l'environnement construit ;
2. optimiser l'offre d'énergie et le système énergétique (par exemple par la cogénération) ;
3. intégrer les deux approches précédentes pour équilibrer de manière efficace et à l'échelle locale l'offre et la demande.

La planification énergétique intégrée doit mobiliser en priorité l'effet de levier de l'efficacité de la structure spatiale urbaine

Les politiques de planification intégrée de l'énergie urbaine doivent s'appuyer sur les capacités de financement et de décision locales afin de mettre en œuvre les effets de levier les plus importants dans les domaines suivants [23]:

- la structure spatiale, la forme urbaine et la densité (qui sont des macros déterminants importants des *patterns* d'activité et donc de la demande énergétique, en particulier pour le transport urbain) ;

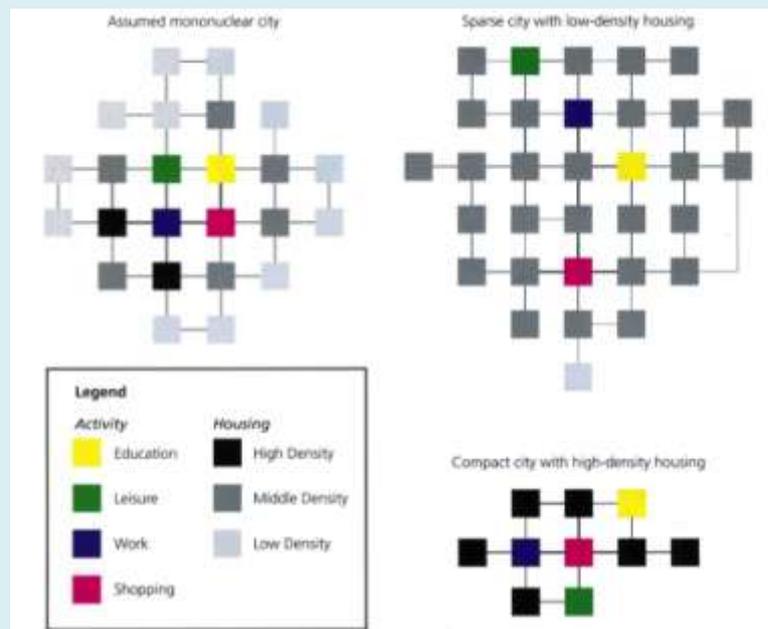
- la qualité de l'environnement construit (en particulier les bâtiments énergétiquement efficients) ;
- les politiques de transport (en particulier la promotion d'un transport public énergétiquement efficient et l'encouragement aux transferts vers les modes non motorisés) ;
- des améliorations du système énergétique à travers des codes de construction zéro énergie, la cogénération ou le recyclage de la chaleur résiduelle.

Les effets sur la demande d'énergie primaire de la forme urbaine (structure spatiale, densité, connectivité, mixité) et de l'efficacité des bâtiments sont du même ordre de grandeur ; ils présentent le même effet de levier de l'ordre de 30 à 50 % de réduction chacun (33 % chacun selon Keirstead et Shah [2], 50 % chacun selon Salat [24]). En l'absence d'une mise en œuvre radicale de stratégies d'utilisation en cascade de l'exergie, les améliorations actuelles de l'efficacité des systèmes énergétiques, notamment sous la forme de substitution des énergies, ne fournissent approximativement qu'une diminution de 16 % des consommations d'énergie primaire et des émissions de gaz à effet de serre associées [2]. Cette différence dans les potentiels de réduction souligne l'importance des politiques de planification spatiale et d'amélioration de l'environnement construit.

La construction de grandes maisons dans une disposition éparse de faible densité augmente les pertes thermiques d'un tiers de l'énergie primaire selon Keirstead et Shah [2], et augmente la consommation d'énergie des transports. Le scénario suburbain de Keirstead et Shah [2] met en évidence une multiplication par 3 de la consommation d'énergie par rapport à la solution optimale. En d'autres termes, la construction d'une maison au standard Passivhaus unifamiliale dans une zone périurbaine ne réduit pas substantiellement la consommation d'énergie par rapport à une construction moins efficace dans un milieu urbain compact (par exemple, une maison de ville située à proximité de l'éducation, des loisirs et des commerces), avec ses besoins de transport individuels inférieurs [2].

Les impacts comparés de la forme urbaine et de l'optimisation des systèmes énergétiques sur la demande d'énergie

Une recherche approfondie a été entreprise par Keirstead et Shah [2] avec l'outil de modélisation "Syn City" afin de comparer différents niveaux d'efficacité de la forme urbaine, différents niveaux de densité, différents niveaux d'efficacité du système énergétique (système standard ou fondé sur la cogénération) et différents niveaux d'optimisation de la distribution des activités. Trois archétypes de densité ont été comparés. Le type Royaume-Uni comprend des densités de 20, 35 et 65 logements par hectare avec des logements de taille moyenne (60 – 200 m²). Le type japonais comprend des densités plus élevées de 50, 75 et 100 logements par hectare avec des logements plus petits (30 – 100 m²). Le type nord-américain comprend un étalement urbain de basse densité avec des densités de 5, 10 et 20 logements par hectare et des logements beaucoup plus grands (200 – 300 m²).



Structures spatiales urbaines (de gauche à droite) : une ville mono nucléaire, une ville compacte à haute densité de logements, une ville diffuse avec des logements à basse densité. Dans chaque figure, les cellules colorées représentent les différentes activités : vert pour le loisir, bleu pour le travail, rose pour le commerce, et jaune pour l'éducation. Les cellules grises représentent les logements à différentes densités. Les lignes noires qui connectent les cellules indiquent les réseaux de connexions routières et les flux de trafic [2]

Les principaux résultats sont les suivants :

- Dans la structure spatiale urbaine compacte, les logements sont plus petits et présentent moins de surfaces de murs externes par m² de logements, ce qui réduit la demande de chauffage. Les économies de chauffage sont d'un tiers grâce aux facteurs de forme du tissu urbain.

- dans la structure spatiale urbaine à faible densité, une réduction d'un tiers de l'énergie de chauffage ne peut être obtenue que par une très haute efficacité de la conception technologique des logements (correspondant au standard Passivhaus de 15 kWh/m²/an pour le chauffage de l'espace d'habitation) appliquée à tous les bâtiments.

La compacité urbaine (de la structure spatiale et de la forme du tissu urbain) et la conception architecturale et technologique Passivhaus offrent le même potentiel de réduction de la demande énergétique, ce qui souligne l'importance de mettre en œuvre les deux leviers d'action simultanément, car sinon l'efficacité énergétique obtenue par une meilleure isolation et une technologie très coûteuse des bâtiments risque d'être annulée par l'effet de rebond d'un transfert vers des formes de développement urbain moins compactes. Cette équivalence de l'impact de l'effet de forme et de la technologie souligne également l'intérêt d'agir d'abord sur la forme urbaine car c'est elle qui apporte le maximum de co bénéfices systémiques en réduisant également la demande énergétique de transport et le coût des infrastructures, tandis que la seule action sur l'efficacité thermique des bâtiments n'a pas de co bénéfices systémiques pour l'ensemble de la ville.

Enfin la mise en synergie des formes compactes et des technologies d'efficacité des bâtiments présente un potentiel d'amélioration qui amplifie les effets des deux mesures lorsqu'on les utilise simultanément. Une forme urbaine compacte a besoin, sous l'effet des seuls facteurs de forme, de 66 % de l'énergie d'une forme non compacte. L'utilisation de technologies passives a le potentiel de réduire encore d'un tiers cette énergie déjà diminuée, c'est-à-dire de parvenir à un besoin énergétique de seulement $0,66 \times 0,66 = 43 \%$, soit une diminution de 57 % par rapport au scénario de base.

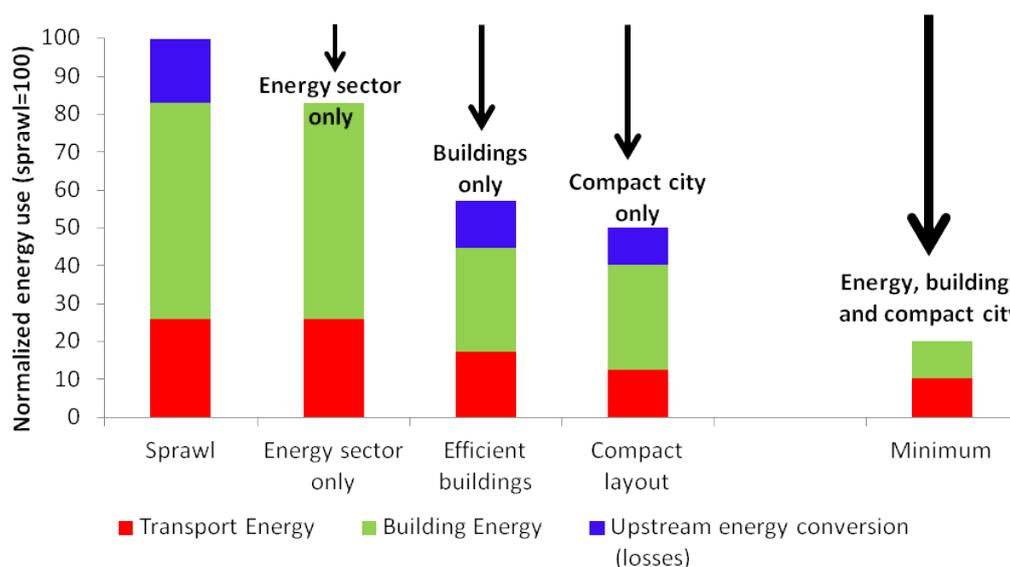
Une utilisation simultanée des 4 leviers est susceptible de diminuer les consommations énergétiques de 80%

Les résultats de la simulation de Keirstead pour chaque type urbain sont présentés dans le tableau et la figure ci-dessous. Les valeurs numériques sont indexées sur la consommation annuelle d'énergie primaire du type suburbain (144 GJ / habitant dans la simulation). L'énergie « amont » (« upstream ») est l'énergie dépensée dans les centrales pour fournir de l'électricité au réseau de la ville. L'énergie « livrée » (« delivered ») est l'énergie fournie aux infrastructures fixes (y compris la

cogénération) et aux utilisateurs finaux (c'est-à-dire une combinaison d'énergie finale et secondaire). Le total de l'énergie livrée, du transport et de l'énergie «amont» correspond à la définition habituelle de la consommation d'énergie primaire.

Les principaux résultats sont les suivants [2]:

- Les pertes d'énergie "amont" de la production d'électricité représentent 20% de l'énergie primaire consommée là où le réseau est utilisé. Ignorer ces pertes et se concentrer uniquement sur l'énergie livrée fait passer à côté d'un potentiel de réduction important.
- Une ville avec une faible efficacité des ressources consomme environ deux fois plus d'énergie primaire qu'une ville conçue pour une haute efficacité des ressources. Les villes à faible densité exigent des vitesses plus élevées de transport sur de longues distances et les bâtiments occupent des zones plus vastes avec plus de surfaces exposées pour la même norme de construction. L'énergie de transport et l'énergie primaire pour le chauffage et l'électricité sont, dans une ville compacte, réduites d'environ 50% par rapport à une ville étalée.



La consommation d'énergie pour cinq modèles urbains alternatifs selon le niveau de consommation énergétique. L'indice 100 correspond à la consommation énergétique (144 GJ / habitant) du modèle urbain étalé (sprawl). La première colonne montre qu'en optimisant uniquement le secteur de la production d'énergie, la baisse des émissions est de l'ordre de 20%. En optimisant les bâtiments uniquement, la consommation baisse de plus de 40%. Avec un modèle de ville compacte uniquement, les émissions baissent d'environ 50%. Enfin, une combinaison des quatre leviers est susceptible de diminuer les émissions de 80%. (adapté de [7])

Keirstead et Shah [2] ont analysé les coûts sur le cycle de vie complet des cinq modèles urbains. Les résultats sont identiques à ceux de la minimisation de l'énergie primaire. Ils montrent aussi que minimiser seulement les coûts en capital biaise les choix en les éloignant de la solution énergétique minimale. Ces résultats soulignent l'importance des mécanismes de financement et de la tarification dans le choix de solutions optimales.

Les politiques de densification et d'accroissement de la mixité ainsi que de réhabilitation thermique des bâtiments sont les leviers les plus efficaces mais également les plus difficiles à mettre en œuvre dans des zones urbaines existantes. L'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes peut être réalisée dans les villes existantes mais son impact n'atteindra son plein potentiel que si elle est accompagnée par des mesures de planification urbaine qui accroissent la densité et la mixité, et qui réduisent ainsi le coût des réseaux d'infrastructures énergétiques.

- Une plus grande intégration entre la planification spatiale et celle des transports permet de diviser l'énergie transport par 2. Cette intégration doit mettre l'accent sur des trajets plus courts et sur l'accroissement des opportunités pour des choix flexibles et diversifiés.
- La rénovation thermique des bâtiments peut réduire les besoins de chauffage et de refroidissement de 50 à 90 % [23]
- Les nouveaux bâtiments peuvent être conçus et construits avec de très hauts niveaux de performance énergétique, souvent proches de l'énergie zéro pour le chauffage et le refroidissement.
- L'électrification du transport réduit l'utilisation d'énergie finale de plus de 60 % par rapport aux véhicules à essence [23]

L'amélioration intégrée de l'efficacité énergétique offre de multiples co-bénéfices

L'amélioration intégrée de l'efficacité énergétique est l'option la plus efficace en termes de coûts globaux ; elle offre de surcroît de multiples co-bénéfices, comme la réduction des nuisances environnementales et des impacts sur la santé, l'amélioration de la sécurité énergétique, une plus grande flexibilité dans les options d'offre énergétique et la création d'opportunités économiques

Les planificateurs doivent adopter une vision globale des problèmes énergétiques. La planification énergétique intégrée conduit à des coûts inférieurs et à des résultats supérieurs à ceux d'une combinaison de politiques non intégrées d'efficacité énergétique des bâtiments, d'aménagement compact et de production énergétique décentralisée. Une approche intégrée de la conception et du fonctionnement des systèmes énergétiques urbains conduit à d'importantes

réductions de l'intensité énergétique des villes. L'analyse systémique démontre que des optimisations séparées ne conduisent généralement pas à une optimisation globale. Au lieu d'optimiser séparément les différents secteurs, il faut procéder à des optimisations croisées en recherchant les effets de synergie les plus puissants entre les différentes optimisations. Une telle optimisation d'ensemble du système a amélioré l'efficacité de plusieurs dizaines de pour cent dans d'autres systèmes tels que les raffineries et les complexes pétrochimiques. Le défi est que les villes sont plus complexes que les systèmes industriels et de plusieurs ordres de grandeur, car elles comprennent de très nombreux vecteurs énergétiques dont l'utilisation est affectée par les décisions quotidiennes de millions de personnes.

La planification intégrée du quartier d'Hammarby Sjöstad [25]



Avec 160 hectares de réaménagement de friches industrielles, Hammarby Sjöstad est le plus grand projet de renouvellement urbain de Stockholm. Le projet est centré sur une nouvelle ligne de transport public ; il est conçu pour l'auto-suffisance et un minimum de gaspillage d'énergie. Un nouveau tramway, Tvärbanan, traverse le cœur de la communauté le long d'un boulevard de 3 kilomètres. Des bâtiments plus hauts (de six à huit étages) sont groupés le long de la colonne vertébrale de la ligne de transport public, et la hauteur des bâtiments décroît avec la distance au corridor de tramway. Les parcs, les allées et les espaces verts occupent une place importante. Le paysage naturel a été préservé. Des pistes cyclables longent les boulevards. Chaque bâtiment comprend des aires de stationnement vélo.

Les quatre principes de la planification énergétique intégrée

La planification énergétique intégrée s'articule autour des principes suivants :

La conservation de l'énergie

- *Les formes urbaines compactes.* Les développements urbains compacts, denses, bien connectés et à usage mixte diminuent les distances moyennes de déplacement quotidien. Ils améliorent l'accessibilité par la proximité. Ils diminuent les besoins en matière de transport, tout en assurant des niveaux plus élevés de service et de bien-être. Les formes urbaines compactes sont les stratégies de conservation de l'énergie les plus efficaces. Elles doivent être mises en œuvre en amont. Elles encouragent le transfert modal vers les transports en commun.
- *La mise en œuvre de synergies.* À l'échelle du quartier, les stratégies de conservation consistent en la mise en œuvre de synergies et l'utilisation de l'énergie en cascade (comme l'échange de chaleur entre des bâtiments avec un excès et un déficit de chaleur).
- *La conception bioclimatique.* À l'échelle du bâtiment, les stratégies de conservation consistent l'isolation des bâtiments et en une conception bioclimatique passive (apports solaires, éclairage naturel, refroidissement passif et ventilation naturelle).

Les stratégies d'efficacité énergétique

Elles optimisent l'offre par rapport à la demande réduite en amont.

Elles reposent sur l'amélioration du taux de conversion de l'énergie primaire en énergie finale. Elles incluent les énergies renouvelables, l'amélioration des procédés de production d'électricité, l'amélioration des procédés industriels, l'amélioration de l'efficacité énergétique des moteurs, des chaudières, du chauffage, du refroidissement et de la ventilation.

L'utilisation de sources d'énergie propre (locale et importée)

Elle comble la demande énergétique résiduelle. Elle comprend une diversification du portefeuille énergétique, avec des énergies renouvelables, des combustibles fossiles modernes, de l'énergie nucléaire et de la capture et du stockage du carbone.

Les comportements et les modes de vie plus responsables

Ces stratégies aval comprennent des campagnes de sensibilisation, des incitations et des mécanismes de prix (taxes sur l'énergie, frais de congestion, etc.) pour encourager les habitants à consommer moins d'énergie.



Les trois familles de chemins de transition énergétique du Global Energy Assessment [23]

Le GEA (Global Energy Assessment) a défini trois familles de chemins de transition qui conduisent à des structures contrastées des systèmes énergétiques futurs :

Les transitions de l'efficacité énergétique mettent en priorité l'accent sur l'efficacité. Par exemple, dans le secteur des bâtiments, l'efficacité est améliorée par un facteur quatre en 2050. Cela nécessiterait des mesures et des politiques pour parvenir à l'adoption rapide de la meilleure technologie disponible dans l'ensemble du système énergétique, par exemple de rénover les installations existantes, d'accroître le recyclage, d'améliorer le cycle de vie des produits dans l'industrie, de réduire la demande énergétique par des normes restrictives, de développer l'électrification des transports en commun et de réduire la demande de mobilité privée.

L'accent dans la transition de l'efficacité est donc mis sur les solutions pour limiter la demande énergétique pour les services rendus par l'énergie. Cela se traduit dans le scénario du GEA par un niveau de consommation d'énergie primaire en 2050 de 700 EJ, par rapport au niveau de 490 EJ en 2005 [23]. Les scénarios d'efficacité du GEA s'appuient également sur l'augmentation de la part des énergies renouvelables, avec un objectif proche de 75% de l'énergie primaire d'ici 2050 et d'environ 90% d'ici la fin du siècle.

Les transitions de l'offre énergétique mettent l'accent sur un changement d'échelle majeur des options nouvelles d'offre énergétique. Un accent plus modeste sur l'efficacité conduit à des taux d'amélioration de l'intensité énergétique à peu près comparables à l'expérience historique. La demande d'énergie primaire dans le scénario du GEA atteint environ 1050 EJ en 2050. Le changement d'échelle des nouvelles options d'approvisionnement en énergie, grâce à la R & D et à des investissements massifs de déploiement, conduit à de nouvelles infrastructures énergétiques et à de nouveaux carburants (comme l'hydrogène et les véhicules électriques dans le secteur des

transports). Les énergies renouvelables contribuent à environ la moitié de l'énergie primaire d'ici le milieu du siècle. En raison de niveaux relativement élevés de la demande d'énergie, la part des énergies renouvelables, est cependant relativement faible dans cette famille de scénarios du GEA. Une autre implication de la demande énergétique relativement élevée est que la capture et le stockage du carbone deviennent un élément essentiel à moyen terme afin de décarboniser la part d'énergies fossiles restante dans l'offre énergétique. Les centrales nucléaires gagnent des parts de marché significatives après 2030 dans certains des scénarios. Cela présuppose que les questions liées à la prolifération des armes nucléaires, aux déchets nucléaires, et à d'autres risques inhérents à l'énergie nucléaire soient résolues de façon satisfaisante.

Les transitions mixtes sont intermédiaires entre les transitions de l'efficacité et le déploiement à grande échelle des technologies de l'offre les plus modernes et les moins polluantes. Le niveau de la demande d'énergie primaire atteint 920 EJ en 2050. L'accent est mis sur la diversité de l'approvisionnement énergétique et des portefeuilles de technologies, en renforçant ainsi la résilience du système contre les chocs technologiques. Cela se traduit par la co-évolution de multiples combustibles, en particulier dans le secteur des transports, où, par exemple, la deuxième génération de bio-liquides, fossiles/bio-liquides avec CCS, et l'électricité prennent de l'importance.

Les investissements mondiaux dans les systèmes énergétiques doivent augmenter de 1700 milliards à 2200 milliards de \$ US annuellement au cours des prochaines décennies, avec environ US \$ 300 à 550 milliards consacrés aux mesures d'efficacité de la demande [23]. Ces besoins d'investissement sont à comparer aux investissements mondiaux consacrés aux systèmes énergétiques par an actuellement : environ 1000 milliards de \$ US d'investissements dans l'offre et environ 300 milliards de dollars d'investissements dans la demande (composants énergétiques). Les investissements nécessaires correspondent à environ 2% du PIB mondial en 2005, et seraient de l'ordre de 2 à 3% en 2050, ce qui pose un défi majeur de financement. Il faudrait de nouvelles politiques visant à attirer les flux de capitaux principalement vers les investissements initiaux avec des coûts à long terme faibles, mais aussi de faibles taux de rendement à court terme.

L'accent mis sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et sur le déploiement des énergies renouvelables augmente la part de l'offre domestique (nationale ou régionale) par un facteur 2 [23] et donc accroît de manière significative la sécurité énergétique en diminuant la dépendance aux importations. Dans le même temps, la part du pétrole dans le commerce mondial de l'énergie devrait se réduire de 75% actuellement à moins de 40 % et aucun autre carburant ne devrait prendre une position dominante dans l'avenir.

La principale conclusion de l'analyse des 60 scénarios de transition énergétique du GEA est que **les améliorations de l'efficacité énergétique sont la meilleure option pour réussir la transition énergétique**, augmenter la flexibilité de l'offre et améliorer la structure des systèmes énergétiques. Avec des taux élevés d'amélioration de l'efficacité, il est possible d'atteindre les objectifs du GEA (accès à l'énergie pour tous, sécurité, protection du climat et de la santé) quelque soit le portefeuille énergétique. Seuls les scénarios d'efficacité fondés sur une réduction de la demande permettent d'atteindre les objectifs de la transition énergétique sans recours à l'énergie nucléaire et sans capture et stockage du carbone. Les scénarios fondés sur l'offre, avec leur maintien de demandes élevées, nécessitent la croissance rapide et simultanée de nombreuses technologies de pointe, ce qui réduit la flexibilité de l'offre.

La planification énergétique intégrée doit valoriser les externalités positives des politiques basse énergie

Les politiques énergétiques doivent chercher à maximiser les externalités positives des différentes actions afin de renforcer la légitimité et l'acceptabilité des mesures de transition énergétique. L'objectif de création de villes neutres en carbone nécessite de diminuer la demande énergétique tout en augmentant la part des sources d'énergie renouvelables et en remplaçant les systèmes actifs pour l'eau et la gestion des déchets par des systèmes passifs. La mise en place de voies vertes, de toits verts (à la fois pour l'isolation et la gestion des eaux pluviales) et les revêtements routiers perméables servent aussi à introduire davantage d'espaces verts dans les zones urbaines, à rendre les températures ambiantes plus basses, à diminuer la pollution de l'air et la pollution sonore et à offrir de plus grandes possibilités de loisirs à proximité des logements. Les systèmes décentralisés passifs de production d'énergie et d'élimination des déchets ont également des coûts de maintenance et de fonctionnement plus faibles.

2. UNE STRATEGIE ENERGETIQUE URBAINE AXEE SUR LA DEMANDE

Les besoins des industries d'approvisionnement énergétique et les sources d'énergie qu'elles fournissent dominent aujourd'hui la planification énergétique. Les besoins des industries d'approvisionnement dominent ceux des utilisateurs. La transition énergétique nécessite une approche différente. Tout d'abord, il faut placer en premier les besoins de services énergétiques des utilisateurs : le confort thermique, l'eau chaude, le transport de marchandises, l'éclairage public, etc. Ces services ne doivent pas nécessairement être remplis avec un apport d'énergie. Par exemple, le confort thermique peut être assuré par l'isolation ou par une conception bioclimatique, le besoin d'eau chaude peut être satisfait par l'installation d'un chauffe-eau solaire. Un système énergétique fondé sur l'offre remplirait simplement ces besoins avec du charbon, du carburant ou de l'électricité produits de manière centralisée.

Une approche axée sur la demande doit au contraire planifier à une échelle beaucoup plus locale et créer des systèmes de gestion où les boucles énergétiques sont refermées en laissant le minimum d'énergie résiduelle à couvrir par une offre au niveau spatial immédiatement supérieur. Une base de données de la demande est importante pour développer ces stratégies d'action et évaluer leur mise en œuvre [27]. La planification énergétique urbaine doit reposer sur une cartographie détaillée et multi échelles de la demande énergétique. Il est assez facile de recueillir des informations globales (combien de pétrole, d'électricité ou de gaz de la ville utilise), mais il est plus difficile de recueillir des informations spatialisées (c'est-à-dire repérées sur une carte des densités énergétiques) sur qui utilise quelles sources d'énergie, la manière dont elles sont utilisées et pourquoi [27]. Le niveau de détail et la spatialisation des informations sur l'énergie urbaine sont très importants, car la planification efficiente doit satisfaire les besoins des consommateurs d'énergie en adaptant de manière fine l'offre à la demande et en mettant en place des stratégies de réduction de la demande à différentes échelles emboîtées (comme les cascades d'utilisation des flux résiduels présentées dans le chapitre I).

Les seuils de densité

Les économies d'agglomération ont historiquement façonné les milieux urbains en leur donnant une haute densité et une forte mixité locale d'activités diversifiées qui maximisent les opportunités et les interactions des citoyens tout en minimisant leurs coûts (en particulier temporels) de transport. Les dernières décennies ont affaibli ces avantages d'agglomération par de faibles densités urbaines, une forte diminution de l'accessibilité et de la connectivité. Des densités plus élevées permettent d'importantes économies d'échelle (en particulier pour les coûts d'infrastructure). Elles accroissent l'accessibilité et la diversité si elles sont accompagnées de politiques de mixité des usages du foncier à des échelles fines. Ces effets de localisation des milieux urbains sont des externalités d'agglomération positives qui s'étendent aussi aux infrastructures urbaines (les réseaux de transport, de communication et d'énergie). Des densités urbaines élevées nécessitent cependant des systèmes énergétiques non polluants car même des formes d'énergie relativement propres peuvent rapidement submerger la capacité d'assimilation d'environnements urbains denses. Ainsi, à long terme, les combustibles dans les zones urbaines doivent être zéro émission, comme l'électricité. Le gaz naturel joue un rôle de carburant de transition.

La littérature scientifique a identifié des seuils de taille et de densité, pour différentes technologies de conversion d'énergie, qui doivent être pris en compte pour la planification urbaine [23]. Les réseaux de transport souterrain (métro) sont économiquement non rentables au-dessous d'un seuil de population de moins d'un million d'habitants. La faisabilité des réseaux de transports publics ainsi que du chauffage urbain à base de cogénération est encadrée par un seuil de densité brute entre 50 et 150 habitants/ha (5000-15000 personnes/km²). Ces niveaux de densité n'impliquent pas des immeubles de grande hauteur, car ils sont atteints, et même largement dépassés à Paris intra-muros, par les formes urbaines traditionnelles compactes et continues de hauteur moyenne (5 à 7 niveaux).

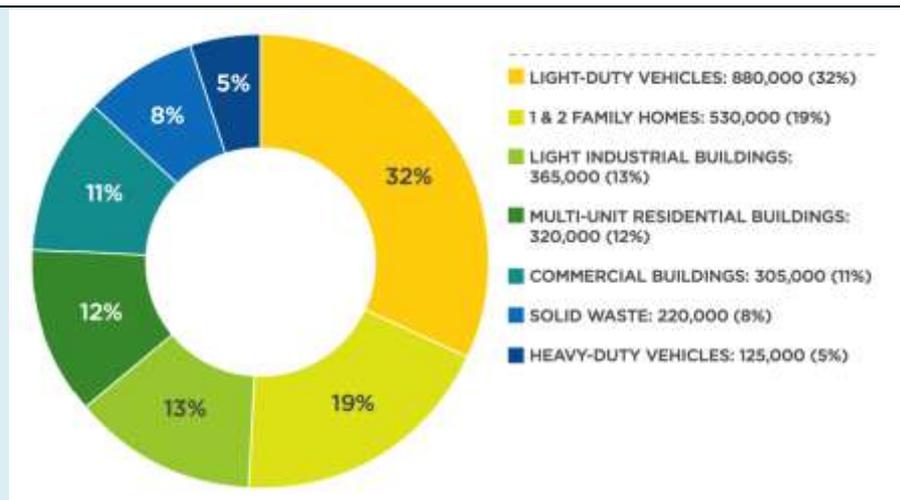
La forme urbaine est d'une importance primordiale pour la viabilité économique des systèmes de cogénération. Des maisons unifamiliales situées dans les banlieues éparses ne génèrent pas les densités de charge calorifique requises pour mettre en œuvre des systèmes de cogénération et des réseaux de chauffage urbain même si ceux-ci peuvent laisser la place à d'autres technologies telles que les PV ou les pompes à chaleur géothermiques.

Vancouver: Planifier la densité pour réduire la consommation énergétique



Vancouver est une ville relativement petite (580 000 habitants) classée deuxième ville la plus verte en Amérique du Nord ainsi que la troisième ville la plus vivable du monde [28]. La ville a réduit ses émissions de GES de 6% au-dessous des niveaux de 1990, malgré 27% de croissance de la population et une augmentation de 18% des emplois [29]. La ville émet environ 4,2 tonnes de CO₂ par habitant, grâce à des sources d'électricité bas carbone (principalement hydroélectrique) et à une utilisation minimale du transport privé motorisé. Bâtiments et véhicules représentent plus de 90% des émissions de GES de la ville (55% pour les bâtiments et 37% pour les transports). La ville possède déjà le plus grand réseau de transport public en Amérique du Nord, avec 5,4 miles de transport public par mile carré de superficie urbaine. Une grande proportion des trajets domicile-travail (25%) est effectuée en utilisant les options non-automobiles.

La densité de population est de 5.000 habitants par km², la plus forte densité au Canada, bien qu'elle reste faible par rapport aux villes européennes ou aux villes asiatiques comme Tokyo ou Séoul (10.000 à 15.000 personnes par km²). Une caractéristique notable de la ville est l'absence d'autoroutes urbaines.



Les sources d'émissions de gaz à effet de serre de Vancouver en 2008 [29]

À partir de 2008, le maire a réuni une équipe intersectorielle pour construire une vision pour faire de Vancouver la « ville la plus verte du monde » en 2020. L'augmentation de la densité est une politique clé pour atteindre les objectifs fixés : accomplir la majorité des déplacements par des modes non - automobiles, assurer l'accessibilité à un espace vert à cinq minutes de marche de tous les résidents, réduire l'empreinte écologique par habitant de 33% [30]. En 2011, le *Plan update* indique: « Il est hautement improbable, voire impossible, d'atteindre nos objectifs sans des décisions de planification du foncier. Tout au long de la mise en œuvre du plan d'action, les connexions avec la planification du foncier demeureront une exigence clé de la réussite» [31].

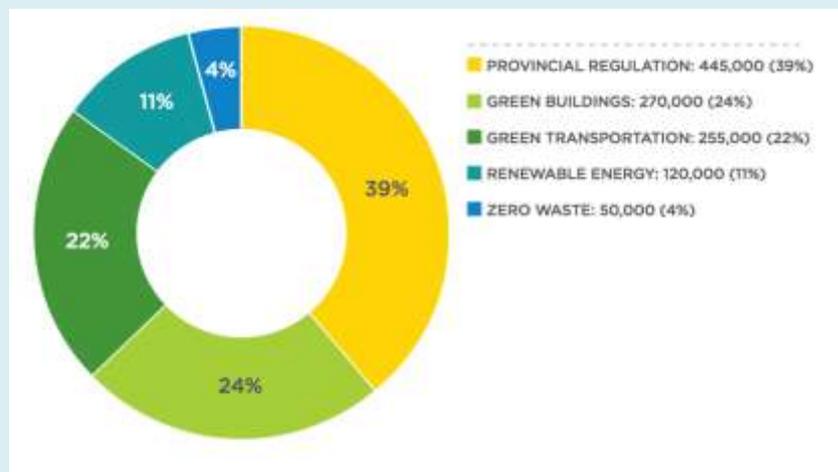
Le conseil municipal a adopté à l'unanimité en 2008 une charte de Densité Écologique. La charte fait de la durabilité environnementale un objectif prioritaire dans toutes les décisions de planification, accompagnée par des considérations sur l'inclusion sociale et la croissance économique. Un guide a été développé pour modifier le zonage et mettre en œuvre des codes de densité. La ville a fait des efforts considérables pour communiquer sur les avantages de la densité.

Codes de densité : les dispositions du code de construction ont inclus en 2004 la possibilité de construire des appartements internes (appelé suites secondaires), et en 2009 une provision pour des unités séparées supplémentaires, appelées logements sur les ruelles, qui seront construites sur les terrains de faible densité. Des m² de plancher supplémentaires ont été également autorisés en 2009 pour les sous-sols habitables dans des maisons unifamiliales [32]. Les changements en 2009 permettent à trois ménages d'occuper l'espace qu'aurait occupé un seul dix ans auparavant. Le Plan 2030 et la Charte d'Eco-Densité obligent les autorités locales à réviser continuellement les règlements pour rechercher de nouvelles opportunités de densification.

Rezonage de la densité : En vertu de la Charte, les nouveaux bâtiments rezonés doivent tous répondre aux exigences du label LEED Gold, s'inscrire dans des environnements urbains à densité et taux d'utilisation des transports publics élevés [28]. Pour accroître les incitations à une densité plus

élevée, la Ville envisage d'exiger des promoteurs de consacrer un pourcentage de la surface des terrains développés à la Ville pour des parcs ou d'autres espaces de loisirs, afin de permettre des développements à haute densité [30]. La ville poursuit également activement le rezonage des zones moins denses, en particulier autour du centre-ville.

Autres mesures incitatives : Un projet pilote de développement d'un équipement d'énergie à l'échelle du quartier a mis en évidence les opportunités économiques pour le déploiement de ces technologies [31]. La Ville intègre maintenant la planification spatiale de la densité avec la transition dans l'offre de carburant et avec les politiques de conservation de l'énergie, en visant le développement de systèmes de chauffage urbain avec des opérateurs à l'échelle des quartiers pour réduire les coûts de construction et tirer parti des économies d'échelle [29]. La ville a planifié le développement de quatre nouveaux systèmes d'énergie renouvelable pour de nouveaux développements urbains à haute densité dans les trois prochaines années [31].



Les sources de réduction des émissions dans les politiques de la Ville de Vancouver [29]

Résultats et objectifs futurs : La 500^e maison sur une ruelle de la ville a été approuvée au début de 2012. 35% des nouvelles maisons offrent maintenant une suite secondaire, contre 5 % en 2000, et 88 % des nouvelles maisons unifamiliales incluent désormais des sous-sols habitables, en hausse par rapport à 30% en 2000 [32]. Le taux de croissance de la population du centre ville entre 2006 et 2011 (11 %) a été plus élevé que le taux de croissance du reste de la ville (4,4%) [33].

Le plan pour 2020 vise une réduction de 33% des émissions de GES d'ici 2007. La densification est considérée comme une stratégie clé pour atteindre cet objectif [30, p. 10].

La diversité et la densité sont les leviers stratégiques pour la planification énergétique

La diversité et la densité sont les leviers stratégiques pour intégrer planification spatiale et énergétique. La diversité des fonctions et des profils énergétiques ouvre de nombreuses possibilités pour la gestion efficace de l'énergie (par exemple la cogénération et l'utilisation de la chaleur en cascade). La diversité fonctionnelle réduit simultanément la demande de transport.

L'optimisation de l'environnement construit

L'environnement urbain construit comprend la totalité du parc immobilier urbain, sa qualité thermique et sa distribution spatiale. Il comprend également les infrastructures urbaines de transport, d'énergie et d'eau. Cette sous-section examine l'impact des politiques d'efficacité de l'environnement construit.

1) L'impact des types de bâtiments

Les types de bâtiments influencent fortement la demande énergétique en milieu urbain. Salat et Morterol [34] ont comparé des îlots urbains du XVIII^e siècle, du XIX^e siècle, et du XX^e siècle à Paris. Ils ont évalué l'impact de cinq facteurs sur les émissions de CO₂ pour le chauffage: (1) la compacité des îlots définie par le rapport de la surface d'enveloppe sur le volume de l'îlot (S/V); (2) le renforcement de l'isolation de l'enveloppe; (3) le type, l'âge et l'efficacité de l'équipement de chauffage; (4) le comportement des habitants; et (5) le type d'énergie utilisée. Ils ont constaté qu'une diminution de 90 % des émissions de CO₂ pourrait être atteinte en utilisant simultanément des mesures d'efficacité sur ces cinq facteurs.

Les stratégies les plus efficaces sont d'accroître la compacité des îlots (rapport S/V) et l'isolation des enveloppes. Les études menées par Salat et Morterol [34] et par Salat et Guesné [35] ont évalué l'impact des facteurs de forme de la morphologie urbaine et des valeurs U de conductance thermique de l'enveloppe sur une vingtaine de tissus urbains archétypes dans Paris intra-muros. Ils ont constaté que dans des situations réelles, et malgré un nombre limité de variations dans les types de formes et de densités, la réduction de la demande énergétique, sous l'effet des facteurs de forme et de l'isolation, est encore plus importante que dans les modèles de Keirstead et al. [2]. La réduction de la demande énergétique de chauffage est de 50% entre les types d'îlots les plus et les moins efficaces sous le seul effet des facteurs de forme et de la compacité (S/V). L'isolation de l'enveloppe présente le même potentiel de réduction de 50%. Ainsi, dans un contexte

urbain réel, l'optimisation simultanée de la forme urbaine et de l'enveloppe conduit à une réduction de 75 % de la consommation énergétique de chauffage.

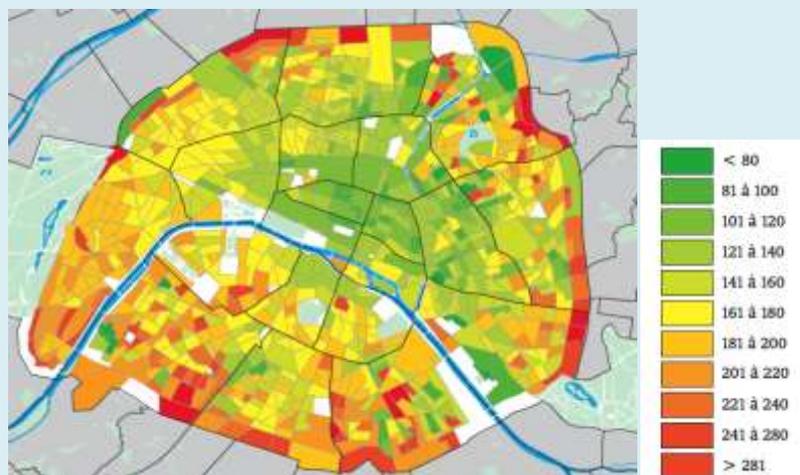
2) L'impact de la technologie constructive

Énergie opérationnelle : une mauvaise isolation thermique peut entraîner une consommation d'énergie pour le chauffage des locaux de 200 à 400 kWh/m²/an dans les latitudes moyennes européennes ; les logements basse énergie consomment environ 50 kWh/m²/an ; la norme Passivhaus exige que la consommation d'énergie pour le chauffage de l'espace soit inférieure à 15 kWh/m²/an.

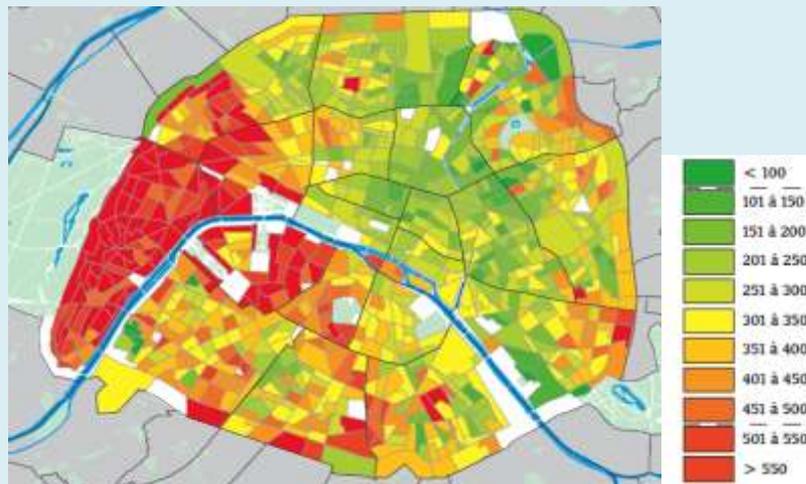
Énergie incorporée : Pour une durée de vie de 50 ans pour les immeubles de bureaux, l'énergie incorporée dans les matériaux de construction ainsi que l'énergie nécessaire pour la démolition sont estimées entre 2,5 à 5 années de consommation d'énergie de fonctionnement du bâtiment [36], [37].

La stratégie parisienne pour diminuer les consommations énergétiques du parc résidentiel

La Ville de Paris a fixé des objectifs ambitieux dans son Plan Climat: (1) réduire de 30% par rapport à 2004 les niveaux d'émission de GES d'ici 2020, (2) réduire de 30% la consommation d'énergie des services municipaux et de l'éclairage urbain, (3) accroître à 30 % la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. L'APUR a mené une étude exhaustive sur le parc de logements parisien afin d'identifier les principaux leviers pour diminuer la consommation d'énergie et les émissions de GES dans le parc immobilier résidentiel. Cette étude a fourni une description complète des 96 000 bâtiments résidentiels de Paris : date de construction, architecture, matériaux de construction, structure, épaisseurs de parois, apports solaires. Elle a fourni une cartographie complète et détaillée de la consommation énergétique par bâtiment en la reliant à des facteurs techniques et socio économiques : besoins de chauffage, sources d'énergie, systèmes de chauffage, niveaux de revenu moyen des résidents.



Consommation d'énergie finale pour le chauffage à Paris, en kWh/m²/an [38]

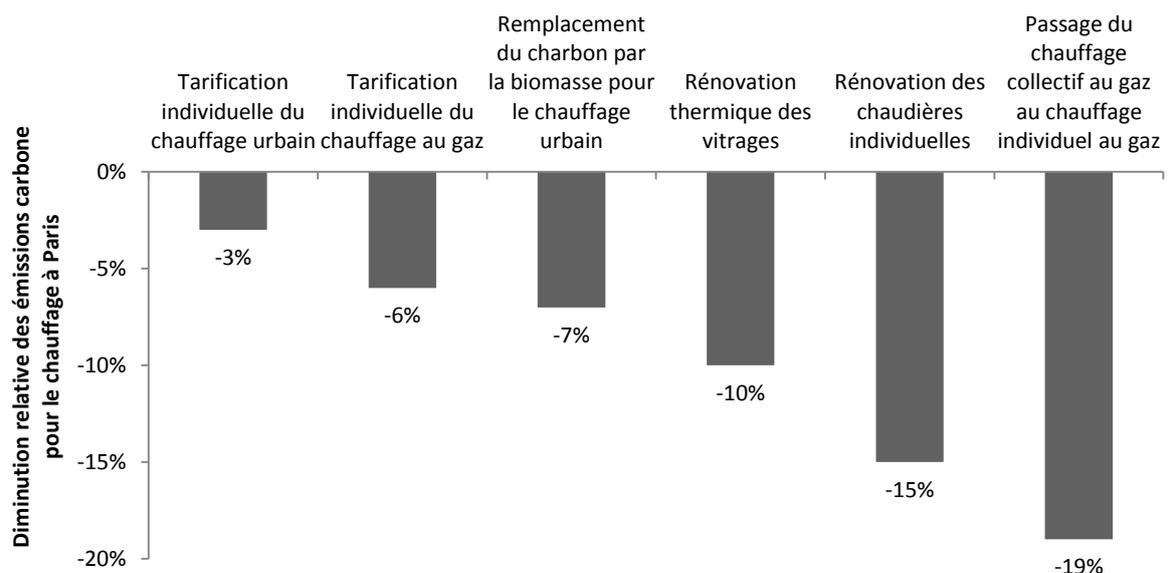


Émissions de carbone pour le chauffage à Paris, en kgC/hab/an [38]

Sur la base de cette analyse, les impacts sur les émissions de GES de différentes actions peuvent être mis en rapport avec leur coût économique :

- (1) réhabilitation énergétique du parc de bâtiments existants en améliorant l'isolation ;
- (2) remplacement des systèmes de chauffage et des chaudières ;
- (3) modification des comportements individuels (le comportement des habitants fait varier la consommation d'un facteur 2,6 en fonction du type d'énergie utilisée, de son coût et de son mode de facturation) ;
- (4) transfert vers des types d'énergie à plus faible intensité carbone.

Le potentiel de réduction des émissions de GES des actions clés est le suivant :



Impacts potentiels d'une série d'actions sur les émissions de GES (adapté de [38])

La planification intégrée du transport

L'intensité énergétique du transport motorisé privé augmente malgré l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules. Deux raisons principales en sont la cause : l'expansion spatiale des villes et leur fragmentation, les faibles taux d'occupation des véhicules (et donc la haute intensité énergétique par passager). Les améliorations d'efficacité énergétique des véhicules ont été, par un effet de rebond, plus que compensées par la croissance du nombre de trajets parcourus, par l'accroissement de leur longueur et par le faible taux d'occupation. Les déplacements non motorisés (marche et vélo) et les systèmes de transports publics sont les meilleures options pour la mobilité urbaine. Le partage des automobiles montre que leur utilisation sélective, comme mode de transport individuel en cas de besoin, peut être conciliée avec une ville économe en énergie.

Les interdépendances entre la demande et l'offre d'infrastructures de transport créent souvent un *cercle vicieux* de la planification des transports urbains : plus de voitures conduisent à la congestion, ce que l'amélioration des infrastructures vise à atténuer. Mais plus l'offre d'infrastructures s'accroît, plus elle induit une demande supplémentaire (par accroissement de la mobilité individuelle et par transformation du foncier) dans une course en spirale où l'offre suit une demande qu'elle contribue à créer. Les politiques publiques doivent sortir de ce cycle d'effets de rebond en intégrant la planification du foncier et celle des transports, c'est-à-dire en optimisant de manière intégrée la demande et l'offre.

3. UNE STRATEGIE ENERGETIQUE URBAINE AXEE SUR L'OFFRE

Les mécanismes par lesquels l'énergie est fournie au consommateur final sont essentiels à la réussite de la planification énergétique urbaine. Pour que le système d'approvisionnement énergétique urbain fonctionne sans heurts, de nombreuses sources d'énergie doivent être intégrées au sein de marchés stables.

La conversion de l'énergie à partir des sources et leur transmission et distribution pour des utilisations finales sont cruciales. L'efficacité de la chaîne énergétique doit mettre l'accent sur des vecteurs énergétiques comme l'électricité, l'hydrogène, la chaleur, le gaz naturel, le biogaz et les combustibles liquides. Tous sont essentiels pour le transport de l'énergie vers les centres urbains à partir de sites de production distants.

De nombreuses combinaisons de ressources énergétiques, pour l'approvisionnement et pour l'utilisation finale, peuvent contribuer à la planification énergétique urbaine. L'électricité et le gaz auront un rôle de vecteurs énergétiques importants, ainsi que la co-utilisation de la biomasse et des combustibles fossiles dans des systèmes intégrés, la co-production de vecteurs énergétiques, comme l'électricité et les produits chimiques, ainsi que le captage et le stockage du carbone. Des investissements importants et soutenus sont nécessaires pour financer cette transition. Ils nécessitent des mécanismes innovants pour réduire les risques et accroître l'attractivité des investissements initiaux. Des politiques comme la tarification émissions des gaz à effet de serre seront de surcroît nécessaires pour changer fondamentalement la part des énergies fossiles dans le système énergétique.

Une part accrue pour les énergies renouvelables

L'utilisation accrue des énergies renouvelables peut répondre à un large éventail d'objectifs : la sécurité énergétique, les questions d'équité et de réduction des émissions, en reliant ainsi la politique énergétique avec les autres politiques liées à l'approvisionnement en eau, aux transports, à l'agriculture, au développement des infrastructures, au développement industriel et à la création d'emplois. Cependant, les mesures politiques doivent surmonter les obstacles au sein du système énergétique actuel qui empêchent une plus large adoption des énergies renouvelables. Les principaux défis à relever pour un déploiement à grande échelle des énergies renouvelables sont les suivants:

- Réduire les coûts grâce au changement d'échelle ;
- Créer un environnement flexible d'investissements, qui serve de base à la diffusion ;

- Intégrer les énergies renouvelables au système énergétique urbain (au-delà des limites territoriales de la ville) ;
- Accroître l'effort de R&D

À l'échelle globale, les énergies renouvelables auront une part accrue (biomasse, hydraulique, éolien, solaire et géothermique), et pourraient représenter en 2050 plus de la moitié de l'approvisionnement mondial en énergie. La moitié des nouvelles capacités de production mondiale d'électricité entre 2008 et 2010 était renouvelable [23]. La capacité globale d'énergies renouvelables en 2010 avec des ajouts de ~ 66 GW, est plus grande que la capacité mondiale installée d'énergie nucléaire [23]. Dans l'Union européenne, les augmentations de capacité électrique ont été à plus de 40% en énergies renouvelables entre 2006 et 2010. Au Danemark, 30% de l'électricité produite en 2010 était renouvelable [23].

Cependant, il existe un décalage très important entre les densités de demande énergétique en milieu urbain (en W/m²) et les densités locales de production possible d'énergies renouvelables. Ce décalage implique de concevoir le rôle des énergies renouvelables en milieu urbain non comme un déploiement généralisé de micro-unités dans le tissu urbain, mais sous la forme de systèmes relativement centralisés avec des problèmes classiques de conversion et de distribution d'énergie.

Décarboner les combustibles fossiles

La transition vers des combustibles fossiles à émissions faibles, nulles ou négatives nécessitera une évolution vers des systèmes qui co-utilisent des combustibles fossiles et des énergies renouvelables avec des technologies de capture et de stockage du carbone (CSC). De nouvelles politiques sont nécessaires pour encourager un déploiement acceptable pour l'environnement de ces systèmes. La transition est réalisable avec les technologies connues:

- La capture du CO₂ et son stockage (CCS). Il faudra réduire ses coûts, soutenir son changement d'échelle, et assurer l'intégrité du stockage du carbone et sa compatibilité environnementale;
- Un rôle croissant pour le gaz naturel, le combustible fossile le moins intensif en carbone;
- Le co-traitement de la biomasse et du charbon ou du gaz naturel avec CCS, en utilisant des technologies connues, est important pour la co-production d'électricité et de combustibles liquides à faible teneur en carbone. Ajouter de la CCS à ces équipements de coproduction est moins coûteux que pour les centrales qui produisent uniquement de l'électricité [23].

L'énergie nucléaire

Selon la gravité des inquiétudes au sujet de l'énergie nucléaire, son fardeau réglementaire (pour la conception, le permis d'exploitation et le déclassement) peut être tel que l'énergie nucléaire devienne une option à coût élevé pour la production d'électricité. Les politiques devraient se concentrer sur la façon d'assurer une utilisation sûre de l'énergie nucléaire, qui est à la fois réelle et perçue.

Les systèmes innovants

Il est urgent de stimuler le développement et l'investissement pour l'innovation dans le domaine des systèmes énergétiques. Le temps de latence entre la recherche et le déploiement commercial à grande échelle est long. Le début d'une transition peut être observé dans un certain nombre d'innovations. Elles incluent des innovations axées sur la technologie dans la production et l'utilisation finale, des innovations systémiques comme les réseaux intelligents, des innovations économiques portant sur la tarification des services énergétiques. Les expériences dans la production comprennent les systèmes hybrides, où la combinaison de plusieurs sources d'énergie primaire permet de traiter des questions telles que l'intermittence. Les expériences dans les utilisations finales comprennent des options technologiques pour la livraison simultanée de plusieurs services énergétiques. Les expériences au niveau du système comprennent des innovations dans le stockage, la production distribuée, et l'encouragement à l'efficacité énergétique en monétisant les économies dans la consommation d'énergie. Dans certains de ces expériences, la technologie peut conduire à des changements dans les relations entre les acteurs ou à l'évolution des rôles des acteurs : les consommateurs peuvent devenir des producteurs comme on le voit dans les projets de production de biogaz à petite échelle.

Pour générer une base d'innovations et soutenir efficacement celles qui sont prometteuses, la compréhension de la dynamique des transitions technologiques est essentielle. La littérature suggère que les transitions à grande échelle dans les systèmes technologiques impliquent une hiérarchie des changements à partir d'expériences de niche vers des régimes technologiques, avec des liens à travers différentes échelles.

Le système de chauffage et de refroidissement à eau de mer à Marseille

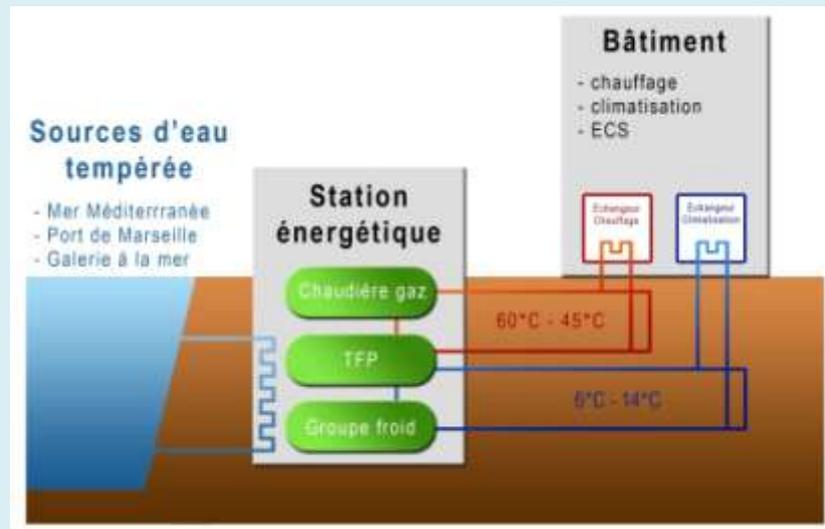


Diagramme du système de chauffage et de refroidissement à eau de mer à Marseille.

Le quartier Euroméditerranée à Marseille est un projet de renouvellement urbain de 169 ha qui vise à être un modèle d'Eco-ville méditerranéenne. L'architecte François Leclercq et le groupe d'ingénierie SETEC ont conçu ce quartier qui accueillera 30.000 nouveaux habitants et 20.000 emplois en 2045. Une attention particulière a été accordée à l'utilisation du potentiel d'énergies renouvelables locales. Le système de chauffage et de refroidissement des bâtiments s'appuiera sur les ressources thermiques de l'eau de mer. Il approvisionnera en énergie 2,5 millions de mètres carrés. Le système énergétique échange de la chaleur et du froid avec l'eau de mer. Les réseaux de chaleur et de froid sont mutualisés et distribuent l'énergie aux logements et aux bureaux. Ce système de chauffage-refroidissement intégré est très flexible et s'adapte aux variations spatiales et temporelles. Plus ou moins de ressources d'eau de mer peuvent facilement être mobilisées, ce qui augmente la flexibilité et la résilience du système. L'analyse de faisabilité financière a démontré la pertinence du projet avec une subvention publique de 17 M € pour un taux de rendement interne de 11% pendant 30 ans, pour un investissement total de 88 M €.

4. L'INTEGRATION DES SYSTEMES

Les méthodes d'intégration systémique ont un potentiel de réduction de la consommation d'énergie primaire directe de 20 à 50%. Ces techniques ont été appliquées lorsque la demande d'énergie d'une ville est connue et lorsque le problème de planification consiste à sélectionner une combinaison optimale de technologies et d'énergies pour répondre à cette demande³⁵.

Il est important de se concentrer sur la fourniture des services énergétiques plutôt que sur la fourniture d'énergie en soi. Les mesures qui améliorent l'efficacité de l'utilisation finale de la chaîne énergétique économisent généralement plus d'énergie primaire que celles portant sur l'offre. 1 kilowatt - heure (kWh) économisé dans l'utilisation finale peut souvent réduire de 2 à 3 kWh la consommation d'énergie primaire et les émissions associées. Les stratégies axées sur l'amélioration de l'efficacité énergétique de la demande ont de plus faibles coûts pour atteindre les mêmes objectifs que celles qui se concentrent sur l'offre [23].

Les solutions axées sur la demande réduisent le risque que les objectifs de développement durable ne deviennent inaccessibles. Elles ont de multiples avantages, notamment l'amélioration de la pollution locale de l'air, et conduisent à des gains importants pour la santé, pour la réduction de la congestion, à des gains de productivité, à l'augmentation de confort et du bien-être, à une amélioration de la sécurité énergétique.

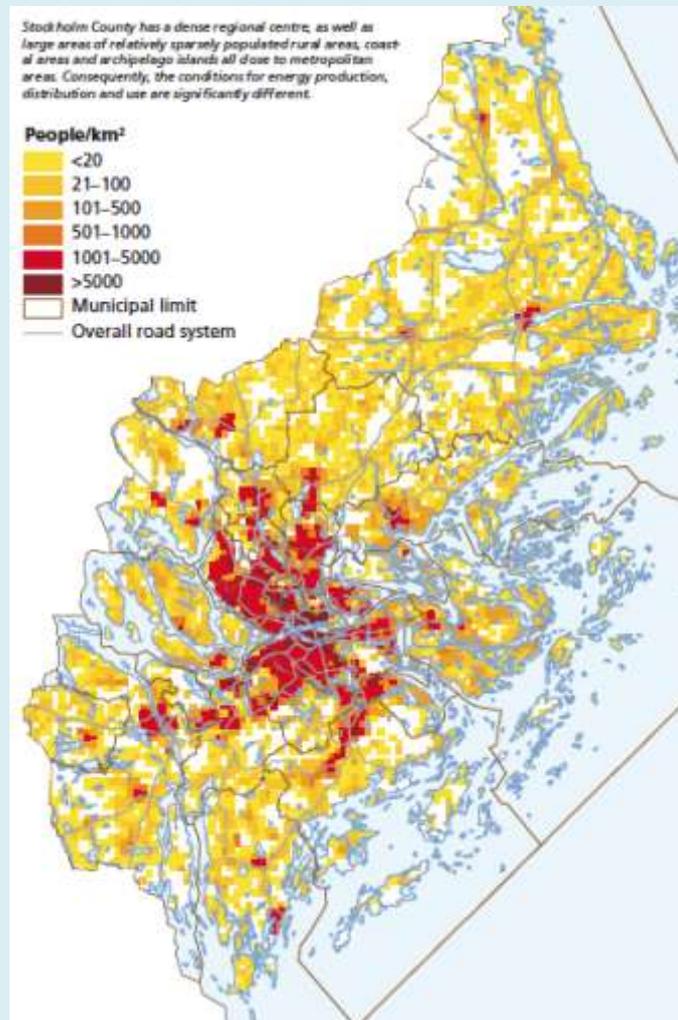
Alors que les améliorations individuelles des systèmes, des processus et des composants ont été significatives au cours des dernières décennies, les plus grandes possibilités de réduction de l'intensité énergétique des activités économiques se trouvent dans des stratégies d'optimisation du système énergétique plutôt que dans celles d'optimisation des composants individuels [23].

Pourtant, la plupart des marchés et les décideurs ont tendance à se concentrer sur les composants individuels du système (par exemple, les moteurs et les entraînements, les compresseurs, les pompes et les chaudières) avec des potentiels d'amélioration de 2 à 5%, tandis que les systèmes ont des potentiels d'amélioration beaucoup plus importants : 20% ou plus pour les systèmes de moteurs, 10% ou plus pour les systèmes à vapeur et les processus de chauffage. L'augmentation du taux de réutilisation des produits, la rénovation, la remise à neuf et le recyclage a un potentiel important. Dans les bâtiments, de nouvelles approches de conception intégrée

³⁵ Les exemples incluent une analyse des options d'approvisionnement en énergie renouvelable pour éco-ville au Royaume-Uni [39], un examen de la programmation des investissements pour la politique énergétique urbaine [40], une évaluation de l'efficacité potentielle de réduction des émissions d'une zone urbaine [41], et une étude des options aux échelles bâtiment, district et ville pour transformer le secteur des bâtiments commerciaux japonais [42].

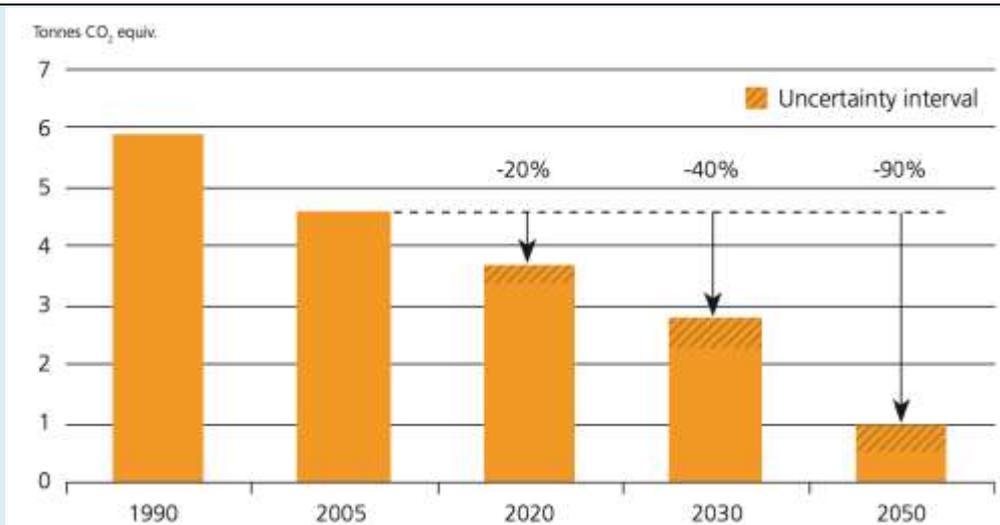
permettent d'atteindre 90% de réduction d'énergie pour le chauffage et le refroidissement par rapport aux pratiques courantes [23].

Stockholm : Un exemple de planification énergétique urbaine globale



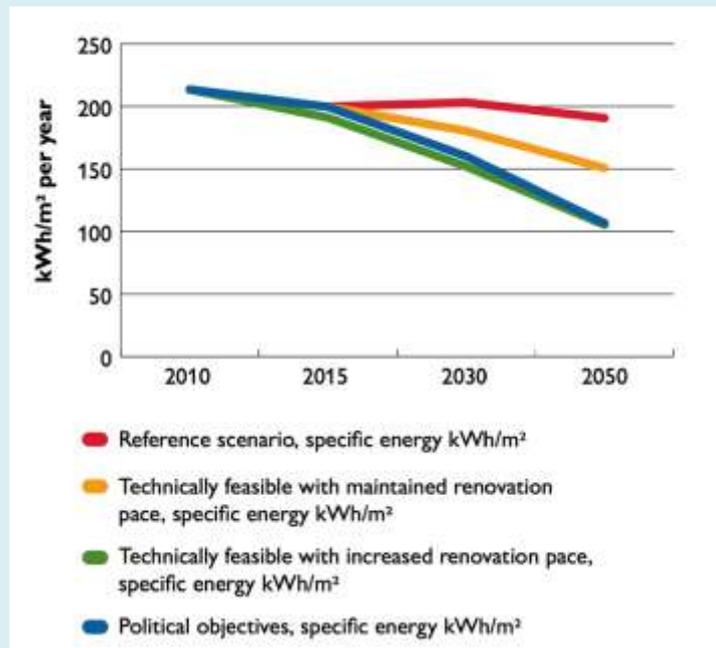
Densité de population dans la région métropolitaine de Stockholm [43]

La planification intégrée implique de considérer simultanément l'ensemble le plus vaste possible de questions, d'identifier les synergies et les co-bénéfices. Un exemple est l'utilisation à Stockholm du biogaz générés par les déchets pour le transport et de la chaleur résiduelle pour le chauffage urbain. Les stratégies mises en œuvre à Stockholm en particulier démontrent les possibilités techniques d'intégration des systèmes urbains.



Objectifs de réduction des émissions par habitant dans la région métropolitaine de Stockholm [43]

Stockholm a entrepris un effort à long terme pour réduire les émissions de carbone, protéger l'environnement et réduire la consommation des ressources dans toute la ville, avec des projets de rénovation des friches industrielles à grande échelle dans des quartiers qui intègrent des technologies et des politiques nouvelles. Les charges environnementales de Stockholm ont été fortement réduites grâce à l'approvisionnement en chaleur par le chauffage urbain et grâce aux améliorations de l'efficacité énergétique du bâtiment. Stockholm a mis en œuvre des politiques visant à économiser l'énergie et à réduire les émissions de GES dans trois domaines: le chauffage urbain, les transports et les bâtiments. En complément aux économies d'énergie dans les trois secteurs, les politiques suivies ont également impliqué le remplacement du combustible : utilisation des bio-déchets dans le chauffage urbain, biocarburants dans les transports, électricité renouvelable dans les bâtiments.



Scénarios de demande spécifique pour les bâtiments à Stockholm (hors bâtiments appartenant à la municipalité) [47]

Efficacité énergétique des bâtiments

Les codes de construction limitent la consommation d'énergie primaire dans tous les bâtiments neufs à un maximum de 100 kWh/m²/an. La Ville poursuit également une politique de réhabilitation énergétique, en particulier dans les bâtiments municipaux existants et les logements sociaux. L'intensité énergétique des nouveaux bâtiments a été largement contrôlée par les normes de construction strictes qui s'appliquent aux éco-quartiers. Dans ces normes, tous les nouveaux projets de construction doivent certifier une intensité de la consommation énergétique inférieure de 50 % à la moyenne de la Suède (100 kWh/m²/an contre 200 kWh/m²/an). Les exigences de réduction de la consommation énergétique des bâtiments municipaux sont supérieures à celles des nouveaux codes énergétiques [45]. Des sociétés de services énergétiques qui travaillent dans des bâtiments appartenant à la municipalité (y compris les logements sociaux) ont des contrats avec intéressement pour prendre la responsabilité de l'exploitation, de l'entretien et du suivi durant plusieurs années après la mise en place des mesures. La Ville a également augmenté le financement pour les investissements en capital, tout en réduisant les budgets de fonctionnement des bâtiments municipaux [44]. Des incitations fiscales pour les appareils, l'éclairage, et les connexions au chauffage urbain ont été utilisées pour encourager la réhabilitation énergétique des bâtiments privés.

Énergies renouvelables

En partie à cause de la hausse des prix du pétrole et du rejet de la technologie nucléaire dans les années 1970 et 1980, la Suède a utilisé des incitations fiscales nationales (des incitations fiscales positives pour la production d'énergies renouvelables et une taxe carbone sur les systèmes basés sur les combustibles fossiles) pour poursuivre une politique forte d'énergies renouvelables centralisées [46]. Des tarifs de rachat sont également proposés pour les énergies renouvelables distribuées. En outre, la majorité des services de la Ville ont acheté l'électricité à partir de sources renouvelables au cours des dix dernières années, et tous les services municipaux le font actuellement dans le cadre d'une nouvelle convention collective signée en 2010 [45].

Plus de 60% de l'électricité consommée dans la ville et 20 % de la consommation d'énergie primaire de la ville proviennent aujourd'hui de sources renouvelables avec une teneur en carbone moyenne de l'électricité atteignant 103 grammes CO₂e/kWh au cours des dernières années. 12% des foyers achètent uniquement de l'électricité certifiée renouvelable produite grâce aux politiques obligeant les compagnies distributrices à acheter une certaine proportion d'électricité provenant de sources renouvelables ; le biogaz provenant du traitement des eaux usées est utilisé pour la cuisson des aliments [45].

Résultats

Le chauffage urbain couvre actuellement près de 80% des besoins de chauffage totaux de Stockholm et le réseau est constamment étendu de 200 à 300 gigawatts-heures par an [44]. 80% de l'énergie de chauffage urbain est produite à partir de combustibles renouvelables ou alternatifs, y compris une grande quantité provenant de déchets municipaux et nationaux. Le nouvel objectif politique est que toutes les nouvelles constructions soient neutres en carbone d'ici 2030 [48]. Le premier objectif de réduction de GES fixé en 1995 était de ramener les émissions de GES par habitant de la ville au niveau de 1990 (5,4 tonnes équivalent CO₂ par habitant) en 2000. Les émissions en 2000 étaient de 4,5 tonnes de CO₂ par habitant, surpassant de loin cet objectif. Le prochain objectif, fixé pour 2005, a de même été dépassé, avec une réduction totale de 25% des émissions de GES en 10 ans [44]. Pour poursuite de ces efforts, la Ville a pour objectif d'atteindre 3 tonnes CO₂e par habitant en 2015, avec zéro utilisation de combustibles fossiles dans la ville en 2050 [44], [45].

CHAPITRE III

METTRE EN ŒUVRE LES POLITIQUES DE TRANSITION

L'approche systémique est celle qui offre les effets de levier les plus importants, mais c'est également la plus difficile à mettre en œuvre car elle requiert de surmonter la fragmentation des politiques et des décisions dispersées et non coordonnées. La gouvernance de la transition est essentielle, en particulier dans les villes petites et moyennes qui n'ont pas nécessairement les capacités pour mettre en œuvre des politiques complexes. Ainsi que nous l'avons vu dans la première partie, ce sont également ces villes petites et moyennes qui ont la plus forte élasticité énergétique lorsqu'elles changent de taille. Plus les villes grandissent en population, et plus des économies d'échelle du système énergétique ont été intégrées dans leur fonctionnement, ce que traduit l'importante différence d'élasticité de la taille énergétique des villes par rapport à leur taille démographique. Les grandes villes, qui sont déjà structurellement plus efficaces que les petites villes, doivent servir de lieu d'incubation puis de diffusion de l'innovation. Partager et transférer les expériences, l'information et les bonnes pratiques entre les différentes villes est un élément clé pour tirer pleinement parti du potentiel d'innovation des villes.

La transition vers un futur durable requiert une transformation des systèmes énergétiques urbains vers des systèmes présentant les caractéristiques suivantes :

- des améliorations radicales de l'efficacité énergétique, en particulier dans l'utilisation finale ;
- une plus grande part d'énergies renouvelables dans le mix énergétique ;
- des systèmes énergétiques avancés, avec la capture et le stockage du carbone pour les combustibles fossiles et la biomasse.

Il existe de nombreuses options de portefeuille énergétique et de nombreuses manières pour transformer les systèmes énergétiques. Des investissements importants et soutenus, associés à des politiques publiques, sont nécessaires pour mettre en œuvre et financer la transition. Certains de ces

investissements ont déjà eu lieu. Ils doivent être renforcés et appliqués largement à travers des mécanismes nouveaux et innovateurs pour créer une transformation majeure du système énergétique.

Les structures de gouvernance actuelle n'ont pas été conçues pour gérer la planification énergétique intégrée. Dans une perspective de long terme, les incertitudes énergétiques et les préoccupations environnementales rendent nécessaire un renforcement des structures de gouvernance.

1. CREER UNE STRATEGIE ENERGETIQUE INTEGREE

De plus en plus de grandes villes dans le monde ont développé des *plans énergétiques* ou des *stratégies énergétiques*. Les instruments de politique publique peuvent être classés selon une hiérarchie d'effets de levier allant de la planification des usages du foncier à la gestion des infrastructures. La planification des usages du foncier fixe des paramètres agrégés pour les zones urbaines, comme les fonctions permises, les densités ou les hauteurs maximales de construction qui encadrent les investissements publics et privés. Elle constitue une solution pragmatique pour le développement progressif d'une zone urbaine.

La réhabilitation énergétique a lieu fréquemment dans des situations urbaines complexes comme « @22 » à Barcelone ou « Thames Gateway » à Londres, habituellement dans le cadre d'un plan régulateur général. Intégrer la planification énergétique dans la planification urbaine est une politique très efficace pour tirer parti des économies d'échelle des technologies à basse énergie et à bas carbone. Il en existe des exemples très significatifs dans les villes européennes, comme Malmö ou Fribourg. De nombreuses autorités locales ont le pouvoir d'imposer des conditions aux nouveaux développements urbains, comme par exemple la connexion obligatoire à un réseau de chaleur urbain. La planification peut être efficace pour éliminer les consommations énergétiques les plus excessives. Toutefois la planification *descendante* ne peut pas à elle seule parvenir à des solutions à très basse énergie car de nombreuses décisions sur l'utilisation des énergies finales sont prises à des niveaux sous-jacents de la hiérarchie.

Certains pays commencent à intégrer les considérations liées au changement climatique dans la planification spatiale en fournissant aux autorités locales les ressources financières et l'assistance technique dans la planification de nouvelles villes neutres en carbone ou dans la réhabilitation énergétique de zones urbaines existantes. Des exemples peuvent être trouvés en Allemagne (Vauban et Fribourg) et en Suède (Malmö et Stockholm). Ces stratégies ont en commun une approche

intégrative qui combine la planification foncière, le transport, l'énergie et les préoccupations environnementales, sociales et économiques dans un cadre cohérent.

La régulation des marchés de l'énergie

En complément à la planification, une attention particulière doit être apportée au marché de l'énergie. Depuis les années 80, la tendance mondiale a été à la fourniture des services locaux par le secteur privé au sein d'un cadre réglementaire. Les prix de l'énergie sont habituellement régulés au niveau national mais les biais qu'ils introduisent dans le fonctionnement du marché des énergies sont un frein à l'efficacité. A l'échelle globale, les subventions aux énergies fossiles restent importantes et sont plusieurs ordres de grandeur au-dessus des soutiens apportés aux énergies renouvelables. Enlever ces subventions aux énergies fossiles est une bonne manière pour atteindre des systèmes énergétiques efficaces à long terme.

Les instruments politiques des collectivités locales

Les impacts les plus importants des politiques publiques sont ceux où elles permettent de :

- prévenir l'irréversibilité spatiale sous la forme de chemin de dépendance ;
- prévenir l'enfermement technologique ;
- permettent de s'éloigner de seuils critiques.

Des exemples de telles politiques incluent :

- la prévention de développements urbains à basse densité ;
- la promotion de la co-localisation de sources de production énergétique et de puits de demande permettant le recyclage de la chaleur résiduelle pour le chauffage et le refroidissement.

La littérature scientifique a identifié un seuil critique de densité entre 5 000 et 15 000 habitants/km² en au-dessous duquel le transport public ou la cogénération ne deviennent plus rentables économiquement, ce qui conduit à une augmentation des coûts énergétiques et d'infrastructures plus rapide que la décroissance de la densité. Éviter de franchir de tels seuils critiques doit être la première priorité des collectivités territoriales.

Les autorités locales ont un grand nombre d'instruments politiques à leur disposition, en particulier pour la politique de transport. Les prix pour les parkings et pour l'utilisation des routes peuvent être utilisés pour réorienter la part modale vers le transport public. Les charges pour la congestion à Londres en sont un exemple [49]. Les taxes sur la propriété et sur les ventes sont des

incitations à améliorer l'efficacité énergétique du stock de bâtiments. Une autre famille d'instruments politiques concerne les composants individuels et leur utilisation directe. Les codes de construction sont désormais généralement associés avec des codes de contrôle énergétique. La fourniture de systèmes de transport public est la meilleure option pour le transport lorsque les densités de trajets sont suffisamment élevées. La mise en œuvre effective de ces options n'est cependant pas seulement un problème technique ou réglementaire mais prend place dans une transition du système socio-économique.

Accélérer le taux de progression est aujourd'hui critique pour la transition énergétique. Une amélioration rapide des systèmes énergétiques nécessite des politiques de soutien à l'innovation, une action réglementaire stricte sur la demande et l'offre d'énergie, une augmentation des prix de l'énergie, la création d'une culture d'économie énergie chez les consommateurs et les entreprises, des changements des plans de COS pour accroître la densité, l'accroissement de la mixité des activités des fonctions afin de réduire le besoin de transport. Dans certains cas, ces politiques devront impliquer des subventions pour les nouvelles technologies, mais celles-ci ne seront pas efficaces si elles ne sont pas associées à une taxation des émissions de gaz à effet de serre.

Les réglementations, en particulier les standards, sont des éléments essentiels des portefeuilles de politiques de transition énergétique. Les codes de construction, les standards pour les équipements domestiques, les standards d'économie de carburant, et les standards de gestion de l'énergie industrielle ont prouvé leur efficacité. L'association des réglementations et des politiques incitatives (notamment fiscales) et les mesures de sensibilisation (par exemple les campagnes d'information du public) ont un fort potentiel d'accroissement d'efficacité énergétique.

Un portefeuille de politiques doit être utilisé en synergie les unes avec les autres [23] et doit en particulier comprendre :

- un cadre réglementaire strict de l'efficacité réactualisé régulièrement (par exemple tous les cinq ans) ;
- des mesures incitatives pour récompenser les efforts des fabricants pour mettre en œuvre des technologies énergétiquement efficaces ;
- une augmentation des prix de l'énergie (qui inclut l'intégration des émissions directes ou indirectes) ;
- des tarifs différenciés de l'électricité qui récompensent fortement les investissements et les comportements efficaces ;
- une planification du foncier qui encourage le redéveloppement et la densification urbaine ;

- des investissements publics et privés dans les infrastructures efficaces comme le transport public, les voies cyclables, et les systèmes de cogénération.

2. DEFINIR DE MANIERE FONCTIONNELLE LES LIMITES DES SYSTEMES URBAINS

Mesurer la consommation d'énergie des villes est la première étape pour la contrôler. Ce n'est pas une tâche facile en raison des différentes limites possibles du système géographique et fonctionnel urbain. Pour l'orientation politique, la question importante de l'*attribution* de l'énergie et des émissions doit être abordée. Seul ce qui est mesuré régulièrement, correctement et de manière transparente à l'échelle urbaine est utile pour l'orientation des politiques.

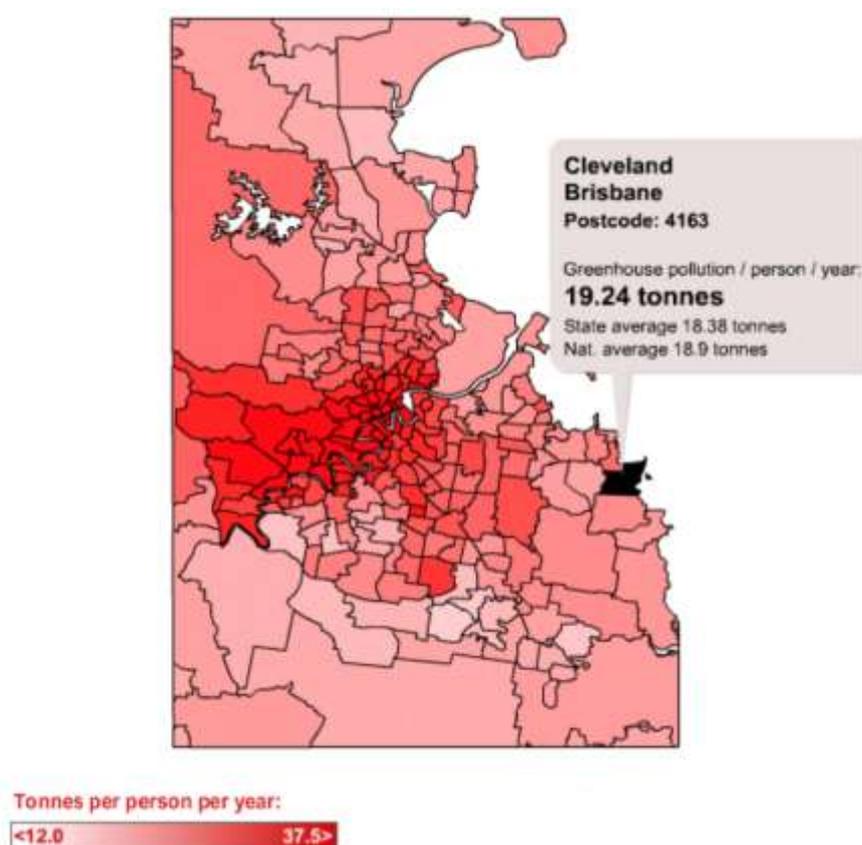
Réussir pleinement la transition énergétique implique de définir des limites des systèmes urbains en étendant l'approche territoriale traditionnelle. La planification énergétique doit être fondée sur l'interdépendance fonctionnelle de différents systèmes qui ne sont pas nécessairement proches graphiquement les uns des autres. Les méthodes d'analyse des systèmes et des méthodes étendues d'analyse des cycles de vie sont de plus en plus disponibles pour analyser les questions de durabilité environnementale de systèmes énergétiques urbains qui sont supportés fortement par des importations énergétiques.

L'approche production et l'approche consommation

La comptabilisation de la consommation énergétique est un préalable à une planification fondée sur des faits. Elle est très sensible au choix des limites du système urbain. Aucune ville moderne n'est une unité économique ou énergétique autonome. L'estimation de la consommation énergétique urbaine varie en fonction des limites du système urbain en termes d'échelles spatiales (villes par rapport aux agglomérations), de définition des systèmes énergétiques (énergie finale ou primaire) et de la prise en compte de l'énergie incorporée dans les biens et services de la ville. Des techniques analytiques transparentes et fiables sont donc essentielles pour définir et piloter les politiques. L'utilisation directe des protocoles nationaux de comptabilisation de l'énergie à l'échelle urbaine est souvent appelée approche *production*. Elle diffère d'une approche de comptabilisation fondée sur la *consommation* qui affecte des consommations d'énergie primaire à chaque unité de consommation des consommateurs urbains, en comptabilisant l'utilisation de l'énergie indépendamment de sa forme (énergie directe ou incorporés) ou de sa localisation (à l'intérieur ou à l'extérieur des limites administrative de la ville). Les deux approches fournissent des informations utiles.

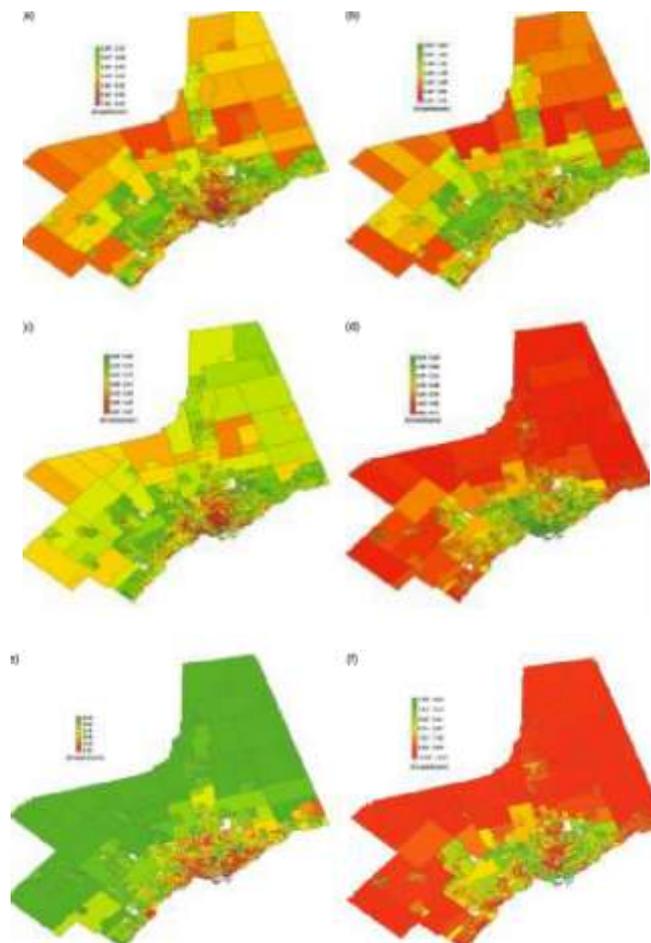
Les approches spatialement explicites de la distribution de l'énergie urbaine

Les approches spatialement explicites de la distribution de l'énergie urbaine sont la clé pour comprendre l'influence de la forme urbaine sur les consommations énergétiques et pour parvenir à découpler les quatre leviers complémentaires de la politique d'efficacité énergétique en milieu urbain : la forme urbaine, la technologie, l'efficacité des systèmes énergétiques et le comportement des habitants. La désagrégation spatiale peut être basée sur une comptabilisation fondée sur la *consommation* ou bien sur une comptabilisation de *production (territoriale)*. Pour la ville de Sydney, Lenzen et al. [50] ont désagrégé la consommation d'énergie fondée sur la consommation dans quatorze zones urbaines et l'ont reliée à un atlas des émissions de GES de l'Australie à l'échelle de résolution du district postal.



Carte des émissions de gaz à effet de serre de Brisbane en Australie. Les zones les plus sombres autour du centre de Brisbane représentent les districts les plus riches et correspondent aux émissions par habitant les plus élevées [50]

Andrews [51] a analysé la consommation d'énergie basée sur la *production* de plusieurs districts dans le New Jersey, des zones rurales aux zones urbaines. Une étude innovante a comparé les émissions de transport et des bâtiments dans les zones urbaines, péri-urbaines et rurales des Etats-Unis [52].



Les émissions annuelles résidentielles de GES par habitant à Toronto : (a) émissions de fonctionnement des bâtiments, (b) consommation d'électricité, (c) utilisation de fioul pour les bâtiments (d) transport total (e) transports en commun et (f) total pour l'activité résidentielle [53]

Pour Toronto, Van de Weghe et Kennedy [53] ont calculé des données spatialement explicites d'émissions de gaz à effet de serre basées sur la *production* pour le transport et les usages résidentiels de l'énergie. Ils ont analysé spatialement les données afin de déterminer l'impact de la forme urbaine sur les émissions. Sur l'ensemble de la région urbaine, les émissions liées à l'utilisation d'automobiles sont à égalité avec celles provenant de la consommation de fioul pour le chauffage des bâtiments. Au-delà du centre dense à forte intensité de transport en commun, les émissions des automobiles privées dépassent les émissions de fonctionnement des bâtiments. Les variations dans les émissions liées aux automobiles et aux bâtiments sont très significatives, allant de 3,1 à 13,1 tonnes d'équivalent CO₂ par an. De toutes les unités de recensement, les dix premières en termes d'émissions de GES sont situées dans les banlieues à faible densité et leurs émissions élevées sont largement dues à l'utilisation de l'automobile.

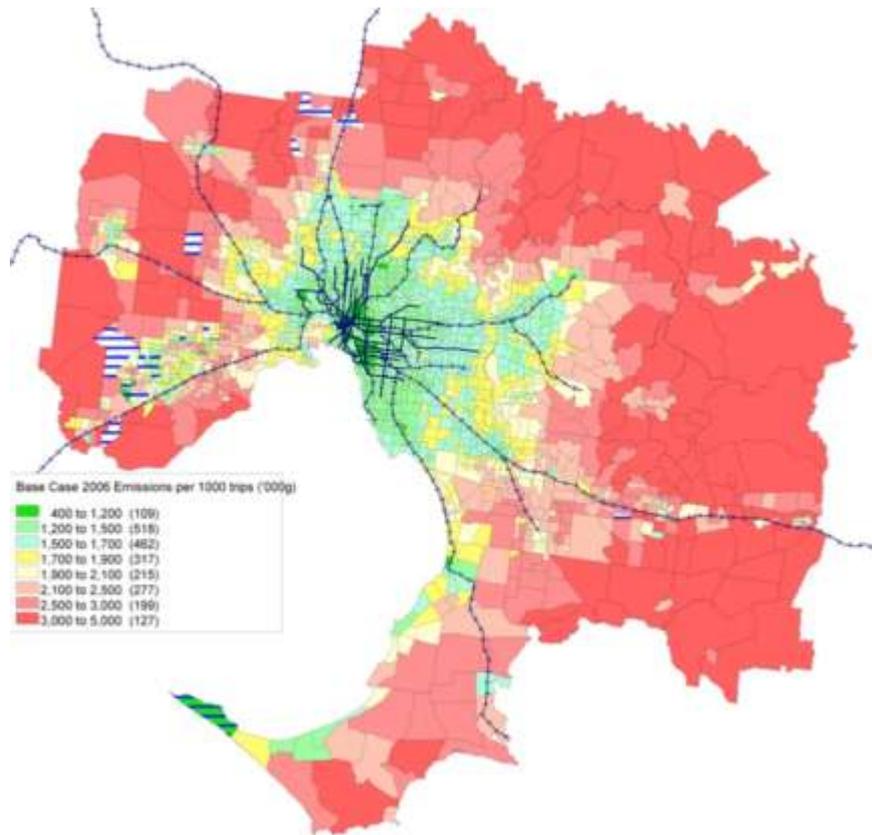
3. METTRE EN PLACE DES POLITIQUES

Les politiques d'amélioration de l'environnement construit

Dans le secteur du bâtiment, pour parvenir à des réductions de l'énergie thermique finale qui soient supérieurs à 40 %, il est nécessaire de renforcer progressivement la réglementation thermique pour atteindre des niveaux de très basse consommation. Ces exigences doivent être étendues à la réhabilitation thermique des bâtiments existants qui doit être accélérée par rapport aux rythmes actuels. Des mécanismes d'utilisation en cascade de l'énergie résiduelle doivent être mis en place lorsque c'est techniquement et économiquement faisable. Réussir la transition énergétique dans le secteur du bâtiment implique de déplacer l'effort de bâtiments pilotes aux qualités exceptionnelles vers la réhabilitation massive du stock de bâtiments existants aux qualités ordinaires. La transition énergétique implique d'associer non seulement les concepteurs (architectes et ingénieurs) mais également les propriétaires, les opérateurs, et les utilisateurs des bâtiments.

Les politiques de transport

Les politiques urbaines ont un impact fort sur les besoins de transport, sur les coûts d'infrastructures et sur la viabilité des différents modes de transport à l'échelle locale. Une transformation majeure des transports est possible au cours des 30 à 40 prochaines années et nécessitera l'intégration de la planification foncière et de celle des transports ainsi que l'amélioration des réseaux d'infrastructures de transport public. À la fois les décisions de se déplacer, la longueur des trajets et les choix du mode de transport affectent la consommation de carburant. Les changements de modes et la réduction des volumes de trajets sont liés à la forme urbaine. Ce sont ces changements structurels qu'il faut d'abord encourager pour diminuer la demande énergétique de transport. Il faut diminuer le besoin de se déplacer avant d'améliorer l'utilisation des infrastructures existantes et avant de développer les véhicules efficaces et les carburants alternatifs.



Distribution spatiale des émissions de transport à Melbourne [23]. L'étude de Melbourne présente les résultats en termes d'émissions pour 1000 trajets ce qui permet de mesurer l'efficacité des trajets.

Réussir la transition dans le secteur des transports implique de modifier les besoins de transport en transformant à long terme les structures spatiales et la distribution des activités urbaines, en modifiant les infrastructures, en favorisant les transferts vers les modes non motorisés et le transport public, en améliorant l'efficacité des véhicules et des carburants. Les variations importantes dans les choix de transport urbain et dans la répartition modale observées dans différentes villes montrent que les patterns de mobilité urbaine peuvent être façonnés par l'interaction des politiques publiques et des choix individuels. Les choix de transport urbain peuvent être modifiés si deux conditions sont remplies : une détermination forte de la politique énergétique de transport, une acceptation large des objectifs globaux par les habitants. Une telle politique nécessite la mise en œuvre de mesures individuelles, par exemple, de modération des vitesses, de systèmes de tarification de la circulation (pour les routes et parkings, etc.). Les mesures restrictives qui limitent la mobilité individuelle motorisée doivent être complétées par des politiques proactives qui améliorent l'attractivité de déplacements non motorisés et encouragent le choix des transports en commun. Les mesures de tarification du transport individuel motorisé doivent être complétées

par des investissements dans les infrastructures de transport public. L'objectif est de transformer la dépendance à l'automobile en un *cercle vertueux* de choix des modes non- motorisés et du transport public.

Une mesure clé est l'internalisation progressive des externalités du transport privé motorisé à son coût. Les estimations pour l'Europe suggèrent que ces coûts externes sont au moins de l'ordre de 6 à 10 centimes par passager-km. Si les coûts externes étaient pleinement internalisés, ils pourraient doubler les coûts de transport motorisé privé. Des expériences récentes avec la tarification de la circulation et des frais de congestion suggèrent que de telles approches politiques sont à la fois réalisables et ont la capacité de modifier le comportement de transport urbain [7].

Un exemple d'instrument économique : la taxe d'immatriculation différenciée fondée sur le rendement énergétique de la voiture (adapté de [54])

Plusieurs pays, dont la Suède et le Danemark, ont au cours des dernières années transformé la taxe d'immatriculation en la différenciant en fonction du rendement énergétique des voitures : les voitures économes en carburant paient une taxe inférieure. Le but de la taxe différenciée est de limiter l'achat de véhicules fortement consommateurs d'énergie. En Irlande, la taxe différenciée a contribué à une croissance des véhicules de la classe A (la plus économe en énergie) à partir d'un taux de 1,5 % du marché en 2007 à 34,7% en septembre 2010. Dans le même temps, les classes E, F et G (les moins économes en énergie) ont vu leur part de marché diminuer de 34 % à 3 %.

À court terme, l'efficacité énergétique globale du secteur peut être améliorée par l'introduction de carburants alternatifs à faibles émissions de carbone et par celle de l'électricité. Il reste encore de nombreuses possibilités d'améliorer les technologies des véhicules conventionnels : augmenter l'efficacité de conversion de l'énergie du combustible en travail en améliorant l'efficacité du groupe motopropulseur, capturer les pertes d'énergie, réduire les charges (poids, roulement, résistance de l'air, et charges accessoires). Ces gains d'efficacité ont le potentiel de diviser la consommation de carburant des véhicules légers de 7,5 litres aux 100 km en 2010 à 3,0 litres aux 100 km en 2050 [23]. L'émergence de technologies de propulsion électrique et de véhicules électriques hybrides permet de réduire à zéro les émissions d'échappement dans des conditions de conduite urbaine. Les véhicules à batterie tout-électrique peuvent atteindre un rendement très élevé (plus de 90%, soit quatre fois l'efficacité d'un véhicule à moteur à combustion, mais sans prendre en compte la production et le transport de l'électricité). Si les technologies hybrides et d'économies de carburant étaient déployées sur une grande échelle, des économies de carburant d'un facteur deux en moyenne pourraient être obtenues dans la prochaine décennie [23].

Réussir la transition vers le transport public nécessite un réseau de transports en commun dense et une fréquence de service élevée avec de courts intervalles, qui ne sont réalisables qu'avec un seuil minimum de densité urbaine. L'objectif de la planification urbaine durable est de constituer des agglomérations urbaines compactes où tous les habitants sont à moins de cinq minutes de marche (<500 m) d'un service de transport public efficace. Les objectifs à moyen terme consistent en la réduction des distances de déplacement dans les villes en mettant en œuvre un aménagement urbain compact qui améliore l'accessibilité aux emplois et aux services. La forme des réseaux de rues et l'aménagement urbain peuvent faciliter la marche et le vélo, et leur intégration dans un réseau de modes de transport public. Les employeurs dans de nombreux secteurs peuvent améliorer l'équilibre travail - logement des salariés par leurs décisions de localisation.

Le déploiement des énergies renouvelables

En raison de la taille et de l'inertie du système énergétique, les énergies renouvelables font face à des barrières de marché importantes. Alors que les marchés concurrentiels fonctionnent efficacement pour de nombreux biens et services, un certain nombre de défaillances doivent être résolues en matière d'énergie. Une préoccupation centrale est la manière dont les marchés favorisent actuellement les formes conventionnelles d'énergie en n'intégrant pas pleinement les externalités dont elles sont responsables, ce qui rend plus difficile d'intégrer de nouvelles technologies et de nouveaux services dans le système énergétique. Les importantes subventions aux énergies fossiles faussent d'autre part le marché et créent une barrière à l'entrée pour les énergies renouvelables. De même, les multiples bénéfices associés aux énergies renouvelables ne sont souvent pas pris en compte lors de l'évaluation du retour sur investissement, comme l'augmentation de la sécurité énergétique, la réduction de la volatilité économique, l'atténuation du changement climatique, et de nouvelles possibilités de production et d'emploi. Pour pleinement déployer les énergies renouvelables, il faut donc associer de multiples politiques. Il est important de noter que :

- La croissance du marché résultera de la combinaison de politiques multiples ;
- La stabilité de long terme des politiques est importante ;
- La participation de niveaux multiples de gouvernance et le soutien des autorités nationales aux acteurs locaux sont importants ;
- Chaque mécanisme de politique doit évoluer avec le retour sur expérience de son utilisation.

Une transition à grande échelle vers des sources d'énergie renouvelable est nécessaire et possible en utilisant un mix énergétique comprenant l'énergie éolienne, marémotrice, solaire, la

biomasse, les sources géothermiques et hydroélectriques. Toutefois, étant donné la densité de la demande énergétique urbaine actuelle et l'intermittence des sources locales d'énergie renouvelables, les villes devront adopter une stratégie à plusieurs volets pour parvenir à une réduction de la densité de demande énergétique urbaine. Cette réduction peut atteindre de 75% à 90% en agissant à la fois sur la forme urbaine, sur la qualité de l'environnement construit, sur l'efficacité systémique dans la demande (par recyclage des flux résiduels) et sur les comportements.

4. MOBILISER LES ECHELONS LOCAUX DE GOUVERNANCE

Les systèmes de production d'énergie à partir des déchets, les systèmes de chauffage et de refroidissement urbain, la mise en œuvre de tarifs de rachat pour l'électricité renouvelable, les subventions, les prêts à faible intérêt et des subventions pour l'installation d'énergie solaire, éolienne (parmi d'autres sources d'énergie renouvelable), les budgets de R&D alloués à des sources d'énergie neutres en carbone, l'amélioration de l'efficacité énergétique des secteurs résidentiel, commercial et industriel font partie du portefeuille d'actions pour les municipalités qui cherchent à réduire les consommations d'énergie et les émissions de GES.

New York PlaNYC 2030 : la combinaison de la planification stratégique avec l'action locale

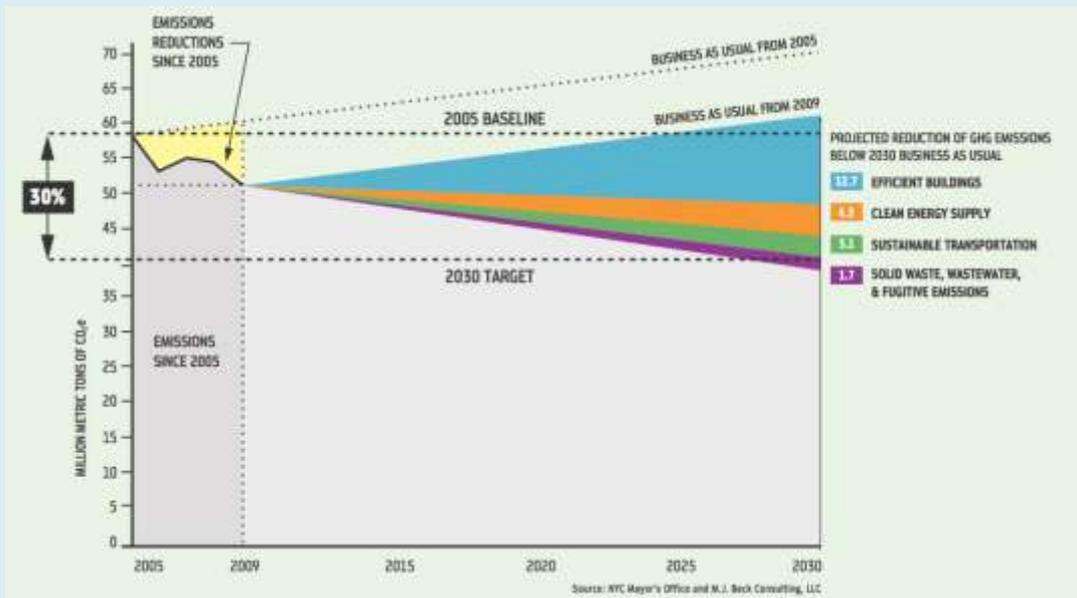


La Ville de New York, la plus grande municipalité américaine (avec actuellement environ 8,2 millions d'habitants), verra sa population augmenter de 1 million d'habitants en 2030. Les infrastructures existantes seront insuffisantes pour répondre aux besoins de cette croissance démographique, en particulier en raison des risques climatiques et de l'élévation du niveau de l'océan. Pour relever ces défis, la ville est dans la quatrième année de mise en œuvre d'un plan global appelé PlaNYC 2030. Ce plan vise à réduire les charges environnementales de la ville en diminuant la consommation de matières et d'énergie, en améliorant les espaces naturels, en planifiant pour atténuer les effets du changement climatique et pour créer une société plus équitable.

Vingt-cinq départements de la ville (en liaison souvent avec des organismes provinciaux et fédéraux) travaillent avec la collaboration d'un large éventail de sociétés, d'entreprises et de parties prenantes à but non lucratif. Ce groupe examine également régulièrement le plan. Le modèle de New York repose sur des efforts ciblés dans l'ensemble de la ville. L'exécution de ces efforts est assurée par les parties prenantes locales. New York élabore un plan global qui s'appuie en grande partie sur une réalisation locale décentralisée. Le travail de PlaNYC a commencé par une prise de conscience que l'objectif de croissance du maire devait être validé par des évaluations de préparation de l'infrastructure [55]. Les prévisions de besoins à grande échelle, en particulier la demande de foncier et d'énergie liée à la croissance démographique, ont servi de base pour que les fonctionnaires de la Ville chargés de la planification du foncier, des transports, de l'environnement et de l'énergie travaillent ensemble et créent l'approche inter-agences de PlaNYC.

Les efforts conjoints des groupes de travail de planification inter-agences, dirigés par une seule agence rattachée directement au maire, ont développé le plan à l'aide d'un processus de décision fondé sur des données quantifiées (ce travail a commencé deux ans avant la publication du plan). Des objectifs ciblés, ont été élaborés en veillant à ce que les parties prenantes soient incluses dans le processus de décision. Les éléments qui soutiennent la réalisation du plan comprennent des objectifs centrés sur les citoyens, des groupes de travail d'experts organisés par City of New York, l'inclusion des parties prenantes à travers la sensibilisation des médias, des budgets et des échéanciers intégrés au plan et le recours à des données exhaustives. L'agence dirigeant la planification a été agrandie et transformée en une agence de mise en œuvre. Des gestionnaires de projet PlaNYC ont été placés dans toutes les agences de la ville concernées et les acteurs locaux (parfois à l'échelle des bâtiments individuels ou des blocs urbains) ont reçu des incitations à prendre en charge la mise en œuvre. Les mesures comprennent des changements dans les codes de zonage qui créent des opportunités pour de nouveaux développements [55].

La planification énergétique urbaine

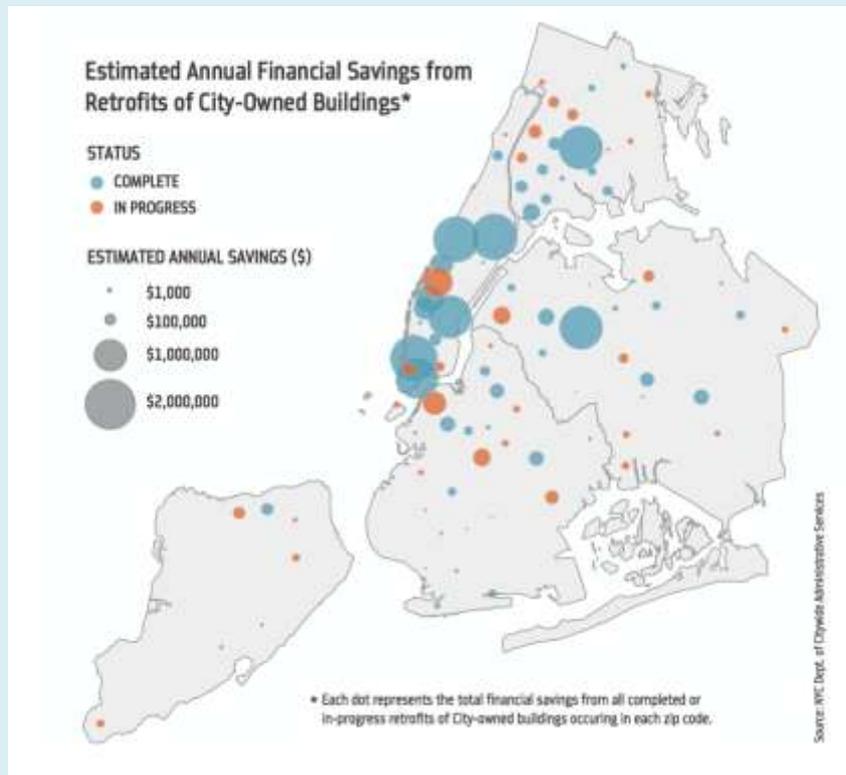


Impacts projetés des différentes stratégies de réduction des GES à New York [55]

Les New-Yorkais paient les prix de l'énergie parmi les plus élevés des États-Unis, et le réseau électrique local est très saturé. Toutefois, les émissions de GES par personne sont environ le tiers de celles de l'Américain moyen, en grande partie à cause de la densité de la forme urbaine et de la forte proportion de trajets non automobiles.

La ville a deux objectifs majeurs de réduction des émissions de GES : une réduction de 30 % de l'ensemble des émissions de carbone d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 2005 et une réduction de 30 % des émissions de GES de source gouvernementale d'ici 2017 par rapport aux niveaux de 2005. Comme 85% du parc immobilier de 2030 est déjà construit et est la source de 75% des émissions de GES, la réduction de la consommation d'énergie grâce à la modernisation de l'efficacité énergétique des bâtiments existants est la cible logique de la plupart des politiques de GES de la Ville. Le changement de carburant est également un objectif important avec en particulier la réduction de la part de fioul de chauffage très polluant utilisé dans les bâtiments multifamiliaux et les écoles et l'augmentation de la part de la cogénération, du gaz et des énergies renouvelables.

L'efficacité de l'environnement construit

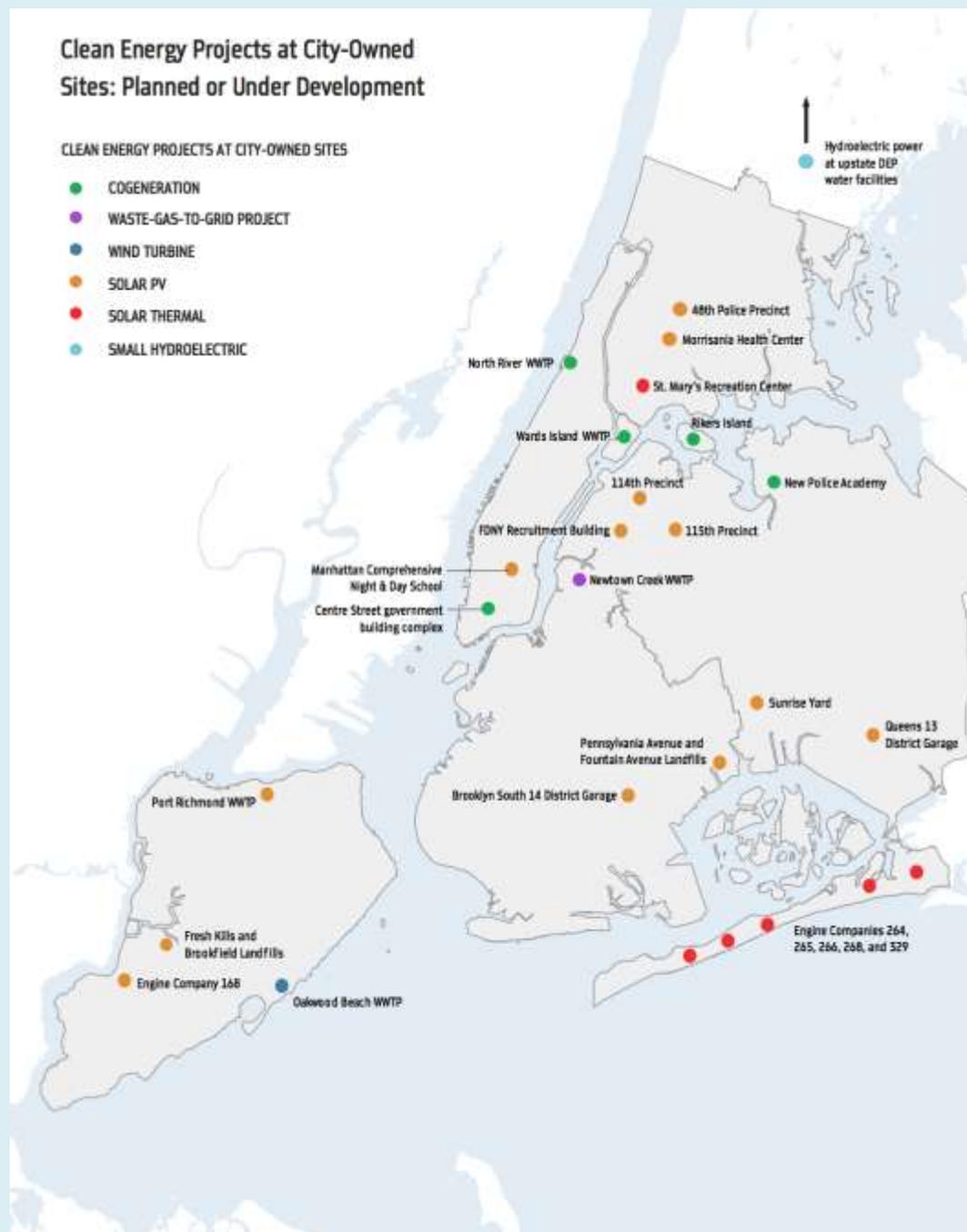


Réduction de coûts permise par les économies d'énergie liées aux rénovations de logements municipaux [55]

La Ville ne contrôle pas et ne réglemente pas l'électricité locale et le gaz. Par conséquent, l'action de la Ville doit se limiter à réduire la demande d'énergie dans les bâtiments publics et privés. Cet effort comporte deux éléments principaux : la promulgation de nouvelles réglementations (appelées le Green, Greater Buildings Plan [GGBP]) et la formation de 200 personnes (Green Codes Task Force (GCTF)) chargées de suivre la mise en œuvre des codes et d'autres réformes visant à réduire les autres impacts environnementaux des bâtiments. Le GGPB requiert des audits réguliers de l'énergie, des réhabilitations énergétiques et le partage des données pour les bâtiments publics plus de 1000 m² et les bâtiments privés de plus de 5000 m².

Ces mesures auront un impact sur plus de 16.000 bâtiments dans la ville. Les règlements sur l'efficacité des bâtiments comprennent des codes énergétiques plus stricts que les règlements fédéraux.

La transition des systèmes énergétiques

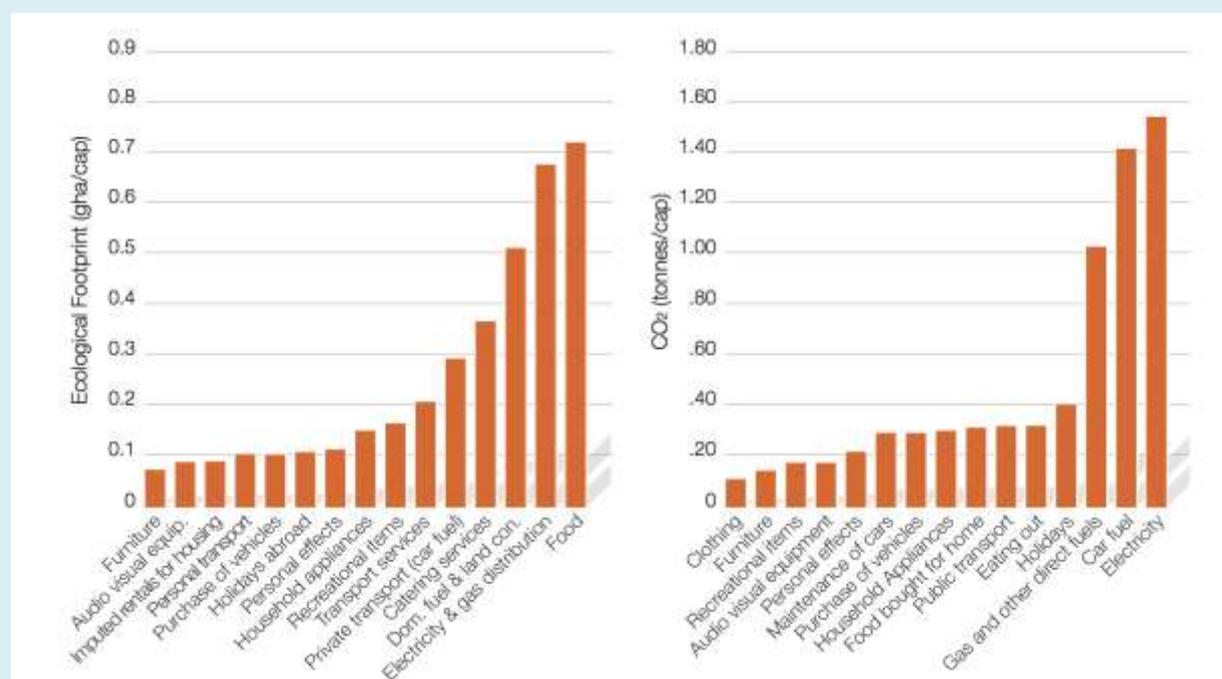


Carte des projets municipaux en cours pour la production d'énergie propres [55]

Le New York City Energy Planning Board nouvellement formé rassemble des représentants de la Ville de New York, de l'État fédéral et des services publics énergétiques. Il planifie l'expansion du réseau de distribution de gaz. Con Edison a été incité à moderniser son système de distribution électrique pour augmenter la fiabilité, et les propriétaires de centrales ont également remis en fonctionnement deux centrales dans la ville en utilisant une énergie plus propre. L'État fédéral, l'État de New York et la Ville ont mis en place des mesures incitatives pour développer l'énergie

renouvelable distribuée, en particulier l'énergie photovoltaïque (PV) solaire et des règles de facturation nette ont été introduites. La Ville a élaboré un plan solaire en ligne pour montrer le potentiel solaire sur les toits et deux outils en ligne sont à l'étude : l'un pour tester l'utilisation du solaire sur les toits pour stabiliser le réseau, l'autre permettant de rationaliser les processus au sein du réseau. Des PV à petite échelle et du solaire thermique ont été installés dans les bâtiments appartenant à la Ville et les projets de remplacement de combustible pour le chauffage visent les écoles publiques. Les changements de combustible pour la production d'électricité ont réduit l'intensité des émissions de GES de l'électricité livrée à New York de 26% depuis 2005.

Agir sur la consommation et les comportements : l'exemple de l'Écosse [56]



Les 15 catégories de consommation ayant les impacts les plus élevés en Écosse, pour l'empreinte écologique et l'empreinte carbone [56]

Selon le rapport *Towards a Low Footprint Scotland* [56], un changement dans les habitudes de consommation ne peut être déclenché que par un changement global dans les systèmes d'incitation et dans la structure des prix. L'analyse du contexte écossais révèle une empreinte écologique 3 fois supérieure à celle qui résulterait d'un partage équitable des ressources de la planète. Plus des trois quarts de l'empreinte de l'Écosse proviennent de la consommation des ménages – principalement

pour l'énergie, le transport et la nourriture. Les hauts revenus se traduisent par des empreintes supérieures.

Les principaux facteurs responsables de cette empreinte élevée sont les suivants:

- le système des prix actuels récompense les comportements non durables ;
- L'augmentation de la consommation est plus importante que les gains d'efficience ;
- Les gains d'efficience peuvent conduire à un *effet de rebond* et à une augmentation de l'empreinte écologique.

Cette analyse met en évidence les trois points suivants. Premièrement, il existe un lien fort entre la création de richesse et l'augmentation de l'empreinte écologique. Le découplage entre la croissance économique et l'intensité de consommation de ressources ne se produit pas. Deuxièmement, il existe des variations considérables des empreintes individuelles. Enfin, la situation actuelle est non durable et des réductions de 75% sont nécessaires pour parvenir à un mode de vie durable en Ecosse.

Cette analyse fournit les orientations nécessaires :

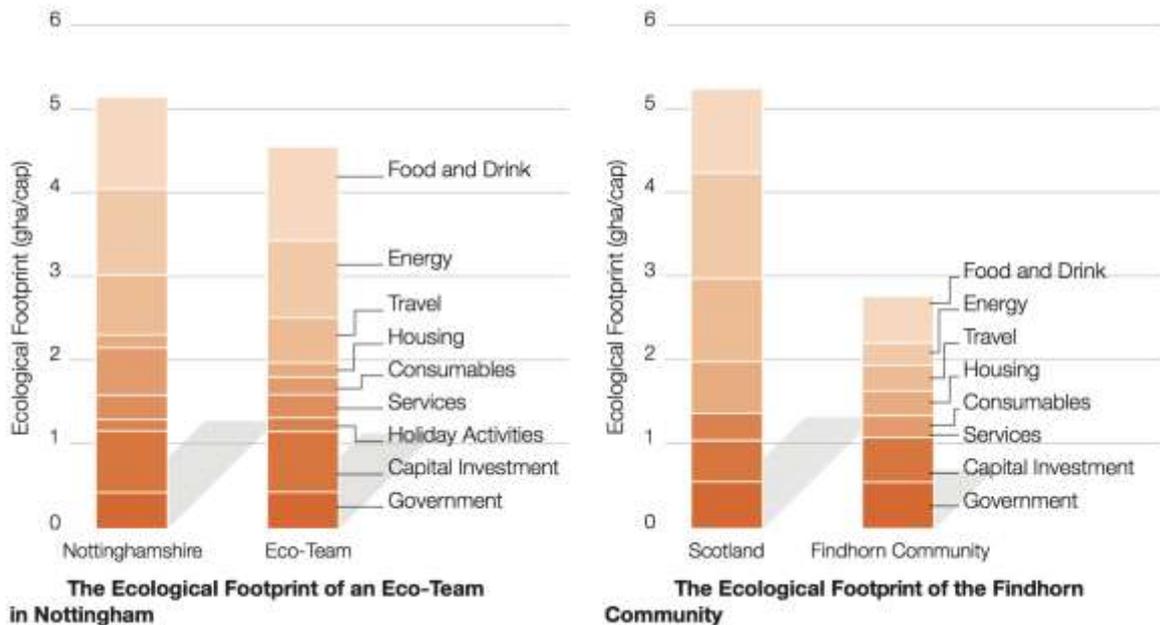
- La priorité doit être donnée à la demande d'énergie résidentielle, au transport et à la nourriture ;
- Les solutions doivent être adaptées aux différents lieux géographiques et aux différents groupes socio-économiques ;
- Des signaux de prix doivent récompenser un comportement durable ;
- Les politiques gouvernementales doivent viser l'amélioration du bien-être et non la croissance économique en soi.

Un large éventail de politiques influence les modes de consommation. Les politiques publiques influencent les prix relatifs et la disponibilité des différents biens et services. Certaines de ces politiques sont élaborées spécifiquement pour encourager une consommation plus durable. Elles visent à exercer une influence directe sur la prise de décision des consommateurs privés, à changer ou à ajuster les cadres de la consommation privée et à promouvoir un approvisionnement plus durable par le secteur public. Différents types de mesures peuvent être prises par les autorités locales pour promouvoir la consommation durable et les comportements basse énergie [54].

- *Stratégies, programmes et plans d'action* : Ces instruments de planification comprennent des documents stratégiques visant à fournir le cadre général de l'action politique visant à promouvoir la consommation durable. Ces politiques mettent en avant une vision, des objectifs stratégiques, des objectifs spécifiques, des mesures concrètes ainsi que des indicateurs pour mesurer les progrès.

- *Instruments et normes réglementaires* : Ceux-ci comprennent des éléments tels que l'interdiction de certains produits et substances, les limites d'émissions, les normes de production, des normes minimales de performance du produit, l'information environnementale obligatoire pour les entreprises, les normes de marchés publics obligatoires et les codes de construction. Ce type d'instrument vise à déterminer les produits, les services, les substances et les méthodes de production autorisés et à établir des exigences spécifiques pour les acteurs.
- *Instruments économiques* : Il s'agit notamment des frais et charges, des impôts et des subventions, des tarifs de rachat, des permis négociables. Les instruments économiques peuvent servir des objectifs différents, y compris l'internalisation des coûts externes, pour atteindre des objectifs de réduction de la pollution ou promouvoir des technologies spécifiques. Ils peuvent influencer de manière significative la consommation en augmentant ou en réduisant l'offre et la demande de produits et de services spécifiques. Les exemples incluent les taxes sur l'énergie, les taxes sur l'eau et les subventions pour le développement ou les tarifs de rachat pour l'énergie renouvelable.
- *Instruments d'éducation axés sur l'information* : Il s'agit notamment de l'étiquetage, des guides pour les consommateurs, des campagnes de sensibilisation, des séminaires de formation pour les autorités locales.

Les campagnes de communication en Écosse [56]



La réduction de l'empreint écologique de communautés motivées en Écosse [56]

L'exécutif écossais a lancé en 2006 la campagne de communication "It's Our Future" pour amener les Écossais à réfléchir à leur héritage pour les générations futures. Elle comprend un site Internet dédié et un éventail de mesures pratiques pour une Écosse plus durable, ainsi que la description de projets qui aident l'environnement. Cette campagne va au-delà de la seule communication : elle récompense les changements de comportement et s'accompagne d'engagements politiques tangibles du gouvernement écossais. Les suggestions spécifiques incluent :

- Définir et communiquer une vision claire et inspirante de ce à quoi une Écosse à faible empreinte écologique pourrait ressembler, en expliquant de manière claire et facile à comprendre pourquoi nous devons changer notre comportement ;
- Étendre les objectifs de sensibilisation et de compréhension des enjeux du développement durable au sein du public et fixer des objectifs clairs pour parvenir à un changement de comportement ;
- Intégrer ces objectifs dans les autres politiques gouvernementales, telles que la stratégie de transport ;
- Offrir des incitations pour déclencher et maintenir un changement de comportement ;
- Communiquer sur un ensemble de changements de comportements qui permettront d'atteindre un effet maximal sur l'environnement et inspirer le changement à travers une exposition claire des possibilités de changement et des avantages de changer les comportements ;

- Continuer à fournir des informations tangibles, pertinentes et cohérentes au public en les fondant sur l'analyse de l'empreinte écologique, avec des outils interactifs comme un calculateur d'empreinte personnelle ;
- Utiliser les nouvelles technologies pour créer des communautés virtuelles fondées sur le changement de mode de vie de vie pour intégrer les questions et fournir un soutien ;
- Créer une éthique de partenariat afin que le gouvernement montre l'exemple et mette en œuvre ses propres engagements pour une Écosse à faible empreinte écologique.

5. ÉVALUER ET PILOTER AVEC DES INDICATEURS DE PERFORMANCE

Les objectifs d'émissions reliées à l'énergie

Les indicateurs aident à définir, comparer et suivre les progrès vers un développement sobre en carbone. Ils sont utilisés pour définir une ville à bas carbone, pour aider les villes à explorer leur potentiel d'économies de carbone, pour évaluer les progrès dans la mise en œuvre des actions de développement à faible émission de carbone, et pour comparer ces progrès à différentes valeurs de référence [57].

- **Les indicateurs agrégés** comprennent : les émissions de CO₂ par unité de PIB, les émissions de CO₂ par habitant, la structure énergétique, etc.

- **Les indicateurs sectoriels** comprennent : l'intensité carbone du secteur industriel, l'énergie résidentielle par m² de surface, les émissions de CO₂ par kWh d'énergie électrique, la part des sources renouvelables dans la production l'électricité, les émissions de CO₂ de transport par personne-km parcouru, les déchets et le recyclage par habitant, etc.

- **Les indicateurs sociaux et économiques** comprennent : la densité de population, la répartition des revenus, la part des emplois verts.

Alors que les indicateurs agrégés sont assez simples et permettent des comparaisons larges, ils ne séparent pas les influences physiques, structurelles et comportementales. En revanche, les indicateurs sectoriels peuvent fournir beaucoup plus d'informations et peuvent servir de base pour la planification.

L'établissement de normes pour mesurer la performance carbone d'une ville est toujours un travail en cours. Un certain nombre de questions de comptabilisation doivent être résolues, en particulier la manière de comptabiliser le carbone émis lorsque les activités et services sont consommés dans des endroits différents de ceux où le carbone est émis. En outre, la relation entre le carbone émis dans une ville et ses moteurs sous-jacents – la structure économique et le PIB, le mix énergétique, le climat, la population et la forme urbaine, les transports et les infrastructures – est à analyser [58].

Les indicateurs qui mesurent les améliorations de l'intensité en CO₂ ou l'efficacité énergétique de manière indépendante de la croissance économique ou de la croissance de la production, utilisent une valeur soit économique, soit physique pour le dénominateur. Par exemple, l'intensité énergétique de la production de ciment peut être mesurée par la consommation d'énergie par unité

de valeur ajoutée par l'industrie du ciment (métrique économique) ou par l'utilisation de l'énergie par tonne de ciment produite (métrique physique). Les indicateurs économiques sont généralement utilisés lors de l'agrégation d'entités hétérogènes qui ne produisent pas des produits comparables (par exemple, l'ensemble du secteur manufacturier). Les paramètres physiques sont généralement utilisés pour comparer des entités aux productions similaires (par exemple, les entreprises qui produisent du ciment). Les analyses ont montré qu'il existe une grande variabilité des mesures économiques – en raison des effets de structure et d'activité – et que les mesures fondées sur des valeurs physiques retracent plus précisément les tendances des émissions ou de l'intensité énergétique, même si l'hétérogénéité du secteur industriel peut rendre le développement de ces métriques difficile pour certaines industries [58].

Les catégories suivantes d'indicateurs ont été identifiées [57] :

- **Agrégé** : énergie ou CO₂ par unité de PIB, énergie ou CO₂ par habitant ou par unité de surface foncière ;
- **Structurel** : part du PIB et de l'énergie par secteur d'utilisation finale ;
- **Bâtiments résidentiels et commerciaux** : énergie ou CO₂ par unité de surface de plancher ou par habitant, pourcentage de respect des codes énergétiques du bâtiment ;
- **Industrie** : Efficacité physique (énergie ou carbone par tonne de produit) et intensité économique énergétique ou carbone (énergie par unité de valeur ajoutée) ;
- **Électricité** : CO₂ par kWh, part des sources d'énergie renouvelable dans l'approvisionnement en électricité ;
- **Transport** : énergie ou émissions de CO₂ par personne - kilomètre parcouru, densité urbaine, utilisation du transport en commun, kilomètres de transport en commun pour 100.000 habitants ;
- **Gestion foncière** : Surface développée avec un zonage à usage mixte (résidentiel et commercial), part des espaces verts et des terres agricoles ;
- **Gestion des déchets** : quantité de déchets produits par habitant, taux de recyclage des déchets ;
- **Économique et social** : part des emplois verts, distribution des revenus, revenu par habitant, accessibilité financière des logements.

Les indicateurs agrégés et structurels sont couramment utilisés pour déterminer si une ville est *bas carbone* ou *énergétiquement efficace* et pour assurer le suivi des mesures prises pour réduire la consommation d'énergie et les émissions. Les points à considérer lors de l'utilisation de ces indicateurs sont examinés ci-dessous.

1) Intensité énergétique et intensité carbone (énergie/PIB et CO₂/PIB)

Le ratio de la consommation d'énergie sur le produit intérieur brut (PIB) est utilisé pour mesurer l'intensité énergétique de l'économie. De même, l'intensité en carbone de l'économie est la quantité d'émissions de carbone par unité de PIB. Un indicateur d'intensité offre de la souplesse et utilise des données déjà mesurées : l'énergie, le carbone et le PIB. Toutefois, il s'agit d'un indicateur mixte qui représente à la fois l'efficacité physique de l'énergie et la structure économique qui influe sur la consommation d'énergie. Au fur et à mesure du développement économique, l'intensité énergétique de l'économie décline généralement tandis que la consommation absolue d'énergie et les émissions de carbone continuent à augmenter. Il existe ainsi d'importantes limitations à l'utilisation de cet indicateur. Des indicateurs axés de manière distincte sur l'énergie physique, sur l'intensité carbone et sur les aspects de la structure économique qui influent sur la consommation d'énergie et les émissions de carbone, doivent compléter ou remplacer un indicateur d'intensité énergétique ou carbone de l'économie.

2) Énergie/habitant et CO₂/habitant

Les indicateurs par habitant fournissent une base de comparaison entre les villes, les provinces et les pays. Toutefois des indicateurs par habitant très agrégés, comme l'énergie totale ou les émissions de CO₂ par personne doivent être utilisés avec prudence. Une ville avec une industrie lourde et une faible population, qui fournit d'autres villes avec du ciment et de l'acier, a une très haute énergie par habitant. Pourtant, ses habitants peuvent utiliser relativement peu d'énergie dans leurs logements. Ainsi, il est important de considérer l'énergie résidentielle et transport par habitant, et de prendre en compte la structure énergétique de la ville.

3) Énergie/ superficie foncière et CO₂/superficie foncière

Une autre mesure de l'intensité énergétique ou carbone d'une ville peut être une mesure spatiale, comme la densité par unité de surface foncière. Cet indicateur permet d'examiner comment la densité de développement influe sur la consommation énergétique et les émissions de carbone.

4) Structure économique : Parts sectorielles du PIB (primaire, secondaire, tertiaire)

Parce que les différents secteurs de l'économie ont des intensités énergétique et carbone sensiblement différentes, la structure économique est un indicateur important des influences structurelles sur la consommation et les émissions. Parmi les nombreuses définitions de la structure économique, la plus simple est la part des secteurs primaire, secondaire et tertiaire. Le secteur

secondaire qui représente l'industrie et la construction présente la plus forte intensité énergétique. Cet indicateur assez agrégé peut aider les villes à identifier des domaines de développement à faibles émissions de carbone.

5) Structure énergétique : parts sectorielles de la consommation énergétique

La structure énergétique contribue à identifier les domaines nécessitant une attention particulière pour le développement bas carbone. Les définitions habituelles des secteurs énergétiques sont les suivantes: industriel, résidentiel, transports, agriculture et sylviculture, commercial, construction, etc. Les données sont plus faciles à obtenir pour les trois premiers secteurs ; souvent les secteurs restants sont regroupés dans « autres sources d'énergie ».

6. ANALYSER LES OPTIONS ET LES COÛTS

Les sous-sections précédentes décrivaient les différentes options de transition énergétique liées à l'offre et à l'utilisation finale. Cette sous-section analyse les coûts, les avantages et les compromis entre plusieurs objectifs.

Coûts des options non - fossiles d'approvisionnement énergétique

Deux observations importantes ressortent. Premièrement, il existe un contraste marqué entre les technologies nucléaires, dont la hausse des coûts est persistante, et les autres technologies non - fossiles, qui montrent généralement une baisse des coûts et des prix avec le déploiement sur le marché. Deuxièmement, les tendances d'amélioration sont très variables selon les technologies [23].

Émissions de gaz à effet de serre

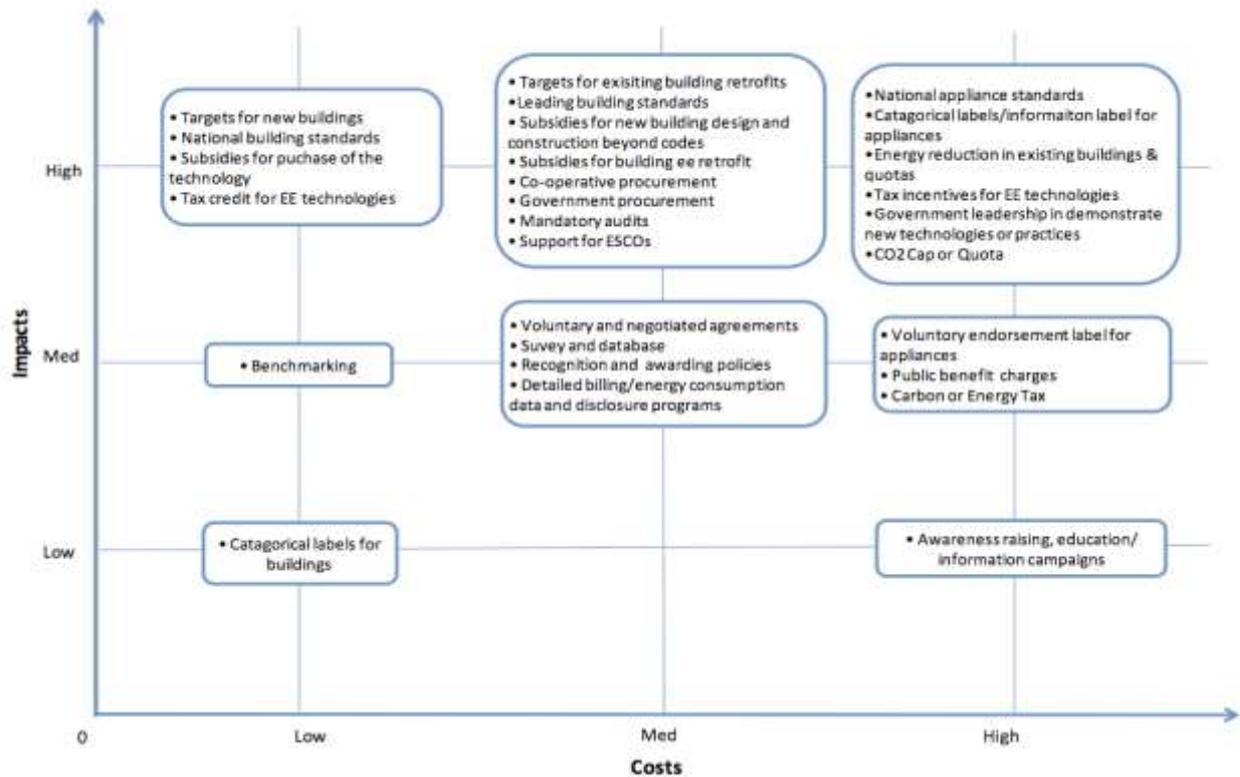
Les énergies renouvelables les plus faiblement émettrices sont l'hydroélectrique, le solaire photovoltaïque, l'éolien, la biomasse et la géothermie. L'énergie nucléaire présente moins d'émissions que les énergies d'origine fossile, même avec capture et stockage du carbone (CSC). La combinaison des combustibles fossiles avec la CSC réduit les émissions de façon significative, bien qu'ils soient encore nettement plus élevés que les énergies renouvelables et le nucléaire. L'utilisation combinée des combustibles fossiles et de la biomasse avec CSC peut offrir de l'électricité et des carburants sans émissions nettes ou même avec des émissions négatives [23].

Avantages multiples

La transition énergétique génère également d'importants avantages économiques et sociaux. Les technologies énergétiques qui limitent le changement climatique réduisent également la pollution et améliorent la santé. Cette synergie est importante car les mesures qui conduisent à l'amélioration de la santé et de l'environnement, peuvent être plus facilement adoptées que les mesures qui mettent en avant les seuls objectifs énergétiques.

Certaines options ont des co-bénéfices supérieurs : l'amélioration de l'efficacité systémique, les énergies renouvelables, la biomasse avec CSC et le co-traitement biomasse/combustibles fossiles avec CSC. Les plus bas niveaux de co-avantages proviennent de l'énergie nucléaire et des options associées aux seuls combustibles fossiles, même avec CSC [23].

Une analyse coûts-avantages des politiques pour le secteur du bâtiment est présentée dans le tableau suivant.



Coûts et économies des politiques d'efficacité énergétique pour les bâtiments et les appareils [57]

7. CONSTRUIRE ET PILOTER UN PLAN D'ACTION

Les étapes essentielles impliquent la coordination entre les agences économiques et énergétiques locales. Les étapes clés sont d'obtenir un engagement fort des autorités locales, de procéder à un inventaire des énergies et des émissions de carbone, de fixer des objectifs, de choisir des politiques et des actions pour atteindre ces objectifs, d'élaborer un plan de développement bas carbone, de mettre en œuvre les politiques et les actions et de vérifier les progrès.

Conduire un inventaire

L'inventaire des émissions devrait couvrir les sources de CO₂ et de CH₄ de l'énergie électrique, de l'industrie, des bâtiments résidentiels, des immeubles commerciaux, des transports, de l'agriculture et des déchets. Comme un certain nombre d'activités qui génèrent des émissions sont entreprises en dehors des limites de la ville, il est important de définir clairement le champ d'application de l'inventaire des émissions, de savoir quelles émissions sont comptées par la ville. Les protocoles d'inventaire internationalement reconnus ont défini trois champs d'émissions : (1) direct (2) indirect, et (3) les émissions associées. Le tableau suivant (adapté de [27]) explique quelles émissions sont comprises dans chaque champ.

Champs des émissions	Champs des activités
Emissions directes, dans les frontières de la ville	Consommation énergétique directe au sein de la ville (industrie, chauffage, climatisation, électricité, infrastructures...) Transport Gestion des déchets
Emissions indirectes : dues aux activités au sein de la ville mais produites à l'extérieur de la ville	Importations d'électricité et de chaleur dans la ville
Emissions associées: dues aux activités de la ville ayant lieu à l'extérieur de ses frontières	Transport inter-régional Gestion des déchets en dehors des limites de la ville

Fixer des objectifs

Fixer des objectifs consiste à choisir le type d'objectif et la valeur cible. Les objectifs doivent être mesurables afin que les progrès puissent être suivis. Une cible physique est préférable, comme les émissions totales de CO₂, la consommation d'énergie, ou la part d'énergie éolienne, car elle peut être mesurée. Les objectifs économiques sont également importants. La valeur cible est définie par la projection d'énergie et de carbone dans l'analyse de différents scénarios (scénario *business as usual* et scénario d'efficacité) en évaluant l'impact des différentes politiques.

Les 17 objectifs de PlaNYC à New York [59]



Le Plan énergétique de New York vise à améliorer la planification de l'énergie, à accroître l'efficacité énergétique, à fournir une énergie plus propre, plus fiable et abordable, à moderniser les systèmes de transport et de distribution de l'énergie. Il comprend 17 initiatives :

Initiative 1 : Accroître la planification et la coordination pour promouvoir l'énergie propre, fiable et abordable ;

Initiative 2 : Mettre en œuvre le plan de construction écologique ;

Initiative 3 : Améliorer les codes et règlements visant à accroître la durabilité des bâtiments ;

Initiative 4 : Améliorer le respect du code de l'énergie et suivre les améliorations apportées aux bâtiments verts dans toute la ville ;

Initiative 5 : Améliorer l'efficacité énergétique des petits bâtiments ;

Initiative 6 : Améliorer l'efficacité énergétique dans les bâtiments historiques ;

Initiative 7 : Assurer le financement de l'efficacité énergétique et de l'information ;

Initiative 8 : Créer une main-d'œuvre de l'efficacité énergétique du 21^e siècle ;

Initiative 9 : Faire de NYC un centre de connaissances pour l'efficacité énergétique et les stratégies énergétiques émergentes ;

Initiative 10 : Assurer le leadership en matière d'efficacité énergétique dans le fonctionnement des bâtiments municipaux ;

Initiative 11 : Étendre le défi du carbone à de nouveaux secteurs ;

Initiative 12 : Soutenir la rénovation ou le remplacement des centrales électriques les plus inefficaces ;

Initiative 13: Encourager le développement de la production décentralisée propre ;

Initiative 14 : Favoriser le marché des énergies renouvelables à New York ;

Initiative 15 : Augmenter les capacités de distribution de gaz naturel pour améliorer la fiabilité et encourager la conversion des combustibles très polluants ;

Initiative 16 : Assurer la fiabilité de la distribution d'énergie de NYC ;

Initiative 17 : Développer un réseau électrique plus intelligent et plus propre pour NYC.

Choisir des politiques et des actions pour atteindre les objectifs

Le potentiel d'économies des différentes politiques dépend de la situation locale (par exemple de l'inventaire de référence, des différentes efficacités dans le parc immobilier, etc.) Le coût dépend aussi de la situation locale (par exemple des prix relatifs de l'énergie et des énergies renouvelables). Pour choisir les politiques à mettre en œuvre, une ville doit d'abord procéder à un examen des options potentielles en effectuant des estimations qualitatives et quantitatives des économies et des coûts.

Mettre en œuvre les politiques et les actions

Afin de mettre en œuvre les politiques et les actions, il est important d'identifier des organisations et de leur confier la responsabilité de chaque politique et de chaque action du plan. Le financement de la mise en œuvre doit également être identifié et attribué. Des plans de travail et des calendriers doivent également être établis pour définir les attentes et fournir un moyen de mesurer les progrès accomplis. Enfin, il faut mettre en place un soutien à la mise en œuvre des politiques et

des mesures, telles que des incitations et/ou des pénalités, tout en assurant la formation et la sensibilisation du public.

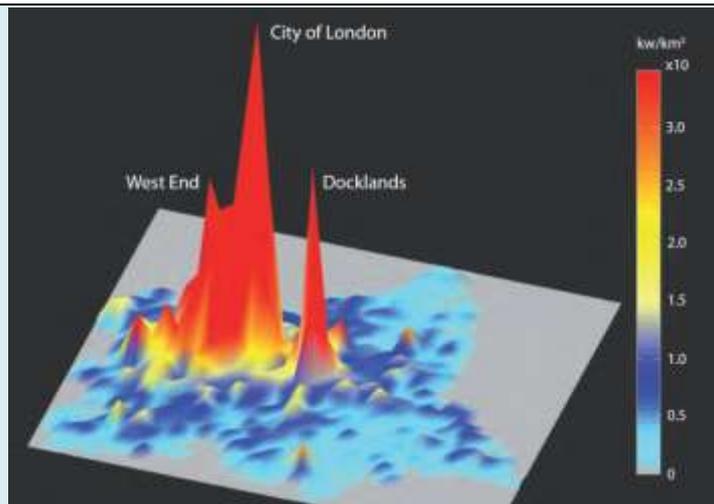
Surveiller, reporter et vérifier les progrès

Les progrès doivent être suivis, reportés et vérifiés. Les rapports doivent inclure des données sur la consommation d'énergie, les émissions de carbone, et des données sur l'activité économique, afin de vérifier l'évolution de l'intensité résultant des politiques. L'information publique sur les résultats, ainsi que sur les progrès vers les objectifs, concentre l'attention et les efforts des autorités locales, des entreprises et du grand public, et contribue à atteindre les objectifs.

Qui assure la gestion de l'énergie dans la City de Londres ?

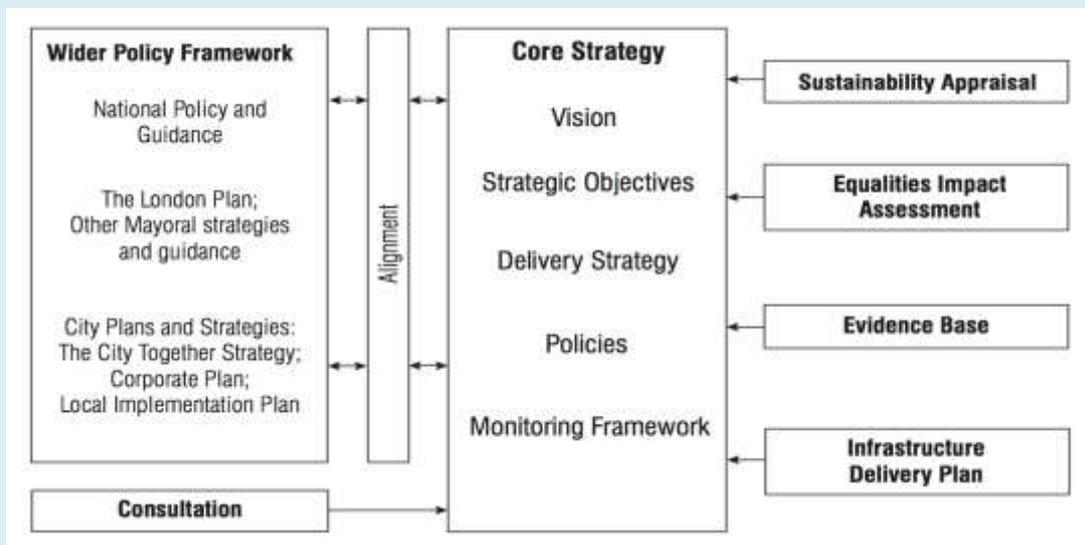
La City de Londres contribue sur seulement 1 square mile (2,56 km², c'est à dire 2,5% de Paris intra-muros) à 12 % du PIB de Londres et 8,5 % du PIB de la Grande Bretagne. Elle emploie 370.000 personnes et est constituée à 70% d'immeubles de bureau. C'est avec Wall Street à Manhattan le lieu au monde qui crée le plus de richesse par km². Son plan stratégique vise à maintenir avant tout sa compétitivité économique. Cette intensité économique se traduit par un pic très élevé de demande énergétique.





La demande d'électricité à Londres

La planification de l'énergie et des infrastructures de la City de Londres repose sur un document stratégique *Core Strategy Development Plan Document* [60]. La stratégie vise à coordonner la planification et la réalisation des infrastructures de manière à assurer le fonctionnement et la croissance de l'activité de la City. L'objectif est que les communautés d'affaires, de résidents, d'étudiants et de visiteurs ne soient pas limitées dans leur développement par la fourniture des services publics et des infrastructures de télécommunications.



La préparation de la Core Strategy [60]

Les objectifs sont de :

1. Minimiser la demande de services électricité, eau et services publics, en exigeant que des mesures de gestion de la demande soient incorporées dans tout développement ;
2. Encourager la collaboration précoce entre les développeurs et les fournisseurs d'infrastructures pour déterminer les besoins en infrastructures et s'assurer que celles-ci seront fournies dans les délais ;
3. Protéger les services publics essentiels existants et les infrastructures de télécommunications de l'impact de nouveaux développements ;
4. Travailler avec les fournisseurs d'infrastructures à minimiser les perturbations pour le système viaire et les entreprises lors des grandes améliorations des infrastructures et de la construction de réseaux souterrains ;
5. Promouvoir la fourniture et l'utilisation de réseaux souterrains, en particulier dans les zones où les canalisations souterraines sont saturées.

Who will deliver		
How we will make it happen	Who	When
<p>Demand management</p> <p>Requiring Sustainability Statements to be submitted with planning applications to demonstrate that building design minimises demand for electricity, water and other utility services.</p> <p>Detailed requirements will be set out in the Development Management DPD.</p> <p>Implementation of utility company strategic plans:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thames Water – Our Plans for Water – Business Plan 2010-2015 and Water Resources Management Plan, 2010-2035 • UK Power Networks - Business Plan • National Grid gas – Streetworks pipe replacement programme. 	<p>City Corporation-Developers</p> <p>Utility Companies</p>	<p>Ongoing</p> <p>2012</p> <p>2010-2015</p>
<p>Infrastructure delivery</p> <p>Monitor and co-ordinate utility infrastructure needs and delivery, implementing the Strategic Infrastructure Action Plan.</p> <p>Pre-application discussions to highlight the need for early engagement with utility infrastructure providers.</p> <p>Implementation of a 33kV power network in the City to supplement the existing 11kV network.</p> <p>Lobbying for legislative changes to allow proactive investment in utility infrastructure.</p>	<p>City Corporation (CPAT)-Utility Companies</p> <p>City Corporation-Utility Companies</p> <p>UK Power Networks</p> <p>City Corporation</p>	<p>In line with the SI Action Plan</p> <p>Ongoing</p> <p>By 2016</p> <p>Short term</p>
<p>Minimising disruption</p> <p>The City of London's 'City developer guidelines for incoming utilities' will be kept up to date.</p> <p>Co-ordinating street works through the London Permit Scheme (LoPS) to minimise disruption.</p>	<p>City Corporation-Utility Companies-Developers</p> <p>City Corporation-Utility Companies</p>	<p>Adopted 2009 Periodic review</p> <p>Ongoing</p>

Coordination des infrastructures et de la planification énergétique [60]

8. FINANCER LE PLAN

Un portefeuille de politiques soigneusement ciblées est nécessaire pour promouvoir et intégrer les technologies énergétiques efficaces, en tenant compte des coûts directs et indirects, des avantages et des effets de rebond.

Améliorer rapidement l'efficacité énergétique exige des politiques ciblées qui soutiennent l'innovation par de nouveaux investissements, par des réglementations plus strictes d'efficacité énergétique, par des incitations fiscales pour les nouvelles technologies et par des prix pour les émissions de GES. Les villes peuvent atteindre une forte augmentation de l'efficacité énergétique par le développement d'une culture d'économie auprès des consommateurs et des entreprises, et par une augmentation de la densité urbaine [23].

Un défi majeur est de résoudre la question des incitations divergentes : ceux qui paient pour améliorer l'efficacité et pour les investissements énergétiques sont plus orientés vers des taux de retour à court terme que vers la rentabilité à long terme des investissements ; de surcroît, ils sont rarement les bénéficiaires de la réduction des coûts énergétiques et des autres co-bénéfices.

Le rôle des entreprises privées, dans le financement et le fonctionnement des systèmes énergétiques urbains, augmente, ce qui a créé de nouvelles possibilités de financement. Alors que les systèmes énergétiques urbains précédents ont souvent été financés par projets en couvrant l'endettement par les revenus générés par le système, les entreprises de services énergétiques recourent de manière croissante au financement sur l'ensemble de leur bilan pour financer ces systèmes. Ces entreprises ont l'expertise nécessaire pour concevoir, développer et exploiter des systèmes énergétiques. En outre, elles ont créé des réserves de capitaux qui leur permettent de financer des projets sans avoir à emprunter projet par projet. Bien que ces entreprises évaluent les projets individuellement et traitent chaque système comme un centre de profit, elles s'appuient sur leurs revenus globaux. Cette évolution réduit les coûts de transaction pour financer les systèmes énergétiques urbains.

Les instruments de capture de la valeur [61]

Les taxes locales offrent des opportunités pour le financement de la transition énergétique lorsque celle-ci, à travers des politiques de densification et d'accroissement de la mixité, s'accompagne de création de valeur foncière. Les autorités locales peuvent utiliser les mécanismes de capture de valeur et gager leurs emprunts sur leurs futures recettes fiscales, comme le fait en particulier la municipalité de Tokyo pour créer des quartiers mixtes à très haute densité autour des hubs du système de transport. Les mécanismes fiscaux de capture de la valeur captent une partie de la valeur créée à la suite d'investissements des collectivités locales. Les mécanismes utilisés pour capturer la valeur créée par l'investissement public dans les transports pourraient être appliqués aux investissements publics dans la planification énergétique.

CONCLUSION

Les moteurs de la consommation d'énergie urbaine comprennent la géographie et le climat, la disponibilité des ressources, les caractéristiques socio-économiques, le degré d'intégration dans l'économie nationale et mondiale (importations/exportations), ainsi que la structure spatiale, la densité, la distribution des activités, l'accessibilité et la connectivité. Les priorités des autorités locales pour les politiques de planification énergétique urbaine doivent se concentrer sur les domaines où les décisions et le financement locaux ont les plus grands effets de levier : la forme urbaine et la densité (qui sont d'importants déterminants macroéconomiques de la structure urbaine et de la distribution des activités, et donc de la consommation d'énergie) ; la qualité de l'environnement construit (bâtiments économes en énergie, en particulier) ; la politique des transports urbains (en particulier la promotion de l'efficacité énergétique des transports publics et des options de mobilité non motorisée) ; et l'amélioration des systèmes énergétiques grâce à la cogénération ou aux systèmes de recyclage de la chaleur résiduelle.

Les décisions et les politiques locales qui ont le plus d'impact sont celles qui influencent l'efficacité de l'utilisation de l'énergie en milieu urbain ; c'est-à-dire celles qui agissent sur la demande plutôt que sur l'offre.

Les réglementations sont des éléments essentiels de la politique énergétique. Les normes et standards pour les codes du bâtiment, pour le chauffage et le refroidissement, pour les appareils, pour les économies de carburant et pour la gestion de l'énergie industrielle sont l'un des outils politiques les plus efficaces pour améliorer l'efficacité énergétique. Les politiques de réglementation sont plus efficaces lorsqu'elles sont combinées avec des incitations fiscales et des mesures comme l'information et la sensibilisation du public.

REFERENCES

- [1] L. M. A. Bettencourt, J. Lobo, D. Helbing, C. Kühnert, and G. B. West, "Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 104, no. 17, pp. 7301–7306, Apr. 2007.
- [2] J. Keirstead and N. Shah, *Urban energy systems: an integrated approach*. Abingdon, Oxon: Routledge, 2013.
- [3] A. Grubler, *Energizing sustainable cities assessing urban energy*. London; New York: Routledge, 2013.
- [4] A. Wolman, "The metabolism of cities," *Sci. Am.*, vol. 213, no. 3, pp. 179–190, 1965.
- [5] Robinson, "Modelling carbon storage in highly fragmented and human-dominated landscapes: Linking land-cover patterns and ecosystem models," *Ecol. Model.*, vol. 220, pp. 1325–1338, 2009.
- [6] J. M. Cullen and J. M. Allwood, "Theoretical efficiency limits for energy conversion devices," *Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 2059–2069, May 2010.
- [7] A. Grubler, X. Bai, T. Buettner, S. Dhakal, D. Fisk, T. Ichinose, J. Keirstead, G. Sammer, D. Satterthwaite, N. Schulz, N. Shah, J. Steinberger, and H. Weisz, "Urban Energy Systems," in *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria: Cambridge University Press, 2012.
- [8] D. Fisk, "Exergy analyses and Sankey diagrams," 2010.
- [9] N. Nakicenovic, *Global energy perspectives*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1998.
- [10] Rotterdam Energy Approach and Planning, "Towards CO₂-neutral urban development," REAP, Rotterdam, 2009.
- [11] S. Stremke and A. V. D. Dobbelsteen, *Sustainable Energy Landscapes: Designing, Planning, and Development*. CRC Press, 2012.
- [12] L. M. A. Bettencourt, J. Lobo, D. Strumsky, and G. B. West, "Urban Scaling and Its Deviations: Revealing the Structure of Wealth, Innovation and Crime across Cities," *PLoS ONE*, vol. 5, no. 11, p. e13541, Nov. 2010.
- [13] L. Bettencourt and G. West, "A unified theory of urban living," *Nature*, vol. 467, no. 7318, pp. 912–913, Oct. 2010.
- [14] L. M. A. Bettencourt, "The origins of scaling in cities," *Science*, vol. 340, no. 6139, pp. 1438–1441, Jun. 2013.
- [15] A. Downs, "The law of peak hour expressway congestion," *Traffic Q.*, vol. 16, no. 3, Jul. 1962.
- [16] G. Duranton and M. A. Turner, "The Fundamental Law of Road Congestion: Evidence from US Cities," *Am. Econ. Rev.*, vol. 101, no. 6, pp. 2616–2652, Oct. 2011.

- [17] E. M. Rogers, *Diffusion of innovations*. New York: Free Press, 2003.
- [18] D. G. LaBay, "Exploring the consumer decision process in the adoption of solar energy systems," 1981.
- [19] M. Weber, *The City*. New York: The Free Press, 1966.
- [20] R. Mayntz and T. P. Hughes, *The Development of Large Technical Systems*. Lightning Source Incorporated, 2006.
- [21] T. P. Hughes, *Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930*. JHU Press, 1993.
- [22] F. W. Geels, "Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study," *Res. Policy*, vol. 31, no. 8–9, pp. 1257–1274, décembre 2002.
- [23] GEA, *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria: Cambridge University Press, 2012.
- [24] S. Salat, "Energy loads, CO2 emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behaviour," *Build. Res. Inf.*, vol. 37, no. 5–6, pp. 598–609, 2009.
- [25] H. Suzuki, R. Cervero, and K. Iuchi, *Transforming cities with transit: transit and land-use integration for sustainable urban development*. Washington, D.C.: World Bank, 2013.
- [26] R. Cervero and C. Sullivan, "Green TODs: marrying transit-oriented development and green urbanism," *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.*, vol. 18, no. 3, pp. 210–218, Jun. 2011.
- [27] UN-Habitat and ICLEI, "Sustainable Urban Energy Planning: A Handbook for Cities and Towns in Developing Countries."
- [28] Economist Intelligence Unit, "Asian Green City Index: Assessing the Environmental Performance of Asia's Major Cities," 2011.
- [29] City of Vancouver, "Greenest City 2020 Action Plan," 2012.
- [30] City of Vancouver, "Vancouver 2020 A Bright Green Future: an Action Plan for Becoming the World's Greenest City by 2020," 2010.
- [31] A. Pitre-Hayes, "Administration Report: Greenest City 2020 Action Plan," City of Vancouver, 09212, Jul. 2011.
- [32] Community Services Group, City Wide and Regional Planning, City of Vancouver, "Monitoring Report: Basements in Single-Family Houses," 2012.
- [33] S. Lazaruk, "Downtown Vancouver's density highest in Canada," *The Province*, 09-Feb-2012.
- [34] S. Salat and A. Morterol, "Factor 20: multiplying method for dividing by 20 the carbon energy footprint of cities: the urban morphology factor," Urban Morphologies Lab, CSTB, Paris, 2006.
- [35] S. Salat and C. Guesne, "Energy and carbon efficiency of urban morphologies. The case of Paris," 2008.

- [36] R. J. Cole and P. C. Kernan, "Life-cycle energy use in office buildings," *Build. Environ.*, vol. 31, no. 4, pp. 307–317, Jul. 1996.
- [37] C. Scheuer, G. A. Keoleian, and P. Reppe, "Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications," *Energy Build.*, vol. 35, no. 10, pp. 1049–1064, Nov. 2003.
- [38] APUR, "Formes urbaines en Ile de France et émissions de gaz à effet de serre," Atelier Parisien d'Urbanisme, 2009.
- [39] C. Weber and N. Shah, "Optimisation based design of a district energy system for an eco-town in the United Kingdom," *Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 1292–1308, Feb. 2011.
- [40] T. Bruckner, R. Morrison, C. Handley, and M. Patterson, "High-Resolution Modeling of Energy-Services Supply Systems Using deeco: Overview and Application to Policy Development," *Ann. Oper. Res.*, vol. 121, no. 1–4, pp. 151–180, Jul. 2003.
- [41] R. A. Brownsword, P. D. Fleming, J. C. Powell, and N. Pearsall, "Sustainable cities – modelling urban energy supply and demand," *Appl. Energy*, vol. 82, no. 2, pp. 167–180, Oct. 2005.
- [42] Y. Yamaguchi, Y. Shimoda, and M. Mizuno, "Transition to a sustainable urban energy system from a long-term perspective: Case study in a Japanese business district," *Energy Build.*, vol. 39, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2007.
- [43] K. Byman, "Energy Future of the Stockholm Region, 2010-2050: The Way to Reduce Climate Impact," 2010.
- [44] City of Stockholm, "The City of Stockholm's Climate Initiatives," City of Stockholm Environment Administration, Stockholm, Jun. 2009.
- [45] M. Berrini and L. Bono, "Measuring Urban Sustainability: Analysis of the European Green Capital Award 2010 & 2011 Application Round.," European Green Capital Program Report., 2011.
- [46] K. Ericsson, "Introduction and development of the Swedish district heating systems: Critical factors and lessons learned," Lund University, Sweden, D5 of WP2 from the RES-H Policy project, 2009.
- [47] The City Executive Office, Stockholm, "Stockholm action plan for climate and energy 2012-2015 with an outlook to 2030.," 2012.
- [48] H. Suzuki, *Transforming cities with transit: transit and land-use integration for sustainable urban development*. Washington, D.C: World Bank, 2013.
- [49] B. D. Taylor, "The Politics of Congestion Mitigation," *Transp. Policy*, vol. 11, no. 3, pp. 299–302, Jul. 2004.
- [50] M. Lenzen, C. Dey, and B. Foran, "Energy requirements of Sydney households," *Ecol. Econ.*, vol. 49, no. 3, pp. 375–399, Jul. 2004.

- [51] C. J. Andrews, "Greenhouse gas emissions along the rural-urban gradient," *J. Environ. Plan. Manag.*, vol. 51, no. 6, pp. 847–870, 2008.
- [52] L. Parshall, K. Gurney, S. A. Hammer, D. Mendoza, Y. Zhou, and S. Geethakumar, "Modeling energy consumption and CO₂ emissions at the urban scale: Methodological challenges and insights from the United States," *Energy Policy*, vol. 38, no. 9, pp. 4765–4782, Sep. 2010.
- [53] J. R. VandeWeghe and C. Kennedy, "A Spatial Analysis of Residential Greenhouse Gas Emissions in the Toronto Census Metropolitan Area," *J. Ind. Ecol.*, vol. 11, no. 2, pp. 133–144, 2007.
- [54] M. S. Hansen and C. Power, "Evaluation of tools to promote sustainable consumption and green lifestyles," Copenhagen, Background paper for the Nordic Council of Ministers(Workshop on sustainable consumption and green lifestyles, 2010.
- [55] ICLEI USA, "The Process Behind PlaNYC: How the City of New York Developed its Comprehensive Long-term Sustainability Plan," ICLEI–Local Governments for Sustainability USA and City of New York, 2010.
- [56] J. Barrett, J. C. Minx, and S. D. Frey, "Towards a Low Footprint Scotland: Living well within our ecological limits," Scotland Environment Institute, York, UK, 2007.
- [57] N. Zhou, "A Low Carbon Development Guide for Local Government Actions in China," May 2013.
- [58] World Bank, *World Development Indicators 2012*. Washington DC: World Bank, 2012.
- [59] City of New York, "PlaNYC 2030: A Greener, Greater New York," The City of New York, 2011.
- [60] City of London, "Core strategy - Development plan document," 2011.
- [61] ICLEI, "Financing the Resilient City: A demand driven approach to development, disaster risk reduction and climate adaptation," ICLEI white paper, 2011.