

REUSSIR

LA TRANSITION ENERGETIQUE

DANS LES TERRITOIRES



Novembre 2013

Résumé du rapport préparé par Serge Salat, Loeiz Bourdic et Françoise Labbe

Pour la Caisse des Dépôts

INSTITUT DES MORPHOLOGIES URBAINES

ET DES SYSTÈMES COMPLEXES



MESSAGES CLES

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 et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

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 GEA¹, 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

¹ Le Global Energy Assessment qui est considéré comme le GIEC de l'énergie.

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'efficacité 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. 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.

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.

ENJEUX ET LEVIERS DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Le système énergétique actuel n'est pas durable. 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 primaire². 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. 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.

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 [1] 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 [2].

La mise en œuvre de la transition énergétique 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

² 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.

et, pour certaines, intermittentes. 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. Une approche intégrée des villes 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. Quatre raisons incitent à articuler la transition énergétique 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.

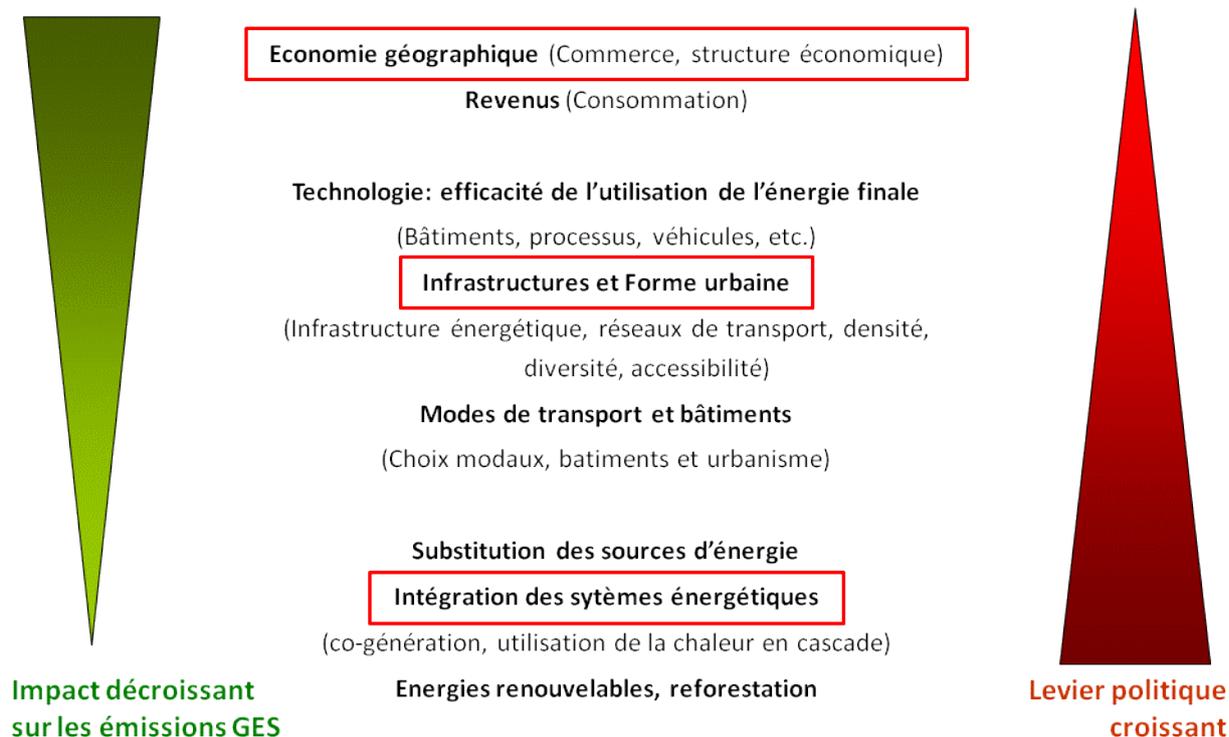
- *Le potentiel d'action des institutions locales.* Les institutions locales sont des niveaux d'organisation aux cycles de décisions relativement courts. Elles sont des centres d'innovation avec un accès aux capitaux, aux compétences, aux technologies et aux marchés.

Les systèmes énergétiques urbains présentent une forte inertie 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. 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. Le mix énergétique de 2050 sera en partie déterminé par les infrastructures que nous construisons aujourd'hui.

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 GEA³, 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'efficience 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

³ Le Global Energy Assessment qui est considéré comme le GIE de l'énergie.

conception des bâtiments viennent seulement ensuite, suivis en dernier des actions sur les énergies (substitutions de carburants, intégration des systèmes énergétiques, énergies renouvelables).



Leviers politiques pour la transition énergétique (adapté de [3])

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

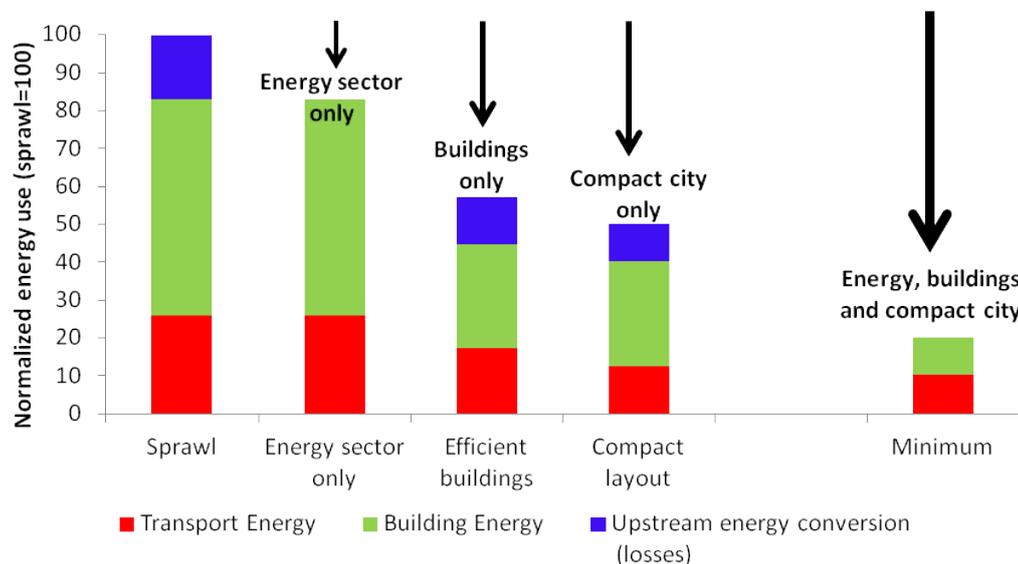
- *réduire la consommation d'énergie*, en diminuant la demande urbaine (en limitant l'étalement et la fragmentation des territoires, en diversifiant les localisations, en accroissant l'accessibilité par la proximité) et en améliorant l'efficacité énergétique de la demande finale ;
- *réduire le contenu carbone de l'énergie consommée*, en développant l'utilisation d'énergies non fossiles à bas niveau carbone, ce qui va nécessiter des investissements importants⁴.

⁴ 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.

Les gains de productivité de l'énergie liés à la planification territoriale, à l'efficacité dans la demande finale (nouvelles technologies du bâtiment et des transports), aux infrastructures et à la forme urbaine, 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 permet de multiplier la productivité énergétique par 4 et de réduire par le même facteur les émissions de gaz à effet de serre.

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).

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.



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 [4])

Keirstead et Shah [5] 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.

- Une plus grande intégration entre la planification spatiale et celle des transports permet de diviser l'énergie de 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 % [3]

- 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 [3].

LES IMPACTS ET EFFETS DE LEVIER DE L'ÉCONOMIE GÉOGRAPHIQUE ET DE L'AMÉNAGEMENT GLOBAL DES TERRITOIRES

Le système urbain global 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 tandis que 180 000 humains arrivent dans les villes chaque jour. En 2100, la population urbaine mondiale s'accroîtra à environ 9 milliards, environ 88 % de la population mondiale⁵.

Les territoires urbains français partagent 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'interdépendance globale des villes se traduit par l'émergence d'un système complexe organisé de toutes les villes du monde. L'effet cumulé et non intégré de la planification foncière et du développement des infrastructures a conduit à des formes étalées et fragmentées fortement consommatrices d'énergie et de territoires. L'étalement urbain des dernières décennies a provoqué un chemin de dépendance au transport automobile et a augmenté le coût des infrastructures.

Les systèmes urbains sont hiérarchisés et évoluent selon des lois d'échelle. La hiérarchie l'échelle est importante pour les territoires et les systèmes urbains⁶. Elle est 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 peuplement, ou des superficies, ou bien encore

⁵ 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 [6], [7]. La distribution de la demande énergétique mondiale sera de plus en plus influencée par la structure du système urbain mondial.

⁶ 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 [8], [9].

des PIB et des demandes énergétiques⁷. 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'évolution⁸ des systèmes urbains, les grandes villes captent, par leur diversité et leur complexité, l'innovation et la nouveauté, en relayant 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 [11].

Le système urbain français est intégré au sein du système urbain européen. 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. Lorsque l'on procède à une analyse rang taille⁹ du système urbain mondial, européen et français, 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. Le système urbain français est fortement intégré au système urbain européen, et ne peut être analysé de façon isolée.

⁷ 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 inégalités⁷ 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, d'accumulation de population, de richesse, de demande énergétique, d'émissions de gaz à effet de serre, ou d'autres.

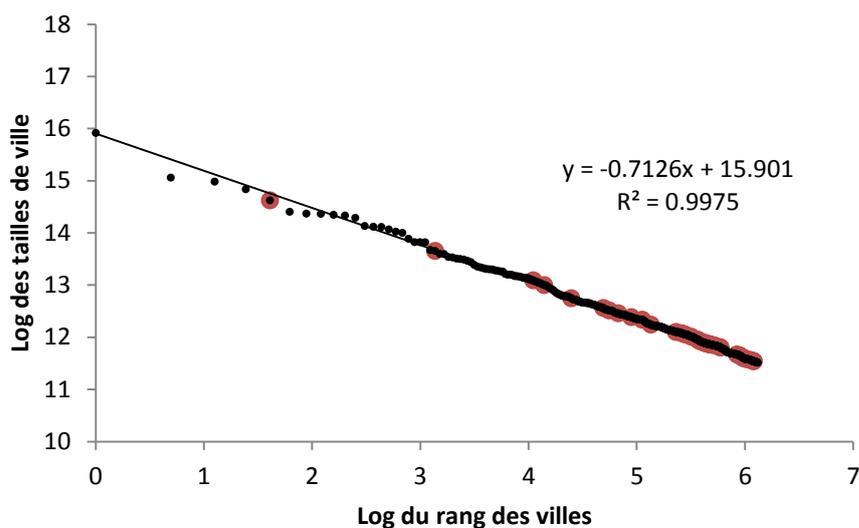
⁸ Voir Pumain et al (2006) qui ont proposé une théorie évolutionniste des systèmes urbains, permettant d'interpréter leurs caractéristiques de hiérarchisation [10].

⁹ 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.



Carte de nuit de l'Europe de l'Ouest

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 systèmes urbains présentent des rendements d'échelle. L'intégration globale des territoires a d'importantes conséquences économiques et énergétiques. La distribution des tailles de villes selon une loi de Zipf - Pareto reflète un optimum économique. Des villes de tailles différentes sont en effet complémentaires au sein du système urbain. La ville principale est souvent la capitale nationale et le siège du pouvoir politique. Elle tend à être la plus diversifiée, à la fois dans les échanges de biens et de services et dans l'intensité de la vie culturelle. D'autres grands centres urbains constituent des capitales régionales qui sont le point focal de l'économie régionale [12]. Pour

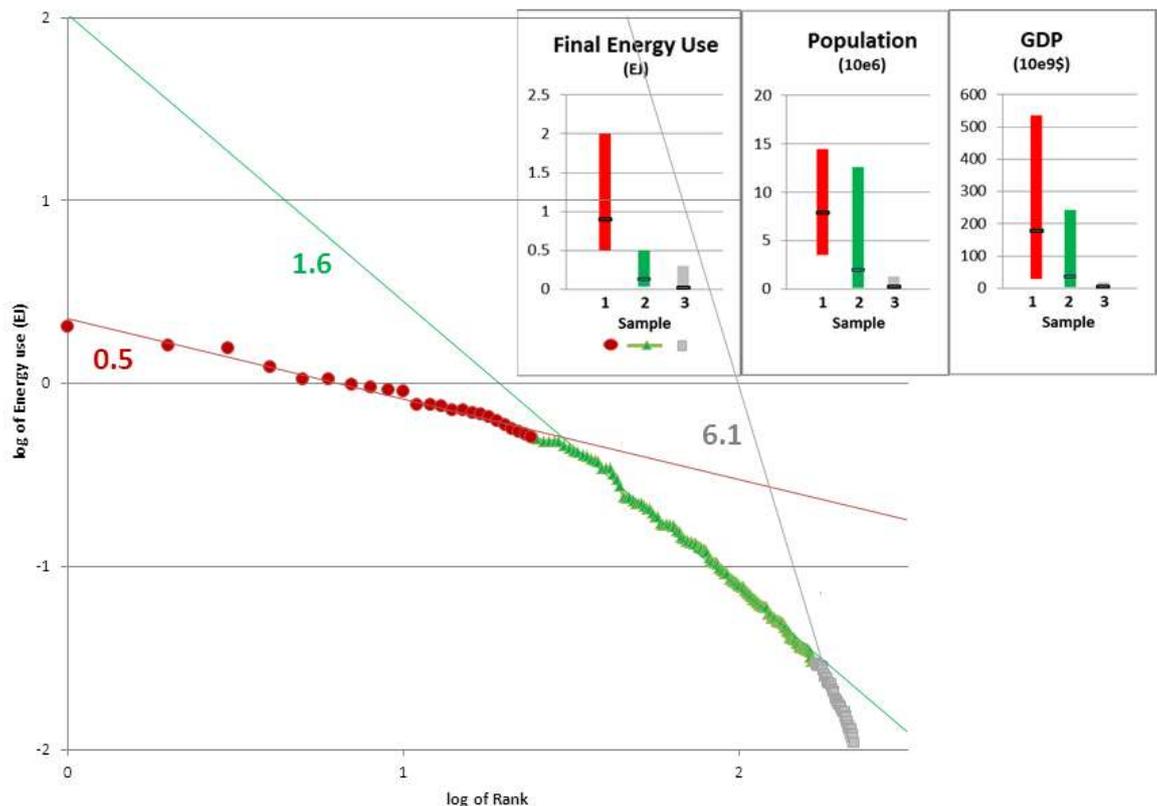
la croissance et la compétitivité économique, c'est l'organisation du système urbain en différents sous systèmes bien structurés, et avec une invariance d'échelle correspondant à l'optimum économique d'une loi de Zipf-Pareto, qui est importante et non les seules d'économies d'agglomération des grandes métropoles. Le soutien aux villes moyennes et petites est crucial pour la compétitivité.

Les villes montrent des rendements d'échelle croissant avec leur taille démographique. Les villes américaines les plus peuplées déposent relativement plus de brevets et ont des PIB par habitant plus élevés [13], [14]. À chaque doublement de la population urbaine, du moins sur des échantillons nord américains, 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. Il existe également des économies d'échelle pour les infrastructures énergétiques¹⁰, 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. À l'inverse, la consommation électrique est proportionnellement plus importante dans les villes les plus peuplées aux États-Unis, en Allemagne et en Chine¹¹. De même la consommation de transport croît plus vite que la taille des villes dans les échantillons nord américains.

La longue traîne de petites villes dans les systèmes urbains a des conséquences pour la transition énergétique. Exprimée en termes simples la loi de Zipf – Pareto sur les tailles des systèmes de villes implique l'existence d'un grand nombre de petites villes (la longue traîne). Les résultats précédents donnent à penser que les petites villes, les villes moyennes et les grandes villes ont des comportements énergétiques différents. De fait, 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.

¹⁰ Voir Bettencourt et al. [13].

¹¹ 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.



Distribution rang taille de la demande énergétique urbaine (EJ) [15]

L'analyse rang taille des consommations énergétiques finales des villes révèle des comportements différents suivant les tailles énergétiques urbaines¹². Les petites villes en termes d'énergie (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 diminue (lorsqu'elles deviennent plus grandes en termes énergétiques), leur consommation augmente 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-corrélation¹³ 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 dans les plus grandes villes par rapport

¹² 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 [13]. La distribution réelle est caractérisée par des effets de seuil dans une distribution globale convexe.

¹³ Corrélation avec un signe négatif entre deux paramètres.

à la consommation énergétique. Cette structure du système urbain en sous-systèmes comprenant 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, pour la transition énergétique, à porter une attention particulière à ces villes et à leur future croissance énergétique. La transition énergétique doit s'effectuer en priorité dans les petites villes car c'est là que les impacts et les effets de levier sont les plus forts.

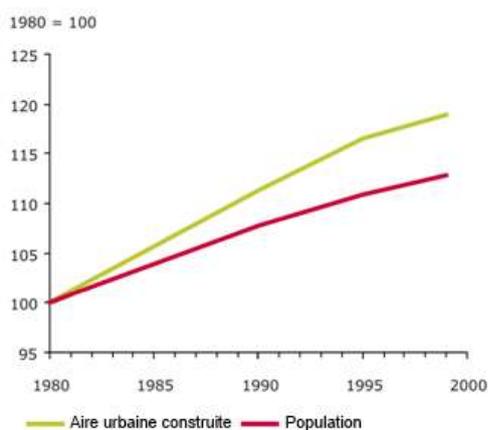
LES IMPACTS ET EFFETS DE LEVIER DE LA FORME URBAINE ET DES INFRASTRUCTURES

La structure spatiale des villes est déterminée par l'interaction des usages du foncier et des systèmes de transport. La structure spatiale des villes 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. Il existe une corrélation étroite entre la structure spatiale des villes et le développement des infrastructures. La conception et la programmation des infrastructures sont parmi les instruments les plus puissants pour configurer la forme urbaine. 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.

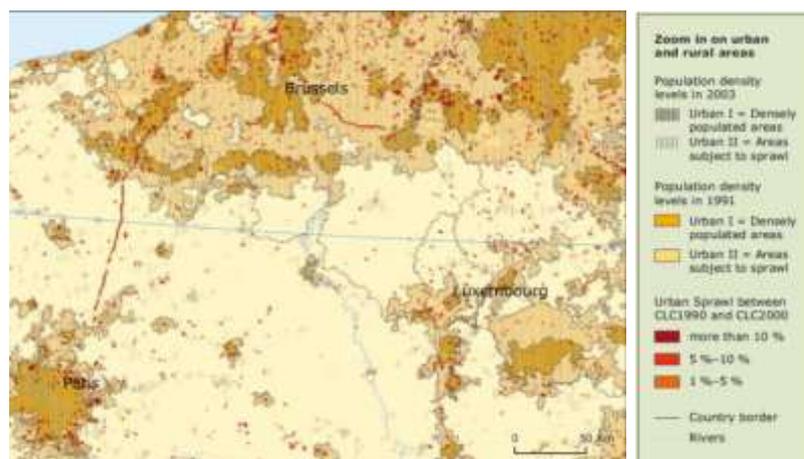
Le rôle des pouvoirs publics tant à l'échelon national que local dans la lutte contre l'étalement urbain et dans l'articulation polycentrique de la densité autour des hubs de transport en commun est crucial. La Caisse des Dépôts, par son rôle d'investisseur de long terme et pour l'intérêt général, est 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.

La croissance des zones urbaines en Europe a été beaucoup plus rapide que la croissance démographique entre 1980 et 2000. L'extension spatiale, ou l'emprise spatiale de la ville, mesure la surface totale utilisée pour les activités urbaines. Les développements urbains récents sont discontinus et fragmentés, peu denses¹⁴, caractérisés par des usages des sols zonés et séparés, une dépendance à l'automobile, une grande extension spatiale, peu d'espaces publics [16]. À l'origine nord américain, ce phénomène touche aujourd'hui largement les territoires français et européens.



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 [17]



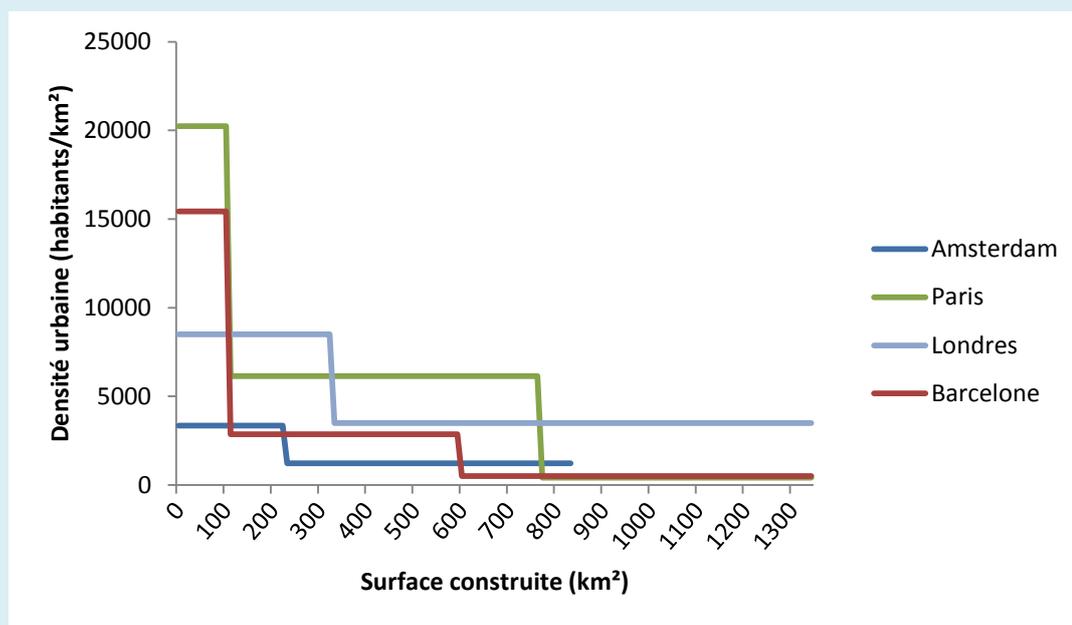
Carte du Nord-Est de la France, du Luxembourg, de la Belgique et du Nord-Ouest de l'Allemagne avec les différents niveaux de densité urbaine. Cette carte montre le développement de

¹⁴ 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.

zones urbaines à faible densité loin des centres urbains, avec un développement particulièrement important le long de l'axe TGV Paris-Bruxelles¹⁵.

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.



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

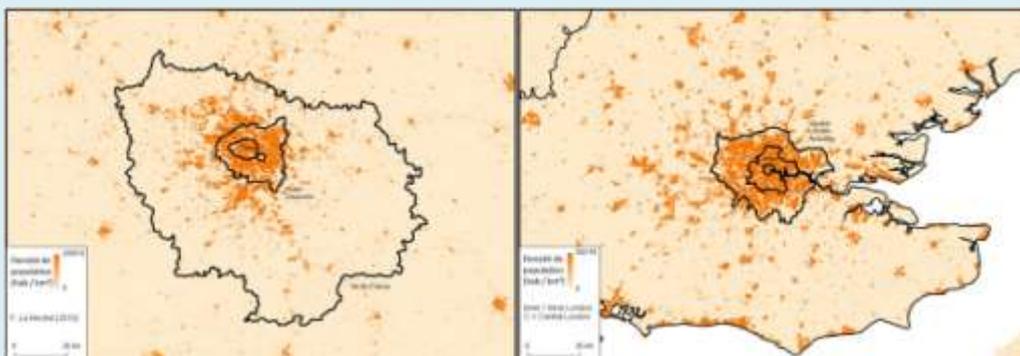
La dynamique de conversion de foncier rural en foncier urbain, génératrice de valeur de court terme, et l'offre d'infrastructures sont les principaux moteurs de l'étalement urbain. La différence de prix entre le foncier rural agricole et le foncier urbain, ainsi que la voiture individuelle et le faible coût de l'énergie ont conjointement causé l'étalement urbain fragmenté. 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. La compétition économique entre les différentes villes nourrit l'étalement urbain. Celles-ci visent à attirer davantage d'emplois ou de services, ce qui contribue à l'assouplissement des contrôles, voire à la mise en place de mécanismes incitatifs pour les commerces et les industries prêtes à investir. La dynamique de conversion de foncier rural en

¹⁵ L'étalement urbain sur le tracé de la ligne TGV Paris-Bruxelles est amplifié autour des « gares des betteraves ».

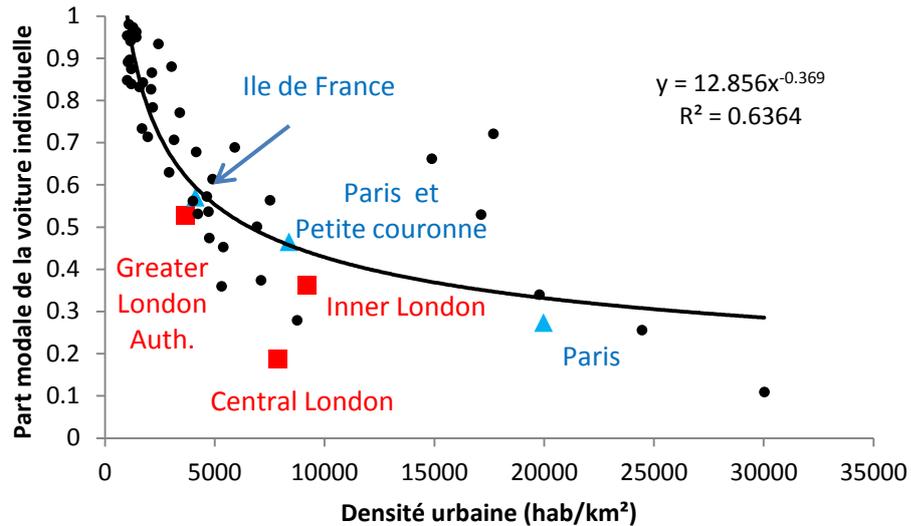
foncier urbain, génératrice de valeur de court terme, nécessite des mécanismes de régénération du foncier à urbaniser sur les franges urbaines. Une fois l'extension urbaine faite, le maintien de la dynamique nécessite de rendre la nouvelle frange urbaine accessible. Cette dynamique d'étalement s'accompagne 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.

La demande énergétique urbaine croît plus vite que l'expansion spatiale. L'augmentation de la taille et des distances demande plus de matériaux de construction. Elle crée 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 bâtiments isolés sont moins performants thermiquement que des îlots urbains compacts des centres villes traditionnels. La faible densité urbaine est 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.

Densité et part modale des véhicules particuliers : Paris et Londres



Densité démographique dans les métropoles parisiennes et londonniennes



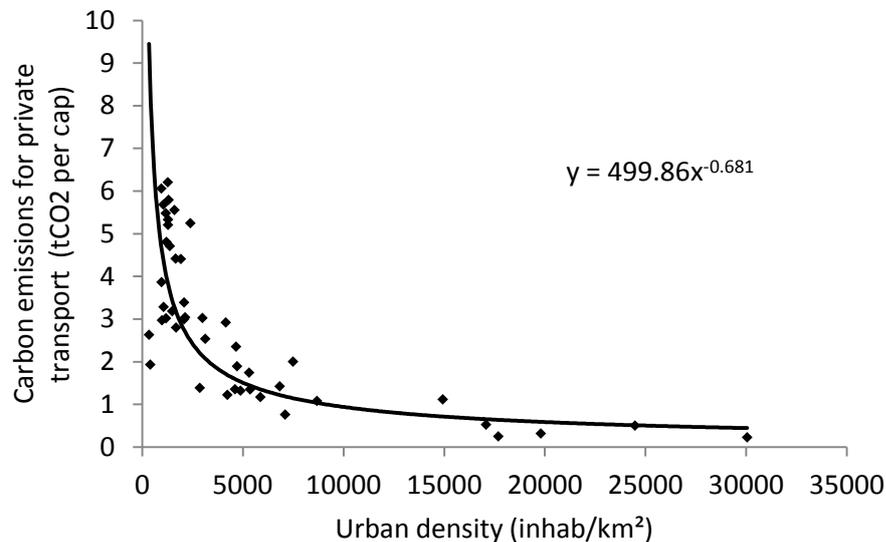
Densité et part modale des véhicules particuliers [18], [19]

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 : 1. La zone centrale (respectivement Paris intra-muros et l'intérieur de la ring-road à Londres, *Central London*) ; 2. La zone dense (respectivement Paris plus les trois départements de petite couronne et Londres plus les boroughs les plus centraux, *Inner London*) ; 3. La région urbaine (l'Ile-de-France et le Grand Londres).

Il existe une corrélation forte entre densité urbaine et consommation énergétique par habitant pour les transports¹⁶. 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 [21]–[23]. Des densités plus fortes de population sont corrélées avec des émissions de gaz à effet de serre plus basses [21], [24]–[26]. 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) [27]. 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) [28]–[30]. 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

¹⁶ Voir Newman et Kenworthy [20].

de la densité sur les choix modaux de transport est plus forte que celle des autres variables comme les facteurs économiques¹⁷ [21], [31].



Emissions carbone pour le transport et densité moyenne de 49 villes mondiales en 2000 [32]

L'équation suivante dérive d'une analyse multi-variée¹⁸ menée sur 42 villes mondiales [32]. Elle montre que 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.

¹⁷ 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 [21].

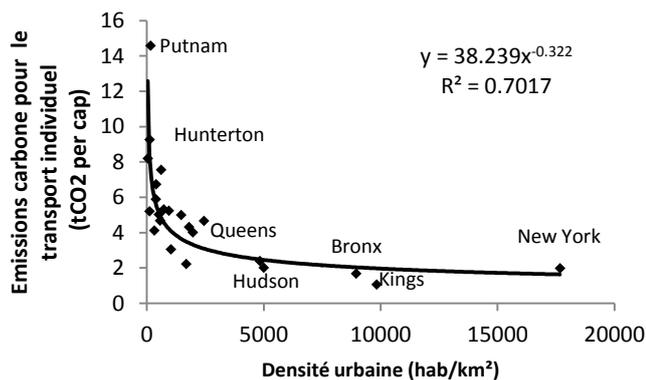
¹⁸ L'analyse multi-variée a pris en compte une série de variables, donc la taille spatiale de la ville, la population, le produit régional brut, le développement des infrastructures, le nombre de voitures par habitant, le cout moyen des transports, les vitesses relatives de la voiture et des transports en commun, ou encore la part des emplois dans le centre urbain.

- 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.

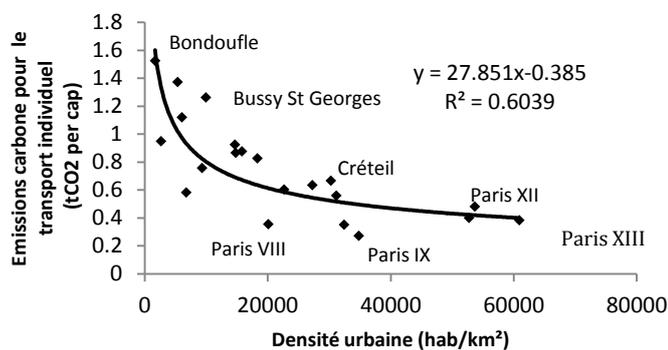
L'impact relatif de l'étalement urbain sur la consommation totale d'énergie pour les transports est donc respectivement 13 fois et 4 fois plus important que celui de la croissance démographique et de la croissance économique. La contribution de l'étalement urbain aux consommations de transport est la seule contribution supra linéaire (exposant 1,3). Les contributions de la croissance économique et de la croissance démographique au contraire sont très infra-linéaires.

Plus que la densité moyenne, c'est la distribution de la densité qui influe le plus fortement sur les modes de transport et les consommations énergétiques. La densité varie dans une large gamme au sein d'un même territoire. Eidlin [33] utilise une comparaison marquante New York et Los Angeles. Prise dans son ensemble, la métropole de New York est moins dense que celle de Los Angeles. 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. 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 [34] 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.

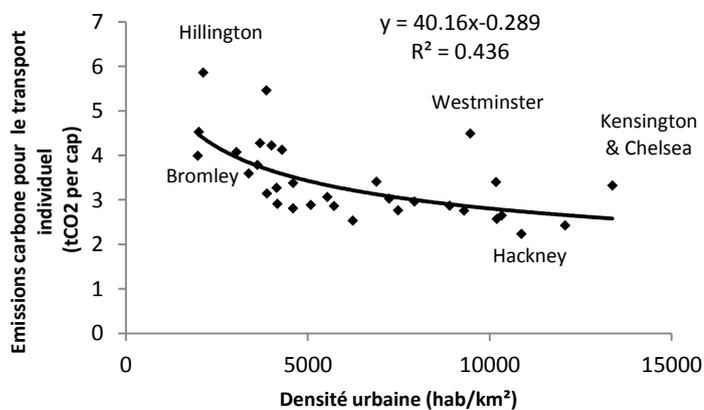
Les analyses menées sur des quartiers urbains au sein des mêmes villes montrent une forte corrélation entre la densité à l'échelle des quartiers et les consommations de transport. Nous avons mené l'analyse sur New York, Paris et Londres : à l'échelle des *counties* pour la métropole de New York, des *boroughs* pour le Grand Londres et des quartiers (découpage statistique des IRIS) pour l'Île de France. À 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 [32]

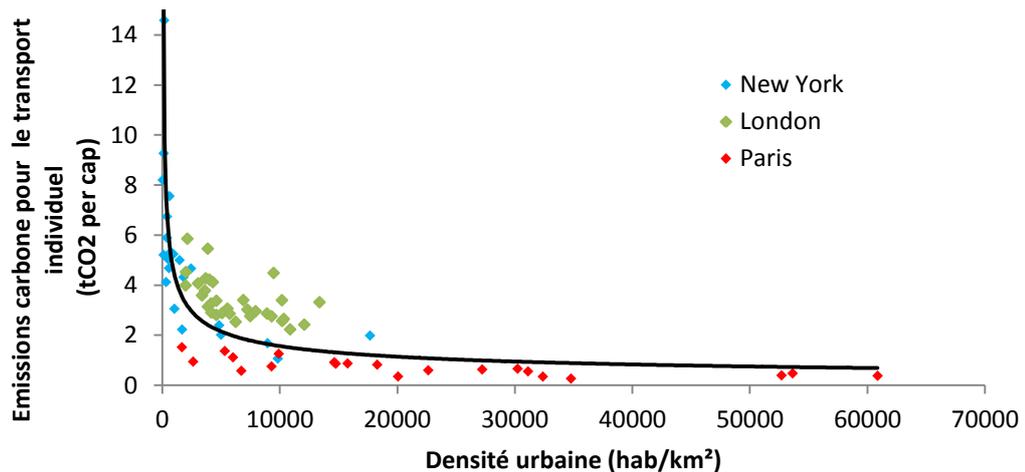


Emissions de carbone par habitant pour le transport dans des IRIS du Grand Paris [32]



Emissions de carbone par habitant pour le transport dans les Boroughs du Grand Londres [32]

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 [32]

Les analyses multi-variées dans les villes denses telles que Londres, Paris ou New York [32], [35] 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 important¹⁹.

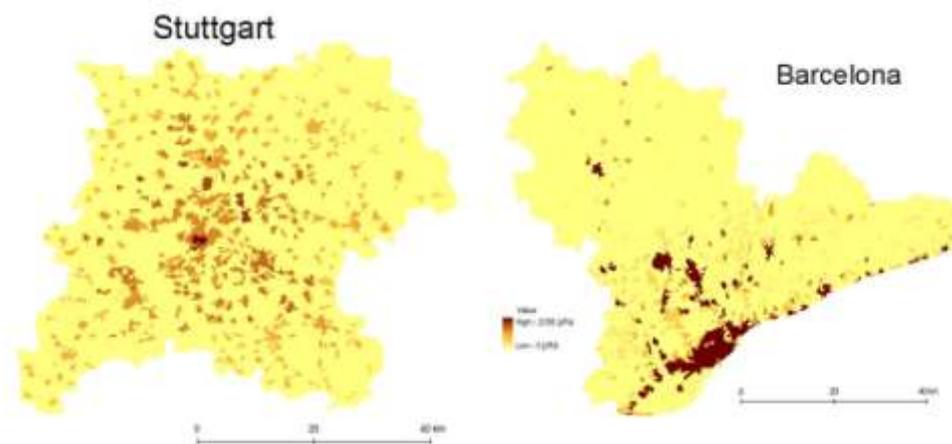
L'homogénéité dans la distribution de la densité accroît la demande énergétique de transport tandis que la hiérarchie dans la distribution la diminue. Le degré d'inégalité de répartition de la population au sein de l'aire urbaine et le degré de *clustering*²⁰ jouent un rôle important sur les modes de transport urbain [19]. Les facteurs qui influencent le plus la croissance de la consommation énergétique de transports sont l'homogénéité dans la distribution de la densité (évaluée par des mesures d'entropie²¹) qui accroît la consommation, et l'articulation plus ou moins polycentrique de la densité (évaluée par des mesures de coefficient de hiérarchie spatiale²²) qui diminue la consommation.

¹⁹ Ces résultats sont confirmés par Cervero et Pivo [36], [37] 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.

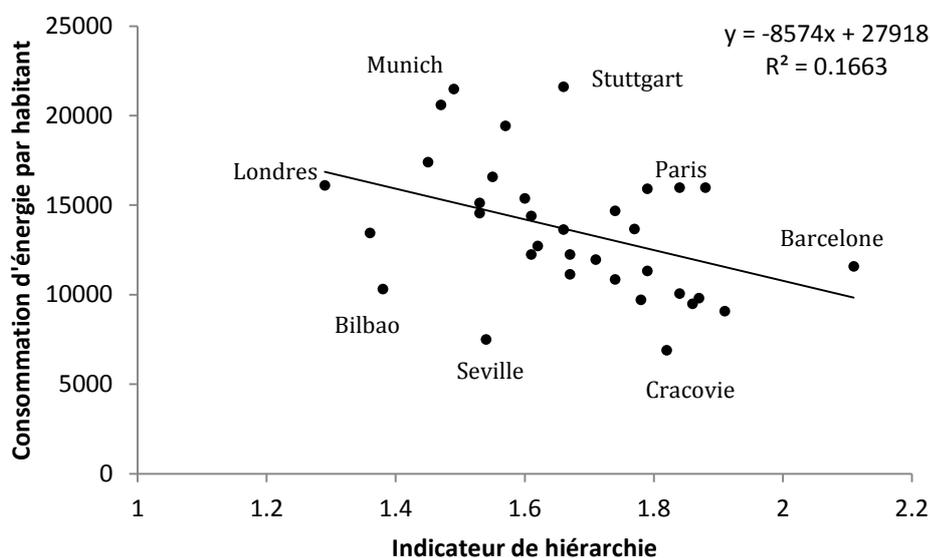
²⁰ Voir Tsai [38]. Un degré d'inégalité de répartition de la population au sein de l'aire urbaine peut être compris comme une forte concentration de la population dans une faible proportion de l'espace urbanisable. Le degré de *clustering*, ou de fragmentation de la tache urbaine, peut être compris comme la propension des zones denses à être voisines les unes des autres.

²¹ 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).

²² Au niveau intra-urbain, la loi de Zipf se trouve également vérifiée, quel que soit le découpage sous-jacent [19]. Batty [39] avec d'autres auteurs utilise l'exposant de la loi de puissance comme indicateur de la configuration spatiale des



Un exemple de structure spatiale urbaine faiblement hiérarchisée (Stuttgart) et de structure urbaine très hiérarchisée (Barcelone) selon une loi rang-taille [19]



Influence de l'indicateur de hiérarchie sur la consommation énergétique par habitant, régression partielle (données extraites de [19])

Les paramètres explicatifs que nous utilisons ici pour les 34 métropoles européennes sont le PIB par habitant²³, la distance moyenne (*dist*) entre individus, la hiérarchie (*hier*) et l'entropie

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.

²³ Le Nechet utilise le taux de motorisation (nombre de véhicules pour 1000 habitants), lui-même corrélé de façon significative au PIB par habitant.

(*entrop*). L'analyse multi-variée montre l'influence significative de ces 4 paramètres sur la consommation d'énergie par habitant pour les transports²⁴ et permet de valider le modèle suivant :

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

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 cependant²⁵, 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 [20] par des paramètres de forme intra-urbains. 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 absolument 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.

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. L'homogénéisation de la population sur toute la surface urbaine²⁶ augmente fortement la consommation énergétique. 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 ainsi d'expliquer la différence de consommation énergétique par habitant observée.

Une hiérarchisation plus forte des densités au sein de l'agglomération contribue en revanche à diminuer les consommations énergétiques pour le transport (élasticité négative). Ce résultat montre la pertinence tant des agglomérations mono-centriques que polycentriques, qui présentent

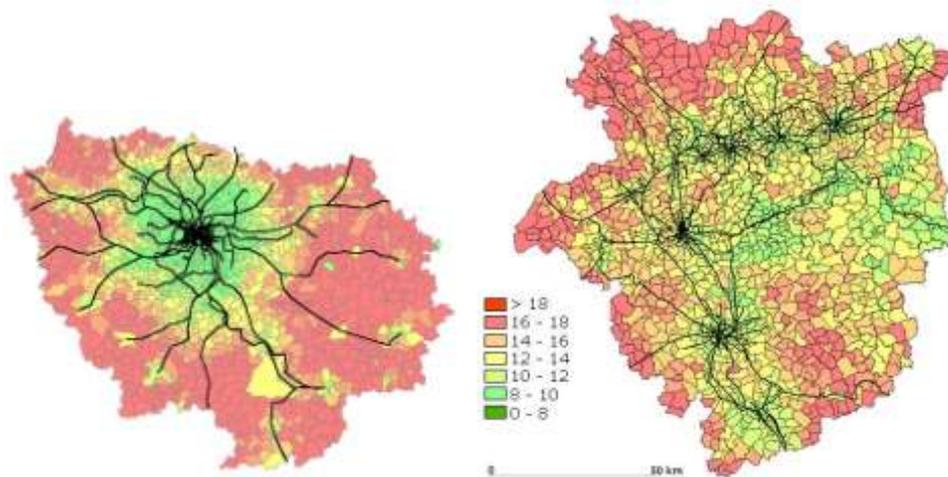
²⁴ Test de Fisher concluant (F=8,1) et variables explicatives décorréélées entre elles. A titre de comparaison, le test de Fisher pour une régression multivariée appuyée sur un modèle linéaire est moins concluant (F=6.7).

²⁵ 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

²⁶ L'entropie maximale égale à un correspond à une totale absence d'ordre et de structure spatiale avec une répartition uniforme.

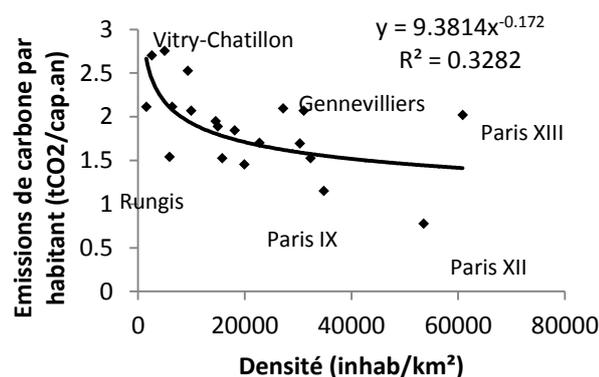
toutes deux une hiérarchie forte des densités. Il montre l'efficacité supérieure des structures présentant une forte hiérarchie d'échelle.

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. 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.



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

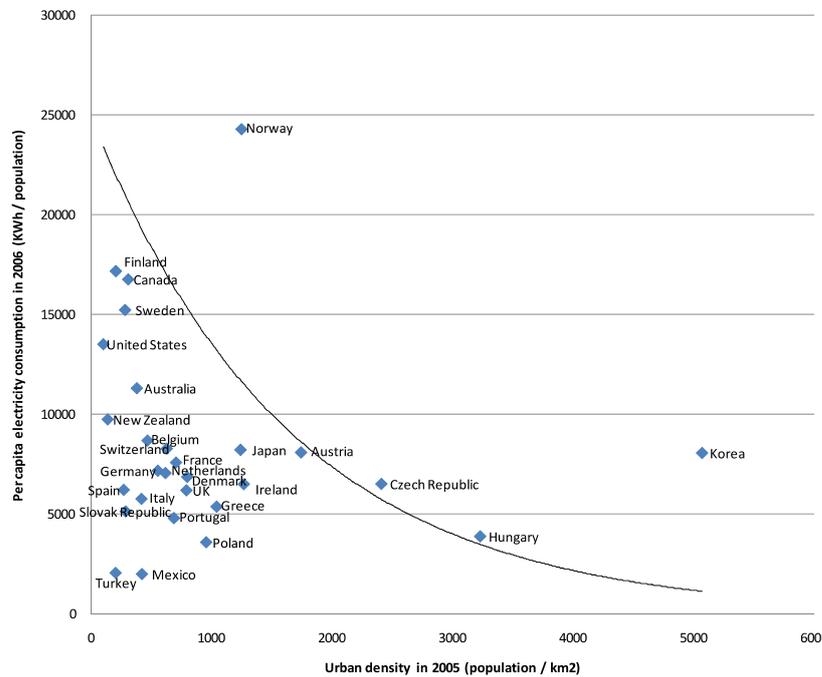
L'impact de la densité est également très fort sur les consommations énergétiques totales par habitant. Le graphique suivant basé sur les données de l'APUR montre cette corrélation.



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

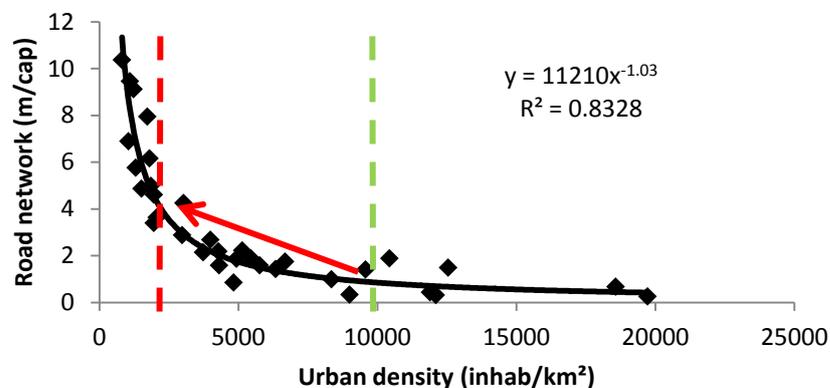
Lorsque la densité s'accroît, la demande d'électricité par habitant décroît. Les zones urbaines du Japon sont à peu près cinq fois plus denses que celle du Canada, ce qui se traduit par une

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 [40].

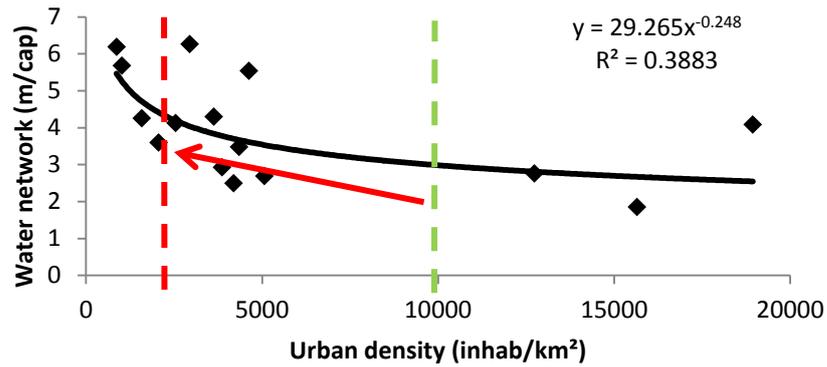


Densité de population urbaine et consommation électrique [40]

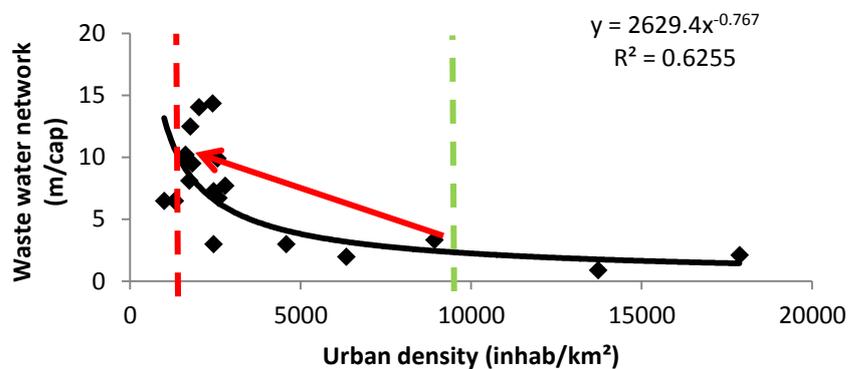
Les coûts d'infrastructure par habitant sont jusqu'à 4 fois plus élevés dans les zones à faible densité. Les infrastructures de services urbains par habitant sont considérablement plus longues dans les formes étalées que dans les formes plus compactes. Leur coût est ainsi accru, de même que leur consommation énergétique directe et leur énergie incorporée. Les trois graphiques suivants, adaptés de Müller et al. [41], montrent la corrélation entre longueur des infrastructures par 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 [41]



Relation entre densité urbaine et longueur du réseau d'eau par habitant [41]



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 dense²⁷.
- 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.

²⁷ La densité de Paris intra-muros varie entre 22 000 et 40 000 habitants au km² selon les arrondissements ; c'est avec une forme urbaine continue de moyenne hauteur la même densité que Manhattan.

	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%

De fortes densités de population et des formes urbaines compactes accroissent la compétitivité des territoires. L'étalement et la fragmentation urbaine ont un impact fort sur la compétitivité des entreprises : ils diminuent les économies d'agglomérations en rendant les différentes parties du territoire peu accessibles entre elles. Les zones urbaines de forte densité présentent également des co-bénéfices économiques tels que l'utilisation plus efficace des infrastructures et de l'énergie [30].

Des seuils de taille et de densité minimale sont importants pour les mesures d'efficacité énergétique. 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.

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. Des niveaux élevés 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). 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 [42], [43]. 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 [44], [45].

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 [46]. La mixité promeut également la marche beaucoup plus que les environnements urbains caractérisés par de hauts niveaux de mono fonctionnalité.

La connectivité à maille fine est un support de la diversité urbaine. La connectivité peut être décrite par la composition, la configuration et la constitution²⁸ des réseaux de rues [47]. La densité linéaire de rues (en km/km²) et la densité d'intersections (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.

²⁸ – *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. 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.

– *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.

L'accessibilité est un support d'efficacité énergétique et un vecteur de croissance économique. Elle peut être atteinte par des distributions en longue traîne des aménités urbaines.

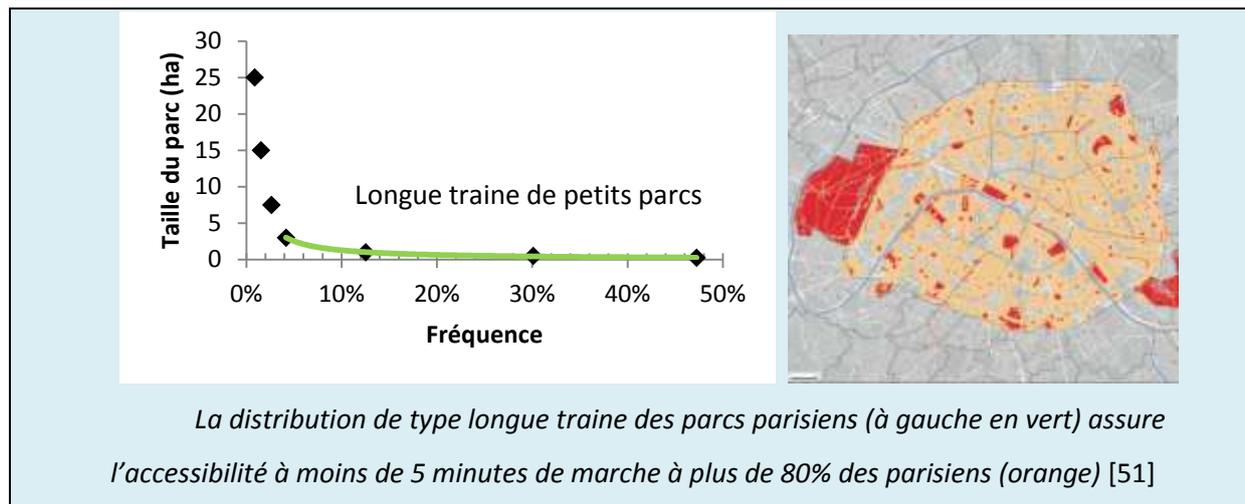
L'accessibilité est un indicateur de la capacité à accéder aux ressources et aux opportunités économiques et sociales (activités de production et de consommation) dans les villes [48]–[50]. Elle accroît les interactions économiques et les effets d'économies d'agglomération. Elle est à la fois un support 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.

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 clés consiste à promouvoir une accessibilité à moins de 500 m des aménités urbaines essentielles (espaces verts, commerces, santé, éducation, culture). La distribution qui optimise l'accessibilité à ces aménités tout en tenant compte de la contrainte économique (le volume d'investissements disponible et le foncier) repose sur une distribution de type longue traîne selon une loi de puissance inverse : 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).

Dans Paris intra-muros, 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 jardins publics suit mathématiquement une distribution en loi de puissance inverse que l'on retrouve notamment dans la distribution des jardins publics de Manhattan [51].



L'EFFICIENCE DANS L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE FINALE

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 %.

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.

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, sont nécessaires : 1. l'amélioration de l'efficacité énergétique globale du secteur des transports, 2. l'introduction de carburants alternatifs à faibles émissions de carbone et de l'électricité, 3. l'amélioration de la diversification, de la quantité et de la qualité des modes de transports publics, Les 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. 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 [3].

L'INTÉGRATION DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES

Les politiques de planification intégrée de l'énergie urbaine doivent viser en priorité à une diminution de la demande en améliorant l'efficacité énergétique. Elles doivent mettre 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%. Ce n'est que dans un second temps, et après une diminution préalable des niveaux de demande énergétique, que 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.

Les trois familles de chemins de transition énergétique du Global Energy Assessment [3]

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 [3]. 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.

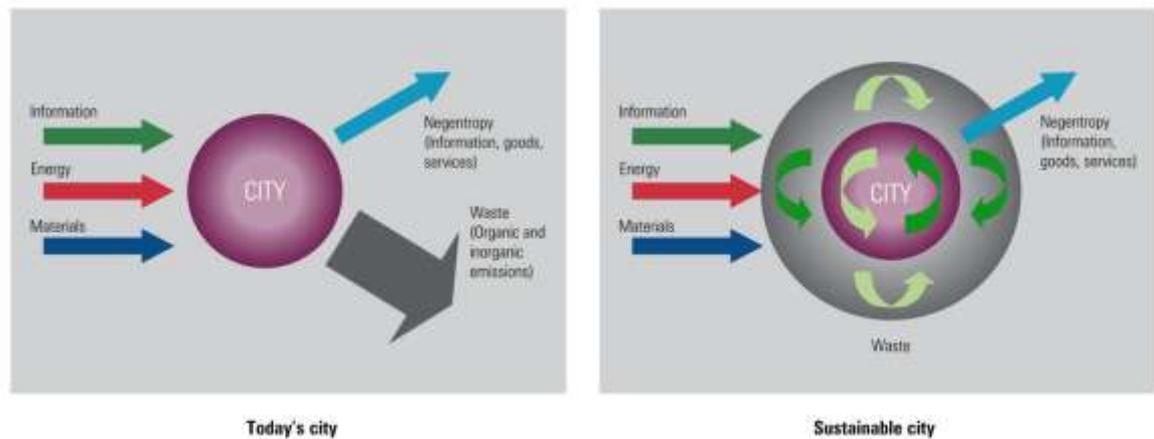
Les investissements mondiaux dans les systèmes énergétiques doivent augmenter de 1700 milliards à 2200 milliards de \$ US annuellement au cours des prochaines décennies, avec environ US \$ 300 à 550 milliards consacrés aux mesures d'efficacité de la demande [3]. Ces besoins d'investissement sont à comparer 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 [3] 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) quel que 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 fondée sur l'exergie est le moyen le plus puissant pour diminuer la demande finale. L'idée de métabolisme urbain repose sur la comparaison des flux

urbains avec ceux d'un organisme vivant²⁹. 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 [53]. 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

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*. En thermodynamique, l'exergie est une grandeur permettant de mesurer la qualité d'une énergie. C'est la partie utilisable de l'énergie. Le travail maximum récupérable est ainsi égal à l'opposé de la variation d'exergie au cours de la transformation. Un système à l'équilibre thermomécanique ou chimique n'a plus aucune valeur. Plus un système est loin de l'équilibre ambiant, plus il est apte à opérer un changement, aptitude sur laquelle repose l'utilité d'une énergie.

Des approches de planification énergétique fondées sur l'exergie³⁰ ont été mises en œuvre, notamment à Rotterdam. Ces stratégies 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. Elles ont été appliquées aux Pays-Bas à différentes échelles avec des cartographies des besoins des territoires et de leurs capacités de production d'énergie

²⁹ Elle a d'abord été formalisée dans le domaine de l'écologie industrielle. À partir de l'article de Wolman [52], les chercheurs ont analysé les flux d'énergie, de nourriture, d'eau, de déchets et d'autres matériaux pour comprendre les impacts physiques urbains.

³⁰ L'analyse de l'exergie 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.

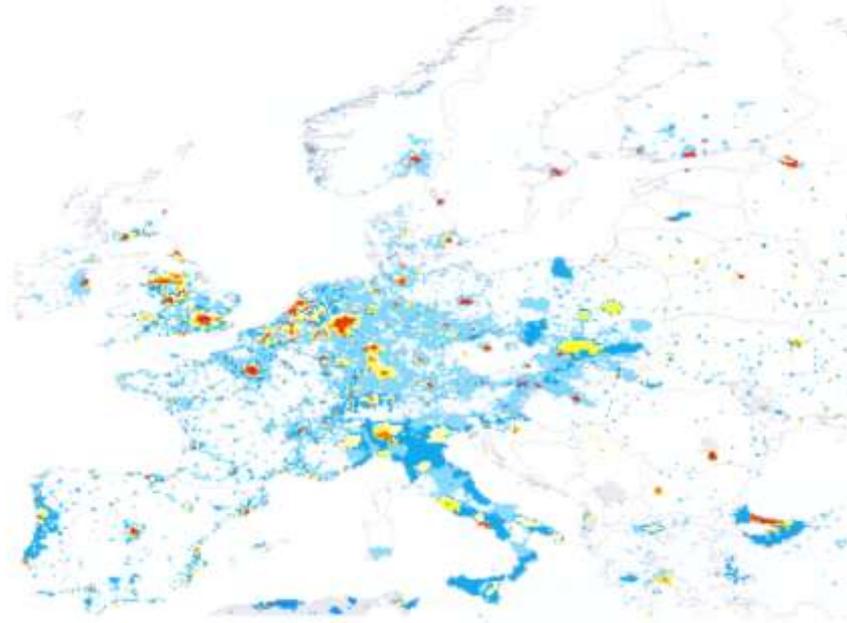
classées selon les niveaux de qualité exergetique. Cullen et Allwood [54] ont montré que la plus grande partie de la consommation énergétique urbaine est perdue sous forme d'énergie résiduelle non fonctionnelle. De ce fait, la demande d'énergie utile peut être réduite par un usage plus efficient de l'énergie, 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. 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'efficience thermodynamique, ce qui suggère un potentiel d'amélioration de plus d'un facteur 5 [4]. 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'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. 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 diffus et intermittents.

Il existe de ce fait un décalage très important entre les densités de demande énergétique³¹ en milieu urbain (en W/m^2) et les densités locales de production possible d'énergies renouvelables. 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 $1\ 000 W/m^2$ 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). Ce décalage implique de concevoir le rôle des

³¹ Le concept de densité énergétique correspond à la quantité d'énergie produite ou consommée par unité de surface urbaine. L'unité usuelle de densité énergétique est le Watt par mètre carré (W/m^2). Elle se réfère à la disponibilité continue (en moyenne) de la puissance d'un Watt pendant une année.

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.



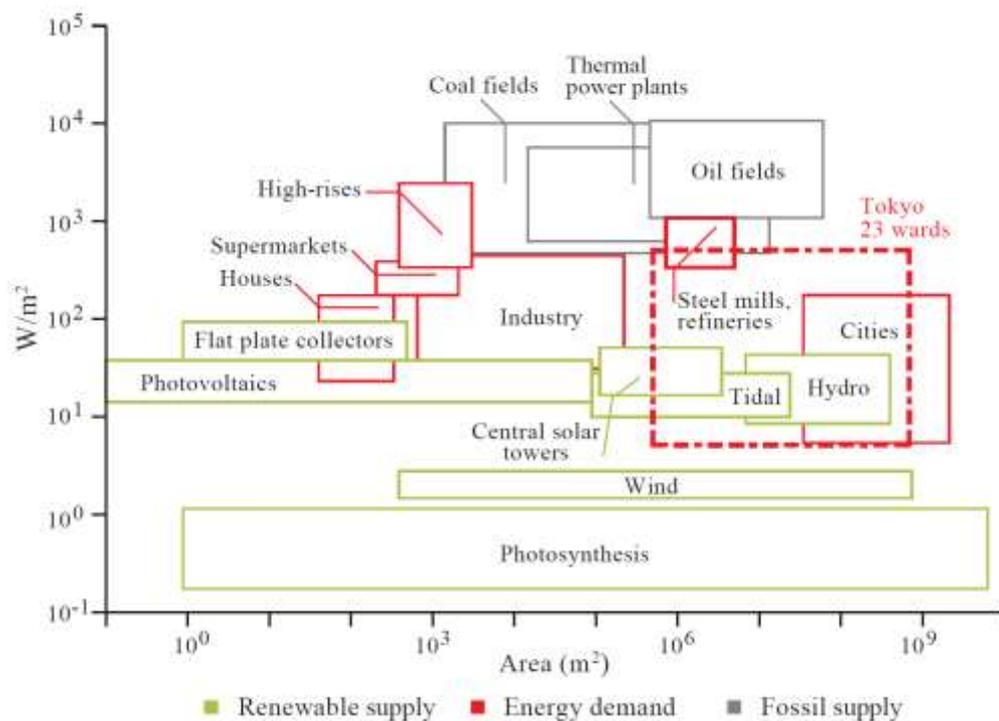
Densité de la demande énergétique (W/m^2) en Europe : les zones bleues et blanches indiquent les zones où les énergies renouvelables locales peuvent satisfaire la faible densité de demande énergétique (inférieure à 0,5 à 1 W/m^2) ; les zones jaunes, rouges et brunes indiquent les hautes densités énergétiques au-dessus de 1, 5, 10, et 25 W/m^2 respectivement [15]

L'ordre de grandeur typique des consommations énergétiques d'une mégapole 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 [55], à comparer avec 0,6 EJ pour Londres (33 *boroughs*) [56] et 0,8 EJ pour New York³² [58]. L'intensité de la demande énergétique à Tokyo varie entre quelques W/m^2 et 200 W/m^2 . Les 25km² les plus denses de Tokyo (4% de la surface de 600 km² des 23 *wards* de Tokyo) consomment 18% de l'énergie finale de Tokyo [15].

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 m²) 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 m² de 0,2 à 1 W/m^2 , pour une taille généralement comprise entre zéro et la dizaine de milliers d'hectares. Le

³² 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 [57].

solaire photovoltaïque fournit entre 20 et 60 W/m² pour des installations allant du panneau individuel à la dizaine d'hectares. Les champs pétroliers fournissent entre 1 000 et 10 000 W/m² pour des tailles typiquement comprises entre 1 et 10 km². 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/m², pour une surface entre 50 et 500m², un immeuble de grande hauteur entre 600 et 3 000 W/m² pour une surface entre 500 et 5000 m². Le système ville consomme (énergie de fonctionnement, sans prendre en compte les biens et services importés) entre 10 et 200 W/m², pour une surface de l'ordre du millier de km².



Intensités énergétiques (en W/m²) et taille typiques (en m²) pour la production de différentes sources d'énergie, fossile (gris) et renouvelable (vert) et pour la consommation énergétique de différentes entités (rouge) [15]

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".

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 urbaine 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% [59]

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* [60]. 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 : 1. les bâtiments présentant un déficit ou un surplus de chaleur ; 2. les bâtiments avec un déficit ou un surplus d'eau chaude domestique ; 3. les bâtiments avec un déficit ou un surplus d'eau grise ; 4. les bâtiments ou les véhicules avec un déficit ou un surplus en courant continu (production d'énergie renouvelable).

La synergie des leviers d'efficience énergétique

Les objectifs de la transition énergétique ne seront pas atteints par l'accumulation de stratégies isolées. Appliqués simultanément, les différents leviers d'action créent une forte synergie et ont un effet multiplicateur. 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.

RÉFÉRENCES

- [1] OCDE and AIE, *Cities, towns & renewable energy: yes in my front yard*. Paris, 2009.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] J. Keirstead and N. Shah, *Urban energy systems: an integrated approach*. Abingdon, Oxon: Routledge, 2013.
- [6] United Nations Human Settlements Programme, *Cities and climate change: global report on human settlements, 2011*. Nairobi, London, Washington, D.C.: UN-Habitat ; Earthscan, 2011.
- [7] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2008*. Paris: International Energy Agency, 2008.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] D. Pumain and F. Moriconi-Ebrard, "City size distributions and metropolisation," *GeoJournal*, vol. 43, no. 4, pp. 307–314, Dec. 1997.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] L. M. A. Bettencourt, J. Lobo, D. Helbing, C. Kühnert, and G. B. West, "Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities," *PNAS*, vol. 104, no. 17, pp. 7301–7306, Apr. 2007.
- [14] 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.

- [15] A. Grubler, *Energizing sustainable cities assessing urban energy*. London; New York: Routledge, 2013.
- [16] O. Gilham, "What is Sprawl?," in *The Urban Design Reader*, M. Larice and E. Macdonald, Eds. Routledge, New York, 2007, pp. 287–307.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] R. Ewing and R. Cervero, "Travel and the Built Environment: A Synthesis," *Transportation Research Record*, vol. 1780, no. 1, pp. 87–114, Jan. 2001.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] U.S. Department of Transportation, "2009 National Household Travel Survey," U.S. Department of Transportation, Washinton, D.C., 2009.
- [28] 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.

- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] L. Bourdic, "Urban density and private transport energy consumption - From global trends to local solutions," Imperial College, London, Center for Environmental Policy, 2011.
- [33] E. Eidlin, "What Density Doesn't Tell Us About Sprawl," University of California Transportation Center, University of California Transportation Center, Working Paper, Oct. 2010.
- [34] C. Bradford, "Density Calculations for U.S. Urbanized Areas, Weighted by Census Tract," *Austin Contrarian*, 2008.
- [35] APUR, "Formes urbaines en Ile de France et émissions de gaz à effet de serre," Atelier Parisien d'Urbanisme, 2009.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Y.-H. Tsai, "Quantifying Urban Form: Compactness versus 'Sprawl,'" *Urban Stud*, vol. 42, no. 1, pp. 141–161, Jan. 2005.
- [39] M. Batty, "Polynucleated Urban Landscapes," *Urban Stud*, vol. 38, no. 4, pp. 635–655, Apr. 2001.
- [40] L. Kamal-Chaoui and A. Roberts, "Competitive cities and climate change," OECD Publishing, Paris, OECD Regional Development Working Papers 2, 2009.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] C. Ratti, N. Baker, and K. Steemers, "Energy consumption and urban texture," *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 7, pp. 762–776, 2005.

- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] S. Marshall, *Streets & patterns*. London; New York: Spon, 2005.
- [48] W. G. Hansen, "How Accessibility Shapes Land Use," *Journal of the American Institute of Planners*, vol. 25, no. 2, pp. 73–76, May 1959.
- [49] D. R. Ingram, "The concept of accessibility: A search for an operational form," *Regional Studies*, vol. 5, no. 2, pp. 101–107, Jul. 1971.
- [50] 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.
- [51] C. Schattner, L. Bourdic, and S. Salat, "Scaling of green spaces in Paris and accessibility," Paris, Working Paper, 2012.
- [52] A. Wolman, "The metabolism of cities," *Scientific American*, vol. 213, no. 3, pp. 179–190, 1965.
- [53] Robinson, "Modelling carbon storage in highly fragmented and human-dominated landscapes: Linking land-cover patterns and ecosystem models," *Ecological Modelling*, vol. 220, pp. 1325–1338, 2009.
- [54] J. M. Cullen and J. M. Allwood, "Theoretical efficiency limits for energy conversion devices," *Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 2059–2069, May 2010.
- [55] Tokyo Metropolitan Government, "Environmental White Paper 2006," Tokyo, 2006.
- [56] Mayor of London, *Green light to clean power: the Mayor's energy strategy*. London: Greater London Authority, 2004.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] R. G. Pratt, "The Smart Grid: An Estimation of the Energy and CO2 Benefits. U.S.," Department of Energy., 2010.
- [60] 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.