
LA TRANSITION ENERGETIQUE DES VILLES

CONTEXTE, ENJEUX, LEVIERS D'ACTION

Nous revenons succinctement dans ce chapitre sur les contours de la crise énergétique et sur les politiques envisagées pour y répondre (1). Cette esquisse du contexte mondial et national nous permet d'appréhender les incidences de la crise de l'énergie sur les villes (2). Engager la transition énergétique des villes suppose en effet comprendre les spécificités et la complexité de la problématique de l'énergie en milieu urbain. A partir de la revue de la littérature scientifique sur le lien entre ville et énergie, nous chercherons à mettre en évidence les principaux leviers d'actions pour améliorer la qualité énergétique des villes (3).

1. LE DEFI DE LA TRANSITION ENERGETIQUE

LE CONTEXTE ENERGETIQUE MONDIAL : RAREFACTION DES RESSOURCES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

La consommation mondiale en énergie primaire¹ a presque doublé entre 1973 et 2010 passant selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) de 6 107 Mtep à 12 717 Mtep (AIE, 2012a) et devrait continuer à augmenter dans les années à venir. Les énergies fossiles conservent une position dominante dans le mix énergétique mondiale (AIE, 2012b), malgré les politiques de développement des énergies à faible teneur en carbone dans les pays de l'OCDE. Les ressources en énergies fossiles sont de plus en plus rares comme le montre le développement des technologies capables d'extraire les ressources pétrolières et gazières « non conventionnelles ». Dans son World Energy Outlook de 2012, l'AIE note une nouvelle tendance qui devrait bouleverser le marché mondial de l'énergie : la recrudescence des productions pétrolières et gazières aux Etats Unis d'Amérique, liée à l'exploitation des huiles et gaz de schiste. L'évaluation des ressources en énergies fossiles encore disponibles est un exercice délicat. Si les stocks en énergies fossiles sont par nature finis, l'estimation des réserves restantes dépend de leur accessibilité technique, leur prix et le rythme de leur consommation. Si un pic de production est irrémédiable, les experts sont en revanche divisés sur sa date de réalisation. Dans ce contexte, les services offerts par l'énergie (s'éclairer, se chauffer, se déplacer, cuisiner, travailler, etc.) risquent de devenir inaccessibles à une part croissante de la population mondiale. Toutefois, l'augmentation du prix des énergies fossiles pourrait aussi faciliter la mise en place d'actions d'économies d'énergie. Dans cette perspective, c'est un pic de consommation qui pourrait advenir. En effet, lorsque la consommation supplémentaire d'énergie coûte plus chère que les actions nécessaires pour l'économiser, il est rationnel de faire le choix des économies d'énergies. C'est pourquoi des auteurs tels que Jean-Marc Jancovici mettent en avant les bienfaits d'une énergie chère, dont le prix devrait notamment intégrer le coût de ses externalités négatives, c'est-à-dire le coût de ses conséquences sur l'environnement et la santé.

Outre les incidences économiques et sociales de l'augmentation continue de la demande en énergie mondiale, ses conséquences sur l'environnement sont préoccupantes. Selon le quatrième rapport

¹ L'ANNEXE 1 propose un ensemble de définitions utiles concernant l'énergie, telles qu'énergie primaire, énergie fossile, énergie renouvelable, etc.

d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC)², le réchauffement du climat est « sans équivoque », la température moyenne à la surface du globe ayant nettement augmenté (GIEC, 2007). Les manifestations attendues pour le XXI^{ème} siècle du changement climatique sont multiples : élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe ; augmentation de la durée, fréquence et/ou intensité des périodes chaudes ou des vagues de chaleur sur la majeure partie des terres émergées ; augmentation des épisodes de sécheresse en Europe méridionale et en Afrique de l'Ouest notamment ; augmentation de la fréquence de fortes précipitations dans les hautes latitudes et les zones tropicales ainsi que dans les latitudes moyennes de l'hémisphère nord en hiver, etc (Groupes de travail I et II du GIEC, 2012). L'origine anthropique du réchauffement climatique est très probable au vu de la corrélation entre l'augmentation de la température moyenne du globe depuis le milieu du XX^{ème} siècle et la hausse des concentrations de GES anthropiques dans l'atmosphère. Les activités humaines depuis la révolution industrielle sont fortement émettrices de gaz à effet de serre. Les émissions anthropiques ont augmenté de 70% entre 1970 et 2004. Selon l'AIE, 65% des émissions anthropiques de GES sont issues de la production et la consommation énergétiques (AIE, 2013). La hausse de la concentration atmosphérique en GES provient de la combustion des énergies fossiles et du changement d'affectation des terres et de l'agriculture³ (GIEC, 2007). De plus, « le réchauffement anthropique pourrait avoir des conséquences brusques ou irréversibles selon l'ampleur et le rythme de l'évolution du climat. » (GIEC, 2007). Les effets du changement climatique concernent la répartition de la ressource en eau, la vie des écosystèmes, les rendements de la production agricole et la santé humaine. Par ailleurs, de nombreux flux migratoires sont attendus. La gravité et l'étendue des conséquences du changement climatique en font un enjeu majeur de nos sociétés actuelles.

Cependant, d'autres dommages environnementaux liés à l'énergie sont également préoccupants. L'extraction, la transformation et la distribution de toutes les énergies produisent une forme de pression sur l'environnement. Il n'existe aucune énergie dont l'utilisation est parfaitement « propre ». Même si les dommages sont de nature et d'ampleur différents d'une énergie à l'autre, sur quels critères objectifs est-il souhaitable de les hiérarchiser ? Ces nuisances environnementales sont d'autant plus préoccupantes que les quantités d'énergie consommées sont grandes (Jancovici, 2004) . Les nuisances issues de l'extraction, la transformation et la consommation des principales énergies sont répertoriées dans le **Tableau 1**. Les degrés d'incidence figurant dans le tableau sont à considérer pour chaque énergie indépendamment des autres, considérant que des dommages de nature différente ne peuvent être comparés.

En plus de contribuer au changement climatique, l'utilisation des énergies fossiles pose des problèmes de qualité de l'air (pluies acides, particules, etc.), perturbe les nappes phréatiques et polluent les océans en cas de marées noires. L'utilisation du bois comme source énergétique contribue à la déforestation et est responsable de pollutions locales et/ou régionales. Si les centrales nucléaires peuvent apparaître comme une bonne solution à la lutte contre le changement climatique, sa production de déchets radioactifs à très longue durée de vie et les risques d'accidents nucléaires en font une solution loin d'être idéale. La construction de barrages hydrauliques engendre l'inondation de vallées, ce qui détruit des écosystèmes et nécessite parfois de massifs déplacements de population. Outre la pollution liée à

² Le GIEC a été créé en 1988 sous l'égide de l'Organisation Mondiale des Nations Unies pour l'Environnement afin de faire une synthèse de la littérature scientifique mondiale capable d'éclairer les décideurs politiques sur la problématique climatique.

³ L'agriculture constitue avec la combustion des énergies fossiles la principale source d'émissions de méthane (CH₄), GES puissant. Ces émissions sont issues de l'élevage, des déjections animales, de la production du riz, de la pratique du brûli de la savane, et du brûlage des déchets agricoles (non destiné à produire de l'énergie) (source : <http://donnees.banquemondiale.org/>).

la production et à la fin de vie des panneaux solaires, les centrales photovoltaïques sont relativement consommatrices d'espace et les dispositifs actuels de stockage de l'électricité peuvent être polluants. Les nuisances relatives à la production d'électricité à partir d'éoliennes sont de mêmes natures que celles relatives aux panneaux solaires, mais pas du même ordre, les panneaux solaires étant plus difficiles à recycler. Si le traitement en fin de vie des batteries est fortement polluant, les « smart grids⁴ » apparaissent comme une solution prometteuse pour régler le problème de la production intermittente de ces deux énergies renouvelables.

Tableau 1. Principaux impacts environnementaux des sources d'énergie d'après Mérenne-schoumaker (2011) (incidence : +faible ++importante +++très importante)

	Occupation d'espace	Déchets	Pollution de l'eau et des sols	Déforestation	Emissions de GES	Pluies acides	Faune et flore	Occupation d'espace
Biomasse			+++	+++	+++			
Combustibles fossiles			+++		+++	+++		
Eolien	+	+						+
Géothermie	+	+						+
Hydroélectricité	+++		++				+++	+++
Nucléaire		+++	+					
Solaire	+	+						+

Selon l'AIE (2012b), « les besoins en eau pour la production énergétique sont appelés à croître deux fois plus rapidement que la demande énergétique ». En effet, l'eau est essentielle à la génération d'électricité, à l'extraction, au transport et au traitement du pétrole, du charbon et du gaz mais aussi à la culture des biocarburants. La disponibilité et la qualité (température de l'eau utilisée pour le refroidissement des centrales nucléaires) de la ressource en eau pourraient devenir des facteurs limitant la production énergétique en plus d'être source de conflits.

C'est donc une véritable « révolution » que l'humanité doit mettre en œuvre de manière à, d'une part sécuriser l'approvisionnement énergétique et l'accessibilité des ressources malgré des prix en constante augmentation, et d'autre part assurer des conditions de production et d'utilisation respectueuses de l'environnement et peu émissives en carbone (AIE, 2008). Selon J-M Chevalier (Chevalier, 2004), ce sont six grandes batailles qui doivent être menées pour assurer une gestion durable de l'énergie mondiale:

⁴ Grâce aux nouvelles technologies de l'information et de la communication, il est possible de rendre les réseaux électriques communicants. Ces réseaux intelligents, « smart grids » ont la capacité d'être pilotés en temps réel et ainsi d'adapter la production à la consommation. Ils permettent ainsi de gérer l'intermittence de la production des énergies renouvelables et la multiplicité des unités de production. Les consommateurs devenant également producteurs, le transport de l'électricité se fait donc en bidirectionnel. Pour plus d'information, se rendre sur le site internet de la Commission de Régulation de l'Energie dédié aux « smart grids » : <http://www.smartgrids-cre.fr/>

- mesurer et prendre en compte les coûts sociaux et environnementaux associés à chaque forme d'énergie ;
- faire de l'efficacité énergétique une priorité politique internationale ;
- réduire les émissions de GES ;
- mettre l'énergie au service du développement économique et de la réduction des inégalités ;
- responsabiliser les acteurs ;
- renforcer la gouvernance mondiale et inventer de nouvelles formes de régulation.

1.2. LES POLITIQUES ENVISAGEES EN REPONSE A LA CRISE ENERGETIQUE ET CLIMATIQUE

Deux types de politique peuvent être mis en place face au réchauffement climatique : l'atténuation (mitigation) et l'adaptation. Cependant, « ni l'adaptation ni l'atténuation ne permettront à elles seules, de prévenir totalement les effets des changements climatiques (degré de confiance élevé). Les deux démarches peuvent toutefois se compléter et réduire sensiblement les risques encourus » (GIEC, 2007). De nombreux effets du changement climatique peuvent être diminués, différés ou même évités à condition que des efforts et des investissements importants soient réalisés rapidement.

Selon Kaya (1990), les émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont liées à quatre facteurs : l'intensité carbone de l'énergie consommée⁵, l'intensité énergétique⁶, le PIB per-capita et la population mondiale. Ainsi lutter contre le changement climatique revient à agir sur chacun de ces facteurs (Treiner, 2010). Pour diminuer l'intensité carbone plusieurs pistes peuvent être envisagées : le développement des énergies renouvelables, les économies d'énergie, la captation et l'enfouissement du gaz carbonique. La réduction de l'intensité énergétique peut être attendue du progrès technologique, comme cela a été fait par exemple sur l'électroménager, mais également d'une diminution des besoins énergétiques. Si réduire le PIB per-capita n'est pas à l'ordre du jour des politiques actuelles, des auteurs tels que Dennis L. Meadows, Nicholas Georgescu-Roegen, Serge Latouche remettent en cause le principe de croissance économique en défendant l'idée d'une croissance nulle ou de la « décroissance ». Sans rentrer dans ce débat, il nous paraît nécessaire de mettre en avant la contradiction entre le confort des modes de vie occidentaux que nous souhaitons préserver et que d'autres populations souhaitent atteindre d'une part et la nécessité de lutter contre le changement climatique et maîtriser la demande en énergie. Le malthusianisme ne fait pas non plus partie des politiques envisageables. Selon les prévisions, la population mondiale devrait continuer de croître pour atteindre un total compris entre 8 et 10 milliards d'habitants (Pison, 2011). Les deux enjeux majeurs de la lutte contre le changement climatique sont donc la diminution de l'intensité carbone et de l'intensité énergétique. Selon l'IEA (2012b), pour limiter l'augmentation de la température globale de la planète à 2°C comme le recommande le GIEC, il est nécessaire de limiter la consommation mondiale d'énergies fossiles d'ici à 2050 à un tiers des réserves prouvées à moins que ne soient déployés à grande échelle le captage et le stockage du carbone.

Depuis l'Appel de la Haye de 1989, la communauté internationale a pris conscience du risque climatique et tente de mettre en place un cadre d'actions acceptables par tous. En 1992, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques a établi les principes clés de la lutte contre le changement climatique à échelle internationale. L'objectif était de « stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du

⁵ Rapport entre les émissions de GES et l'énergie consommée

⁶ Rapport entre la consommation en énergie et le produit intérieur brut

système climatique» (article 2 de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 1992). Cette convention a instauré le principe des «responsabilités communes mais différenciées», qui reconnaît la responsabilité historique des pays industrialisés dans le réchauffement climatique comparée aux pays actuellement en développement. Les pays ayant participé à l'écriture de cette convention se réunissent tous les ans depuis 1995. Le protocole de Kyoto signé en 1997 et entré en vigueur en 2005 complète la Convention-cadre en fixant des engagements de réduction des GES pour chacune des parties. Les négociations pour donner suite au protocole de Kyoto se révèlent particulièrement difficiles comme l'a montré l'échec particulièrement médiatisé de la conférence de Copenhague.

Fin 2008, l'Union Européenne a adopté «le paquet énergie-climat» (ou «bouquet énergie-climat»), c'est-à-dire un ensemble de règlements et directives répondant à l'objectif des «trois fois vingt»: d'ici à 2020, l'UE s'est engagée à réduire de 20% ses émissions de gaz à effet de serre par rapport au niveau d'émissions de 1990, à améliorer son efficacité énergétique de 20% et à porter à 20% la part d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale.

La France, qui a signé le protocole de Kyoto, s'est engagée à maintenir ses émissions de GES au niveau de 1990. Pour répondre à ses engagements, elle s'est dotée en 2000 d'un Programme National de Lutte contre le Changement Climatique (PNLCC). Les secteurs de l'industrie, des transports, du bâtiment, de l'agriculture et de l'industrie des gaz frigorigènes sont concernés par les mesures et actions préconisées par le programme. Il est par exemple prévu d'accentuer l'effort sur la production d'énergies renouvelables, sur l'offre d'infrastructures de transports en commun, l'amélioration de la tarification des déplacements urbains et de programmer à long terme les actions de réglementation des bâtiments. En 2000, le Programme National d'Amélioration de l'Efficacité Énergétique (PNAEE) propose d'accélérer la mise en œuvre des plans de déplacements urbains (incitation à l'achat de véhicules propres et développement du fret ferroviaire) et le développement des énergies renouvelables (augmentation du tarif de rachat de l'électricité d'origine éolienne). Afin d'améliorer la performance thermique des bâtiments, le programme prévoit une nouvelle réglementation et un système de financement des réhabilitations. Depuis 2003, la France s'est engagée à diviser par quatre ses émissions de GES d'ici à 2050 par rapport à 1990, en les diminuant de 3% par an en moyenne. C'est l'objectif de «facteur 4».

En juillet 2007, le gouvernement a lancé le «Grenelle de l'environnement», un débat entre l'Etat, les collectivités locales, les entreprises, les syndicats et les ONG (organisations non gouvernementales) dans le but de construire une politique de développement durable. Les débats ont été organisés autour de six thématiques (changement climatique et maîtrise de la demande énergétique, préservation de la biodiversité et des ressources naturelles, environnement et santé, modes de production et de consommation durables, démocratie écologique, modes de développement écologique favorables à l'emploi et la compétitivité). Ce processus de consultation a permis de mettre en évidence la nécessité d'une approche territoriale de la politique énergétique (Chanard, 2011). De ces négociations ont émergé deux lois, une loi de programme dite loi Grenelle 1 adoptée le 17 juin 2009 et une loi «engagement national pour l'environnement» dite loi Grenelle 2 adoptée l'année suivante. Un ensemble de dispositifs de politique publique devant permettre la mise en œuvre des engagements du Grenelle est né de la loi Grenelle 2. Nous détaillerons dans le [CHAPITRE 3](#) les différents outils créés pour assurer une action urbaine en phase avec les préoccupations énergétiques et climatiques.

Plus que réduire les émissions carbonées des usages de l'énergie, l'association Négawatt propose un scénario de transition énergétique pour la France mettant notamment en avant l'enjeu de la sobriété énergétique (Négawatt, 2011) : Il faut avant tout interroger les comportements énergétiques individuels et collectifs, l'utilité de chacun des usages de l'énergie pour identifier les gisements d'économie, avant de chercher des solutions techniques plus performantes. Une fois les besoins énergétiques réduits, il s'agit de produire une énergie propre et décarbonée en encourageant le recours aux énergies renouvelables. Les trois mots d'ordre de la démarche Négawatt sont donc « sobriété, efficacité et renouvelables ». Les services énergétiques considérés dans le scénario regroupent la chaleur (chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson, processus industriels), la mobilité (déplacements de personnes, de matières premières et de biens) et l'électricité spécifique (éclairage, électroménager, informatique, bureautique et moteurs électriques). Selon ce scénario, il serait possible de diviser les émissions de CO₂ par deux en 2030 et par seize en 2050. En appliquant les principes de sobriété et d'efficacité énergétique, l'énergie nécessaire pour satisfaire les besoins de la société française pourrait être divisée par 2,2 environ d'ici à 2050, comme le montre la Figure 1. La demande en énergie pourrait diminuer de près de 500TWh grâce à la sobriété énergétique (zone couleur orange sur le graphique), et d'environ autant grâce à des actions augmentant l'efficacité de la consommation (zone couleur crème) et d'environ 700TWh avec une production énergétique plus efficace (zone beige).

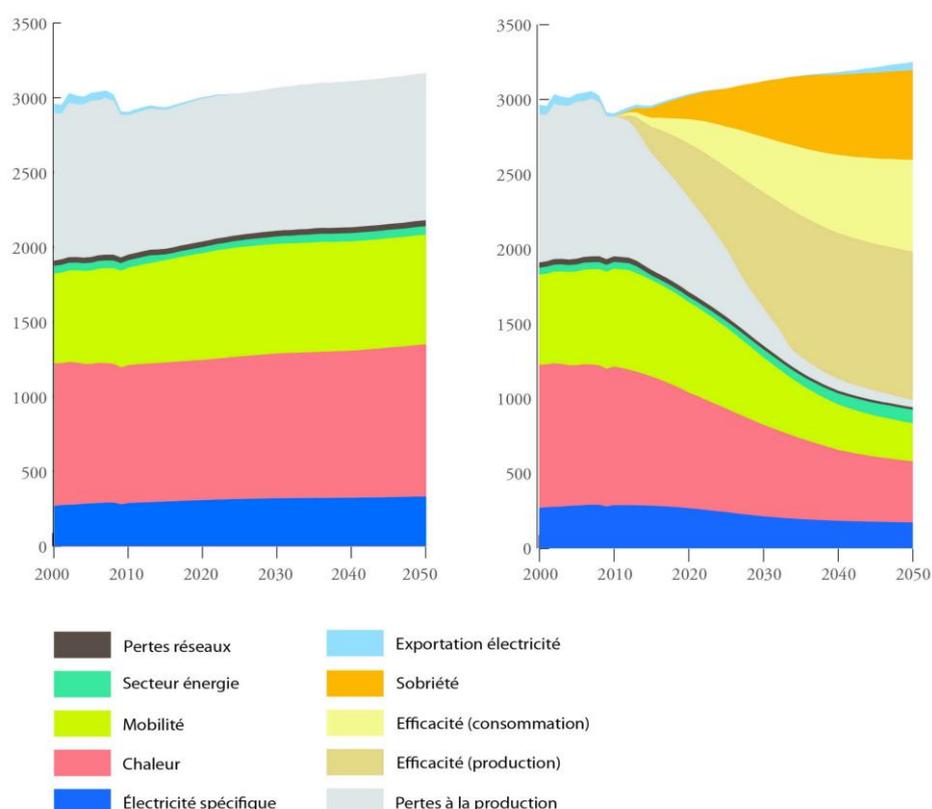


Figure 1. Evolution des consommations énergétiques finales par usages suivant les scénarios tendanciel (à gauche) et négawatt (à droite) en TWh (source Negawatt, 2011)

L'efficacité énergétique⁷ fait aussi partie des scénarios envisagés par l'AIE. Bien qu'encore sous exploitée, l'efficacité énergétique apparaît comme une action incontournable pour l'ensemble des

⁷ L'efficacité énergétique est définie par le [Secrétariat général du débat national sur la transition énergétique \(2013\)](#) comme le « rendement énergétique d'un processus ou d'un appareil par rapport à son apport en énergie. Pour un

décideurs politiques (AIE, 2012b). La place de l'énergie nucléaire dans les scénarios est l'un des points les plus débattus par les experts et les politiques, notamment depuis l'accident de Fukushima. Si les propositions du groupe de travail Terra Nova partagent la volonté d'agir sur la demande en énergie dans l'ensemble des secteurs et en priorité dans le bâtiment et les transports, elles ne préconisent pas une sortie rapide du nucléaire (Grandjean et al., 2011). Outre le débat idéologique, la remise en cause de la production nucléaire pose la question de la décentralisation du réseau électrique, étape essentielle au développement des énergies renouvelables et de la cogénération (cf. chapitre 2, section 1.2).

Un débat national sur la transition énergétique s'est ouvert en mars 2013 à l'initiative du gouvernement, rassemblant représentants de l'Etat, organisations non gouvernementales, syndicats, entreprises et les citoyens. A l'issue de ce débat, une loi de programmation sur la transition énergétique est attendue courant 2014. Les quatre questions structurantes du débat sont les suivantes :

- « 1. Comment aller vers l'efficacité énergétique et la sobriété ? L'évolution des modes de vie, de production, de consommation, de transport ainsi que des services énergétiques nécessaires doit constituer le point de départ.
 - 2. Quelle trajectoire pour atteindre le mix énergétique en 2025⁸ ? Quel type de scénarii possibles à horizon 2030 et 2050, dans le respect des engagements climatiques de la France ?
 - 3. Quels choix en matière d'énergies renouvelables et de nouvelles technologies de l'énergie et quelle stratégie de développement industriel et territorial ?
 - 4. Quels coûts, quels bénéfices et quels financements de la transition énergétique ? »
- (Secrétariat général du débat national sur la transition énergétique, 2013).

Ainsi, le gouvernement français a fixé comme objectif d'améliorer l'efficacité énergétique, a fait le choix de la sobriété et a décidé de réduire à 50% la part du nucléaire dans le mix énergétique français en 2025. A défaut de se mettre d'accord sur des propositions, les membres du Conseil National du Débat sur la Transition Energétique ont soumis une synthèse des débats. Quinze enjeux indispensables à la tenue de cette transition ont été listés. L'ambition de cette nécessaire transition a été précisée, celle-ci doit concerner l'ensemble des citoyens en luttant en priorité contre la précarité énergétique. L'efficacité énergétique ainsi que la sobriété ont été reconnues comme des moyens à intégrer dans le modèle de croissance de la France, de manière à créer des emplois et à dynamiser les territoires. Les secteurs du bâtiment et des transports devront être majoritairement concernés par ces actions. Les ressources énergétiques devront être diversifiées et donc les énergies renouvelables développées de manière à produire des énergies faiblement émettrices en GES et renforcer l'indépendance énergétique de la France. Pour assurer la réalisation de la transition énergétique, les compétences des territoires devront être étendues.

appareil électroménager par exemple, une bonne efficacité énergétique se définit comme une consommation en énergie moindre pour le même service rendu ».

⁸ Le mix énergétique visé par le gouvernement en 2013 pour la France en 2025 comprend la réduction de 75 à 50% de la part de l'énergie nucléaire en faveur des énergies renouvelables.

En définitive, mettre en marche la transition énergétique apparaît comme une nécessité pour garantir un futur énergétique plus soutenable, plus solidaire et lutter contre le changement climatique. Si la mise en œuvre d'actions d'amélioration de l'efficacité énergétique pour la consommation et la production fait de plus en plus consensus, la modification des modes de vie et le recours au nucléaire font encore débat. Ce qui est certain, c'est que les secteurs du bâtiment (résidentiel et tertiaire) et des transports qui sont les plus émetteurs possèdent les gisements d'économies les plus importants. C'est donc sur ces deux secteurs que les efforts doivent être concentrés si la France souhaite respecter ses engagements de réduction des émissions (Grenier, 2007). Développer la part des besoins énergétiques couverts par les énergies renouvelables constitue un autre levier important pour réduire la dépendance de notre société aux énergies fossiles et lutter contre le changement climatique.

2. LA TRANSITION ENERGETIQUE DES VILLES : UNE QUESTION COMPLEXE

2.1. LES ENJEUX DE L'ENERGIE EN VILLE

Plus de la moitié de la population mondiale habite désormais en milieu urbain (54% en 2014), et cette tendance devrait continuer à croître dans les décennies à venir, puisque selon les projections des Nations Unies les deux tiers de la population mondiale devraient être urbains en 2050 (United Nations, 2014). La ville est un espace construit concentrant populations et activités diverses, notamment des activités d'échanges. C'est également un centre politique et administratif. « La ville naît fondamentalement des fonctions d'échange, de confrontation ou de rencontre collective » (Merlin & Choay, 2009). Les agencements (spatiaux) des éléments matériels et immatériels, les configurations et la situation qui en résulte caractérisent les villes (Lévy & Lussault, 2003). Comme l'écrit Vilmin (2008), « la ville est un système ouvert sur l'extérieur [...] qui subit de fortes influences de son environnement naturel (pollutions de l'eau et de l'air, caprices du climat, catastrophes naturelles comme les inondations, etc.) et humain (actions de l'Etat, du Département, de la Région, des entreprises et autres acteurs socio-économiques nationaux et multinationaux) ». Il existe de nombreuses définitions de la ville, c'est un écosystème complexe dont les limites sont parfois floues. Nous retiendrons que la ville se caractérise par une concentration spatiale de population et d'activités économiques, politiques et culturelles. Les fonctions résidentielles-tertiaires et les mobilités sont très fortement concentrées en milieu urbain et péri-urbain (Antoni, Flety, & Vuidel, 2009).

Les villes concentrent donc une grande part des échanges énergétiques. Selon les chiffres de l'AIE (2008), plus de deux tiers de la consommation énergétique mondiale a lieu en zone urbaine. L'urbanisation continuant à prendre du terrain, la part des villes dans la consommation énergétique mondiale devrait continuer à croître. Les habitants des villes consomment plus de charbon, de gaz et d'électricité que la moyenne des habitants de la planète mais un peu moins de pétrole (AIE, 2008). Toutefois, la consommation énergétique per capita en ville est inférieure à la moyenne nationale en Europe, aux Etats-Unis et en Australie.

Si les énergies fossiles et notamment le pétrole ont permis aux villes de croître dans la seconde moitié du vingtième siècle, elles sont à l'origine d'une double problématique : d'une part, l'approvisionnement énergétique des villes peut être mis à mal par la raréfaction des ressources et l'augmentation des prix qui en résulte et d'autre part, l'utilisation des énergies fossiles constitue en ville une source de pollution atmosphérique (ozone et particules fines notamment) et sonore, en plus de contribuer au dérèglement climatique (Droege, 2008). L'importante consommation d'énergies fossiles en ville peut conduire à des pics de pollution, notamment en hiver par beau temps en raison de la concentration des émissions de

particules fines issue des équipements de chauffages et des automobiles (diesel). La qualité de l'air en milieu urbain constitue donc un réel enjeu de santé publique (allergies respiratoires, asthme, cancer). Les villes contribuent largement au changement climatique en émettant 73% des émissions de CO₂ (AIE, 2008). Par ailleurs les villes sont vulnérables aux changements climatiques (Droege, 2008). Elles risquent effectivement d'être directement touchées par la diminution de la ressource en eau potable, mais sont aussi exposées au risque d'inondation du fait de leur localisation et de l'imperméabilisation de leur sol. Les *Groupes de travail I et II du GIEC (2012)* estiment avec un degré de confiance élevé que « le type d'habitat, l'urbanisation et l'évolution des conditions socio-économiques ont contribué aux tendances observées de l'exposition et de la vulnérabilité aux extrêmes climatiques » (*Groupes de travail I et II du GIEC, 2012, p. 6*). Si les villes sont vulnérables aux phénomènes météorologiques extrêmes (cyclones, ouragans, tsunami), l'augmentation à long terme de l'activité cyclonique dans les zones tropicales du fait du changement climatique ne demeure, en l'état des connaissances actuelles, qu'une hypothèse (*Groupes de travail I et II du GIEC, 2012*). Il en est de même pour l'augmentation de l'ampleur et de la fréquence des crues imputable au climat.

Les villes constituent donc des cibles clés de la transition énergétique, mais elles pourraient aussi devenir l'un des moteurs essentiels (Rutherford & Coutard, 2014), à travers le développement des énergies décarbonées et la maîtrise de la demande en énergie (Shah & Keirstead, 2013). La transition énergétique représente en ville un défi à la fois pour la culture, la communauté et la civilisation, mais aussi pour les institutions, les politiques et l'action publique (Droege, 2008).

Les bâtiments résidentiels et tertiaires ainsi que les transports sont responsables de la grande majorité de la consommation en énergie finale des villes : à Londres, par exemple, en 2000, 61% de l'énergie finale a été consommée par le résidentiel et le tertiaire, et 28% par les transports (Steemers, 2003). Maîtriser la demande en énergie dans le secteur du bâtiment suppose d'identifier les postes de consommations énergétiques les plus importants. Le chauffage est le premier poste de consommation énergétique des bâtiments résidentiels, il représente en France 61,3% de la consommation totale en énergie finale (ADEME, 2013). Les usages spécifiques de l'électricité constituent le deuxième poste de consommation (19,5%) devant la production d'eau chaude sanitaire (12,1%) et la cuisson (7%). Dans les bâtiments tertiaires⁹, le chauffage est également le premier poste de consommation énergétique, représentant en France en moyenne 57,8% de la consommation totale (ADEME, 2013). Il nous est apparu difficile de trouver des chiffres détaillant les consommations énergétiques unitaires des bâtiments tertiaires précisant les autres postes que le chauffage. Selon Steemers (2003), le premier poste de consommation¹⁰ en énergie primaire des bâtiments de bureaux (et non des bâtiments tertiaires au sens large) au Royaume-Uni est l'éclairage (entre 34% et 47% de l'énergie totale suivant si les bâtiments sont climatisés ou non), puis vient le chauffage ou la ventilation. Lorsqu'un bâtiment de bureaux est climatisé, l'énergie primaire consacrée à la climatisation représente 14% de la consommation totale et la part relative à la ventilation augmente (Steemers, 2003). Il semble que le taux de climatisation des bâtiments tertiaires en France diminue, mais les surfaces rafraîchies augmentent de manière spectaculaire (+136% entre 2011 et 2012) (ADEME, 2013). Il paraît délicat de comparer les chiffres sur les consommations des bâtiments français aux chiffres concernant les bâtiments de bureaux londoniens, dans la mesure où des méthodes de calcul visiblement différentes

⁹ Dans les statistiques françaises, les bâtiments tertiaires comprennent les bâtiments de l'ensemble des branches du tertiaire, c'est-à-dire l'enseignement, l'habitat communautaire, les sports, la santé, les commerces, les cafés, hôtels et restaurants, les bureaux et les transports.

¹⁰ Notons que les consommations spécifiques d'électricité (bureautique notamment) ne sont pas ici prises en compte.

ont été employées. Il faudrait décomposer ces méthodes pour comprendre les différences de conclusion auxquelles elles amènent. Si la fabrique urbaine ne peut pas jouer sur l'énergie consommée pour la cuisson ni sur les usages spécifiques de l'électricité (électroménager, informatique, etc.), elle doit en revanche pouvoir intervenir sur les besoins en chauffage et en climatisation, ainsi que sur les besoins en éclairage.

Outre les sources de consommations d'énergie, il est nécessaire de connaître les émissions de GES associées aux différentes activités d'une ville pour déterminer une stratégie de lutte contre le changement climatique. Réalisé en 2007, le bilan carbone de Paris a permis d'évaluer les émissions globales de CO₂ de la capitale. Le bilan carbone visible à la Figure 2 présente les émissions du territoire parisien en dehors des émissions relatives à la venue de visiteurs. Les visiteurs sont d'importants émetteurs de GES, les émissions associées à leur venue en 2009 étaient égales à 4 154 200 tonnes équivalent carbone (Mairie de Paris & Bilan Carbone, 2011). Ces émissions sont majoritairement dues aux déplacements en avion des visiteurs (76% environ). Hors visiteurs, les émissions du territoire parisien sont principalement dues au transport de marchandises (fret routier, ferroviaire, fluvial et aérien), au transport de personnes, au bâtiment (résidentiel et tertiaire) et enfin à l'alimentation. Les émissions du transport de personnes couvrent les déplacements liés à la mobilité quotidienne en voiture personnelle, en transports collectifs et en taxis, mais aussi les déplacements des parisiens en avion et en hélicoptère. Mises ensemble, les émissions relatives à la consommation énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires et celles liées à la construction des bâtiments et des infrastructures routières représentent 23% du bilan carbone du territoire parisien hors visiteurs.

Découpage "Postes ADEME"

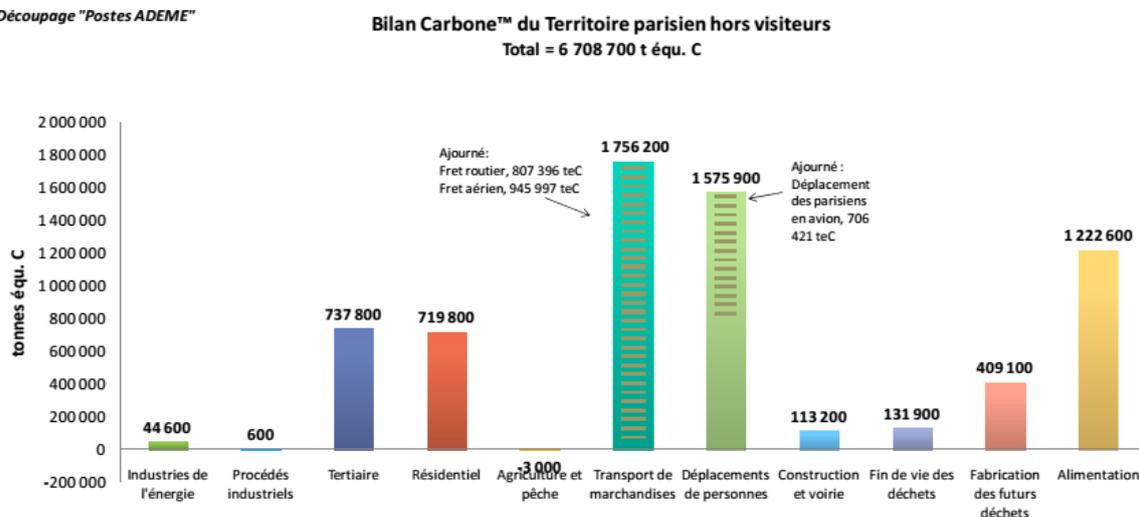


Figure 2. Bilan carbone du territoire parisien hors visiteurs (Mairie de Paris & Bilan Carbone, 2011)

Parce que les villes sont des « espace[s] construit[s] et à construire qui, dans le temps, structure[nt], transforme[nt], développe[nt] le territoire, organise[nt] la vie des hommes et le déploiement des activités, répond[ent] aux besoins en logements, en transports, en travail, en culture, en loisirs, en éducation » (Arab, 2007b), il est primordial qu'elles anticipent ces contraintes énergétiques et climatiques en les intégrant dans leurs modes de production et de renouvellement.

Rutherford & Coutard (2013) rappellent que depuis la première révolution industrielle, les villes se sont développées en exploitant les énergies fossiles, alors largement disponibles et peu chères. Au fur et à mesure de la croissance des villes, les sources d'énergies les approvisionnant se sont éloignées,

l'énergie étant transportée à travers d'importants réseaux de transport « invisibles » de la source aux consommateurs urbains. Avec l'apparition des panneaux solaires et des éoliennes, les unités de production énergétique sont réintroduites en milieu urbain et deviennent visibles.

Dans un contexte de crise énergétique et climatique, la fabrique de la ville doit donc se renouveler pour se tourner vers de nouvelles formes, de nouveaux modes d'habiter et de nouveaux modes de se déplacer. Imaginer de nouveaux modes de production et de distribution de l'énergie doit également participer à la transition énergétique des villes.

2.2. LA TRANSITION ENERGETIQUE DES VILLES : UNE PROBLEMATIQUE DE DEVELOPPEMENT DURABLE

Selon Rutherford (2013, p. 1), « L'organisation spatiale des villes et des infrastructures, les modes de vie urbains et les pratiques quotidiennes sont remis en question [par la transition énergétique]. L'ensemble de ces logiques a des conséquences économiques, sociales et environnementales potentiellement perturbatrices qui doivent être prises en compte ». Du fait de ses incidences nombreuses et variées aussi bien en matière sociale, économique, culturelle, qu'en matière d'environnement ou de gouvernance, l'énergie peut être considérée comme une problématique de développement durable (cf. Figure 3).

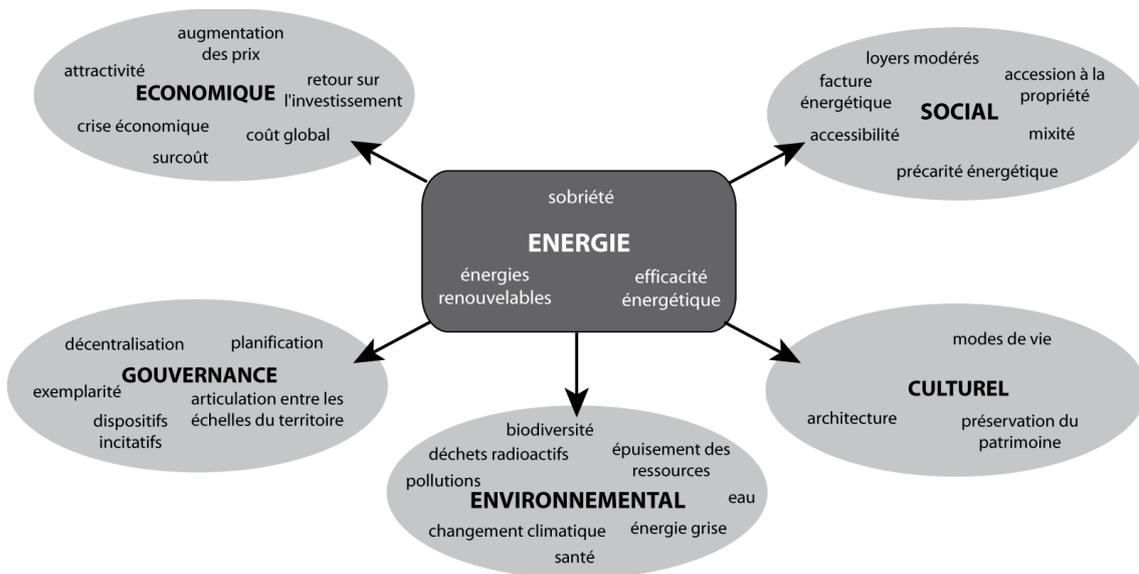


Figure 3. L'énergie, une problématique de développement durable

Les conséquences environnementales de la production, du transport et de la consommation de l'énergie sont nombreuses et variées comme nous l'avons vu dans la section précédente. Faire des économies d'énergie dans le secteur des transports et du bâtiment doit donc être réalisé dans le respect de l'environnement et de la santé humaine. Il ne faut pas dissocier les enjeux de l'énergie et du climat des autres enjeux environnementaux de pollution ou d'extinction de la biodiversité par exemple. Puisque la maîtrise de la demande de l'énergie dans le secteur du bâtiment amène à choisir des matériaux ayant une meilleure résistance thermique, il est nécessaire de ne pas le faire au défaut de leur qualité environnementale. Les analyses de cycle de vie constituent un bon moyen de mesurer

l'ensemble des impacts environnementaux d'un matériau ou d'un bâtiment et ainsi faire des choix de conception éclairés sur le plan écologique. D'un point de vue économique, la transition énergétique peut aujourd'hui nécessiter des investissements supplémentaires avec des temps de retour parfois longs. Il s'agit alors de privilégier des intérêts non économiques, bien que la crise économique soit actuellement une réalité. Par ailleurs, la transition énergétique ne doit pas accentuer les inégalités et préserver l'accès à tous aux services rendus par l'énergie : « ce sont les ménages les plus fragiles économiquement, ceux qui sont contraints d'aller chercher un foncier peu cher, loin des villes, qui n'ont pas les moyens d'acquérir les voitures les plus performantes qui souffrent déjà de l'enchérissement de l'énergie. Le défi environnemental rejoint le défi social » (Grenier, 2007, p. 136). Selon la définition retenue dans la loi du 12 juillet 2010, un ménage est en situation de précarité énergétique lorsqu'il présente une « difficulté à disposer de la fourniture d'énergie nécessaire à la satisfaction de ses besoins élémentaires en raison de l'inadaptation de ses ressources ou de ses conditions d'habitat » (ADEME, 2013, p. 46). En 2006, 14,4% des ménages français étaient en situation de précarité énergétique, soit 6 700 000 individus (chiffres de l'ONPE in ADEME, 2013). L'aménagement du territoire peut remettre en question l'utilisation de l'automobile individuelle au nom de la lutte contre le changement climatique, il doit assurer l'accès au plus grand nombre à la mobilité quotidienne indispensable à la vie économique, sociale et culturelle d'une ville (Chanard, 2011; Desjardins, 2011). Hui (2001) considère qu'il est nécessaire de ne pas isoler la question des économies d'énergies des problématiques environnementales et sociales. D'autant que les études énergétiques seraient l'occasion d'analyser la qualité de l'environnement extérieur et intérieur des bâtiments. L'exemple de la qualité de l'air intérieur est à ce titre révélateur. En effet, il serait problématique que les campagnes actuelles de réhabilitation énergétique des bâtiments existants ne prennent pas en compte les préconisations sur la qualité de l'air lors du choix des matériaux. La problématique de l'énergie en ville soulève également des enjeux culturels. Culturels, dans le sens où l'amélioration de la performance énergétique doit respecter le caractère patrimonial et l'esthétique du bâti existant. L'enjeu suppose également de sensibiliser les citoyens des villes dont les cultures et modes de vie sont divers et variés, à des comportements énergétiquement plus sobres.

Enfin, la mise en œuvre d'une politique énergétique locale en faveur des économies d'énergie et du développement des énergies renouvelables suppose de créer des conditions de gouvernance territoriale adéquates. Il paraît nécessaire que cette politique soit cohérente d'un échelon territorial à l'autre et que le caractère trans-sectoriel de la problématique énergétique puisse être respecté. Comme l'explique Chanard (2011, p. 53) :

« Un projet de ville écologique économe en énergie demande une réflexion multi-échelle et multi-sectorielle. De la construction technique des bâtiments à la localisation des différentes activités en passant par l'organisation des réseaux de transport et la production d'énergies renouvelables, tout doit être mis en balance. Cette adéquation entre structure urbaine, usages énergétiques, énergie produite et distribuée est évidemment beaucoup plus commode à envisager dans une ville nouvelle ou un nouveau quartier sans contrainte héritée, mais la démarche doit valoir pour la ville dans sa globalité structurelle et fonctionnelle ».

Parce que la problématique de l'énergie en ville est plurielle, il nous paraît important de ne pas la réduire à un enjeu de réduction des besoins énergétiques. Il est nécessaire d'aborder la transition énergétique des villes comme une question plurisectorielles et multi-échelles. Les actions mises en œuvre doivent donc s'inscrire dans une logique de développement durable, dans toute sa complexité.

2.3. DES SYSTEMES ENERGETIQUES URBAINS COMPLEXES

La ville et son fonctionnement énergétique forment donc un système complexe. Selon [Keirstead \(2013\)](#), il existe trois types de représentation physique des systèmes énergétiques urbains comme le montre la [Figure 4](#). Le premier est le modèle thermodynamique. Celui-ci considère les flux d'énergie et de matières entrant dans la ville et transformés en son sein pour produire du travail et inévitablement des déchets. Ces processus de transformation de l'énergie sont régulés par les deux premiers principes de la thermodynamique. Le premier principe stipule que lors d'une transformation d'un système fermé, l'énergie est conservée, l'énergie interne du système étant échangée avec le milieu extérieur sous forme de chaleur et de travail. Selon le second principe, l'entropie (le désordre) augmente lors de la transformation d'un système thermodynamique. Le second type de modèle est fondé sur une analogie du fonctionnement de la ville avec l'activité métabolique des organismes vivants. Selon cette vision, la ville ingère des ressources qui circulent sur l'ensemble de son territoire selon des réseaux de distribution pour les utiliser avant d'en rejeter les déchets. Analyser le métabolisme urbain revient par conséquent à identifier les flux de matières entrants et sortants de la ville, ceux qui y sont stockés et l'ensemble des transformations subies par ces flux à l'intérieur du système urbain ([Barles, 2007](#)). Le troisième mode de représentation consiste à considérer la ville et ses systèmes énergétiques comme un système complexe, c'est-à-dire fait d'un grand nombre de composants reliés entre eux de multiples manières, plus ou moins directement. Chacune de ces visions permet de mettre en évidence des caractéristiques importantes des systèmes énergétiques urbains :

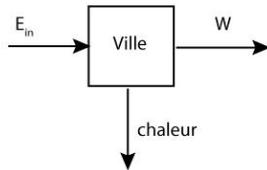
“First, the structure of urban energy systems emerges from the bottom-up. The activities of individual citizens create demands for energy services, which then require complex infrastructures in order to supply them. This sets up the dynamic of urban metabolism, the city importing energy resources and expelling wastes in order to maintain order and function. The laws of thermodynamics can be seen to govern these processes, for example, highlighting the open nature of the urban boundary and the inexorable loss of energy, or energy quality, along the steps of the energy system” ([Keirstead, 2013, p. 20-21](#)).

S'inspirant de la définition d'un système énergétique de [Jaccard](#), [Keirstead \(2013\)](#) propose de définir un système énergétique urbain comme « the combined processes of acquiring and using energy to satisfy the energy service demands of a given urban area », c'est-à-dire comme l'ensemble des processus d'acquisition et d'utilisation de l'énergie nécessaire pour satisfaire les besoins en services énergétiques d'une zone urbaine donnée.

Outre le fonctionnement énergétique de la ville, les interactions entre sa réalité physique (localisation, formes urbaines, matérialité, etc.) et les flux énergétiques, il ne faut pas négliger l'incidence de ses habitants sur les systèmes énergétiques. En effet, une grande variété d'acteurs participe au comportement énergétique du milieu urbain : usagers consommateurs, décisionnaires, industriels, gestionnaires de réseaux, etc. De ce fait, « Les besoins et les choix (par exemple, le confort), les usages et les comportements variés de ces derniers sont à la fois la source et le résultat de la complexité et la spécificité des systèmes énergétiques et de leurs reconfigurations » ([Rutherford, 2013, p. 3](#)). [Grenier \(2007\)](#) partage l'idée selon laquelle la diversité des acteurs concernés par la question de l'énergie en ville (Etat, entreprises, collectivités locales, usagers...) en renforce la complexité. Au vu de la complexité du système urbain, [Maizia, \(2002\)](#) estime « qu'il est actuellement impossible de proposer un modèle de système urbain intégré qui reconstituerait l'ensemble des articulations existant entre toutes les

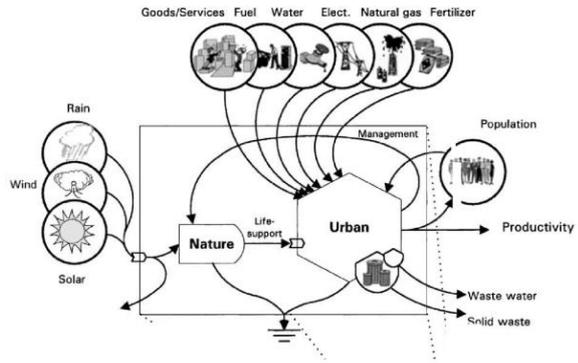
phénoménologies concernant l'environnement et entre toutes les caractéristiques physiques et socio-économiques de l'urbain ». (Maizia, 2002, p. 8).

MODELE THERMODYNAMIQUE



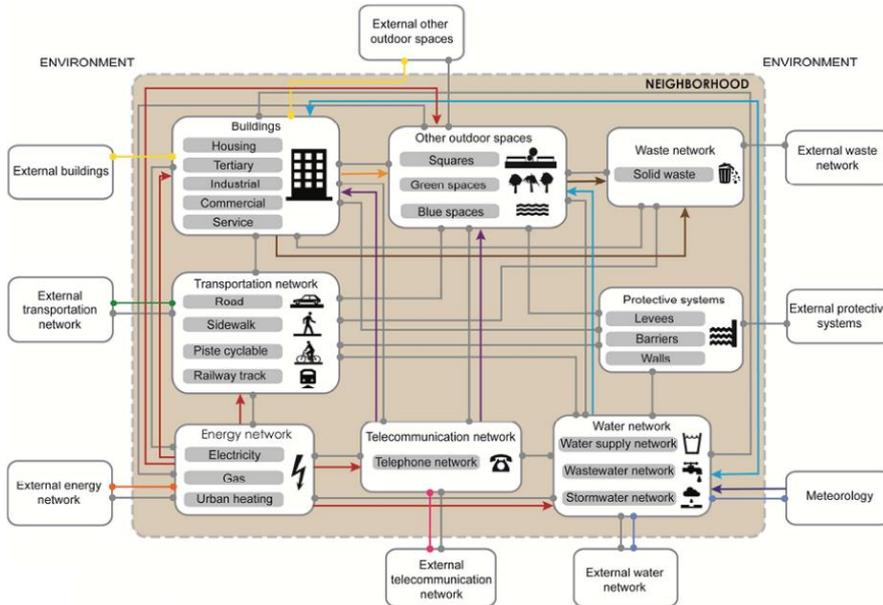
Source: Keirstead, 2013

MODELE METABOLIQUE



Source: Huang et al., 2001

MODELE SYSTEMIQUE



Source: Balsells et al., 2013

Figure 4. Illustrations des trois modes de représentation physique des flux énergétiques en ville

La complexité relative au milieu urbain et son influence sur la nature et la forme des systèmes énergétiques sont encore trop négligées par les acteurs en charge de ces systèmes (Rutherford & Coutard, 2014). Ceux-ci considèrent généralement la ville simplement comme le dernier maillon de la chaîne d’approvisionnement en énergie, en négligeant toute la complexité du système énergétique urbain. Si les recherches relatives à l’énergie commencent à prendre en compte les spécificités du milieu urbain, l’inverse est encore exceptionnel. En effet, Rutherford & Coutard (2013) ont remarqué à partir d’une recherche par mots clés dans les revues *Urban Studies* et *Energy policy*, qu’un grand nombre de publications en politique énergétique portent sur le milieu urbain et ses spécificités, alors que rares sont les publications sur la ville en urban studies qui font référence à la question de l’énergie.

Selon Magnin (2010), les politiques énergétiques doivent considérer le système énergétique urbain dans toute sa complexité si elles veulent être efficaces : « un système urbain à basse consommation d’énergie, ce n’est donc pas une collection d’objets performants posés (bâtiments) ou roulant (véhicules) sur un territoire. C’est un ensemble complexe de relations entre de multiples objets ». Outre les caractères physiques du territoire, l’auteur comprend dans le système urbain l’organisation de ses fonctions par les autorités locales : « Les composantes de ce système s’appellent : planification urbaine, politique foncière, performance énergétique des bâtiments, accessibilité aux services et magasins, organisation de la mobilité, partage de l’espace public entre usagers divers, etc. ». Malheureusement, l’auteur remarque que les mesures mises en place par les collectivités s’apparentent souvent davantage à « une collection d’actions ponctuelles qu’à une politique coordonnée » (Magnin, 2010, p. 33).

En plus de devoir être considérée comme une problématique de développement durable, la réalisation de la transition énergétique ne doit pas négliger le caractère éminemment complexe du système énergétique urbain. Les interrelations entre les composantes du système énergétique urbain ne doivent donc pas être oubliées lors de la mise en œuvre d’actions en faveur de l’énergie ou du climat. Il est nécessaire d’avoir une vision systémique de la transition énergétique et non de mettre en place des actions isolées sur l’une ou l’autre des composantes du système. En d’autres termes, il faut avoir à l’esprit que « l’énergie est partout et [que] tout est énergie » (Souami et al., 2006).

3. LES LEVIERS D’AMELIORATION DE LA QUALITE ENERGETIQUE DES VILLES DANS LA LITTERATURE SCIENTIFIQUE

Poussées par la volonté d’optimiser la performance énergétique des villes dans un contexte de crise énergétique, de nombreuses études cherchent à identifier les points sur lesquels il est intéressant d’agir. Notre objectif dans cette partie est donc de mettre en évidence les principaux leviers d’actions reconnus par la communauté scientifique pour améliorer la qualité énergétique des zones urbanisées.

3.1. DENSIFIER LES VILLES : LA SOLUTION AUX ECONOMIES D’ENERGIE ?

Aujourd’hui, nombreuses sont les villes en Europe ou en Australie qui promeuvent la ville dense (Boyko & Cooper, 2011). Mais, la ville dense ainsi promue ne correspond pas toujours à la même réalité en raison du grand nombre d’indicateurs pouvant être utilisés. Les objets mesurés peuvent varier (densité bâtie, densité de population, densité des ménages) ainsi que l’unité considérée. Les termes ville dense et ville compacte sont parfois utilisés de manière indifférenciée, alors qu’ils désignent des objets différents. Pouyanne (2004) définit la ville compacte par opposition à la ville étalée, celle-ci se caractérise par de fortes densités et par la continuité de son urbanisation. La définition de Pouyanne correspond à ce qu’appellent Salat & Nowacki (2010) la compacité de l’agglomération, à ne pas

confondre avec la compacité d'un bâtiment ou d'un bloc urbain, qui elle, est définie par le rapport entre la surface d'enveloppe et le volume bâti. Par ailleurs, la densité est un concept de mesure de la distribution d'un objet dans l'espace (Duhayon, Pages, & Prochasson, 2002). Il est donc nécessaire de préciser l'objet considéré dans la mesure (les habitants, les logements, les bâtiments, les emplois, etc.) ainsi que la surface considérée (l'agglomération, la surface bâtie, l'îlot, etc.). Par exemple, la densité de la population peut être dite brute et renvoyer au rapport entre une population ou un nombre de logements sur une unité de surface du territoire ou être nette et ainsi correspondre au rapport entre une population et la surface bâtie qu'elle occupe. Ainsi la notion de densité recouvre un grand nombre de réalités différentes suivant l'objet et l'échelle de la mesure. Les différentes recherches universitaires traitant du lien entre énergie et territoire sont organisées autour d'objets techniques (le bâtiment, les transports et les infrastructures urbaines), d'expertises très précises sur les modes de transport ou certaines parties du bâtiment par exemple (Desjardins, 2011). La littérature est également divisée selon les disciplines scientifiques. Desjardins remarque d'ailleurs que les recherches distinguent deux échelles pour aborder la question de l'énergie et du territoire : l'échelle métropolitaine ou régionale, et l'échelle du secteur d'agglomération ou d'un ensemble de quartiers. A la première échelle, les recherches ont pour objet de mettre en évidence les éléments d'organisation territoriale influençant l'impact énergétique et climatique des déplacements quotidiens de personnes et parfois des bâtiments. A la seconde échelle, il est question de mesurer ou de prévoir les besoins énergétiques en matière de déplacements et d'utilisation des bâtiments en fonction des propriétés d'un quartier. Toutefois, quelle que soit l'échelle considérée, le terme « formes urbaines » est employé de manière générique, alors qu'il recouvre des définitions différentes.

L'intérêt de la communauté scientifique pour l'étude du lien entre ville et énergie a fluctué dans le temps, au rythme des crises énergétiques (Desjardins & Llorente, 2009) avec un grand nombre de publications au lendemain du premier choc pétrolier. Après une période de creux dans les années 1980, cette thématique de recherche s'est à nouveau développée au milieu des années 1990 avec la montée en puissance des questions climatiques et l'importante diffusion des travaux de Newman et Kenworthy. Steadman (1979) fut l'un des premiers à établir un lien entre forme de la ville, sa densité et les consommations énergétiques des secteurs du transport, des commerces et du logement. Il conclut que la densité permet de réduire l'énergie liée à la demande de déplacements mais augmente les besoins d'éclairage et de rafraîchissement, limite le recours à l'énergie solaire et exige des modes constructifs énergétiquement plus intensifs (Laigle & Matthys, 2012; Maizia et al., 2010; Mitchell, 2005). Mais rapidement, Steadman enrichit son analyse partant des théories de formes urbaines développées par Lionel March. La densité n'apparaît plus comme la seule variable influençant la demande énergétique, dans la mesure où, à densité égale, la ville peut prendre des formes très différentes. Les contraintes sur les bâtiments en matière d'éclairage, de ventilation et d'apports solaires peuvent se révéler très variables. Steadman conclut donc que densité et forme urbaine sont des facteurs déterminants de la demande énergétique des bâtiments et des transports (Maizia et al., 2010; Mitchell, 2005). En 1989, Newman et Kenworthy ont comparé 37 métropoles nord-américaines, européennes, australiennes et asiatiques en fonction de la quantité de carburant consommée chaque année par personne pour leurs déplacements. La courbe ainsi obtenue correspond à un classement des villes plus ou moins énergivores : en matière de transport, les villes les moins denses apparaissent comme les plus consommatrices en énergie. Le choix modal de transport et en particulier le recours à l'automobile, les distances parcourues et les consommations d'énergies associées seraient ainsi conditionnés majoritairement par la densité (Bannister et al. 1997 cité par Maizia et al. 2010). Mais, selon Mindali, Raveh, & Salomon (2004), ce n'est pas réellement la densité urbaine qui influe sur les besoins énergétiques des déplacements, mais plutôt la densité d'emplois dans la ville-centre et les centres

tertiaires qui jouerait un rôle déterminant. Contrairement à Newman et Kenworthy, [Mindali et al. \(2004\)](#) recommandent de favoriser les parcours radiants pour les trajets quotidiens domicile-travail. La comparaison des organisations urbaines par [Marquez et al. \(1999\)](#) à partir du modèle TRANPLAN conclut que le modèle de la ville compacte – défini comme une densification de la population et des logements dans le centre et la première couronne – est le moins émetteur en CO₂, la moins consommatrice en carburant et le plus optimale en termes de distances parcourues et de durée de trajets ([Maizia et al., 2010](#)). Néanmoins, la ville polycentrique, c'est-à-dire une aire métropolitaine entourée de différents pôles tertiaires denses et relativement indépendants, apparaît également performante même si moins performante que la ville compacte. Après une revue de la littérature scientifique sur les liens entre ville, énergie et gaz à effet de serre, [Desjardins & Llorente \(2009\)](#) mettent en évidence trois points sur lesquels les recherches convergent :

- Pour les grandes métropoles, plus la densité urbaine est grande, plus l'énergie consommée per capita pour les déplacements individuels diminue ;
- Dans les pays développés, la consommation énergétique per capita pour les déplacements individuels locaux et l'habitat est plus importante dans les espaces à densité faible (généralement périurbains ou ruraux) que dans les zones denses ;
- La présence de transports en commun dans des zones à densité comparable contribue à la réduction des émissions de GES des déplacements.

[Boyko & Cooper \(2011\)](#) ont mis en évidence les avantages et les inconvénients de la densité urbaine à partir de la revue de 75 études scientifiques. Nous avons repris dans le [Tableau 2](#) les effets positifs et négatifs de la densité urbaine mis en évidence par les auteurs en matière d'énergie. Les effets de la densité urbaine relevés sont de plusieurs types :

- Déplacements (besoins, modes, congestion du trafic),
- Consommations énergétiques nécessaires au confort thermique des espaces extérieurs et intérieurs (besoins de chauffage, de rafraîchissement, de ventilation),
- Besoins énergétiques pour l'éclairage des bâtiments,
- La production d'énergies renouvelables,
- Rentabilité des réseaux (de transports en commun, de chaleur, de froid),
- Emissions de GES,
- Innovation écologique,
- Énergie nécessaire au fonctionnement des réseaux
- Intensité énergétique des modes de construction.

Outre la grande diversité des effets induits par la densification urbaine, les effets identifiés se manifestent à des échelles très contrastées (agglomération, quartier, îlot, bâtiment) et renvoient à des choix allant de la stratégie de planification urbaine à des choix de forme architecturale.

L'un des premiers avantages de la densité urbaine avancés par ses partisans est que la concentration des hommes et des activités limiterait les besoins de déplacements quotidiens et par conséquent la consommation de carburant et les émissions de GES associées. Si la densité permet de renforcer la viabilité et l'efficacité des transports publics, elle aggrave également les problèmes de congestion à la fois automobile (embouteillages, pollutions, accidents, stationnements), piétonnier (encombrement des espaces publics) et des transports publics. De plus, la ville compacte contribue à une augmentation de la pollution de l'air et des nuisances sonores. La vulnérabilité environnementale de l'espace urbain

s'en trouve ainsi amplifiée, ce qui incite ses habitants à quitter le milieu urbain plus fréquemment (Maignant, 2005). Si la densification a tendance à réduire les déplacements quotidiens, elle a aussi tendance à augmenter la fréquence des déplacements des citoyens hors des centres urbains denses pour leurs loisirs, contrairement aux périurbains qui passent plutôt leurs fins de semaine chez eux du fait d'un accès facilité à des espaces verts (jardins privés ou publics). Ce phénomène, théorisé par Orfeuil & Soleyret (2002) et intitulé « l'effet barbecue » aurait donc tendance à relativiser l'impact de la morphologie urbaine sur la dépendance énergétique du territoire.

La compacité du bâti permet de réduire les besoins énergétiques pour le chauffage surtout si l'orientation du bâti lui permet de profiter des apports solaires. Si la ville dense a tendance à privilégier les bâtiments compacts par opposition au périurbain pavillonnaire, elle ne permet que rarement l'optimisation de l'orientation des bâtiments en fonction de la course du soleil. Les ombres portées induites ou le manque de possibilité d'optimisation de l'orientation du bâtiment limitent le potentiel de recours à la production d'énergie solaire. La densité permet par ailleurs d'augmenter la proximité voire la contiguïté des bâtiments et donc les échanges thermiques entre les bâtiments. Si retenir la chaleur est avantageux l'hiver, le phénomène d'îlot de chaleur urbain augmente les besoins énergétiques nécessaires au rafraîchissement des bâtiments. Améliorer l'environnement urbain et réduire les nuisances (bruit, pollutions, etc.) en limitant notamment la circulation des voitures incitera les usagers à recourir aux transports doux et à privilégier la ventilation naturelle à la climatisation très énergivore (Steemers, 2003). Plus la densité bâtie augmente, plus les conditions favorables à la végétation se réduisent, ce qui réduit d'autant la possibilité pour la végétation de contribuer au rafraîchissement des espaces extérieurs pendant les périodes chaudes. Dans les zones denses, la vitesse et la structure des vents se trouvent modifiées, ce qui limite le recours possible à la ventilation naturelle. Une densification importante peut amener à surélever les bâtiments, ce qui augmente les besoins énergétiques des ascenseurs.

Nous observons également sur le tableau que le nombre d'avantages et d'inconvénients de la densité urbaine en matière d'énergie identifiés dans la littérature scientifique par Boyko & Cooper (2011) et (Hui, 2001) sont identiques (dix). En revanche, le nombre de chercheurs démontrant les avantages de la densité sont bien supérieurs à ceux démontrant ses inconvénients. Si ce tableau a le mérite de répertorier les différents effets de la densité en matière d'énergie, il ne permet en aucun cas d'appréhender l'ampleur de ces phénomènes. Pour pouvoir arguer pour ou contre la densité, il faudrait pouvoir quantifier ces effets et être en mesure de les comparer. Peu de recherches s'attachent à notre connaissance à faire ce difficile travail de quantification, de mesure des incidences de la densité sur la qualité énergétique d'un territoire. Quoi qu'il en soit, bon nombre d'effets ne peuvent être comparés : comment mesurer la capacité à favoriser l'innovation et la comparer à des consommations énergétiques ou à l'accès au soleil ?

Tableau 2. Avantages et inconvénients de la densité urbaine en matière d'énergie d'après Boyko & Cooper (2011) et (Hui, 2001)

Avantages de la densification urbaine	Inconvénients de la densification urbaine
Réduit la consommation énergétique des bâtiments, en augmentant leur densité et leur compacité [Burchell and Listokin (1982) as cited in Hui (2001)]	Augmente l'intensité énergétique des modes de construction des bâtiments [Rydin (1992)]
Facilite l'échange thermique entre les bâtiments [DETR (1998); Norman et al (2006)]	Limite le potentiel d'utilisation de panneaux solaires [Owens (1992); Rydin (1992); Hui (2001)]
Favorise l'innovation en matière de conception écologique [Alexander and Tomalty (2002), Anderson, Kanaroglou, and Miller (1996), Breheny (1992b), Broberg and Kyttä(2010); City of Newcastle upon Tyne (1993),cited in Churchman (1999), City of Vancouver (2008), DETR (1998), DoE (1994),ECOTEC (1993), Holden and Norland (2005), Newman and Kenworthy (1989,1991), Owens (1992), Regional Municipality of York (1994), Stenhouse (1992),both as cited in Churchman (1999)] et de système de transport [Broberg and Kyttä (2010) and Owens (1992)], dans la mesure où des économies énergétiques et financières peuvent être réalisées dans les projets à forte densité	Aggrave les problèmes de congestion du trafic, de stationnement et d'accidents de la circulation [Breheny (1992b), De Roo and Miller (2000), DETR (1998), Jenks et al. (1996), Llewelyn-Davies (1998), Rydin (1992), Troy (1996), as cited in Churchman (1999), and Williams et al. (2000)]
Augmente la faisabilité des réseaux de chauffage et de froid urbains, généralement plus efficaces que les solutions individuelles [Hui (2001)]	Engendre des densités de piétons trop élevées et congestionne les transports publics [Roberts (1978), as cited in Churchman (1999), Ruback and Pandey (1992)]
Réduit les émissions de GES des énergies fossiles et l'empreinte carbone [Alexander and Tomalty (2002), Burton (2000a), Churchman (1999), City of Vancouver (2008), DETR (1998), Gordon (1997), as cited in LSE (2006); Holden and Norland (2005), Kamal-Chaoui and Robert (2009), Llewelyn-Davies (1998), LSE (2006), Mayor of London (2008), National House-Building Council (2007), Urban Task Force (1999), Williams et al. (2000), Willis, Turner, and Bateman (2001); Woodhull (1992), as cited in Churchman (1999)]	Augmente la consommation énergétique des ascenseurs dans les bâtiments de grande hauteur [Hui(2001)]
Renforce l'efficacité et la viabilité des transports en commun [Berridge Lewinberg Greenberg Ltd. (1991), as cited in Churchman (1999), Breheny (1996), Churchman et al. (1996), as cited in Churchman (1999), City of Vancouver (2008), De Roo and Miller (2000), DETR (1998), Haughey (2005), Hillman (1996), Holden and Norland (2005), Llewelyn-Davies (1998), Mayor of London (2008); New York City Planning Commission (1993), as cited in Churchman (1999), Newman and Kenworthy (1989), Portnov and Errell (2001), Regional Municipality of York (1994), Reid (1986), both as cited in Churchman (1999), Owens (1992), Rydin (1992), Stenhouse (1992), as cited in Churchman (1999); Urban Task Force (1999), and Williams et al. (2000)]	Réduit les flux d'air dans les rues et par conséquent les possibilités de ventilation naturelle des bâtiments [Givoni (1989) as cited in Skinner (2006); Givoni (1998) as cited in Hui (2001)]
Limite l'exposition au soleil des bâtiments durant l'été [Hui (2001)]	Augmente les besoins de rafraîchissement des bâtiments en raison de l'accroissement de l'effet d'îlot de chaleur urbain [Coutts, Beringer, & Tapper (2007); Hui (2001); Oke (1987) as cited in Skinner (2006)]
Offre plus d'opportunités aux modes doux [Bannister (1992), Woodhull (1992), as cited in Churchman (1999)]	Empêche la végétation de pousser et de rafraîchir la température extérieure en limitant l'accès au soleil [Giridharan, Lau, Ganesan, & Givoni (2008)]
Diminue le nombre de déplacements motorisés et la longueur des déplacements [Bannister (1992), Bartholomew (2007), Berridge Lewinberg Greenberg Ltd. (1991), as cited in Churchman (1999), Breheny (1992b), Haughey (2005), Kamal-Chaoui and Robert (2009); Stenhouse (1992), as cited in Churchman (1999), Stone et al. (2007), Woodhull (1992), as cited in Churchman (1999)]	Réduit l'éclairage naturel et les apports solaires potentiels [Hui (2001), Steemers (2003)]
Réduit la longueur des réseaux d'eau et donc l'énergie nécessaire au pompage [Hui (2001)]	Augmente la fréquence des déplacements de loisirs hors de la ville des habitants des centres urbains denses [Kennedy (1995); Vilhelmson (1990) both as cited in Holden & Norland (2005)]

Par ailleurs, la qualité énergétique d'un territoire urbain ne peut être limitée à la question de sa densité, quelle qu'en soit sa définition (Duhayon et al., 2002). La question du lien entre forme de la ville et énergie se révèle bien plus complexe au vu de la variété de réalités recouverte par la densité des interrelations entre ses effets. D'ailleurs la communauté scientifique n'arrive pas à définir un degré optimal de densification d'un territoire, pour lequel les bienfaits de la densité seraient supérieurs à ses inconvénients, ni sur la forme qu'elle doit prendre. En effet, il n'y a pas un unique modèle d'organisation territorial dense, et surtout il n'y a pas une seule morphologie urbaine correspondant à une densité démographique élevée. Pour densifier, il existe plusieurs solutions : il est possible d'augmenter la profondeur des bâtiments, d'augmenter la hauteur des bâtiments, de réduire l'espace entre les bâtiments ou d'augmenter la compacité (privilégier les immeubles collectifs aux maisons individuelles dans les espaces périurbains par exemple) (Steemers, 2003). A densité égale les formes urbaines peuvent être très différentes. Il n'existe pas de rapport entre densité et types d'habitat (Certu, 2010a). La densité n'est donc pas un critère de conception, il s'agit avant tout de choisir des formes urbaines adaptées à chaque contexte et non pas de rechercher un niveau élevé de densité. Contrairement à la Charte d'Athènes, la Charte d'Aalborg, texte de référence pour l'urbanisme durable, considère qu'il faut limiter l'étalement de la ville et que les formes urbaines à développer ne doivent pas être génériques mais au contraire adaptées à chaque contexte (caractéristiques physiques du site et enjeux du territoire). Par conséquent, la Charte d'Aalborg, conformément à l'avis de la communauté scientifique, ne privilégie pas une forme urbaine ni un niveau optimal de densité. Un grand nombre de variables sous-jacentes nécessitent également d'être considérées : morphologie urbaine, concentration des activités et des emplois, mixité et agencement des fonctions, efficacité de l'offre de transports en commun, etc. Desjardins & Llorente (2009) concluent à partir d'une revue de la littérature scientifique qu'agir sur l'agencement entre individus, activités et réseaux de transport est plus efficace qu'agir uniquement sur la forme urbaine ou la densité afin de créer les conditions urbaines propices à une mobilité énergétiquement économe et peu émettrice en GES. Selon Grenier (2007), les leviers d'actions possibles pour maîtriser les besoins de mobilité des biens et des personnes sont les modes et volumes transportés, ainsi que les motifs, longueurs, vitesses et enchainements des déplacements. S'il est donc possible d'agir sur les formes urbaines et sur l'offre en transports en commun ou en espaces verts d'une ville pour limiter sa consommation énergétique, il faut relativiser l'effet de ces actions. En effet, comme le rappellent Laigle & Matthys (2012), s'il est démontré qu'il existe une corrélation entre les caractéristiques des formes urbaines et des transports et la consommation énergétique de la communauté correspondante, cette corrélation n'est pas nécessairement un lien de causalité. D'autres déterminants sont à considérer pour expliquer la longueur et la fréquence des déplacements des citoyens et donc leurs impacts énergétiques, notamment les facteurs sociaux, démographiques et économiques (genre, revenus, structure des ménages, etc.).

En plus de l'ambiguïté inhérente à la notion de densité, la communauté scientifique ne semble pas encore unanime sur les bienfaits de la densification du point de vue de l'énergie et du climat. Les conclusions sur l'incidence des formes urbaines sur la consommation énergétique sont contrastées (Salat, Celnik, Nowacki, & Vialan, 2009) Pouyane (2004) parlent même de controverse pour désigner les débats scientifiques autour des avantages de la ville compacte en termes de mobilité. Plus qu'une question de densité, le lien entre ville et énergie met en évidence un certain nombre de paramètres pouvant avoir une incidence sur la qualité énergétique d'un territoire. La transition énergétique des villes suppose donc la réalisation de choix stratégiques au moment de la planification urbaine notamment en termes de réseaux et en particulier de réseaux de transports en commun, lors de la

conception des formes urbaines, et nécessite de mettre en œuvre des actions pour limiter les nuisances du milieu urbain.

3.2. DECENTRALISER LES SYSTEMES ENERGETIQUES URBAINS ET MULTIPLIER LES UNITES DE PRODUCTION ?

La densité facilite le développement de réseaux urbains de production et de distribution de chaleur ou de froid. En effet, la concentration d'un plus grand nombre d'utilisateurs permet de réduire les coûts de distribution même si les coûts d'investissement se révèlent plus importants. Les réseaux énergétiques urbains présentent certains avantages comparés aux solutions individuelles (Rezaie & Rosen, 2012). Tout d'abord, ils seraient énergétiquement plus efficaces, et donc plus économes en combustibles. Cette solution se révèle assez flexible, puisqu'il est possible de changer la source énergétique alimentant le système. Surtout, les réseaux de chaleur permettent de combiner différentes sources énergétiques. Ils représentent ainsi un bon moyen de valoriser des sources d'énergies renouvelables, telles que la géothermie, et de récupération locales (incinération des déchets ménagers, récupération de chaleur sur les eaux usées ou les data center, etc.). La maîtrise du système peut permettre d'améliorer relativement aisément l'impact environnemental et surtout carbone d'un territoire. Il est en effet plus facile d'améliorer le système de production de chaud ou de froid d'un réseau urbain que de maîtriser le remplacement des dispositifs individuels des bâtiments ou des logements de tout un quartier.

Le modèle de réseaux urbains centralisés hérités du XIX^{ème} siècle est aujourd'hui remis en question (Coutard & Rutherford, 2013). Au nom du développement durable, une myriade de solutions décentralisées est préférée aux réseaux centralisés. Ils proposent la notion de « ville post-réseau » pour désigner une ville dans laquelle émerge une collection de solutions technologiques dispersées et alternatives aux grands réseaux d'infrastructures. Quatre formes d'urbanisme « post-réseau » ont été identifiées en fonction de leur degré d'autonomie dans l'organisation sociotechnique et du caractère collectif ou individuel de la décision. Le schéma « hors-réseau » correspond à la situation où une communauté locale a souhaité s'affranchir des réseaux nationaux pour tendre vers l'autonomie. Le second schéma, appelé « boucler la boucle » par les auteurs, repose sur le principe de métabolisme urbain. Ici la décentralisation des réseaux a pour objectif de créer localement des boucles de recyclage. Le type « au-delà du réseau » renvoie aux installations indépendantes mises en place dans les zones périphériques des villes non desservies par les grands réseaux (assainissement et gaz généralement). Enfin le quatrième schéma, « injection dans le réseau », correspond à une organisation en réseau où des producteurs individuels et indépendants ont la possibilité d'injecter leur énergie sur le réseau. Le consommateur peut donc devenir fournisseur, la centralisation du contrôle est réduite au profit des producteurs indépendants. Dans la même lignée, les chercheurs du projet « écoquartiers NEXUS énergie » ont identifié trois schémas d'approvisionnement énergétique¹¹ qui pourraient être mis en place dans les quartiers à l'horizon 2040 : l'ensemble de « systèmes individualisés », le « réseau centralisé » ou le « réseau dé-centralisé » (Menanteau, 2013, p. 123). Le modèle dé-centralisé apparaît comme un entre-deux où le réseau permet de mutualiser la chaleur produite par de nombreuses sources réparties sur le quartier et de la distribuer en fonction des besoins. Ce modèle tire donc parti

¹¹ Les hypothèses sous-tendant ces trois scénarios prévoient des quartiers mixtes, composés à la fois de bâtiments neufs à énergie positive et de bâtiments réhabilités pour lesquels la demande de chaleur est réduite mais non nulle (ECS). Les chercheurs considèrent aussi que même si le recours à des énergies renouvelables locales serait privilégié et soutenu par des aides publiques, l'utilisation d'énergies fossiles persistera.

des avantages des deux autres modèles. En effet, la distribution de la chaleur dans un réseau à basse température, voire très basse température permet de valoriser la chaleur produite par des unités de production plus modestes et est compatible avec des bâtiments aux besoins réduits en chaleur.

Cette évolution des réseaux énergétiques est soutenue par les progrès effectués dans le domaine des technologies de l'information et de la communication, qui offre les outils de gestion dynamique de ces réseaux où les consommateurs peuvent devenir des producteurs. Le réseau électrique est le premier réseau énergétique à bénéficier des possibilités offertes par ces nouvelles technologies : les « smart grids ». Un réseau dit intelligent a la capacité d'intégrer le comportement et les actions de l'ensemble de ses utilisateurs (producteurs, consommateurs ou les deux à la fois) pour répondre plus efficacement à la demande en électricité et assurer la sécurité de l'approvisionnement (Clastres, 2011). Les différences entre un réseau électrique intelligent et un réseau électrique classique sont répertoriées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Caractéristiques des réseaux intelligents comparées aux réseaux classiques existants d'après (Farhangi, 2010)

Existing grid	Smart grid
Electromechanical	digital
One-way communication	Two-way communication
Centralized generation	Distributed generation
Hierarchical	Network
Few sensors	Sensors throughout
Blind	Self-monitoring
Manual resotring	Self-healing
Failures and blackouts	Adaptative and islanding
Limited control	Pervasive control
Few customer choices	Many customer choices

Dotés de capteurs, de compteurs communicants, ces nouveaux réseaux sont capables de transmettre en temps réels les informations entre producteurs et consommateurs et inversement, et ainsi de faire face rapidement aux problèmes survenant sur le réseau. Ces réseaux sont décentralisés, la production électrique se faisant dans de multiples unités de production de taille plus ou moins importante. Certaines parties du réseau peuvent ainsi être isolées en cas de besoin, la production et la distribution se faisant à une échelle plus restreinte. Ce ne sont pas des réseaux locaux autonomes mais plutôt des réseaux locaux ou régionaux interconnectés. Les avantages attendus des « smart grids » sont variés (Clastres, 2011) :

- Les consommateurs mieux informés sur leur consommation peuvent jouer un rôle actif sur le réseau, les pics de consommation peuvent être réduits et l'efficacité énergétique améliorée ;
- L'intégration des énergies renouvelables et des dispositifs de stockage de l'énergie sur les réseaux électriques ;
- L'amélioration de la qualité du service de distribution de l'électricité ;
- L'optimisation de l'utilisation des équipements électriques ;
- La flexibilité, l'anticipation et l'adaptation à l'évolution des besoins et des technologies ;

- Le développement des systèmes d'information et l'amélioration de l'accès aux données des différents acteurs en maîtrisant les contraintes éthiques de la confidentialité de telles données.

Ces nouveaux réseaux « intelligents » rendent possible la valorisation des énergies renouvelables et de récupération réparties dans le milieu urbain. Ils permettent ainsi de faire face au caractère intermittent de la production d'énergie renouvelable, répartissant en temps réel l'énergie en fonction des besoins des consommateurs. Des solutions de stockage et de cogénération peuvent dès lors être installées. Par exemple, des véhicules électriques pourraient servir de stockage d'électricité et la restituer sur le réseau lors des pics de consommation. Des systèmes de tarification dynamique incitant les consommateurs à modifier leurs comportements pourraient facilement être mis en place sur ces réseaux. Bon nombre de technologies et de services associés à ces réseaux intelligents sont d'ores et déjà disponibles : compteurs intelligents, réseaux communicants, tarification dynamique, système d'automatisation, dispositifs d'information (Hledik, 2009). Les bénéfices attendus des réseaux intelligents pourraient se démultiplier avec leur généralisation. Selon les projections de Hledik (2009) sur le marché de l'électricité américain, la mise en place des « smart grids » permettrait de réduire les émissions annuelles de CO₂ du secteur de l'énergie entre 5% et 16% en 2030¹². Quelques expérimentations de « smart grids » dans des quartiers sont recensées en France, IssyGrid à Issy-les-Moulineaux¹³ et Nice Grid¹⁴ sont les expérimentations les plus connues.

Si ce mouvement de décentralisation des réseaux peut apparaître bénéfique, il risque également de créer des « niches pour une minorité aux dépens de la majorité [...] en termes économiques, sociaux et environnementaux » (Coutard & Rutherford, 2013, p. 24). Plusieurs risques sont ainsi identifiés par les auteurs : fragilisation de l'égalité d'accès aux services urbains, jusque-là assurée par les réseaux centralisés ; augmentation du coût global de la fourniture de services ; maîtrise difficile des externalités environnementales des installations individualisées (pour les installations de traitement d'eau). Il paraît donc important de veiller à encadrer la mise en place de ces solutions dispersées.

La décentralisation des réseaux énergétiques et en particulier du réseau électrique suppose d'abord la question énergétique à une échelle intermédiaire entre le bâtiment et le grand territoire, l'échelle du quartier apparaît alors appropriée. A cette échelle, la mutualisation des moyens de production énergétique peut être envisagée et le problème de la consommation énergétique des bâtiments et des transports peut être abordé de manière intégrée.

¹² L'auteur compare dans cet article, l'impact de deux scénarios de développement des « smart grids », le premier correspond à une projection de l'état actuel des technologies et du contexte, alors que le second prend en compte les effets de la généralisation des « smart grids » à échelle nationale.

¹³ Pour plus d'informations se rendre sur le site internet du projet : <http://issygrid.com/>

¹⁴ Pour plus d'informations sur l'expérimentation niçoise, se rendre sur le site internet du projet : <http://www.nicegrid.fr/nice-grid-le-projet-4.htm>

3.3. INTEGRER L'ENERGIE DANS LES CHOIX URBANISTIQUES

LES DETERMINANTS DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE DU BATI : DES LEVIERS URBANISTIQUES

Dans les bâtiments résidentiels, l'énergie consommée est répartie en quatre postes : le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la cuisson et les usages spécifiques de l'électricité (éclairage, appareils électroménagers, équipements informatique et audio-visuels...). Comme nous l'avons vu plus haut, le chauffage représente le premier poste de consommation des logements en France (ADEME, 2011a), même si l'énergie spécifique consommée dans les logements ne cesse d'augmenter. Il est donc primordial de maîtriser les besoins de chauffage des bâtiments résidentiels. Dans les bâtiments de bureaux, l'éclairage et la consommation énergétique de la ventilation et des équipements sont des postes de consommation non négligeables, au même titre que le chauffage et la climatisation lorsqu'elle existe (Steemers, 2003).

Il existe une grande diversité de facteurs déterminants la consommation d'énergie d'un bâtiment (Mitchell, 2005). Selon Baker et Steemers (1992), cinq variables influencent la performance énergétique d'un bâtiment: le climat, la géométrie urbaine, l'architecture du bâtiment, l'efficacité des équipements et le comportement des occupants (Ratti, Baker, & Steemers, 2005). Mis à part le climat considéré comme une donnée d'entrée, les autres facteurs sont aux mains de différents acteurs du développement urbain : l'urbaniste, l'architecte, l'ingénieur systèmes et l'occupant. Si les auteurs évaluent la contribution de l'efficacité des systèmes et du comportement des occupants respectivement à un facteur 2 chacun, et à 2,5 celle de l'architecture, ils ne savent pas quantifier précisément l'impact de la géométrie urbaine Figure 5. Comme l'écart observé entre la consommation énergétique de deux bâtiments ayant la même fonction peut atteindre un facteur 20, les auteurs déduisent que le facteur relatif à la géométrie urbaine est égal à 2. La géométrie urbaine influe sur l'accès des façades à la lumière naturelle et au soleil mais aussi sur le microclimat urbain (Givoni, 1989 as cited in RATTI et al., 2005). A l'issue de travaux de modélisation sur trois villes (Londres, Berlin et Toulouse), les auteurs ont évalué à 10% la contribution de la géométrie urbaine sur la performance énergétique d'un bâtiment. Toutefois, si l'on considère non plus les facteurs comme indépendants mais comme interdépendants, le dessin urbain devrait théoriquement influencer l'ensemble des facteurs suivants, et de fait agir plus largement sur la performance du bâti.

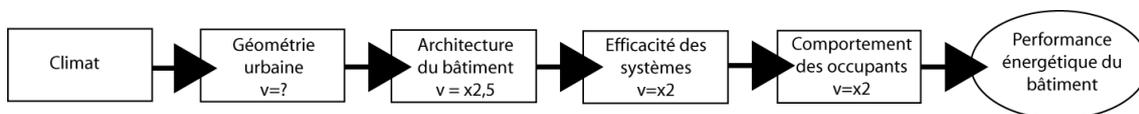


Figure 5. Les différents facteurs influençant la performance énergétique d'un bâtiment et leur degré de contribution (Ratti et al., 2005)

D'après Maizia et al. (2010), les paramètres suivants sont unanimement reconnus comme des facteurs déterminants la performance énergétique du bâti :

- Fonction du bâti et comportement des occupants ;
- Géométrie urbaine (angles d'obstruction au rayonnement solaire résultant de la hauteur, de la profondeur et des prospects entre bâtiments) ;
- Géométrie du bâti (orientation des façades et du taux de vitrage) ;

- Caractéristiques constructives des enveloppes (conductances et inerties des matériaux employés) ;
- Rendement des systèmes (chauffage et éclairage, climatisation pour les bureaux) ;
- Rendement des réseaux de distribution ;
- Températures de l'air extérieur et intérieur ;
- Prix de l'énergie.

Les besoins de chauffage d'un bâtiment dépendent de la différence entre les déperditions dues aux caractéristiques thermiques de l'enveloppe (composition et surface de l'enveloppe) ainsi qu'à la ventilation et les apports énergétiques internes et solaires (qui dépendent de l'orientation des vitrages) (Maizia, 2008). La surface de l'enveloppe et l'orientation du bâtiment sont deux leviers d'action sur la consommation énergétique à l'échelle urbaine, même s'ils sont fortement corrélés avec le taux de vitrage et la composition de l'enveloppe (Maizia, 2008). Si la compacité (ratio surface d'enveloppe sur volume chauffé) et l'exposition solaire des bâtiments sont deux paramètres reconnus comme ayant une incidence sur la performance thermique d'un bâtiment, les auteurs sont divisés au sujet du degré d'incidence de chacun de ces paramètres. Pour certains, c'est la compacité qui est le levier le plus pertinent pour réduire les besoins en chauffage : « A matériaux comparables, augmenter la compacité à l'échelle urbaine permet donc de réduire significativement les déperditions par les parois du bâti » (Maizia, 2008). Si l'impact de la compacité sur les besoins de chauffage peut être significatif, il ne faut pas négliger le potentiel de réduction de la demande en énergie pour le chauffage, l'éclairage et la ventilation naturelle du aux apports solaires. Réduire la surface d'enveloppe afin de limiter les pertes thermiques et donc les besoins en chauffage implique une réduction de l'accès à la lumière naturelle et aux rayons du soleil ce qui induit une augmentation de la consommation en énergie de l'éclairage et de la ventilation notamment (Ratti et al., 2005; Salat & Nowacki, 2010). Selon Ratti et al. (2005), la compacité (ratio surface sur volume) ne constitue donc pas le paramètre le plus pertinent à l'échelle urbaine, contrairement au ratio volume passif sur volume total. Est appelé volume passif, l'ensemble des volumes d'un bâtiment ayant accès à la lumière naturelle, la ventilation naturelle et pouvant profiter des apports solaires. Strømman-Andersen & Sattrup (2011) ont montré que la consommation énergétique d'un bâtiment augmente lorsque ses apports solaires diminuent : la différence de consommation énergétique entre un bâtiment en site isolé et un bâtiment entouré d'autres bâtiments comme dans un centre urbain dense peut aller jusqu'à 30% pour un bâtiment de bureaux et jusqu'à 19% pour un bâtiment résidentiel. Ainsi les auteurs conseillent d'augmenter la réflectivité des matériaux de façades et surtout de contrôler l'accès au soleil des bâtiments ou d'imposer des règles de prospect en conséquence. Afin de bénéficier des apports solaires, il est également opportun d'augmenter le taux de vitrage des façades bien exposées. A partir de la modélisation des besoins en chauffage et en climatisation de plusieurs formes urbaines présentes dans les tissus urbains français, Maizia et al. (2010) ont démontré que l'affirmation selon laquelle les apports solaires ont une forte incidence sur les besoins en énergie pour le chauffage et le rafraîchissement mérite d'être nuancée, car dépendante de la surface de vitrage. Au-delà de 25% de vitrage, les apports solaires ne suffisent plus à compenser les déperditions thermiques.

La capacité à ventiler naturellement un bâtiment ne dépend pas seulement de son exposition solaire. En effet, la qualité de l'environnement et la faible exposition aux nuisances permet d'inciter les occupants à ventiler naturellement leurs locaux (Stemmers, 2003). Par conséquent l'exposition au bruit et la pollution de l'air sont des paramètres caractéristiques du contexte urbain d'un bâtiment capables d'influencer sa performance énergétique. La végétation et en particulier les arbres contribuent ainsi à

diminuer les besoins énergétiques relatifs au confort thermique. Les travaux de Akbari (Akbari, Pomerantz, & Taha, 2001; Akbari & Taha, 1992; Akbari, 2002) montrent que la présence d'arbres feuillus en milieu urbain a un aspect positif sur les consommations énergétiques des bâtiments : en hiver ils protègent du vent, et en été l'ombre qu'ils projettent sur les bâtiments contribue à leur rafraîchissement donc à limiter les besoins de rafraîchissement artificiel d'une part et d'autre part, ils rafraîchissent l'air par évapotranspiration. La contrainte des formes urbaines sur les apports solaires détermine également le potentiel de production d'énergie solaire (Monette & Beckers, 2012).

CONSIDERER LA QUESTION DE L'ENERGIE A L'ECHELLE DU QUARTIER FAIT APPARAÎTRE D'AUTRES LEVIERS

Il est possible de construire des bâtiments très performants avec les techniques et les technologies actuelles, comme le montrent les niveaux de consommation exigés par la réglementation thermique du bâtiment de 2012 et la future réglementation de 2020. Mais, la consommation énergétique liée aux déplacements des occupants et l'énergie nécessaire à la production des matériaux et des équipements du bâtiment ne sont généralement pas pris en compte dans le bilan énergétique du bâtiment. Ces deux sources de consommation énergétique ne sont pas négligeables, il est donc primordial de les intégrer au bilan énergétique des bâtiments (Hui, 2001; Stephan, Crawford, & de Myttenaere, 2011). Les économies d'énergie obtenues sur un bâtiment très performant mais peu accessible pourraient être contrebalancées par la consommation énergétique nécessaire aux déplacements des usagers. Ainsi, Stephan et al. (2011) décident de mesurer la contribution de l'énergie opérative, de l'énergie grise et de l'énergie de transport à la consommation énergétique totale d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie. L'énergie opérative correspond à l'énergie consommée durant l'exploitation du bâtiment pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et l'électricité spécifique. L'énergie grise est l'énergie nécessaire à l'extraction, la production et le transport des matériaux et équipements nécessaires à la construction et à la maintenance du bâtiment. Enfin, les auteurs considèrent dans l'énergie de transport le carburant consommé lors des déplacements ainsi que l'énergie grise des véhicules automobiles et des infrastructures de transport routier. Précisons que les transports en communs ne sont pas considérés dans cette étude, les considérer amènerait, selon nous, les auteurs à nuancer leurs conclusions. Sont ainsi comparés les consommations énergétiques des ménages habitants dans des logements aux performances énergétiques variables (bâtiment normal, basse énergie et passif) en centre urbain et en zone périurbaine. La durée de vie présumée des logements est 50 ans. A l'issue de cette comparaison, les auteurs montrent que le chauffage ne représente sur 50 ans qu'une part limitée de la consommation totale d'un ménage (au maximum 23%), alors que c'est la principale cible des politiques actuelles (Figure 6). Ce sont l'énergie grise et l'énergie de transport qui, ensemble occupent la majeure part de la consommation énergétique totale d'un ménage. Par conséquent, les auteurs concluent qu'il est indispensable de considérer ces sources de consommation indirecte du bâtiment dans les politiques appliquées à la performance énergétique du bâti. Il serait d'autant plus intéressant d'intégrer l'énergie de transport qu'elle présente encore un important potentiel de progrès.

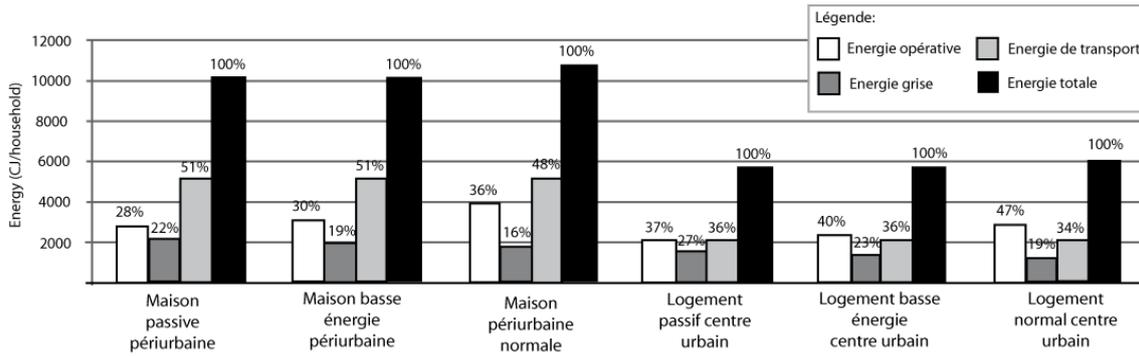


Figure 6. Répartition des consommations énergétiques (énergie opérative, énergie grise et énergie de transport) des ménages pour des logements aux performances énergétiques variées suivant leur localisation en périurbain ou en centre urbain

D'après le guide méthodologique du bilan carbone appliqué au bâtiment Figure 7, il existe encore une importante marge de manœuvre en matière énergétique dans deux secteurs (ADEME & CSTB, 2010) : la production photovoltaïque avec un potentiel de production pouvant aller jusqu'à 250kWh.ep/m².an et la mobilité des usagers avec une marge de réduction de 180kWh.ep/m².an environ. Le potentiel d'amélioration de la consommation énergétique restant est plus faible mais non négligeable (environ 100kWh.ep/m².an). Enfin la marge de manœuvre sur l'énergie grise est, elle, nettement plus faible (environ 40kWh.ep/m².an).

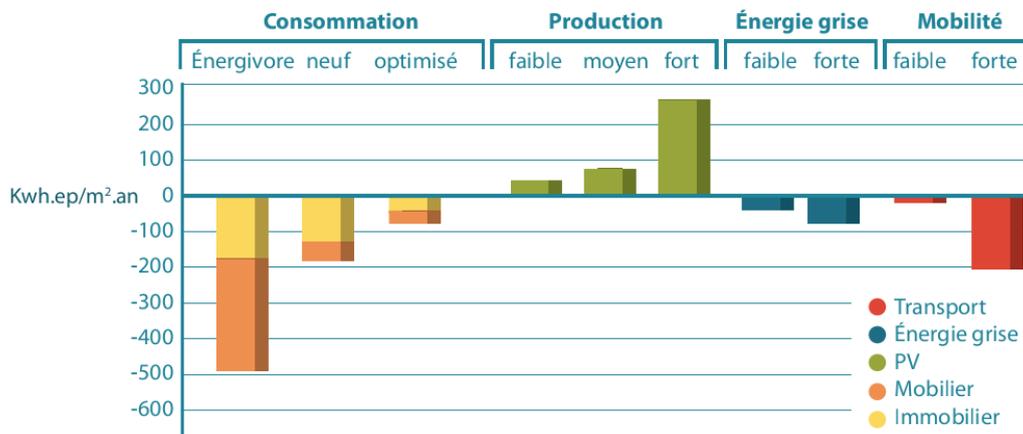


Figure 7. Potentiels de réduction de la consommation énergétique des bâtiments, de l'énergie grise et de la mobilité et de production d'énergie photovoltaïque (ordres de grandeur) (source : ADEME & CSTB, 2010)

Considérer les consommations indirectes d'un bâtiment est un moyen de prendre en compte les relations du bâtiment dans le contexte dans lequel il s'inscrit. Un autre moyen est d'appliquer les objectifs de consommation d'un bâtiment à une échelle plus large, comme le quartier ou le territoire. Ainsi, les concepts de quartier « zéro énergie » ou de « territoire à énergie positive » ont récemment émergé. Selon Menanteau (2013), le quartier est une échelle pertinente pour aborder la question de l'énergie. Contrairement à l'échelle du bâtiment, l'échelle quartier permet de prendre en compte les interactions bioclimatiques entre les bâtiments (effets de masque, ilots de chaleur urbain, orientation des bâtiments, etc.). Avec des tissus urbains compacts, il est possible selon Maizia (2008) de mutualiser la production et la distribution énergétique ce qui, en plus d'optimiser la production, facilite le saut

technologique vers une production décentralisée valorisant des gisements d'énergie du territoire urbain, aujourd'hui non exploités. L'auteur propose la « compacité fonctionnelle » comme levier d'action pour optimiser la gestion énergétique d'un quartier et profiter de la contiguïté de deux bâtiments aux fonctions différentes pour assurer entre eux des échanges thermiques. Il y a compacité fonctionnelle lorsque la contiguïté entre bâtiments d'activités de nature différente est valorisée par une mutualisation et une optimisation de la production énergétique et l'augmentation des surfaces d'échange entre ces bâtiments. La production et la distribution de l'énergie pour le bâtiment peuvent être considérées comme des « leviers urbains » (Maizia, 2008, p. 176). A l'échelle du quartier, il est également possible de profiter du foisonnement de la demande en énergie liée à la mixité des fonctions et des usages, de mobiliser des ressources énergétiques diffuses telles que la méthanisation des déchets, la récupération de chaleur fatale sur les eaux usées ou les data center, ou encore le solaire et d'envisager des dispositifs de distribution de la chaleur en réseau, qui simplifient la gestion de l'approvisionnement et du stockage tout en garantissant des prix unitaires réduits (économies d'échelle) (Menanteau, 2013).

Dans une étude évaluant la consommation énergétique issue des déplacements individuels quotidiens dans les zones périurbaines, Marique & Reiter (2012) ont montré que plutôt que de densifier la population ou les bâtiments, il est plus efficace pour réduire la consommation énergétique de la mobilité quotidienne dans les quartiers périurbains existants d'assurer une grande mixité de fonctions (emplois, écoles, commerces, logements) à l'échelle du quartier. De plus, la localisation du quartier, notamment la distance séparant le logement de la destination finale du déplacement, a un impact considérable sur la consommation énergétique relative aux déplacements. Dans une autre étude, Marique, Penders, & Reiter (2013) proposent un cadre et une méthode d'évaluation des quartiers « zéro énergie ». Les auteurs partent du constat que les recherches actuelles sur les « bâtiments zéro énergie » (zero energy buildings) se focalisent sur le bâtiment, négligeant trop souvent les interactions entre le bâtiment et son environnement à une échelle plus large. Les bâtiments « zéro énergie » sont des bâtiments dont le bilan énergétique est proche de zéro. Le concept de « zéro énergie » est à manipuler avec précaution, la performance du bâtiment « zéro énergie » dépendant des flux considérés dans le bilan énergétique. Les auteurs ont remarqué que rares étaient les articles qui s'intéressent à la ville « zéro énergie ». Comme pour les bâtiments, le bilan énergétique annuel d'un quartier « zéro énergie » est à l'équilibre, c'est-à-dire que l'énergie consommée par les bâtiments et les déplacements des habitants du quartier est dans le cas présent compensée par la production locale d'énergies renouvelables. Suite à l'évaluation de deux quartiers belges, les auteurs concluent qu'évaluer le bilan énergétique à l'échelle du quartier et non plus seulement du bâtiment permet de mettre en évidence des potentiels de mutualisation de la production énergétique. Par exemple, ils montrent que l'efficacité de la production photovoltaïque est augmentée si les panneaux ne sont placés que sur les bâtiments les mieux exposés du quartier plutôt que répartis sur l'ensemble des bâtiments. En passant de l'échelle du bâtiment à l'échelle du quartier, les consommations énergétiques issues de la mobilité quotidienne (déplacements domicile-travail et domicile-école) ne peuvent plus être négligées, ce qui fait de la localisation du quartier une source d'impacts à considérer dans le bilan annuel. Par ailleurs, analyser le bilan énergétique d'un quartier sur des temps plus courts (mois ou heure) permettrait d'identifier les écarts entre pointes de production et pointes de consommation. Si Marique, Penders, & Reiter (2013) montrent l'intérêt de considérer la question énergétique à l'échelle du quartier ils n'expliquent pas comment arriver à réduire la consommation énergétique des habitants en matière de déplacements.

A travers la comparaison de six villes (Paris, Hong Kong, Tokyo, Kyoto, Guangzhou et Shanghai), [Salat & Nowacki \(2010\)](#) identifient plusieurs paramètres de morphologie urbaine capables de réduire les déplacements motorisés et donc la consommation énergétique et les émissions de GES correspondantes:

- La densité des rues (nombre de rues sur la surface totale de la ville) ;
- L'intensité des rues (nombre de rues sur la surface des rues) ;
- La distance entre deux intersections, plus elle augmente, plus les modes de déplacements motorisés seront privilégiés aux modes doux ;
- La densité d'intersections, plus celle-ci est grande plus il est possible de se déplacer à pieds ou à vélos.

Selon les travaux de J-P. Traisnel, les caractéristiques influençant le mode de déplacements sont la densité d'activité et la surface réservée aux modes de déplacements doux comparée à la surface dédiée à l'automobile ([Augiseau, 2012](#)).

Le dessin d'urbanisme est particulièrement important dans la gestion énergétique des villes dans la mesure où les interactions sont connues entre volumétries bâties, traitement des espaces extérieurs et micro-climat local, qui lui-même influe sur la performance thermique des bâtiments ([Grenier, 2007](#)). D'autant que la compacité permet de limiter les déperditions thermiques du bâti et la densité est favorable à la mise en place de réseaux de chaleur, capables de valoriser des énergies produites localement. Si ces interactions sont connues, il est nécessaire pour identifier de réels leviers d'action, de connaître la part de chacune des variables urbaines dans la consommation énergétique de la ville. [Owens \(1986\)](#) a proposé une synthèse des variables de planification urbaine ayant une incidence sur la performance énergétique des villes et a estimé le potentiel d'économies d'énergie associées. Le [Tableau 4](#) répertorie ces différentes variables de la structure urbaine, leurs liens avec l'énergie et leur potentiel d'économie d'énergie maximal. Les potentiels d'économies d'énergie (exprimés en pourcentage de variation de la consommation énergétique du territoire) sont à considérer indépendamment les uns des autres. Selon l'auteur, les besoins de chauffage des bâtiments peuvent varier jusqu'à un facteur 2 suivant la densité et la forme du bâti, dans la mesure où la compacité du bâti (ratio du volume sur la surface) joue fortement sur les besoins de chauffage des bâtiments. L'introduction de réseaux de chaleur ou de systèmes de cogénération sur un territoire, possible sur un territoire dense et aux multiples fonctions urbaines, permettrait d'améliorer d'un facteur 2 la consommation en énergie primaire. En termes de transports, il paraît plus énergétiquement intéressant d'agir sur la mixité des activités, qui permet de réduire la longueur des trajets, et sur une combinaison de variables structurelles telles que la forme, la taille, la mixité d'utilisation d'un territoire, qui en plus d'influencer la longueur des déplacements, joue sur leur fréquences. Entre la structure urbaine la moins performante et la plus optimale, la consommation en énergie des déplacements pourrait être divisée par deux ou trois.

Tableau 4. Influence de différentes variables de planification urbaine sur la demande en énergie du territoire d'après (Owens, 1986 traduit par Augiseau, 2012)

Variables de planification	Lien avec la consommation d'énergie	Degré d'incidence sur la consommation d'énergie du territoire urbanisé
Forme urbaine	Besoins en termes de transports locaux	x 0,2
Mixité des activités	Besoins en termes de transports (principalement la longueur des trajets)	x 1,3
Combinaison de variables structurelles (forme, taille, mixité d'utilisation du terrain, etc.)	Besoins en termes de transports (longueur des trajets et fréquence)	x 1,5
Densité, forme bâtie	Ratio volume sur surface qui influence les besoins en chauffage	x3
Densité et regroupement des extrémités de trajets	Faisabilité du transit et facilité d'utilisation des transports publics	x 0,2
Densité, mixité d'utilisation du terrain	Introduction de réseaux de chaleur ou de systèmes de cogénération	x 2 (énergie primaire)
Densité, disposition du site, orientation et conception	Maximisation du potentiel d'utilisation d'énergies renouvelables ou gratuites	x 0,2

Par ailleurs, [Bourdic, Salat, & Nowacki \(2012\)](#) proposent une typologie d'indicateurs de morphologie urbaine, capables d'évaluer la performance énergétique des formes urbaines, ce qui peut être utile autant pour évaluer les quartiers existants que pour en concevoir de nouveaux :

- Indicateurs d'intensité qui mesurent la densité ou la concentration d'un objet à une échelle donnée ;
- Indicateurs de distribution spatiale qui permettent de comparer la distribution d'un objet d'une échelle à l'autre ;
- Indicateurs de proximité qui mesurent la distance séparant deux éléments ;
- Indicateurs de connectivité qui représentent l'accessibilité ou l'interconnexion spatiale d'un réseau ;
- Indicateurs de diversité ;
- Indicateurs de forme qui caractérisent la géométrie, le volume, l'emprise des objets urbains
- Indicateurs de complexité.

En termes de mobilité, la forme urbaine peut être optimisée selon des indicateurs d'intensité, de connectivité, de proximité, de diversité et de complexité. En termes d'énergie et de bioclimatisme, ce sont les indicateurs d'intensité sur lesquels il faut jouer pour améliorer la qualité environnementale et les indicateurs de forme pour optimiser la forme urbaine ([Bourdic et al., 2012](#)).

3.4. QUALITE ENERGETIQUE DES VILLES : DES LEVIERS URBAINS, ARCHITECTURAUX, TECHNOLOGIQUES ET COMPORTEMENTAUX

Cette revue de la littérature scientifique autour des liens entre énergie et ville, nous a permis de mettre en évidence un certain nombre de variables ayant une incidence sur la qualité énergétique. Nous avons ainsi identifié plusieurs leviers, qui peuvent être classifiés suivant les acteurs en mesure de les activer : leviers urbains, leviers architecturaux, leviers technologiques, et leviers comportementaux. Nous obtenons ainsi le [Tableau 5](#). Cette liste ne se veut pas exhaustive, elle permet toutefois d'illustrer la diversité de variables sur lesquelles il est possible de jouer pour améliorer la qualité énergétique d'une ville. Nous constatons qu'il existe de nombreux leviers urbains et architecturaux. Par conséquent, il paraît opportun d'intégrer les préoccupations énergétiques et climatiques dès les choix de conception urbaine. En revanche, la question de l'énergie en milieu urbain se révèle trop complexe pour qu'un guide pratique à destination des concepteurs urbains soit constitué. A cause des nombreuses interactions entre les variables, mesurer la contribution de chacun de ces leviers à la qualité énergétique d'une ville et hiérarchiser ces leviers est un exercice périlleux.

Tableau 5. Exemples de variables sur lesquelles jouer pour améliorer la performance énergétique d'un quartier urbain et le type de levier qu'elles constituent

Variables	Lien avec la performance énergétique d'un quartier urbain	Levier urbain	Levier architectural	Levier technologique	Levier comportemental
Mixité fonctionnelle	Besoins de déplacements	X			
Densité de population	Potentiel de mutualisation de la production et de la distribution énergétique et développement des transports en commun	X			
Compacité urbaine	Limiter les pertes thermiques du bâti	X			
Contiguïté du bâti	Limiter les pertes thermiques du bâti	X			
Orientation des façades	Profiter des apports solaires	X	X		
Proportion de volumes passifs du bâti	Profiter des apports solaires	X			
Prospect	Profiter des apports solaires	X			
Densité de rues	Inciter les usagers à privilégier les modes de déplacement doux	X			
Intensité des rues	Inciter les usagers à privilégier les modes de déplacement doux	X			
Connectivité de la trame urbaine	Inciter les usagers à privilégier les modes de déplacement doux	X			
Surface dédiée aux modes de déplacements doux	Inciter les usagers à privilégier les modes de déplacement doux	X			
Compacité fonctionnelle	Potentiel de mutualisation énergétique	X	X		
Echelle de production énergétique	Potentiel de mutualisation de la production et de la distribution énergétique et efficacité de la production locale d'énergie renouvelable	X			
Exposition au bruit et à la pollution de l'air des bâtiments	Inciter les occupants à ventiler et à rafraichir naturellement leurs locaux	X	X	X	
Végétation	Ombre et rafraichissement de l'air	X	X		
Surface de vitrage	Pertes thermiques/apports solaires		X		
Réfectivité des matériaux de façade	Apports solaires		X		
Composition de l'enveloppe des bâtiments	Limiter les pertes thermiques		X	X	
Equipements des bâtiments	Efficacité des équipements		X	X	
Energie grise	Energie consommée pour l'extraction, la production et le transport des matériaux et des équipements		X		
Comportement des usagers	Sobriété				X

4. SYNTHÈSE ET CONCLUSION DU CHAPITRE 1

Le contexte énergétique et climatique mondial pose aux sociétés contemporaines un ensemble de défis, faisant de la transition énergétique une nécessité incontournable. En effet, la crise énergétique soulève des questionnements à la fois en termes de sécurité d’approvisionnement, d’accessibilité aux services rendus par l’énergie (confort thermique, cuisson, déplacements, etc.) et des impacts sur l’environnement induits par la production de l’énergie, son transport et sa consommation. Engager une transition énergétique suppose d’apporter des réponses à chacun de ces questionnements et d’esquisser l’avenir énergétique d’un territoire, c’est-à-dire de préciser les ressources énergétiques à exploiter, l’organisation des réseaux énergétiques et le degré de changement des modes de consommation. La transition énergétique est indissociable de la politique de lutte contre le changement climatique dans laquelle la France s’est engagée depuis 2003 et appelée facteur 4. Les ingrédients de la transition énergétique sont donc multiples : améliorer l’efficacité énergétique tant de la production que de la consommation d’énergie, développer les énergies renouvelables, et modifier nos comportements pour aller vers plus de sobriété.

Parce que les villes concentrent désormais plus de la moitié de la population mondiale et qu’elles sont le lieu d’intenses échanges et de consommations en énergie, elles constituent des cibles clés de la transition énergétique. L’énergie doit, selon nous, être en ville considérée comme une problématique de développement durable, dans la mesure où elle soulève des enjeux tant sociaux, économiques, environnementaux, culturels que de gouvernance. Ainsi, il est primordial que cette problématique de l’énergie en ville ne soit pas réduite à la question de la maîtrise de la demande énergétique des bâtiments, mais au contraire qu’elle soit abordée dans toute sa complexité. Le comportement énergétique d’une ville est complexe, dépendant à la fois de la structure urbaine, des réseaux énergétiques, des comportements des habitants, du contexte climatique et économique, etc. Agir sur le système énergétique urbain suppose par conséquent de coordonner les actions selon une approche systémique. En d’autres termes, la réalisation d’actions isolées sur l’une ou l’autre des composantes du système risquerait de déplacer le problème ou d’en créer un nouveau. Ce sont donc des actions plurisectorielles et multi-échelles qu’il s’agit de mettre en œuvre.

Quatre types d’action peuvent être mis en œuvre pour contribuer à rendre les villes plus économes en énergie et moins émettrices de GES :

- Economiser l’énergie grise dans l’acte de construire les bâtiments et les infrastructures de la ville, c’est-à-dire l’énergie nécessaire à l’extraction, au transport et à la transformation des matériaux indispensables à la construction ainsi que l’énergie consommée pendant les travaux ;
- Produire les conditions nécessaires à un usage économe de l’énergie dans la ville (dessins urbain et architectural optimisés, emploi de technologies efficaces), ce qui revient à limiter les besoins énergétiques dans les bâtiments, les besoins de déplacements, l’impact énergétique et climatique de ceux-ci et de fournir des services urbains plus économes ;
- Assurer des conditions optimales pour produire des énergies renouvelables localement ;
- Sensibiliser les usagers à un usage responsable de l’énergie et promouvoir les bonnes pratiques et les technologies innovantes d’un point de vue énergétique et climatique.

La revue de la littérature scientifique sur le lien entre ville et énergie a mis en évidence un grand nombre de travaux de recherches relatifs à l'incidence énergétique de la densification des territoires. La densité urbaine défendue par un grand nombre de municipalités par opposition aux tissus urbains des zones périurbaines pavillonnaires, demeure source de nombreux débats parmi les scientifiques. Les effets de la densification sont de nature très variable allant des besoins et modes de déplacements, aux consommations énergétiques nécessaires au confort thermique des espaces extérieurs et intérieurs, en passant par la faisabilité financière des réseaux de transports en commun ou des réseaux de chaleur. Quoi qu'il en soit, la densité est loin de constituer un critère suffisant en matière énergétique, puisque des territoires à densité égale peuvent présenter des réalités tout à fait différentes, en matière de formes urbaines, de mixité des fonctions, etc. Un grand nombre de variables sont à considérer pour réaliser la transition énergétique des villes : morphologie urbaine, concentration des activités et des emplois, mixité et agencement des fonctions, efficacité de l'offre de transports en commun (Desjardins & Llorente, 2009).

Si une densité urbaine élevée rend possible l'implantation de réseaux de chaleur, ce modèle de réseaux urbains centralisé est en passe d'être délaissé au profit d'un modèle décentralisé, où chaque point du réseau peut être un producteur d'énergie en plus d'être un consommateur. Ce changement de modèle est soutenu par les progrès récents réalisés dans les technologies de l'information et de la communication. Avec ces nouvelles technologies, il est possible de gérer de manière dynamique et « intelligente » les réseaux et en particulier les réseaux énergétiques. Le réseau électrique est le premier réseau à bénéficier de ces avancées technologiques. Quelques expérimentations de « smart grids » dans des quartiers sont recensées en France (IssyGrid à Issy-les-Moulineaux et Nice Grid à Nice sont les expérimentations les plus connues). De tels réseaux favorisent le développement des énergies renouvelables et des dispositifs de stockage de l'énergie et permettent de par leur grande flexibilité d'anticiper et de s'adapter à l'évolution des besoins en énergie ainsi qu'à l'apparition de nouvelles technologies. Le développement des réseaux « intelligents » et décentralisés risque de renforcer les inégalités territoriales d'accès aux services urbains et d'augmenter le coût global de la fourniture de ces services (Coutard & Rutherford, 2013). Quoi qu'il en soit, la mise en place de tels réseaux nécessite de mener une réflexion à l'échelle du quartier pour mettre en évidence les besoins énergétiques, les potentiels de production d'énergie ainsi que les potentiels de mutualisation.

Les travaux de recherche s'intéressant aux déterminants de la performance énergétique des bâtiments montrent qu'il existe des leviers urbanistiques. Outre les choix de conception architecturaux (compacité, efficacité des équipements, performances thermiques de l'enveloppe, etc.), il est possible d'influencer la demande en énergie des bâtiments, lors du dessin urbain, en jouant sur l'orientation et l'implantation des bâtiments de manière à profiter au mieux des apports solaires. Un équilibre nécessite néanmoins d'être trouvé pour que le confort d'été soit préservé. Améliorer la qualité de l'environnement extérieur peut également permettre de réduire la demande en énergie pour rafraîchir les logements en été (végétation, bruit, pollution de l'air, etc.). Cependant, la contribution de ces différents leviers à l'amélioration de la qualité énergétique des bâtiments est difficilement quantifiable, en raison des nombreuses interrelations entre les variables. Améliorer la qualité énergétique des bâtiments suppose de trouver des compromis entre confort d'hiver, confort d'été, potentiel de production d'énergie solaire, besoins en éclairage. Par ailleurs, aborder la question de l'énergie à l'échelle du quartier plutôt qu'à l'échelle du bâtiment fait apparaître de nouveaux leviers. En effet, il est de cette manière possible d'aborder de pair les consommations énergétiques des bâtiments et des déplacements et donc d'optimiser le programme d'une opération en fonction de son accessibilité en

transports en communs ainsi que de favoriser le recours à des modes de déplacements doux en jouant sur les formes urbaines et le dessin des rues. A cette échelle, il est également possible de créer les conditions d'une mutualisation énergétique entre différents programmes ou bâtiments.

Appréhender la question de la transition à l'échelle du quartier, échelle intermédiaire entre le bâtiment et l'agglomération, semble faire apparaître un certain nombre d'opportunités d'actions pour améliorer la qualité énergétique des villes. Cette revue de la littérature scientifique nous a également permis de mettre en évidence quatre types de leviers d'actions pour la transition énergétique : les leviers urbains, les leviers architecturaux, les leviers technologiques, et les leviers comportementaux. Parmi les leviers recensés, nombreux sont ceux qui peuvent, selon nous, être activés lors d'un projet urbain.