

Du post-réseau à l'hyper-connexion la place du réseau dans le futur énergétique des territoires urbains en question

En point de départ de cette thèse et, dès lors, au cœur du propos de ce chapitre, se trouve une ambivalence quant au devenir des réseaux urbains de distribution d'énergie, pourtant considérés depuis maintenant plus de cent cinquante ans comme indissociables du fonctionnement des villes. En effet, d'un côté, les discours institutionnels et réglementations qui prennent pour cadre un objectif de transition énergétique promeuvent l'usage d'énergies décentralisées, renouvelables ou de récupération, dont le développement tend à affaiblir le rôle du grand réseau centralisé tel qu'il existe aujourd'hui. De l'autre, un discours émerge quant à la difficulté de trouver une adéquation entre ces productions locales et les besoins individuels de ceux qui les produisent. En d'autres termes, la possibilité de leur autonomie est mise en doute. Pour améliorer l'efficacité du système énergétique, les discours promeuvent alors des échanges de flux d'énergie entre des activités qui, traditionnellement, ne sont pas reliées sur le plan énergétique. Ces échanges passent par la création de nouvelles liaisons matérielles, c'est-à-dire par de nouvelles mises en réseau.

Ainsi, l'évolution du rôle de la forme réticulaire dans l'approvisionnement énergétique des villes est incertaine, au sens où son affaiblissement comme son renforcement sont concomitamment considérés, les implications urbaines de cette ambivalence étant insuffisamment explorées. Dans ce chapitre, nous commençons par révéler cette ambivalence et les principes techniques et fonctionnels sur lesquels elle repose (I). Nous donnons ensuite à voir les discours institutionnels qui, de l'échelle européenne à celle de collectivités locales, promeuvent ces nouvelles formes de mise en réseau, afin de montrer l'épaisseur qu'elles prennent dans les stratégies de transitions énergétiques (II). Nous montrons alors que les approches académiques de ces formes par la littérature explicitement urbaine ne les considèrent que pour leur dimension matérielle (III). De là, nous avançons qu'elles doivent au contraire être construites comme une combinaison de flux, d'objets techniques et d'acteurs organisés dans l'espace et ouvrons sur les champs de recherche qui peuvent aider à les conceptualiser en ce sens (IV).

I. Le réseau dans les transitions énergétiques urbaines : un statut ambivalent

L'idée de transition énergétique urbaine est un concept aux contours flous, bien souvent utilisé comme expression signifiante puisqu'appartenant aujourd'hui au débat public. Elle est parfois présentée comme la passage d'une dépendance aux énergies fossiles à un usage d'énergies renouvelables dans le fonctionnement urbain (Droege, 2011) ou bien est « prioritairement conçue comme impliquant l'utilisation accrue d'énergies renouvelables » (Bolzon, Rocher et Verdeil, 2013). Elle est encore décrite, en un sens élargi, comme « un changement radical, systémique et dirigé vers des approvisionnements et usages « plus soutenables » et « plus efficaces » de l'énergie »³ (Rutherford et Coutard, 2014).

La notion est donc plurielle et touche, de près ou de loin, à tout ce qui a trait à la vie et aux fonctionnements urbains. Nous abordons ici cette question, dans une première approche, par un sous ensemble de ce qui compose les systèmes énergétiques urbains : les réseaux, qui ne sont pour le moins pas au cœur des recherches sur les transitions énergétiques urbaines (Rocher, 2013). Invisibles dans leur majorité aux usagers, ils innervent pourtant les villes pour distribuer l'énergie et les relier à des macro-systèmes techniques transfrontaliers et jouent un rôle depuis maintenant plus d'un siècle dans le fonctionnement urbain. Malgré cela, ils sont aujourd'hui mis en cause dans des critiques qui semblent dessiner une ville sans réseaux et qui s'appuient sur les mêmes arguments qui fondent la défense de la nécessité d'une transition énergétique (A). Pour autant, et c'est là le point de départ de notre investigation, la mise en réseau de l'urbain par des échanges énergétiques apparaît quant à elle toujours valorisée, mais sous des formes renouvelées qui visent précisément à favoriser une transition énergétique (B).

A. Du réseau au post-réseau, vers un changement de modèle pour la fourniture des services urbains ?

Les historiens des sciences et des techniques l'ont montré : à partir du milieu du XIX^{ème} siècle, la forme réseau se diffuse et devient le mode dominant de fourniture des services urbains dans les villes du Nord. En particulier, les réseaux de gaz et d'électricité sont installés dans les villes européennes et nord-américaines (Hughes, 1993), jusqu'à, pour l'électricité, irriguer tout le territoire. Cette transformation est jugée si importante par Abram De Swaan qu'il va jusqu'à avancer qu'elle est indissociable de la formation des villes modernes :

³ Traduction personnelle de l'anglais. Texte original : “*a radical, systemic and managed change towards ‘more sustainable’ or ‘more effective’ patterns of provision and use of energy*”.

répondant à des problématiques d'hygiène et de qualité de vie, elle a contribué à leur développement et à leur extension (De Swaan, 1995). Gabriel Dupuy consacre également la forme du réseau comme le paradigme fondamental de la construction des villes modernes (Dupuy et Tarr, 1988) et cherche à montrer comment le mode de pensée des urbanistes doit évoluer pour prendre en compte cette réalité (Dupuy, 1991 ; Dupuy, Van Schaick et Klaasen, 2008).

Au-delà de la forme technique du réseau, les systèmes ainsi construits sont associés à la fourniture de services aux caractéristiques bien particulières. Le réseau, tel qu'il est défini par Olivier Coutard, désigne en effet un « ensemble d'équipements interconnecté, planifié et géré de manière centralisée à une échelle tantôt locale tantôt plus large et offrant un service plus ou moins homogène sur un territoire qu'il contribue à solidariser » (Coutard, 2010, p. 102). On note ainsi deux notions clés qui sortent des considérations purement techniques : la centralisation et la solidarisation. La première d'entre elles s'applique à plusieurs aspects de ces systèmes techniques : d'un côté, le faible nombre de points de production en comparaison du nombre de points de consommation, de l'autre, la centralisation de la décision quant à la gestion, la régulation et la planification à une échelle locale ou plus large du réseau (Coutard, 2010 ; Coutard et Rutherford, 2010a). Ainsi, Jean-Marc Offner montre que le monopole territorial, qu'il soit local ou national, est en général présenté comme le plus approprié pour la gestion des services en réseau, en raison de l'importance des investissements en infrastructures nécessaires à la fourniture du service (Offner, 1996). La centralisation permettrait alors des économies d'échelle et d'envergure, qui contribuent à abaisser les coûts du service pour chacun par le regroupement des productions et des consommations (Curien, 2000). Taoufik Souami montre ainsi comment la centralisation de la gestion de l'eau potable est le résultat d'un processus historique qui met précisément en avant l'importance des économies d'échelle (Souami, 2012).

La seconde notion fait référence aux différentes liaisons que le réseau contribue à créer au sein du territoire qu'il irrigue. Le rôle solidarisant est fortement ancré dans la conception scientifique des réseaux historiques, si bien que Gabriel Dupuy les définit comme des équipements techniques de solidarité urbaine (Dupuy, 1984). Il utilise l'idée « dans tous les sens du terme solidarité, c'est-à-dire aussi bien la dépendance physique que les rapports relatifs à un enjeu économique et social » (Dupuy, 1984, p. 20). De même, Olivier Coutard et Jonathan Rutherford expliquent que cette solidarité s'exprime sur quatre plans (Coutard et Rutherford, 2015, p. 19) : par la redistribution socio-économique (on pense par exemple à la

péréquation tarifaire pour le système électrique français (Poupeau, 2007)), par l'intégration fonctionnelle d'espaces toujours plus grands, par l'intégration politique à travers l'incitation à fournir un service homogène sur des territoires aux gouvernances distinctes et par « l'intégration métabolique », c'est-à-dire l'appropriation de ressources pour l'usage de grandes régions urbaines⁴. Les effets attribués au réseau sont donc très forts puisque ce dernier contribuerait à faire tenir le territoire physiquement, socialement et économiquement ensemble.

Les qualificatifs qui sont ici associés au réseau ont dans l'ensemble des résonances positives, liées à des idées d'égalité et de solidarité, ce dernier terme étant même utilisé sans détour. Cette approche dans la littérature académique résonne avec la supériorité conférée à la forme réseau par les acteurs de la fourniture des services pendant plus d'un siècle (Le Bris et Coutard, 2008) : « la solution aux problèmes créés par les réseaux résidait dans les réseaux eux-mêmes, dans leur extension plus grande, leur gestion plus centralisée, leur sophistication technique accrue ».

Toutefois, malgré ce consensus général, la forme du réseau centralisé n'est jamais restée sans détracteurs. Fanny Lopez l'explique fort bien dans son ouvrage « Le rêve d'une déconnexion » (Lopez, 2014, p. 78) : « au moment même où le rêve de la connexion se réalise [...], se profile une nouvelle utopie technicienne : la déconnexion ». Ainsi, la dépendance des individus à un macro-système technique géré de manière centralisée pose problème à différents mouvements, des plus contestataires, comme la contre-culture, aux plus institutionnels, comme l'expérience de *l'Autonomous Housing Project* menée par Alexander Pike à Cambridge (Lopez, 2011b). Les critiques du modèle en place sont autant d'ordre social qu'économique ou environnemental. Cependant, les différentes expériences menées jusqu'aux années 1980 sont abandonnées ou restent inachevées, laissant derrière elles un héritage plus que mitigé (Lopez, 2014, 2017).

⁴ «*In the North where the universal deployment of networked infrastructure systems was achieved, the advent of the networked city historically, from the mid-nineteenth century, has been (shown to be) associated with various forms of integration or solidarity:*

- *socioeconomic integration through the (cross) subsidized provision of homogeneous essential services across urbanized spaces;*
- *functional integration, as networked infrastructures have facilitated and sustained spatial practices on the scale of ever broader living areas;*
- *political integration, through the cooperation between contiguous local governments encouraged by the thrust to provide homogeneous services within entire urban regions;*
- *“metabolic integration”, as the development of large, monopolistic, centrally-managed networked infrastructure systems resulted in, and rested on, the appropriation of (remote) resources for the benefit of the development of the entire urban region”* (Coutard et Rutherford, 2015, p. 19).

C'est finalement à partir du début des années 1990 qu'une contestation plus générale du modèle du grand réseau émerge, principalement basée sur des arguments environnementaux (Coutard, 2010). Les critiques ne se portent pas uniquement sur le système énergétique mais plus largement sur la forme du macro-système technique centralisé que l'on retrouve également dans la fourniture de l'eau, l'assainissement ou encore la gestion des déchets (Dobigny, 2012). Leur origine tient à la place sans cesse croissante dans le discours scientifique et médiatique de l'importance de l'influence des activités humaines sur l'environnement physique. On parle ainsi d'anthropocène, terme au départ scientifique qui se diffuse auprès du grand public, pour désigner « la période géologique actuelle [...] marquée par l'émergence de déterminismes d'origine anthropique au côté des déterminismes naturels qui jusque-là conditionnaient la planète » (Barles, 2010a, p. 63).

Les grands réseaux se voient alors associés à un usage dispendieux des ressources et à des rejets importants de déchets dans l'environnement qui perturbent le fonctionnement des écosystèmes et assoient le fonctionnement urbain sur des ressources dont les stocks s'épuisent. En outre, leur gestion centralisée est jugée éloignée des préoccupations des usagers des services qu'elle empêcherait de saisir l'impact et la portée de leurs consommations, limitant ainsi la possibilité d'inciter à une sobriété des usages.

Olivier Coutard montre de manière synthétique, dans le Tableau 1.1 reproduit ci-dessous, les différentes oppositions conceptuelles entre grand réseau centralisé et (éco)systèmes urbains dits « durable » promus en réponse à ces déséquilibres matériels (Coutard, 2010, p. 114).

Tableau 1.1 : Des paradigmes contrastés : grand système de réseau et techno-écocycle – extrait de Coutard, 2010, p. 114

Réseau	Ecosystème urbain (durable)
Solidarité, solidarisation	Autonomie, autonomisation
Métabolisme linéaires : prélèvement > approvisionnement > évacuation	Métabolisme circulaire : recyclage, rejets minima
Ingénierie, mécanique, systèmes techniques, cybernétique	Écologie, systèmes organiques, écosystèmes
Étanchéité, écoulement, flux, cinétique ; modèle de flux (hydraulique)	Porosité, stase, stock, lenteur ; modèles de stocks (ressources non renouvelables)
Découplage entre les capacités du milieu et les pratiques de consommation des ressources	Adéquation entre les capacités du milieu et les pratiques de consommation des ressources
Cycle long, débouclage	Cycle court, (re)bouclage

Logique d'offre ou de construction/satisfaction de la demande	Logique de maîtrise de la demande
Modèle technico-économique d'expansion de grands systèmes : économies d'échelle, d'envergure, de variété ; effets de club ; moindre coûts de transaction	Modèle écologique de conservation ou de préservation des ressources et des milieux
Equipements de grande taille, gérés de manière centralisée	Equipements de petite taille unitaire, dispersés, gérés de manière décentralisée
Consommation non bornée ; croissance perpétuelle de l'urbanisation, de la richesse matérielle, de l'usage des services urbains	Consommation modérée, sobriété ; dissociation entre croissance et développement, décroissance
Irréversibilité, « momentum », inflexibilité	Réversibilité, adaptabilité

De manière générale, c'est donc l'usage linéaire des ressources, déconnecté des capacités des milieux où elles sont prélevées, sur lequel s'appuie le fonctionnement du grand réseau qui est mis en cause (Brunner, 2007) ou encore l'enfermement de sa gestion technique et économique qui la réserve à un cercle restreint d'acteurs (Souami, 2012).

Promotion est alors faite par des experts, des militants ou des responsables politiques de systèmes autonomes de production de services à différentes échelles, ou tout du moins visant l'autonomie et recherchant ainsi le minimum de dépendance au système centralisé. Dominique Lorrain *et al.* voient cette évolution comme un processus de « miniaturisation » ou d'« individualisation » des systèmes techniques, observé auparavant dans certaines industries telles que les transports (passage du ferroviaire à la voiture individuelle) ou l'informatique (Lorrain, Halpern et Chevauché, 2017b). Dans le cas des services urbains, les écoquartiers ou quartiers dits durables sont le laboratoire qui en permettent l'expérimentation (Souami, 2009). Bien que les techniques mises en œuvre y soient dans une certaine mesure standardisées, l'idée qui prévaut n'est plus celle de l'extension par défaut d'une infrastructure en réseau identique en tout point de l'espace aménagé. Dans le domaine de l'énergie, on tend au contraire vers un « sur-mesure énergétique », comme suggéré par Taoufik Souami où le système est pensé en fonction des usages, ressources et potentiels de production propres au lieu (Souami, 2007).

Les techniques attenantes à ces principes s'opposent donc au système conventionnel en ce qu'elles sont décentralisées, c'est-à-dire que, dans le principe au moins, elles produisent localement pour des usages locaux. On installe ainsi des systèmes de production locaux, notamment des panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques dont le placement sur les toitures devient presque un prérequis de la qualification d'écoquartier pour les nouveaux aménagements (Souami, 2009). On promeut la création de boucles locales au travers de la récupération d'effluents de matière locaux pour produire de l'énergie localement. L'exemple le plus souvent cité de mise en œuvre de tels principes est le quartier d'Hammarby Sjostadt à Stockholm où la production renouvelable locale et la création de boucles de matière et d'énergie sont appliquées à l'ensemble des services, malgré de nombreuses limites dans les faits (Pandis Iveroth, 2014 ; Rutherford, 2008).

La diffusion de ces modèles alternatifs donne alors naissance à une hypothèse scientifique : celle du glissement vers une ville « post-réseau » (Coutard et Rutherford, 2009, 2013, 2015 ; Féré et Scherrer, 2014 ; Petitet, 2011 ; Scherrer, 2010), c'est-à-dire de l'altération, à plusieurs titres, du modèle conventionnel de fourniture des services urbains pour aller vers des formes moins centralisées et moins dépendantes d'infrastructures lourdes de transport et distribution des flux. Cette hypothèse est en particulier explorée au sein d'un numéro de revue et d'un ouvrage qui regroupent des travaux internationaux sur les techniques décentralisées (Coutard et Rutherford, 2009 ; Rutherford et Coutard, 2015). Ce qui en ressort n'est pas la disparition univoque des lourdes infrastructures plus que centenaires que sont les grands réseaux de services urbains mais leur transformation aux marges et leur hybridation (Lorrain, Halpern et Chevauché, 2017c) avec des techniques décentralisées formant des « ensembles composites » (Jaglin, 2012). Ainsi, différentes formes d'altération du réseau conventionnel co-existent avec les infrastructures conventionnelles, comme le suggère le Tableau 1.2, associées à diverses relations entre les techniques décentralisées et l'infrastructure conventionnelle. En outre, l'évolution peut exister tant du point de vue de l'organisation que de l'échelle d'autonomie de décision.

L'hypothèse du post-réseau appelle donc un examen approfondi des évolutions contemporaines de fourniture des services, en particulier énergétiques. Elle suppose la sortie d'une idéologie, partagée pendant une longue période, selon laquelle le réseau est toujours, en tout contexte et en tout lieu, la forme la plus efficace de circulation des flux (Coutard et Rutherford, 2015 ; Lopez, 2014).

Tableau 1.2 : Une typologie des voies « post-réseau » pour une transition urbaine - Extrait de Coutard et Rutherford, 2013, p.14

		ORGANISATION	
		Découplage (autarcie locale)	Nouvelles formes de couplage (autonomie locale)
DECISION	Echelle locale et collective de la décision	Hors réseau	Boucler la boucle
	Echelle individualisée (ou quasi-individualisée) de la décision	Au-delà du réseau	Injection dans le réseau

B. Rechercher l'adéquation locale entre productions et consommations : moins de centralisation mais plus de tuyaux ?

La dénomination-même de l'hypothèse, bien que nous ayons montré qu'elle n'illustre pas la supposition d'une disparition complète du réseau, laisse toutefois paraître l'idée selon laquelle il s'affaiblirait : il existerait moins d'interconnexion entre les différents dispositifs de production et de consommation au sein des espaces urbains. À la limite, on se dirigerait vers une juxtaposition de bâtiments aux fonctionnements énergétiques disjoints, sans interaction sur ce plan.

Pourtant, la nature physique des flux produits et consommés dans la fourniture du service appelle d'autres considérations qui semblent s'opposer à ces dernières. Fanny Lopez le constate à la fin de son ouvrage sur l'autonomie énergétique où elle montre que dans les discours et représentations actuelles du futur des systèmes énergétiques urbains, on parle certes de systèmes de production décentralisés, mais aussi de connexion entre eux tous (Lopez, 2014). Laurence Rocher démontre également une tension dans les discours de la transition énergétique qui se cristallise autour de la promotion d'un renouveau des réseaux de chaleur (Rocher, 2013, 2014) : alors que la forme du grand réseau centralisé est condamnée comme forme inadaptée aux enjeux environnementaux contemporains, la multiplication, la densification, l'extension et l'interconnexion des réseaux de chaleur sont encouragées, sous le motif qu'ils seraient la forme la plus efficace de circulation des flux de chaleur renouvelables et de récupération. On assiste donc à un compromis entre flux et infrastructure, dans laquelle une vision « écocyclique » du système énergétique urbain justifie une expansion des infrastructures en réseau. Dans un autre domaine, Sabine Barles *et al.* font également le constat d'une promotion de la multiplication des mises en réseau au travers de l'étude du cas

de la remise en service d'un réseau alternatif d'eau non potable à Paris (Barles, Coutard et Guillaume, 2015).

Une image d'hyper-connexion se dessine ainsi, dans laquelle la centralisation des productions est affaiblie mais le nombre de câbles et de tuyaux qui irriguent l'urbain, quant à lui, s'accroît, laissant penser que les systèmes énergétiques se dirigent davantage vers une multiplication des liens à toutes les échelles que vers un affaiblissement de la mise en réseau. La partie suivante de ce chapitre a pour objectif de montrer la forme que prend la promotion d'une telle hyper-connexion dans les discours des institutions internationales, nationales ou locales qui jouent un rôle dans la dynamique de mise en œuvre d'une transition énergétique. Toutefois, avant d'entrer dans un tel exposé, nous présentons dans ce qui suit les concepts généraux qui fondent les arguments avancés pour défendre ces formes de connexion. En d'autres termes, nous tentons de répondre à la question suivante : alors que la forme du grand réseau est jugée non conforme aux enjeux environnementaux, pourquoi certains acteurs promeuvent-ils, de manière apparemment contradictoire, de nouvelles formes de mise en réseau de l'urbain par l'énergie ?

L'une des formes de « post-réseau » présentée par Olivier Coutard et Jonathan Rutherford dans le Tableau 1.1, « boucler la boucle » nous permet de mettre en exergue une première explication, et peut-être la plus évidente. En effet, le « bouclage » local des flux, pour le cas de l'énergie, se traduit en particulier par la récupération d'un flux de chaleur pour les usages locaux qui serait autrement rejeté dans l'atmosphère ambiante. Dans le langage des énergéticiens, on parle de la récupération d'énergie fatale (voir l'Encadré 1.1) qui nécessite la construction d'une infrastructure permettant la circulation du flux de son producteur à des consommateurs, c'est-à-dire des tuyaux, semblables à ceux que l'on retrouve dans les systèmes énergétiques conventionnels.

Encadré 1.1 – **La chaleur fatale**

L'application du qualificatif « fatale » à la notion d'énergie peut *a priori* sembler surprenante. Elle est pourtant aujourd'hui consacrée pour désigner une réalité physique spécifique. L'expression « chaleur fatale » est définie par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) comme étant « la chaleur générée par un procédé qui n'en constitue pas la finalité première, et qui n'est pas récupérée » (ADEME, 2015c, p. 7). La notion fait donc référence à la « fatalité » d'une telle production : elle existe, bien qu'elle ne soit pas

souhaitée. La chaleur de récupération constitue alors ce même flux s'il est capté et réutilisé pour un usage quelconque et la chaleur perdue est une chaleur fatale qui n'est pas réutilisée.

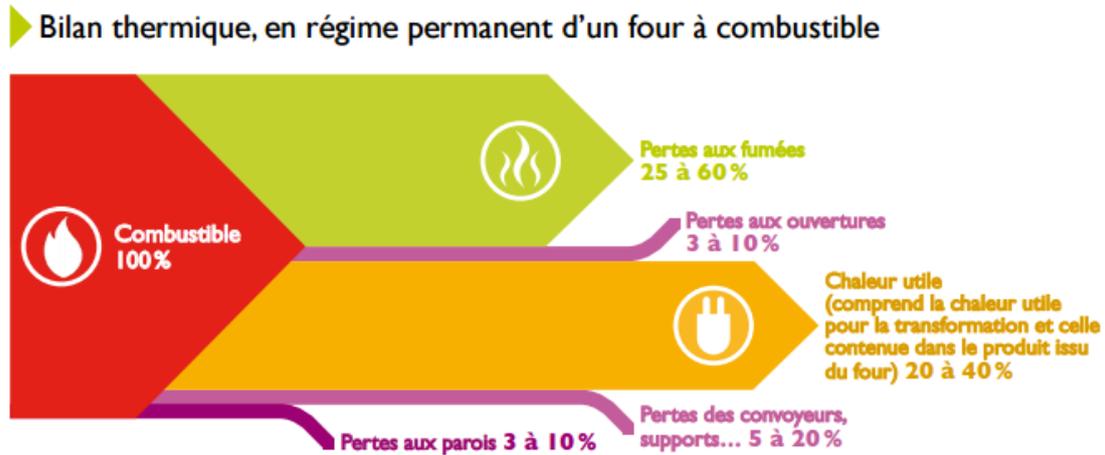


Figure 1.1 : Représentation des pertes de chaleur dans divers flux lors d'un procédé industriel de combustion en four : 60 à 80% de la chaleur est de la chaleur fatale - Source : "La chaleur fatale industrielle", ADEME, 2015

Les sources de chaleur fatale sont très diverses puisque de nombreux procédés génèrent de la chaleur qui se dissipe dans l'atmosphère : si l'on s'intéresse simplement à une habitation, on peut penser à l'éclairage, à la cuisson, au chauffage de l'eau sanitaire, aux appareils électroménagers ou bureautiques. Toutefois, dans les faits, ce sont surtout les sources concentrées de chaleur qui sont considérées dans les documents qui y font référence. Ainsi, sont évoqués les industries, et notamment celles qui utilisent des fours à haute température (voir la Figure 1.1 pour une illustration), les *data centers* qui, regroupant une forte densité de serveurs informatiques produisent une grande quantité de chaleur qu'ils doivent évacuer (ALEC Plaine Commune, 2013), les collecteurs d'eaux usées, souvent à une température supérieure à celle extérieure et les incinérateurs d'ordures ménagères (ADEME Ile de France, 2015 ; Région Ile de France et Préfet de la région Ile de France, 2012).

On distingue alors deux façons de valoriser ces flux : une valorisation interne, c'est-à-dire pour le processus en lui-même en créant une boucle directe (par exemple pour le préchauffage des matières), ou pour le même usager mais dans un autre processus ; ou bien une valorisation externe, c'est-à-dire pour d'autres usagers. Dans ce second cas, les réseaux de chaleur sont alors le vecteur de transport du flux, depuis le producteur jusqu'au consommateur.

Toutefois, les arguments sur lesquels s'appuient la justification de nouvelles formes de connexions énergétiques ne s'arrêtent pas à cette idée de « bouclage des flux ». Dans une autre dimension, elle peut en fait aisément être reliée à l'un des arguments qui a servi à justifier jusqu'à récemment la supériorité du réseau conventionnel et de l'interconnexion. En effet, l'idée de connecter un nombre toujours croissant de consommateurs est défendue en

particulier à travers la notion d' « économie d'envergure » (Coutard, 1994 ; Curien, 2000) ou *load diversity* en anglais (Andrews, 2008). Le principe en est simple : plus on connecte d'utilisateurs au réseau, plus les usages sont diversifiés et plus facilement on peut espérer équilibrer les consommations dans le temps pour mieux gérer le parc de production. Une illustration empirique de l'importance de ce principe est donnée par Mark Rose qui montre comment il est intégré à la stratégie d'un opérateur énergétique américain à la fin des années 1926 (Rose, 1988, p. 232) : *"yet by 1926, executives at the Public Service Company of Colorado (PSCC) had decided to take advantage of the diversity in Denver, assuming that they could balance their domestic and industrial loads against one another, thus creating a large potential market without expensive improvement in capacity"*.

Pour décrire cette caractéristique des réseaux, les énergéticiens utilisent la notion de foisonnement. Le CETE⁵ de l'Ouest (aujourd'hui CEREMA⁶) en donne une explication très claire dans une publication sur les réseaux de chaleur (CETE de l'Ouest, 2012), dont la Figure 1.2 est une illustration.

Il nous faut toutefois préciser un point technique important pour comprendre le principe qui sous-tend la lecture de cette dernière : les installations de production énergétique sont dimensionnées en fonction de la puissance maximale nécessaire à fournir l'énergie consommée. Ainsi, ce n'est pas tant la quantité d'énergie consommée qui importe pour planifier et dimensionner le système technique que sa répartition dans le temps, et tout particulièrement sa pointe, c'est-à-dire la valeur la plus haute de puissance consommée. Nous parlons ici de techniques locales, que l'on peut qualifier de « micro-systèmes techniques » en opposition aux macro-systèmes évoqués dans la section précédente, mais la problématique de la pointe est en fait bien plus médiatisée pour ces derniers. On sait en effet que la pointe de consommation nationale d'électricité ne cesse d'augmenter. Or, dans le système électrique tel qu'il est construit aujourd'hui, la production de pointe est la plus coûteuse sur les plans économiques et environnementaux, car elle demande la construction et la mise en fonctionnement de systèmes de production dits d'appoints, qui doivent être flexibles et ne sont utilisés que pour une part très faible de leur capacité réelle, leur production n'étant pas utile la plupart du temps (FNCCR, 2013).

⁵ Centre d'Etude Technique de l'Équipement

⁶ Centre d'Etude et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

À l'échelle beaucoup plus fine qui nous intéresse, l'exemple développé par le CETE de l'Ouest part du profil temporel de consommation de deux bâtiments, l'un abritant des bureaux et l'autre des logements. On constate que les consommations d'énergie y sont décalées dans le temps. Leur combinaison, c'est-à-dire leur somme, permet alors un « lissage » de la courbe de charge.

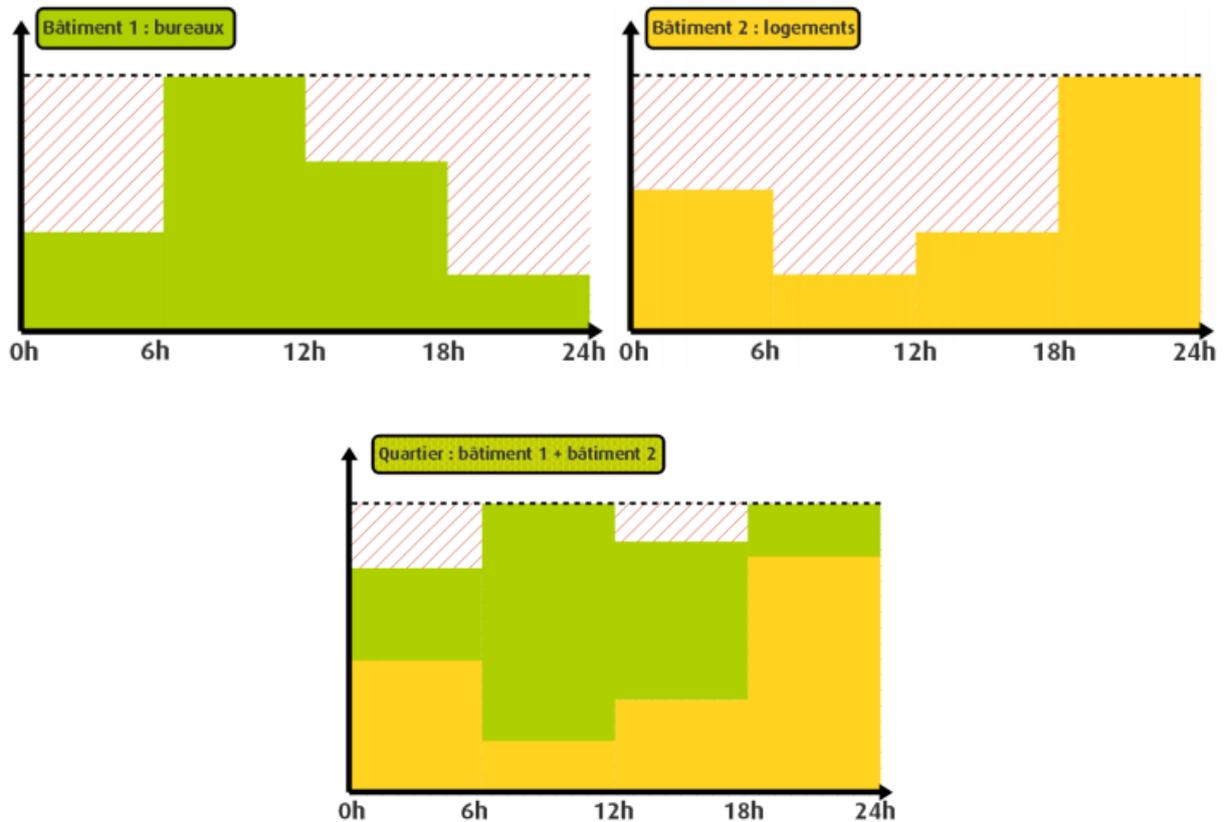


Figure 1.2 : Superposition des consommations de deux bâtiments aux fonctions distinctes - Extrait de CETE de l'Ouest, 2012, p. 10

Le CETE de l'Ouest et, comme nous le verrons plus loin, de nombreux acteurs institutionnels de l'aménagement et de l'énergie (ministères, collectivités, associations d'entreprises ...) tirent plusieurs conclusions de ces résultats. Ils en déduisent en effet qu'il est plus intéressant de concevoir les systèmes de production d'énergie à l'échelle de plusieurs bâtiments aux fonctions diverses que de manière individuelle, et ce pour deux raisons. D'une part, la puissance installée dans le premier cas est inférieure à la somme des puissances installées dans le second, ce qui entraîne donc un abaissement des coûts économiques et environnementaux liés à la fabrication et à l'exploitation des systèmes de production. On

retrouve ici précisément les économies d'envergure qui font partie des vertus allouées au grand réseau.

D'autre part, la puissance souscrite se rapproche davantage, en tout temps, de la puissance maximale, c'est-à-dire de celle que peut effectivement produire le système technique. Les capacités de ce dernier sont donc davantage utilisées. Dès lors, il apparaît qu'une mutualisation des productions énergétiques (Masboungi, 2014, p. 88), entre des activités dont l'évolution des consommations dans le temps se complète dans une certaine mesure, n'est pas neutre sur le plan de la construction du système technique.

Cependant, cette approche se limite à la question de l'évolution de la consommation. Or, une caractéristique importante de bon nombre de productions locales, qu'elles soient renouvelables ou de récupération, est leur intermittence. En d'autres termes, que l'on parle de production solaire ou de récupération d'un effluent de chaleur provenant d'une activité locale qui n'a pas pour objectif de produire de l'énergie, elles ne sont pas disponibles en n'importe quelle quantité et en tout instant pour répondre à la demande. De la même manière que précédemment, il apparaît alors que plus les consommateurs potentiels du flux sont divers, plus il est aisé de trouver un usage à l'énergie produite en chaque instant. Ainsi, le partage des productions locales entre des activités diverses offre *a priori* de plus grandes possibilités d'obtenir une adéquation entre productions et consommations en tout temps qu'une conception autonome. De là, on voit apparaître des relations entre le système énergétique et la forme spatiale d'organisation des villes (Owens, 1986). La mixité d'activités autour du point de production revêt en effet une importance considérable pour l'intérêt technico-économique de ce partage puisqu'elle amène une diversité d'usages dans un périmètre donné. De la même manière, lorsque l'on cherche à récupérer un flux de chaleur perdue, il est nécessaire de lui trouver des consommateurs à proximité du producteur. Le fonctionnement du système énergétique entre alors explicitement en interaction avec l'organisation des activités urbaines dans l'espace.

La boucle finit alors par se boucler puisque tous les échanges, circulations ou partages de flux d'énergie envisagés ici passent par des câbles ou des tuyaux, c'est-à-dire par des infrastructures en réseau, au sens technique du terme. Dès lors, si la mutualisation, l'échange ou encore la récupération de flux au travers de telles infrastructures sont encouragés, on voit bien se dessiner l'hyper-connexion décrite par Fanny Lopez en conclusion de son ouvrage (Lopez, 2014).

Néanmoins, nous n'avons jusqu'ici fait qu'énoncer de manière théorique des principes techniques et fonctionnels, et n'avons donc en rien montré l'importance qu'ils prennent dans la manière de faire ou projeter les systèmes énergétiques urbains. Comme énoncé plus haut, tout l'enjeu de la partie suivante de ce chapitre est de montrer qu'ils prennent bien une épaisseur dans le contexte français actuel où l'on énonce des stratégies de « transition énergétique » à toutes les échelles.

II. Mutualisations et récupérations : des outils pour l'évolution des systèmes énergétiques urbains promus dans les discours institutionnels

L'ensemble des notions présenté dans la section précédente n'est pas nouveau pour les techniciens de l'énergie. Comme nous l'avons montré, le problème de la pointe de consommation, la question du foisonnement ou encore les économies d'envergure, font partie du vocabulaire des industriels des réseaux d'énergie depuis de nombreuses décennies. Cependant, la nouveauté provient ici de leur association à des réalités bien différentes, à des échelles largement réduites et pour gérer d'autres types de productions.

Nous souhaitons montrer dans ce qui suit que ces notions apparaissent, associées à ce nouveau contexte, dans de nombreux documents et éléments de discours récents émanant de diverses institutions dont les positions quant à l'aménagement et à l'énergie ont une influence forte sur le paysage français de ces secteurs. Ce sont ainsi des institutions européennes, des ministères, des agences nationales ou locales ou encore des collectivités qui se saisissent de ces concepts pour construire et orienter des stratégies de transition énergétique. En particulier, en tant que producteurs de réglementations ou financeurs de projets et d'expérimentations, ces acteurs ont la capacité d'orienter, dans une certaine mesure, les actions entreprises dans ces domaines.

Nous abordons ces discours de manière thématique, en nous référant à deux réalités que recouvrent ces nouvelles connexions, qui ressortent des développements précédents : d'un côté, la récupération de la chaleur fatale (A) et, de l'autre, la mutualisation de l'énergie produite localement entre plusieurs bâtiments (B). Les éléments que nous présentons dans ce qui suit ont été mis au jour au travers d'une lecture approfondie des documents récents publiés par les principales institutions françaises jouant un rôle dans l'aménagement ou l'approvisionnement énergétique, à toutes les échelles, ainsi que d'une veille constante en ce domaine, depuis 2013. Nous avons de cette manière pu constater un fort accroissement des

prises de position sur ces sujets durant cette période, comme en attestent les dates pour la plupart très récentes des documents auxquels nous faisons référence dans ce qui suit. Notre objectif n'est pas l'exhaustivité, même si nous avons tenté de l'être en interrogeant directement les acteurs concernés par ces sujets au cours d'entretiens⁷, en assistant à des séminaires et rencontres professionnelles et en actualisant aussi fréquemment que possible la veille des documents publiés ou publicisés en ligne. Nous cherchons davantage à montrer que ces concepts font désormais partie du vocabulaire commun des acteurs des systèmes énergétiques urbains. Pour chacun des deux concepts, nous abordons les différentes mentions relevées par échelles emboîtées. Ainsi, partant de discours d'organisations supranationales, nous nous intéressons ensuite à l'échelon national avant d'aborder les différentes initiatives d'échelles locales.

A. La récupération de chaleur fatale entre estimation et réglementation

L'utilisation de flux de chaleur fatale, contrairement à certaines techniques locales de production d'énergie que nous avons évoquées dans ce qui précède, existe de par le monde depuis de nombreuses décennies. Depuis que les industriels utilisent de fortes quantités d'énergies fossiles et rejettent, par suite, de nombreuses calories dans l'air ambiant ou dans les fleuves, cette solution est envisagée. On trouve ainsi de nombreux exemples d'échange de chaleur fatale entre des industriels et des réseaux de chaleur urbains en Suède, dont certains sont anciens (Broberg *et al.*, 2012 ; Grönkvist et Sandberg, 2006)⁸.

Pourtant, depuis quelques années, on observe un foisonnement d'initiatives, d'études et de publications des acteurs institutionnels quant à ce potentiel énergétique jugé sous-utilisé. Par exemple, sur un plan qui peut sembler de première importance, une directive européenne datant de 2012⁹ contraint certaines activités, sous certaines conditions, à évaluer le potentiel de récupération sur leurs installations. Ladite réglementation est transcrite dans le droit

⁷ Nous mettons ici en avant une méthode par allers-retours entre la contextualisation et la construction du sujet et l'analyse du terrain sur laquelle nous reviendrons plus précisément par la suite.

⁸ Un témoignage d'un exemple ancien de ce type d'échange énergétique entre différentes activités, cette fois-ci non industrielles, peut également être trouvé dans l'ouvrage « La Fée et la Servante » qui vise à comprendre le rapport de la société française à l'électricité aux 19^{ème} et 20^{ème} siècles : « le Théâtre des Variétés serait également digne d'intérêt par le louable souci de rationalité qui avait animé les concepteurs de l'installation électrique. L'eau de condensation des machines à vapeur, au lieu d'être perdue, réchauffe le bassin d'une piscine proche, où elle permet de gagner plusieurs degrés, exemple précoce d'utilisation rationnelle de l'énergie » (Beltran et Carré, 1991, p. 104).

⁹ Paragraphe 5 de l'article 14 de la directive 2012/27/UE, publiée au journal officiel de l'Union Européenne le 14/11/2012

français par un décret en 2014¹⁰. Toutefois, les conditions de sa mise en application sont si restrictives (il doit s'agir d'un ICPE¹¹ d'une puissance de plus de 20 MW lors de son implantation ou de travaux de modification ou rénovation importants) que sa portée est faible. Ce sont finalement des actions d'incitation, d'estimation et de communication qui mettent davantage la valorisation de la chaleur fatale sur le devant de la scène.

Ainsi, toujours à l'échelle européenne, la Commission publie pour la première fois en 2016 une stratégie de chauffage et refroidissement et fait de la récupération de la chaleur rejetée par les industries l'un des quatre axes de cette dernière. Elle reprend en particulier l'idée à la base du programme Celsius City (voir plus bas) d'une possibilité de couvrir l'ensemble des besoins des bâtiments grâce à cette chaleur (voir Figure 1.3)¹².

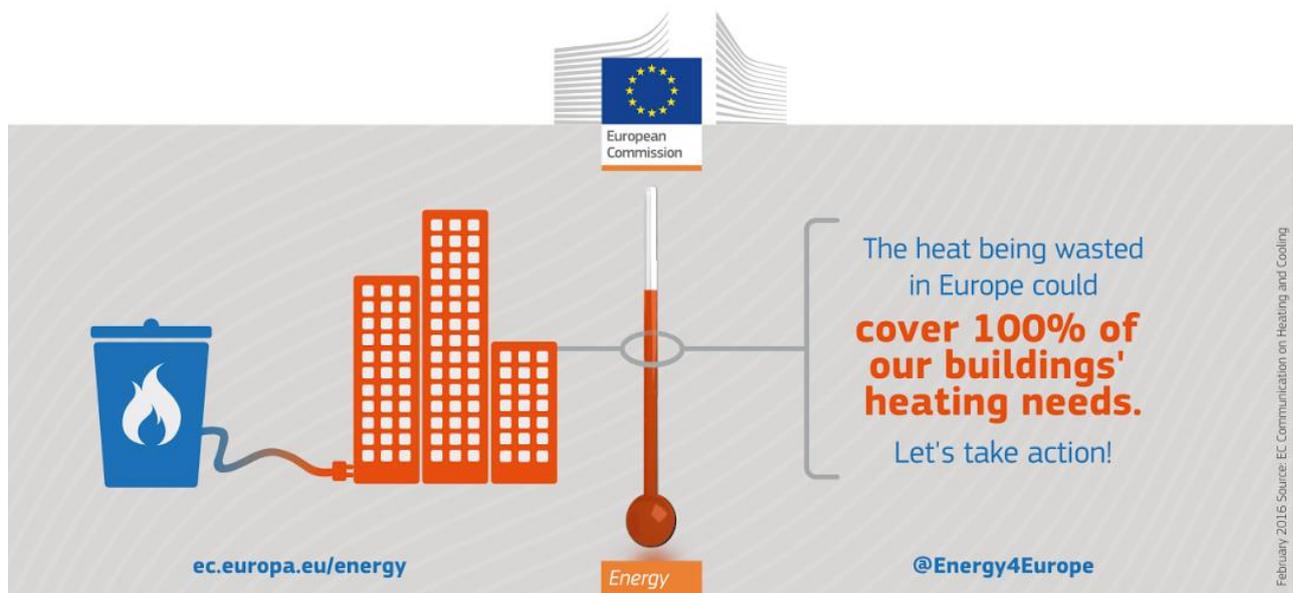


Figure 1.3 : Extrait de l'infographie de la Commission Européenne quant à sa stratégie de chauffage et de refroidissement rendue publique en février 2016

À une échelle internationale, l'UNEP¹³, programme environnemental des Nations Unies, pose un regard approfondi sur la question dans un rapport sur les réseaux énergétiques « de quartier » (*district networks*) (UNEP, 2015). À de multiples reprises, il est expliqué que ces réseaux locaux doivent être promus en particulier parce qu'ils permettent la récupération de

¹⁰ Décret n°2014-1363 du 14 novembre 2014 visant à transposer l'article 14.5 de la directive 2012/27/UE relatif au raccordement d'installations productrices d'énergie fatale à des réseaux de chaleur

¹¹ Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

¹² Nous n'avons pas pu mettre au jour les données sur lesquelles se basent cette affirmation, comme dans le cas du projet Celsius abordé plus bas.

¹³ *United Nations Environmental Program*

flux de chaleur diffus pour remplacer l'usage de sources fossiles ou d'électricité d'origine nucléaire pour le chauffage de l'eau ou de l'air intérieur aux bâtiments. De nombreux exemples d'expériences récentes d'un tel mécanisme, dans des villes témoins, sont donnés. Le rapport défend l'idée que les ressources fossiles et l'électricité sont des énergies de haute qualité, qui sont coûteuses et peuvent servir à mener des actions complexes tandis que le chauffage de fluides peut être réalisé au moyen de flux produits par de nombreuses activités de manière résiduelle. Il est ainsi fait référence à la notion d'exergie, sur laquelle nous revenons dans la partie suivante de ce chapitre (UNEP, 2015, p. 21) :

“Using energy sources such as fossil fuels or nuclear-powered electricity to provide space heating, hot water or cooling is inefficient and a waste of resources. District energy is the only way to utilize low-exergy, low-grade waste heat or free cooling sources for these end-uses in buildings.”

À l'échelle européenne toujours, le programme Celsius City (Borelli *et al.*, 2015), financé par le programme de recherche de l'Union Européenne, vise la mise en œuvre d'expérimentations touchant à la chaleur dans des villes européennes. Le projet part du principe, sans pour autant jamais expliquer d'où il provient, que l'on pourrait chauffer l'ensemble des bâtiments européens grâce à la chaleur fatale qui est aujourd'hui perdue sur le territoire (Celsius City, 2013) :

“The overall aim with the project is to save energy by using more wasted excess heat in Europe. The potential is huge; there is actually enough waste heat unused in Europe to heat the entire European building stock.”

On observe donc un intérêt fort pour les potentialités d'une telle source, que l'on retrouve à l'échelon national. La récente loi de transition énergétique pour une croissance verte¹⁴ favorise en effet la récupération des énergies fatales de plusieurs manières. D'abord, elle dispose que les équipements de récupération doivent être considérés comme des équipements de productions d'énergie renouvelable dans toutes les réglementations qui traitent des seconds, et donc en particulier celles qui sous-tendent leur subventionnement¹⁵. On constate toutefois que cet élargissement n'a pas été sans débat : comme le montre l'Encadré 1.2, la nature particulière des énergies de récupération, qui s'étendent au-delà de la chaleur fatale et sont peu connues des parlementaires au moment des débats relatifs à la loi, fait naître des ambiguïtés et incompréhensions quant aux répercussions de leur mise sur le même plan que

¹⁴ LOI no 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, publiée au journal officiel de la République Française le 18 août 2015.

¹⁵ Paragraphe 7 de l'article premier

les énergies renouvelables. En outre, la loi pose également la valorisation des énergies fatales comme un des quatre objectifs du plan stratégique national de développement de la chaleur et du froid¹⁶.

**Encadré 1.2 – Les énergies de récupérations sont-elles des énergies renouvelables ?
Extraits d'un débat relatif à la Loi de Transition Énergétique pour une Croissance
Verte à l'Assemblée Nationale**

La Commission est saisie des amendements identiques CS833 de M. Julien Aubert, CS1879 de M. Denis Baupin et CS1339 rectifié de M. Jean-Paul Chanteguet.

M. Julien Aubert. La production d'énergie de récupération doit être prise en compte dans l'ensemble des textes relatifs à la construction et à l'urbanisme, et en particulier dans les réglementations thermiques, énergétiques et environnementales des bâtiments.

Les énergies de récupération sont déjà partiellement intégrées à divers textes de loi, mais la meilleure façon d'harmoniser et de simplifier la prise en compte de ces énergies de récupération consiste à les qualifier comme telles d'énergies renouvelables. Tel est l'objet de l'amendement CS833.

M. Denis Baupin. Pour avoir travaillé sur le territoire de la ville de Paris, notamment pour essayer de mettre en place un plan climat et une politique énergétique, j'ai pu constater à quel point il y avait des potentiels de récupération d'énergies perdues sur le territoire. Nous avons intérêt à nous organiser en la matière. Tel est l'objet de l'amendement CS1879.

M. Jean-Paul Chanteguet. L'amendement CS1339 rectifié est défendu.

Mme Marie-Noëlle Battistel, rapporteure. L'énergie de récupération est l'énergie captée sur l'air extrait et sur les eaux usées. Ces énergies ne sont donc pas renouvelables.

Elles ne peuvent pas compter dans l'atteinte des objectifs relatifs à la part d'énergie renouvelable. L'amendement est donc contraire à la directive. Pour rendre cet amendement applicable, il faudrait proposer des modifications législatives à chaque article concerné au sein des textes relatifs à la construction ou à l'urbanisation.

Défavorable donc.

M. Martial Saddier. L'argumentation de Mme la rapporteure me surprend. Nous proposons un amendement réflexe, c'est-à-dire que la production d'énergie de récupération doit être prise en compte à tout moment, pour toutes les décisions.

Nous venons d'examiner l'article relatif à l'économie circulaire : avec l'eau usée et l'air extrait, on est au cœur du sujet. Pourquoi se priver de la capacité d'optimiser la récupération d'énergies que l'on trouve quotidiennement ?

Mme Marie-Noëlle Battistel, rapporteure. L'énergie de récupération est une énergie de recyclage et non une énergie renouvelable.

M. le président François Brottes. Il faut néanmoins la valoriser.

M. Martial Saddier. Mercredi soir, Mme Royal nous a appelés à l'offensive, à bousculer les habitudes, les corporatismes, à être innovants, à nous inscrire dans le xxie siècle.

J'ai été bouleversé, je n'en ai pas dormi de la nuit... Recyclons l'énergie recyclable et ouvrons une page de l'histoire du Parlement en permettant que l'énergie recyclable devienne une énergie renouvelable !

M. le président François Brottes. L'énergie de récupération vaut aussi pour le sommeil, monsieur Saddier.

¹⁶ Section 4 du paragraphe 1 de l'article 176

M. Julien Aubert. Nous avons eu un long débat sur l'économie circulaire. On nous a expliqué que la croissance verte et l'économie circulaire, c'était un peu la même chose. Cet exemple montre qu'il est bon d'avoir des définitions car il y a bien plusieurs idées : la croissance verte décarbonée, les énergies renouvelables et le concept d'économie circulaire. Il faut éviter le gloubi-boulga sémantique. Ce texte n'est pas un paquet-cadeau et nous pouvons avoir des divergences.

M. le président François Brottes. Vous convenez néanmoins qu'il y a une différence entre ces deux énergies.

M. Julien Aubert. Oui, mais nous aurions pu innover.

Mme Marie-Noëlle Battistel, rapporteure. Rien ne vous empêche d'innover un peu plus tard. C'est juste un problème de définition. Sur le principe, il faut valoriser les énergies de récupération, mais pas avec le statut des énergies renouvelables (EnR)

M. Julien Aubert. Avec cet amendement, la quatrième génération [*de réacteurs nucléaires*] serait devenue une énergie renouvelable. Puisqu'on recycle les déchets, on aurait pu élargir le domaine de la lutte.

M. le président François Brottes. Et je suis sûr que ceux qui défendent les mêmes arguments sur la récupération seront d'accord avec vos propos sur la quatrième génération.

M. Denis Baupin. Je ne céderai pas aux provocations primaires.

[...]

M. le président François Brottes. Ce soir, on a compris qu'il ne faut pas assimiler énergie de récupération et énergie renouvelable. Pour autant, l'énergie de récupération n'est pas assez valorisée. Si l'on veut lui attribuer un certain nombre de modes de reconnaissances dans différents domaines, il faut en mesurer l'impact.

Ne pourriez-vous pas réfléchir, d'ici à l'examen du texte en séance publique, à une écriture de l'amendement qui prévoirait un statut spécifique pour les énergies de récupération et appellerait à un volontarisme et un encouragement en faveur de ces énergies-là dans les bons endroits ?

[...]

M. Denis Baupin. Je suis prêt à rectifier l'amendement afin de montrer qu'il y a un consensus ici pour avancer. Nous serons d'autant plus amenés à le compléter que l'on aura recueilli ce soir un vote favorable.

M. François Brottes. Je comprends que vous souhaitiez, dès ce soir, mettre un pied dans la porte. Je ne crois pas qu'il y ait de désaccord sur la nécessité de mieux cibler les énergies de récupération.

Monsieur Aubert, êtes-vous d'accord pour supprimer l'alinéa 2 de votre amendement CS833 ?

M. Julien Aubert. Je suis neutre car j'ai du mal à en apprécier les conséquences juridiques et financières. J'ai mieux compris, grâce au débat, la différence entre les énergies de récupération et les énergies renouvelables, mais je reste prudent et je retire mon amendement.

[...]

La commission adopte l'amendement CS1879 ainsi rectifié et l'amendement CS1339 deuxième rectification.

Sur le plan cette fois-ci de l'incitation financière plutôt que de la réglementation, l'ADEME, qui subventionne depuis de nombreuses années les réseaux de chaleur *via* le « Fonds Chaleur » (ADEME, 2014c), introduit pour la première année en 2015 une catégorie spécifique aux dispositifs techniques de récupération de chaleur (ADEME, 2015a). L'Agence et ses antennes locales manifestent en outre depuis quelques années un intérêt fort pour cette

ressource : en 2012, l'ADEME du Nord Pas de Calais mène une étude du gisement de chaleur fatale existant sur la région (ADEME Nord Pas de Calais, 2012), en 2015, l'agence nationale publie une étude sur le potentiel de chaleur fatale industrielle sur tout le territoire français (ADEME, 2015c) tandis que l'antenne d'Ile de France analyse plus finement celui de plusieurs types de flux sur la région (ADEME Ile de France, 2015)¹⁷. La Figure 1.4 présente un exemple type des résultats issus de ces études, qui prennent la forme d'une quantification spatialisée de façon plus ou moins précise.

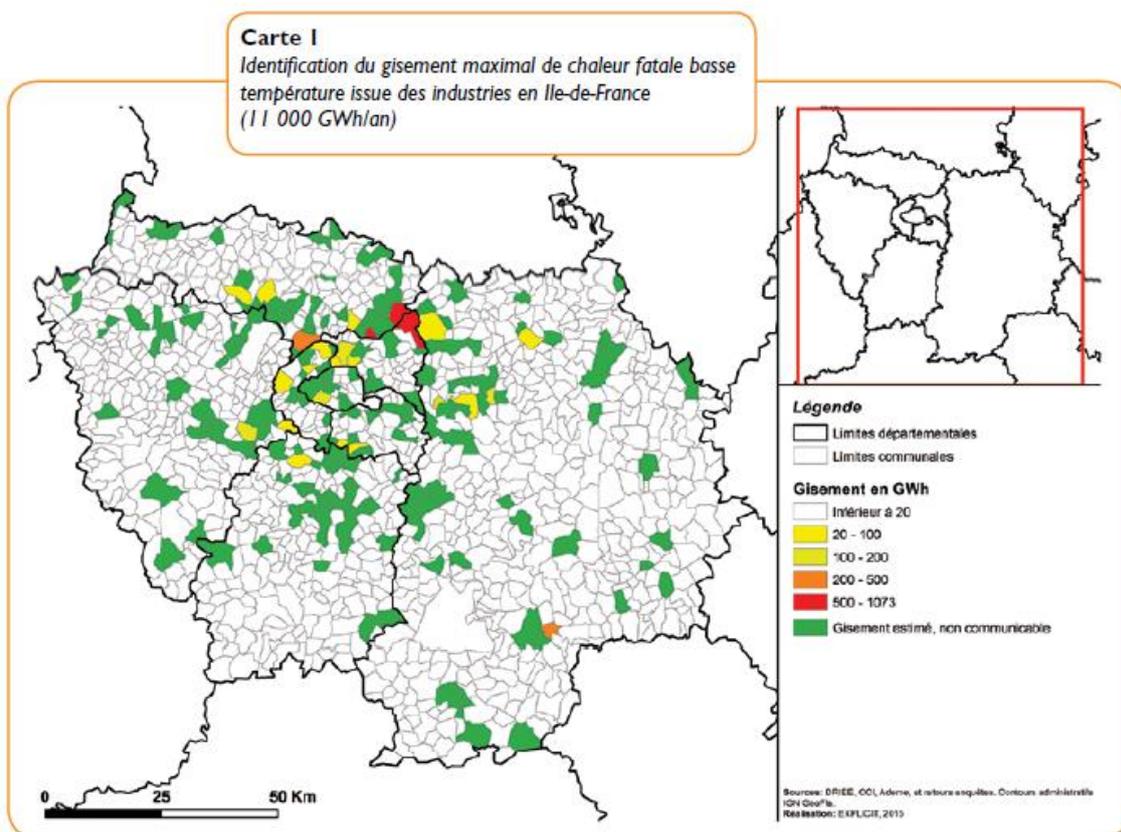


Figure 1.4 : Un exemple de carte produite dans le cadre de l'étude sur le gisement de chaleur fatale en Ile-de-France - Source : Etude des potentiels de production et de valorisation de chaleur fatale en Ile-de-France (ADEME Ile de France, 2015, p. 6)

¹⁷ L'étude analyse les potentiels de chaleur fatale rejeté par les industriels, les usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM), les *data centers* et les eaux usées.

Répartition des 51 TWh de gisement de chaleur fatale (> 100°C) par région

SRCAE mentionnant le potentiel que représente la récupération d'énergie fatale, sur 26 régions (par ordre alphabétique) :

- Bretagne
- Haute-Normandie
- Île de France
- Nord Pas de Calais
- PACA
- Picardie
- Rhône-Alpes

Régions	Gisement de chaleur fatale en GWh selon la gamme de température					Total
	100-199°C	200-299°C	300-399°C	400-499°C	> 500°C	
Nord-Pas de Calais	2 400	3 030	580	210	1 000	7 220
Provence-Alpes-Côte d'Azur	2 690	2 100	720	350	470	6 330
Haute-Normandie	2 660	1 330	640	320	160	5 110
Rhône-Alpes	1 910	1 100	590	210	150	3 960
Lorraine	2 340	860	300	100	80	3 680
Aquitaine	1 920	710	80	40	30	2 780
Champagne-Ardenne	2 140	340	150	60	60	2 750
Pays de la Loire	1 250	680	230	130	10	2 300
Picardie	1 590	350	160	50	70	2 220
Alsace	1 300	500	230	80	50	2 160
Île-de-France	1 080	540	180	70	50	1 920
Centre	1 110	430	130	60	30	1 760
Bretagne	1 080	270	30	30	10	1 420
Poitou-Charentes	740	360	190	40	30	1 360
Midi-Pyrénées	710	240	120	40	20	1 130
Bourgogne	610	160	100	50	50	970
Franche-Comté	650	190	80	30	10	960
Auvergne	420	170	120	40	30	780
Basse-Normandie	490	180	40	20	10	740
Limousin	490	160	50	20	10	730
Languedoc-Roussillon	310	210	120	40	30	710
Corse	< 10	0	0	0	0	< 10
Toutes régions métropolitaines	27 900	13 910	4 840	1 990	2 360	51 000

Figure 1.5 : Comparaison entre les SRCAE mentionnant le potentiel de récupération de chaleur fatale et l'ordre des régions en termes de potentiel de chaleur fatale industrielle selon l'ADEME - Source du tableau de droite : « La chaleur fatale industrielle », ADEME, 2015

Aux échelles régionales, on trouve également des références à ces potentiels dans les SRCAE¹⁸ qui ont en particulier pour ambition d'écrire une stratégie énergétique partagée sur ces territoires. Ainsi, on retrouve des mentions explicites de l'importance de chercher à récupérer ces flux dans ceux du Nord Pas de Calais (Région Nord pas de Calais et Préfet de la région Nord Pas de Calais, 2012) et de l'Île de France (Région Ile de France et Préfet de la région Ile de France, 2012), mais également dans ceux des régions Picardie (Région Picardie et Préfet de la région Picardie, 2012), Haute-Normandie (Région Haute-Normandie et Préfet de la région Haute-Normandie, 2013), Bretagne (Région Bretagne et Préfet de la région Bretagne, 2013), Rhône-Alpes (Région Rhône-Alpes et Préfet de la région Rhône-Alpes,

¹⁸ Schéma Régional Climat Air Energie

2014) et PACA (Région PACA et Préfet de la région PACA, 2013)¹⁹. Par exemple, on peut lire dans le SRCAE de Haute-Normandie que (p. 57) :

« Les énergies fatales ou de récupération représentent un potentiel important en Haute-Normandie, du fait de la concentration importante d'industries. [...] Les solutions de récupération sont encore peu valorisées actuellement, les installations productrices de chaleur fatale n'étant pas nécessairement celles qui en ont besoin. Une réponse à cette problématique peut être de mutualiser ces offres et besoins. »

Il est d'ailleurs intéressant de constater que, rétrospectivement, ces régions font partie de celles où le potentiel estimé dans l'étude de l'ADEME sur la chaleur fatale industrielle est le plus élevé. Nous le montrons sur la Figure 1.5.

Dans le cas de l'Ile de France, l'approche est plus développée puisqu'il est préconisé d'orienter la localisation des *data centers* pour faciliter la récupération de la chaleur fatale qu'ils émettent (Région Ile de France et Préfet de la région Ile de France, 2012, p. 202)²⁰. Le lien entre l'organisation spatiale de la ville et le système énergétique est alors explicitement fait.

On note également des travaux et initiatives sur la question au sein d'organisations créées à différents niveaux spécifiquement pour traiter des questions énergétiques. Ainsi, le pôle d'excellence régionale du Nord Pas de Calais « Energie 2020 », qui a pour mission d'accompagner le développement économique des filières régionales de l'énergie, a fait de la chaleur fatale l'une de ses thématiques de travail²¹. En 2014, l'« incubateur énergie » porté par le pôle est créé pour aider au développement de nouvelles et jeunes entreprises dans le domaine de l'énergie. Un premier appel à projets est lancé en septembre 2015 pour promouvoir l'émergence de solutions innovantes d'efficacité énergétique par l'attribution de subventions. L'un des trois axes retenus est celui de « la récupération et la valorisation d'énergie thermique », c'est-à-dire, en d'autres termes, la récupération de chaleur fatale (Incubateur Energie, 2015).

L'institut de recherche et développement Efficacity, lancé en 2014 et financé à moitié par des entreprises privées et à moitié par le dispositif des investissements d'avenir, a également fait de la chaleur fatale l'une de ses thématiques. Poursuivant l'objectif de développer

¹⁹ Pour arriver à cette liste, nous avons consulté de manière systématique l'ensemble des SRCAE des régions françaises.

²⁰ Nous revenons plus précisément sur ce point dans l'Encadré 5.4.

²¹ Page de présentation des thématiques du pôle consultable en ligne, consultée la dernière fois le 18/01/2016 <http://energie2020.fr/energie2020/thematique>

l'innovation pour participer à la transition énergétique des territoires urbains, l'un des projets de recherche menés par l'institut consiste à étudier les potentiels de récupération de chaleur existant en ville ainsi que les technologies attenantes (Efficacity, 2015, p. 11) :

« Le projet [...] vise à faire émerger une filière industrielle et d'ingénierie pour la valorisation de cette énergie, en s'assurant qu'elle participe à l'efficacité globale du système urbain. [...] [II] se concentre sur la récupération de la chaleur fatale pour l'alimentation des réseaux de chaleur urbains. Il consiste à étudier les potentiels de récupération les plus prometteurs (usines d'incinération de déchets, eaux usées, data-centers, hôpitaux, etc) au regard des besoins énergétiques d'un territoire donné, et à réfléchir à l'évolution des technologies participant à toute la chaîne de récupération. »

Un second institut fonctionnant sur le même principe mais créé cette fois-ci pour répondre aux enjeux de transition énergétique des industries, aborde également la question. « Paris-Saclay Efficacité Énergétique », autrement appelé PS2E, place la valorisation de chaleur perdue par les industries et son échange avec les villes parmi ses quatre ambitions²² :

« Première ambition, récupérer la chaleur fatale rejetée par les usines qui, dès qu'elle dépasse les 100°C, devient substituable au gaz ou au fuel. [...]. Deuxième ambition, nous cherchons à développer des éco-parcs industriels pour créer des synergies énergétiques entre les zones industrielles et les villes (récupération de chaleur, smart grids à l'échelle locale) [...]. »

Un point commun des initiatives évoquées jusque-ici dans cette section est leur focalisation sur les sources concentrées de chaleur fatale et leur distribution par des réseaux de chaleur, comme explicitement indiqué dans la citation précédente. Toutefois, on note également un intérêt pour les sources plus diffuses telles que les serveurs dispersés dans les bureaux, qui peuvent produire un surplus de chaleur au sein du bâtiment qui les abrite, mais qui peut avoir une utilité pour un bâtiment adjacent. C'est par exemple le cas dans le « rapport Peylet » sur la ville durable commandé en 2014 par le Premier Ministre (Peylet, 2014, p. 79) :

« D'un point de vue technique, la mutualisation peut se traduire dans des services urbains fonctionnant de manière systémique. Il s'agit de soutenir ces technologies solidaires (récupération de chaleur locale, cycles locaux de valorisation des déchets). »

On constate cependant un glissement de vocabulaire : la récupération est évoquée comme un cas particulier de « mutualisation ». Cette notion, de la même manière que celle de

²² Extrait d'entretien avec le président de l'institut, Pierre-Antoine Grislain, publié en ligne le 3 octobre 2014 sur le site d'EDF L'Observatoire Energies d'Entreprises intitulé « Efficacité énergétique : synergies entre recherche et industrie ». Consulté la dernière fois le 18/01/2016.
<http://www.observatoire-energies-entreprises.fr/synergies-energetiques-entre-recherche-et-industrie/>

récupération abordée ici, se retrouve dans nombre de documents et initiatives d'acteurs publics ou semi-publics, mais pour rendre compte de systèmes énergétiques différents de celui de la récupération de chaleur fatale, conformément à ce que nous avons montré dans la partie précédente de ce chapitre. Ces occurrences font l'objet de la section suivante.

B. La mutualisation énergétique comme principe d'optimisation

L'idée de partager tous les flux énergétiques produits dans un périmètre donné, qu'ils soient renouvelables ou de récupération, apparaît tout comme la question de la chaleur fatale dans un ensemble de documents de l'ADEME de portée incitative ou informative. Toutefois, l'angle d'entrée n'est pas le même. Alors que la chaleur fatale est principalement abordée, comme nous l'avons vu, en termes de potentiel valorisable, et donc de flux, la notion de mutualisation est le plus souvent associée à une vue d'ensemble qui associe des flux et des systèmes techniques. Ainsi, dans un appel à projet de recherches publié en 2013, un axe est consacré à l'« autoconsommation et mutualisation énergétique » (ADEME, 2013, p. 5). Comme nous l'avons évoqué dans la partie précédente, c'est la problématique de l'intermittence des énergies renouvelables qui est mise en exergue :

« Le développement des énergies renouvelables et leur intégration au sein des bâtiments imposent la gestion de leur intermittence ayant pour conséquence, par exemple, l'encouragement à l'autoconsommation, la recherche de solutions de stockage et de mutualisation des besoins et des flux d'énergie produits à l'échelle du bâtiment ou entre bâtiments à l'échelle de l'îlot. »

La notion est également utilisée dans d'autres documents de l'agence qui incite par-là les acteurs susceptibles de travailler à l'élaboration de bâtiments au sein desquels des flux d'énergie seraient produits à penser l'usage de ces productions au-delà des limites desdits bâtiments (ADEME, 2008, 2014a, 2015b). Ainsi, par exemple, lors de l'édition 2016 de l'appel à projets de recherche « Energie durable », une section porte sur la « mutualisation énergétique » et met en exergue l'importance d'identifier les verrous juridiques, techniques et organisationnels qui en empêcheraient le développement (ADEME, 2015b, p. 20).

L'idée de tirer parti de diverses complémentarités entre les différentes fonctions d'un îlot ou d'un quartier est alors explicitement développée. Ainsi, le lissage des pointes de consommation apparaît comme un résultat possible de cette mutualisation (ADEME, 2008, p. 9) :

« Cette mutualisation doit aussi prendre en compte les usages et les besoins selon l'occupation des bâtiments : les horaires et les besoins différents selon la destination du bâtiment (école, logements, bureaux). Autant de possibilités de dégager des marges de manœuvre pour lisser les pointes de consommation énergétique et mieux dimensionner les équipements. »

L'usage de l'expression « marge de manœuvre » sous-tend ici une idée d'optimisation : dans cette conceptualisation, mutualiser, c'est avoir la possibilité de « mieux » utiliser les ressources et les systèmes techniques. Cette vision est précisément reprise dans un document du Plan Bâtiment Durable datant de 2013 qui valorise une approche des systèmes énergétiques décentralisés à l'échelle des îlots, des quartiers ou des territoires et cite explicitement l'ADEME comme référence pour l'usage de la notion de mutualisation (Plan Bâtiment Durable, 2013, p. 18). Cette dernière est même, dans ce cas, associée aux concepts de solidarité et d'équité, sans que ne soit toutefois précisé ce qui est entendu par-là (Plan Bâtiment Durable, 2013, p. 4) :

« Les enjeux de mutualisation entre les bâtiments au sein d'un quartier, permettant entre autres d'optimiser la production et la consommation d'énergie, ouvrent de nouvelles perspectives sur la ville solidaire et sur les enjeux d'équité territoriale. »

On retrouve cette vision, toujours à l'échelon national, dans un rapport sur l'autoconsommation de l'électricité renouvelable publié en décembre 2014 par la direction de l'énergie et du climat (DGEC) du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE, 2014). Les réflexions développées dans ce dernier portent autant sur les aspects techniques que réglementaires et financiers qui pourraient accompagner le développement de l'autoconsommation ou l'autoproduction de l'électricité renouvelable (voir l'Encadré 1.3 pour la distinction entre les deux concepts). L'intérêt pour la question est justifié, d'une part, par l'expression du désir de certains citoyens de subvenir eux-mêmes à leurs besoins énergétiques et, d'autre part, par une réduction des coûts d'intégration des énergies renouvelables sur le réseau que cela permettrait (MEDDE, 2014, p. 4). Le rapport présente les conclusions et résultats d'un groupe de travail créé pour réfléchir à la problématique, constitué de représentants des pouvoirs publics, de gestionnaires des réseaux, d'acteurs de l'électricité et des énergies renouvelables et de syndicats professionnels.

L'une des conclusions importantes de leurs travaux est la suivante : l'autoconsommation (ou autoproduction) de l'énergie solaire ne doit pas être considérée uniquement à l'échelle du bâtiment. Les auteurs du rapport jugent qu'il est difficile d'obtenir une adéquation entre la production et la consommation à cette échelle, tout particulièrement dans le résidentiel où l'on

consomme davantage le soir, lorsque l'énergie solaire est peu abondante. Ce décalage entraîne des soutirages et versements importants d'énergie sur le réseau, qui tendent à le déstabiliser, ce que vise pourtant à contrer l'autoconsommation. Dès lors, il est expliqué à plusieurs reprises que l'autoconsommation peut également se construire à l'échelle d'un îlot, d'un quartier ou d'un territoire à travers une mutualisation et grâce au foisonnement des besoins (MEDDE, 2014, p. 24) :

« L'autoconsommation peut se mesurer à l'aval du point de livraison mais également à l'échelle d'un bâtiment, d'un centre commercial, voire d'un quartier : en effet, les déficits de production d'un bâtiment à un instant donné pourraient être compensés par un bâtiment situé à proximité tout comme un excédent de production pourrait être valorisé à proximité et réduire ainsi les contraintes d'injection sur le réseau. »

Cette vision est en fait sous-tendue par les apports de différentes organisations participant au groupe de travail, et tout particulièrement l'association Hespul²³ (2013), le syndicat des énergies renouvelables (SER) et Soler, le groupement français des professionnels du photovoltaïque. L'une comme les autres estiment qu'une autoconsommation pensée à une échelle plus collective que celle du bâtiment permet de trouver plus aisément un usage instantané à la production solaire (MEDDE, 2014, p. 171) :

« Dans le cadre de l'implantation de systèmes photovoltaïques sur des bâtiments, si le bâtiment porteur du système n'a pas besoin d'électricité à l'instant où le système produit, il y a une forte probabilité qu'un bâtiment voisin aura, lui, besoin d'électricité à ce moment précis. »

Encadré 1.3 – Autoconsommation et autoproduction : des concepts frères mais pas jumeaux

L'autoconsommation désigne le fait de consommer ce que l'on produit tandis que l'autoproduction désigne celui de produire ce que l'on consomme. Il paraît donc difficile au premier abord de différencier les deux concepts. En réalité, ils ne sont synonymes que dans le cas où production et consommation sont égales en tout temps. La Figure 1.6 permet de comprendre la différence entre les deux notions : la partie hachurée en rouge est la seule portion d'énergie qui est à la fois produite et consommée par l'utilisateur-producteur. Dès lors, l'autoconsommation correspond à la part que représente cette quantité d'énergie par rapport à la production totale tandis que l'autoproduction correspond à la part qu'elle représente par

²³ On retrouve la vision de l'association dans les annexes du rapport et son influence sur le rapport, dans son ensemble, nous a été confirmée lors d'un entretien avec le responsable du pôle « Réseaux et planification » de l'association (le 02/04/2015).

rapport à la consommation totale. Dans le cas présenté ci-dessous, l'autoconsommation est inférieure à l'autoproduction.

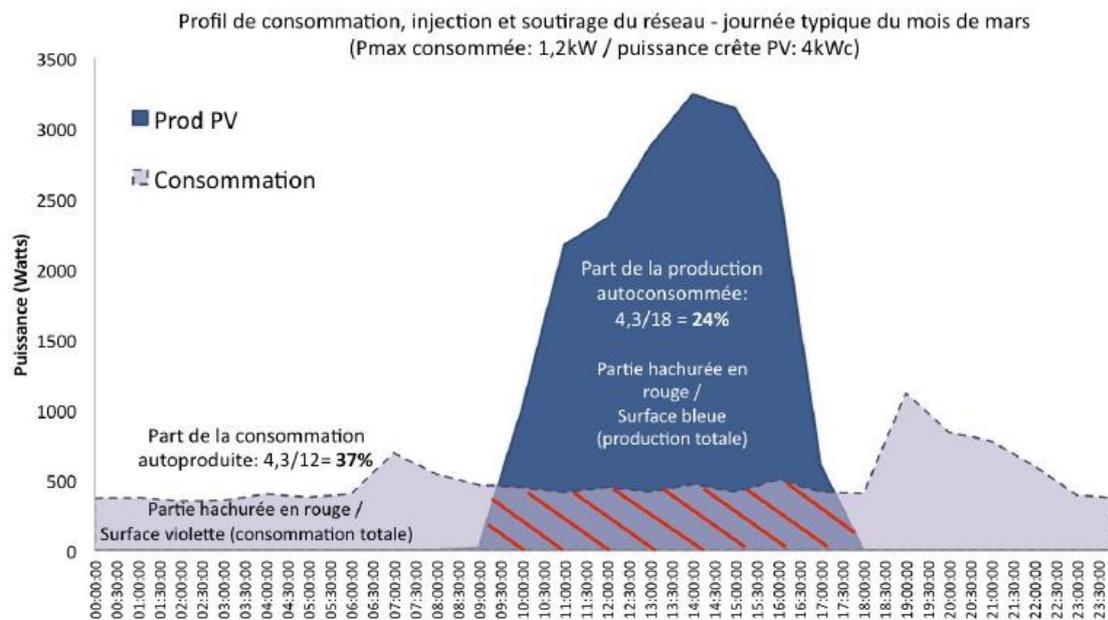


Figure 1.6: Représentation des parties autoconsommée et autoproduite d'une production photovoltaïque - Source : "Note de positionnement sur l'autoconsommation", Hespul, 2013

Un point important de divergence entre les concepts est l'indifférence de l'autoproduction à la pointe de production. En effet, inciter à l'autoproduction revient à favoriser un dimensionnement maximal des installations de production sans tenir compte de la problématique de l'injection du surplus sur le réseau. Au contraire, inciter à l'autoconsommation, revient à favoriser une diminution de ces injections en incitant à un dimensionnement des installations qui soit tel que la pointe de production ne dépasse pas la consommation au moment où elle se produit. Les deux stratégies ont donc des effets bien différents sur les réseaux et sur le développement des énergies décentralisées (Hespul, 2013 ; MEDDE, 2014) : l'idée d'autoconsommation s'oppose à celle de la mutualisation des surplus de production, tandis que celle d'autoproduction la favorise.

Avec une approche centrée cette fois sur l'aménagement et non sur une technique de production particulière, le club Ville-Aménagement aborde également largement la notion de mutualisation dans un ouvrage collectif consacré à l'énergie dans le projet urbain (Masboungi, 2014). La complémentarité entre les courbes de charge des fonctions urbaines est explicitement mentionnée comme une justification de l'intérêt de mutualiser leurs dispositifs de production (Masboungi, 2014, p. 89) :

« L'élargissement du regard – de l'échelle du bâtiment à celle du territoire – oblige à redéfinir la performance en posant la question : que peut-on partager ? À titre

d'exemple, bureaux et logements ont des courbes de consommation énergétique inverses : la complémentarité de leurs besoins rend la mutualisation de leurs installations particulièrement intéressante. »

Partant toujours d'une approche centrée sur l'urbain, on peut également citer le travail de l'Agence Parisienne d'Urbanisme (l'APUR) qui publie en décembre 2015 un « Plan Local Energie pour la Métropole du Grand Paris », en tant que contribution à l'élaboration d'un futur Plan Climat Air Energie Métropolitain (APUR, 2015). Une partie non négligeable du plan consiste en effet à évaluer les potentiels d'échanges et mutualisations énergétiques en analysant la mixité des îlots sur l'ensemble de la métropole parisienne. La Figure 1.7 présente la manière dont l'exercice est mené dans les limites de la ville de Paris.

Identifier les îlots propices à la mise en place de synergies énergétiques



Îlots mixtes présentant un potentiel de mutualisation énergétique

- Équipement(s) public(s), bureaux récents (après 1988) et logements sociaux
- Équipement(s) public(s) ayant des besoins de chaud/froid et logements sociaux
- Équipement(s) public(s) ayant des besoins de chaud et bureaux récents (après 1988)
- Bureaux récents (après 1988) et logements sociaux

Figure 1.7 : Cartographie d'îlots mixtes au sein de la ville de Paris selon une typologie - Source : "Un Plan Local Energie pour la Métropole du Grand Paris", APUR, 2015, p. 72

Plus récemment encore, mais toujours au même échelon, la ville de Paris lance en janvier 2016 un appel à candidatures sur la « ville de demain » appelé DataCity²⁴, en partenariat avec NUMA, un « accélérateur d'innovation ». L'objectif poursuivi est de fournir à des projets innovants les moyens d'accélérer leur expérimentation ou leur mise sur le marché. L'appel est constitué de neuf « challenges » relevant de différentes thématiques et l'un d'entre eux porte précisément sur la « mutualisation des flux énergétiques ». L'argumentaire justifiant l'introduction de cette thématique particulière fait référence aux problématiques de l'ancien et de l'énergie positive²⁵, c'est-à-dire des bâtiments conçus pour que les productions locales d'énergie y soient supérieures aux consommations, le plus souvent selon un bilan annuel :

« Au sein de la plupart des grandes villes françaises, à l'image de Paris, la construction de logements neufs est limitée par la pression foncière. Les efforts de rationalisation des consommations doivent dès lors se reporter sur l'amélioration de l'existant. L'une des principales opportunités identifiées réside dans le développement des échanges d'énergie entre des bâtiments ou des équipements. Il s'agit donc de changer d'échelle, en passant du bâtiment à énergie positive à l'îlot à énergie positive, ce qui permettrait de multiplier les opportunités et d'optimiser les impacts environnementaux et économiques. »

Ici encore, c'est l'idée d'optimiser le système énergétique qui est défendue. Finalement, à travers l'ensemble de documents et initiatives évoqués dans cette section, nous constatons que ce potentiel d'optimisation est appliqué à plusieurs types de systèmes, dont le fonctionnement pourrait, selon ces discours, être amélioré par la mutualisation : tantôt il est question des flux produits et consommés, tantôt du réseau de distribution et enfin, d'autre fois, des bâtiments. Cette alternance est, à notre sens, révélatrice de la nature de l'objet qu'est la mutualisation énergétique, tout autant que la récupération dont nous avons traité plus haut : elles forment précisément un système dans lequel aucun de ces éléments ne peut être compris sans les autres. Aussi, on ne peut conceptualiser la mutualisation ou la récupération comme une simple circulation de flux, un partage d'infrastructures ou un regroupement d'activités humaines diverses. Nous soutenons au contraire que, pour comprendre leur fonctionnement, il nous faut envisager ces trois systèmes comme un tout qui forme l'objet analysé.

En somme, cette revue des discours institutionnels montre bien l'importance croissante que prennent les possibilités d'échanges locaux d'énergie dans la conceptualisation du futur des

²⁴ Voir le site internet de l'appel à candidature, consulté la dernière fois le 19/01/2016
<http://www.datacity.paris/>

²⁵ Voir la page « mutualisation des flux d'énergie » sur le site internet de l'appel à candidature, consultée la dernière fois le 19/01/2016
<http://www.datacity.paris/mutualisation/>

systemes énergétiques urbains. Partant, nous pouvons nous interroger sur l'approche de tels objets dans la littérature académique, notamment dans celle qui s'intéresse à la question du fonctionnement énergétique des villes. Il s'agit ainsi de comprendre comment sont saisis et analysés ou non ces objets, que nous comprenons comme une interaction entre trois sous-systemes (flux, systemes techniques, activités et acteurs humains). La partie suivante de ce chapitre est consacrée à ce travail.

III. La ville comme un objet physique : une approche purement matérielle dans la littérature académique de l'urbain

Partant de la problématique du réseau, nous en sommes arrivée à celles, déclinaisons d'un même principe d'échange énergétique, de la mutualisation et de la récupération. Ayant mis au jour différentes déclinaisons de promotion de ces dernières, nous proposons à présent d'analyser la façon dont elles ont été saisies ou non par des travaux de recherche, et plus particulièrement dans des approches scientifiques qui les questionnent explicitement dans une perspective urbaine. Par-là, nous entendons que nous avons mis de côté des travaux qui s'intéressent purement au fonctionnement technique de tels systemes, de façon décontextualisée. Au contraire, nous avons recherché les mentions explicites du caractère urbain des récupérations ou mutualisations considérées.

Pour mener cette revue de littérature, exploratoire puisque centrée sur un objet empirique plutôt qu'un champ ou une approche, nous avons sondé l'ensemble, large et pluriel, des recherches qui visent à comprendre les liens unissant la ville et l'énergie, avec une approche qui n'oublie la matérialité ni de l'une ni de l'autre. Nous voulons signifier en cela que nous ne nous sommes pas intéressée, dans cette première approche, aux recherches portant exclusivement sur la gouvernance des questions énergétiques à l'échelle urbaine. Nous avons au contraire, sans discrimination *a priori*, sondé les travaux qui partent de la matérialité de la ville, des flux énergétiques qui la traversent ou des infrastructures qui l'irriguent, puisque nous avons en premier lieu caractérisé notre objet d'étude comme une évolution de ces systemes. Ainsi, bien que les deux questions ne soient bien entendu pas indépendantes, notre première entrée n'est pas celle des recompositions de la gouvernance des questions énergétiques à l'échelle urbaine, mais celle des transformations du systeme énergétique urbain en lui-même.

De cette manière, nous avons pu constater que les travaux portant, au moins en partie, sur la mutualisation ou la récupération telles que nous les avons définies, sont très peu nombreux et se limitent pour la plupart à une vision réduite au fonctionnement physique de l'urbain. Autrement dit, alors que les tenants et aboutissants du passage du réseau au post-réseau sont documentés dans une vision plurielle de la ville, comme système à la fois social et matériel, ceux de l'émergence de ces liens ne sont traités que dans une approche de cette dernière comme un système physique qui passe sous silence le fait que l'urbain soit sans cesse mêlé par des relations entre acteurs humains. Il s'agit précisément de ce que nous souhaitons montrer dans la suite de cette thèse.

En outre, les approches mises au jour par notre revue de littérature sont pour la plupart relativement récentes et ne constituent aucunement des champs de recherche bien déterminés. Par ailleurs, il n'existe pas toujours de liens explicites entre eux, qu'ils soient théoriques ou conceptuels, si bien que nous les présentons sous forme de trois ensembles thématiques, allant du plus homogène et clairement lié à une filiation académique au plus diffus. Les premiers, qui font l'objet d'une première section, s'intéressent aux circulations de flux énergétiques dans les espaces urbains (A). Les seconds considèrent la ville à travers les activités qu'elle regroupe et des productions et consommations d'énergie qui en découlent, comme le montre une deuxième section (B). Dans une troisième section, sont discutés des travaux qui portent sur les réseaux de distribution d'énergie (C). Enfin, dans une dernière section, nous faisons une courte synthèse de l'ensemble et la discutons au regard de l'ambition de ce travail (D).

A. Le système urbain comme un système énergétique : une approche par les flux

Le premier ensemble de travaux que nous considérons se rejoint autour de l'idée de considérer la ville comme un système support de flux d'énergie (et de matière). Il se place ainsi dans une lignée d'approches clairement identifiée, apparue dès la fin des années 1960 alors que la méthode d'analyse des flux de matière (*material flow analysis*) commençait à se développer au sein des travaux d'écologie (Barles, 2007). Aussi bien Abel Wolman (1965), qu'Eugène Odum (1997), l'un des pionniers de l'écologie en tant que discipline scientifique, s'intéressent aux systèmes urbains. Toutefois, leur analyse n'est pas réellement centrée sur la ville, qui n'y est considérée que comme un attracteur de matières qu'elle transforme en déchets jugés nuisibles pour l'environnement (Barles, 2007). Il est donc relativement complexe d'en tirer des conclusions sur le fonctionnement des systèmes urbains. En outre,

bien que les travaux plus récents qui s'inscrivent dans cette mouvance se soient départis de cette vision, ils ne s'intéressent pas spécifiquement aux flux d'énergie dits techniques (voir Encadré 1.4), liés aux usages de l'électricité, de la chaleur ou du froid. Leur approche consiste à analyser des flux de matière et dans certains cas à les convertir en grandeur énergétique (Kennedy, Cuddihy et Engel-Yan, 2007).

Encadré 1.4 – L'énergie technique, l'énergie biologique et la récupération

Parler de l'énergie n'est jamais aisé car elle n'est pas une substance mais une grandeur physique qui peut qualifier l'état de systèmes bien différents. Lorsque l'on parle de l'énergie dans le champ de l'aménagement, on fait en général référence aux flux et aux systèmes techniques qui amènent de l'électricité ou de la chaleur au sein des bâtiments et équipements urbains. On évoque ainsi l'énergie en parallèle de l'eau ou des déchets, comme fondement matériel du fonctionnement urbain, le plus souvent sans prendre en compte les différents vecteurs, matériels quant à eux, par laquelle elle est amenée.

Toutefois, les travaux du champ de l'écologie urbaine montrent que le recours à la notion d'énergie pour qualifier uniquement les flux de gaz, d'électricité ou d'eau chaude qui abreuvent les villes peut être ambigu. En effet, des travaux initiateurs (Odum, 1997 ; Wolman, 1965) et plus récents (Huang, Zheng et Hu, 2015 ; Huang et Chen, 2005 ; Huang, Lai et Lee, 2001 ; Salat et Bourdic, 2011) du champ utilisent l'énergie et des concepts associés pour décrire la ville en elle-même à la manière d'un écosystème. Ils visent ainsi à quantifier chaque flux de matière qui contribue à la construction et au fonctionnement de la ville et de ses habitants en termes énergétiques.

Cette conception large met au jour la nécessité de distinguer des flux d'énergie propres à des processus différents. Sans être exhaustive, nous pouvons en citer deux qui, nous le verrons, ont un lien avec les notions que nous avons développées dans ce chapitre, selon la distinction d'Eunye Kim (2013, p. 57). En premier lieu, l'énergie dite biologique est celle qui est contenue dans toute la biomasse, qui comprend donc également les humains vivant en ville. Les flux d'énergie biologique qui traversent la ville sont ainsi largement liés aux quantités d'aliments qui entrent et qui sont ensuite transformés, à plus ou moins long terme, en déchets organiques et en flux de chaleur. En second lieu, l'énergie technique correspond à celle qui permet le fonctionnement des objets techniques et le maintien des températures au sein des bâtiments. Elle recouvre ainsi la notion d'énergie telle qu'elle est entendue lorsque l'on parle d'aménagement urbain.

Ici encore, on constate que la compréhension de la notion d'énergie n'est pas simple puisqu'une partie de l'énergie technique peut servir à la production d'une énergie biologique et inversement, le principe même de l'énergie étant de circuler. Toutefois, la distinction nous semble opérante dans le cadre de cette thèse.

En effet, lorsque nous parlons d'énergie dans ce travail, c'est bien à l'énergie technique que nous faisons référence, ôtant de l'équation celle qui est nécessaire aux transports. La précision est importante car la mutualisation et la récupération peuvent être appliquées autant à l'énergie technique qu'à l'énergie biologique. Ainsi, lorsqu'il est proposé de produire de l'énergie par la méthanisation ou l'incinération de déchets organiques ou de récupérer la chaleur contenue dans l'eau des stations d'épuration pour chauffer des bâtiments²⁶, on envisage en fait de transformer une énergie biologique en énergie technique. Au contraire, la mutualisation ou la récupération que nous avons envisagées jusqu'ici sont bien celles de flux eux-mêmes techniques ou issus d'un flux technique.

La distinction n'est pas sans incidence car les principes qui fondent l'existence de ces flux sont fort différents et leur récupération est ainsi associée à des enjeux également différents. Dans le cas de l'énergie biologique, la possibilité de récupération est liée au fonctionnement du système socioécologique qui produit des déchets tandis que dans le cas de l'énergie technique, elle est liée à l'efficacité des systèmes techniques en eux-mêmes, qui est limitée par des principes physiques. Ainsi, par exemple, la méthanisation des déchets alimentaires est en partie rendue possible par le « gaspillage alimentaire », qui touche donc à des processus en premier lieu socioécologiques, tandis que la production de chaleur par les *data centers* est liée à leur fonctionnement technique intrinsèque et au principe physique qui veut que l'électricité se transforme en chaleur. Sans développer plus avant, puisqu'il ne s'agit pas de l'objet de cette thèse, on comprend donc que l'émergence ou la disparition de ces flux recouvre des réalités sociales, économiques et organisationnelles largement disjointes.

Cependant, en parallèle de ces développements, les concepts de l'écologie, dérivés de la thermodynamique, ont été mobilisés dans l'objectif de mieux comprendre les retombées environnementales des activités industrielles. Cette approche a donné lieu au courant de recherche qui prend le nom d'écologie industrielle et que l'on peut définir comme étant l'analyse des métabolismes industriels, eux-mêmes définis par Suren Erkman (1997) comme l'ensemble des flux de matière et d'énergie prenant place dans un système industriel²⁷. L'écologie industrielle a donc le même objectif que l'écologie urbaine²⁸ mais elle se focalise sur un système anthropique différent : l'industrie plutôt que l'urbain.

C'est précisément de ce dernier courant de recherche, sur lequel nous reviendrons bien plus longuement dans cette thèse, que se réclament les travaux qui touchent, de près ou de loin, aux circulations d'énergie que nous proposons de saisir. L'utilisation des principes de

²⁶ Notons qu'une partie de la chaleur contenue dans les eaux usées est issue de l'énergie technique puisqu'elle provient du chauffage de l'eau sanitaire.

²⁷ “*The whole of the materials and energy flows going through the industrial system.*” (Erkman, 1997, p. 1)

²⁸ Dans sa dimension naturaliste et non sociologique. En d'autres termes nous faisons référence ici aux travaux développés dans la lignée de ceux d'Abel Wolman et Eugene Odum évoqués précédemment et non à ceux relevant de la conception de l'écologie urbaine de l'Ecole de Chicago (Barles, 2010a).

l'écologie industrielle pour comprendre l'objet ville peut paraître surprenant, d'autant plus que, comme le rappelle Xuemei Bai, les individus qui s'intéressent à l'industrie et ceux qui s'intéressent aux villes n'appartiennent pas aux mêmes groupes professionnels (Bai, 2007). Il relève toutefois que deux raisons justifient de tels rapprochements : les similarités méthodologiques d'une part et le rapprochement spatial de certaines activités industrielles avec les systèmes urbains d'autre part²⁹.

Et en effet, de tels liens ont été exploités. Par exemple *l'Urban Morphology Institute*, qui produit des recherches sur l'organisation spatiale des villes, mobilise dans la plupart de ses approches des concepts de l'écologie industrielle. Entre autres travaux relevant de la thermodynamique dans sa dimension plus théorique, ils revendiquent en effet une filiation avec les travaux de James Kay (2002) sur l'écologie industrielle (Salat et Bourdic, 2011, 2012). Sur le plan conceptuel, la ville est considérée comme un système thermodynamique (Salat et Bourdic, 2011, p. 2)³⁰ dont l'efficacité pourrait être évaluée grâce à la notion d'entropie, bien que les auteurs estiment qu'une telle approche soit inefficace pour deux raisons : le système urbain est trop complexe pour être analysé pertinemment comme un système thermodynamique et la notion d'entropie est trop théorique pour qu'en soient tirées des conclusions simples pour l'action publique. L'objectif de leurs travaux est donc de développer des indicateurs dérivés de l'analyse thermodynamique, mais qui permettent d'évaluer l'efficacité d'une structure urbaine en termes énergétiques (Salat et Bourdic, 2011, p. 3).

La notion d'efficacité d'un système sur le plan énergétique est liée à un autre concept repris par Serge Salat et Loeiz Bourdic, ainsi que par d'autres auteurs dont nous évoquons les travaux dans ce qui suit : l'exergie (van den Dobbelen *et al.*, 2007 ; Salat et Bourdic, 2011, p. 4), créée pour décrire la qualité d'une énergie. On peut en effet, par exemple, comptabiliser des quantités d'énergie sous forme de chaleur ou d'électricité avec les mêmes grandeurs. En d'autres termes, la même quantité d'énergie peut exister sous ces deux formes. Pour autant, il n'est pas possible de réaliser la même *quantité de travail*³¹ avec ces deux mêmes quantités d'énergie : l'énergie électrique permet de réaliser davantage de travail que l'énergie calorifique, ce que l'on peut comprendre de manière intuitive puisque l'on sait qu'il est aisé

²⁹ Nous revenons plus précisément sur les filiations entre ces deux champs dans le chapitre suivant.

³⁰ "Following Kay's approach, cities could be described as self-organised hierarchical organism: they are open dissipative systems, far from equilibrium, non linear. As such, analyse cities with thermodynamics only is no easy task."

³¹ Ici au sens physique du terme.

de transformer de l'électricité en chaleur³², tandis qu'il est plus complexe de transformer de la chaleur en électricité³³. En somme, l'électricité est une énergie de meilleure qualité que la chaleur. L'exergie a précisément pour fonction de quantifier cette différence de qualité.

Dans les travaux de Serge Salat et Loëiz Bourdic, la notion n'est pas utilisée directement pour analyser les systèmes techniques énergétiques urbains mais pour évaluer l'efficacité du système urbain, et en particulier sa résilience, en faisant de l'exergie un indicateur d'ordre (Salat et Bourdic, 2011, p. 4). Toutefois, outre certaines considérations autour de l'organisation des réseaux viaires ou des îlots (Salat et Bourdic, 2012), leurs travaux à visée académique restent majoritairement conceptuels. C'est finalement dans un rapport produit pour la Caisse des Dépôts et Consignations qu'ils expliquent la relation de ces principes avec la conception de la ville (Salat, Bourdic et Labbe, 2013, p. 6) : « les stratégies de planification exergétique [...] consistent à intégrer la planification des usages du foncier et la planification énergétique pour réaliser notamment des cascades d'utilisation de la chaleur et des échanges thermiques entre bâtiments ». On retrouve également lié à ces possibilités d'échanges, celle de mixité et de mutualisation (Salat, Bourdic et Labbe, 2013, p. 64) : « la mixité à l'échelle de la ville, du quartier et de l'îlot crée des synergies qui réduisent la demande énergétique [...]. La présence de différents types de bâtiments et d'usages situés dans un îlot urbain donné conduit à une variété de courbes de charge de l'énergie [...]. Une diversité de profils de charge permet la mise en œuvre d'approches de synergie fondées sur l'échange, le recyclage et la réutilisation des flux de matières et d'énergie entre les différents usages ». En définitive, les auteurs promeuvent une planification du territoire qui permette la mutualisation et la récupération d'énergie.

La notion d'exergie est mobilisée dans d'autres travaux, néerlandais cette fois-ci, qui touchent également à des questions de planification. Au premier plan, la méthode appelée *Energy Potential Mapping* développée par Andy van den Dobbelsteen *et al.* s'appuie sur l'usage des méthodes d'écologie industrielle au service de l'urbain (van den Dobbelsteen *et al.*, 2007 ; van den Dobbelsteen, Broersma et Stremke, 2011). Comme son nom l'indique, la méthode consiste à évaluer les potentiels de production d'énergie de manière spatialisée afin de prévoir l'aménagement urbain en conséquence. Elle part du postulat que les potentiels de production dépendent des conditions climatiques, de la typologie de paysage et d'usage des sols, des caractéristiques naturelles, culturelles et techniques locales et des points de productions

³² L'effet Joule dans les câbles électriques en est une illustration.

³³ Les machineries des centrales thermiques en sont la preuve.

d'énergie déjà existants (van den Dobbelsteen *et al.*, 2007, p. 3). Ils proposent ensuite une démarche d'aménagement de l'espace qui intègre ces potentialités énergétiques en tenant compte de la qualité de l'énergie produite en chaque point de l'espace pour la faire coïncider avec les besoins : on retrouve ainsi la notion d'exergie.

L'approche défendue par les développeurs de l'*Energy Potential Mapping* emprunte alors à nouveau à l'écologie industrielle en considérant, comme précédemment, la notion de cascade de chaleur³⁴ (van den Dobbelsteen *et al.*, 2007, p. 6) : par exemple, certaines activités industrielles ont besoin de fortes températures et rejettent des températures moins importantes, tandis que les activités résidentielles se contentent de plus faibles. Leur méthode vise donc à organiser les activités dans l'espace de manière à pouvoir construire des cascades d'usage de l'énergie : les auteurs promeuvent une organisation du territoire urbain qui serve des objectifs de récupération de chaleur. De même, plus récemment, Wouter Leduc et Ferry Van Kann s'appuient sur les concepts d'*urban energy harvesting* (littéralement récolte énergétique urbaine) et d'exergie pour produire les mêmes conclusions (Leduc et Van Kann, 2013) : des circulations d'énergie doivent être organisées entre les activités urbaines et la mixité d'activités doit être promues en ce sens. Enfin, Han Vandevyvere et Sven Stremke (2012) mettent en exergue l'intérêt de l'usage de l'exergie plutôt que de l'énergie dans la conception et la planification urbaines en prenant pour exemple la différence importante entre la température à laquelle sont brûlés les gaz dans les chaudières individuelles (1000°C) et la température que cette combustion sert à produire (20°C) (Vandevyvere et Stremke, 2012, p. 1312). Ainsi, de leur point de vue, l'organisation spatiale de la ville basée sur ce principe thermodynamique permet d'envisager la circulation des flux thermiques en fonction de leur température, par des échanges entre activités, ce qui contribue à l'efficacité énergétique de l'urbain.

Ce petit ensemble de travaux peut en définitive aisément trouver un dénominateur commun : tous, dans la filiation de l'écologie industrielle, proposent l'application de concepts de la thermodynamique à la ville, dans l'objectif de promouvoir une planification urbaine qui permette des échanges de flux entre activités par la mutualisation ou la récupération d'énergie. Ils ont ainsi une visée applicative forte et considèrent les objets que nous discutons dans cette thèse comme une manière d'améliorer l'efficacité énergétique de la ville, conceptualisée comme un système de flux. Pour autant, autant les réseaux support de ces flux

³⁴ *Heat cascade* dans le texte.

que le cadre bâti sont absents de cette conception. D'autres travaux, tout aussi peu nombreux toutefois, mettent au contraire ces objets au cœur de leur approche.

B. Du bâtiment à la ville : une approche par les activités

Le second ensemble de travaux que nous avons mis au jour se trouve aux marges d'un champ de recherche relativement étendu de l'ingénierie : l'énergétique des bâtiments, qui vise à évaluer les flux énergétiques qui traversent un bâtiment en fonction de sa forme, des matériaux qui composent ses parois et des installations techniques qu'il abrite (Morel et Gnansounou, 2009). Le domaine, dont les assises théoriques sont physiques, s'est constitué autour du développement de modèles de simulation du comportement thermique et plus largement énergétique d'un bâtiment, afin d'en optimiser la conception (Ratti, Baker et Steemers, 2005, p. 762).

Face à cette entrée, des critiques émergent autour de ces modèles, au-delà des simples techniques de simulation qui y sont mises en œuvre. En effet, la question de l'intégration du bâtiment dans son environnement, en particulier urbain, est jugée insuffisamment prise en compte. Carlo Ratti *et al.* en font par exemple le constat (Ratti, Baker et Steemers, 2005, p. 762), puis Mindjid Maïzia (2007, p. 79). La principale critique porte sur l'absence de considérations de la morphologie urbaine environnante, qui aurait un impact important sur le fonctionnement thermique d'un bâtiment. Ainsi, il s'agit à nouveau de se concentrer sur le cadre bâti de la ville en lui-même.

Toutefois, partant également du rapport du bâtiment à son environnement, quelques travaux récents s'interrogent au contraire sur ce qui se passe au sein de ce cadre, c'est-à-dire sur les activités humaines dont la ville est le lieu. À partir du constat du développement des techniques décentralisées de production d'énergie, ils conceptualisent la ville comme un lieu potentiel de production d'énergie autant que de consommation (Maïzia, 2008). Le modèle prédominant de production centralisée, qui correspond à une mutualisation totale des besoins énergétiques sur l'étendue du réseau de transport et distribution, est alors mis en question puisque des systèmes de production individuels voient le jour.

À partir de ces postulats, Mindjid Maïzia soutient l'idée que la mutualisation des besoins d'énergie à des échelles plus locales peut contrer certaines contreparties négatives de

l'individualisation des dispositifs de production³⁵ tout en ne contraignant pas à un système totalement centralisé (Maïzia, 2006, 2008). Il cherche ainsi à montrer qu'entre la centralisation et l'individualisation totale, il existe de nombreuses configurations locales de « mini-réseaux » qui peuvent s'avérer plus efficace en termes d'usage des ressources énergétiques (Maïzia, 2006).

La question du rapport entre les différents éléments du système urbain est donc posée, mais pas celle des activités qui se déroulent en leur sein. En d'autres termes, chaque partie du système est considéré comme étant identique à sa voisine. Dans d'autres travaux, le même auteur analyse toutefois les potentialités qui ressortent d'une variation temporelle des besoins d'énergie au travers de la mutualisation (Maïzia, 2008, p. 105) : la mutualisation de besoins énergétiques matérialisés par des courbes de charge décalées dans le temps permet de diminuer les pics de consommation et un usage plus efficace des installations de production. Dans ce cadre, l'approche est essentiellement théorique et vise simplement à montrer l'effet de la mutualisation de courbes de charge simplifiées³⁶ décalées dans le temps.

On retrouve alors la question de l'organisation spatiale des activités urbaines en filigrane. En effet, le décalage temporel des besoins énergétiques au sein de bâtiments différents implique que des activités différentes y soient pratiquées aux mêmes instants. L'auteur évoque d'ailleurs cette potentialité dans ses conclusions (Maïzia, 2008, p. 145)³⁷, mais ne l'introduit pas dans sa formalisation du système urbain. Au contraire, Anne-Françoise Marique *et al.* posent le problème en ces termes en proposant d'étendre le concept de *zero-energy building*, c'est-à-dire de bâtiment produisant autant d'énergie qu'il n'en consomme, à l'échelle du quartier. Elles expliquent alors que la mutualisation énergétique entre des activités diverses à cette échelle est une façon d'améliorer les possibilités de parvenir à un tel objectif (Marique, Penders et Reiter, 2013 ; Marique et Reiter, 2014). Jean-Marie Alessandrini suit un raisonnement similaire, expliquant que l'urbain, par ses caractéristiques de densité et de diversité, permet de tirer parti de mutualisations de besoins différents (Alessandrini, 2013). Il en fait le constat en s'appuyant sur des exemples d'usages de rejets de chaleur de certaines activités pour le chauffage de bâtiments résidentiels ou de bureaux, qui font par ailleurs écho

³⁵ Par exemple l'inégalité des sites en termes de potentiel de production et les difficultés de stockage ou le caractère intermittent de cette production.

³⁶ Ce sont des sinusoides.

³⁷ « Une autre idée simple est de mélanger les fonctions urbaines. Les besoins énergétiques du résidentiel et du tertiaire étant complémentaires, il suffirait d'instaurer un équilibre entre les surfaces à chauffer des logements et celles des commerces et bureaux pour lisser, à l'échelle locale, la demande énergétique et par conséquent la production plus ou moins centralisée de la chaleur » (Maïzia, 2008, p. 145).

aux concepts présentés dans la section précédente. On retrouve le même type de considération chez Andi van den Dobbelsteen et Sebastiaan de Wilde qui évoquent la surproduction de chaleur par rapport à leurs besoins des bâtiments de bureaux modernes qui pourrait être récupérée pour les habitations (van den Dobbelsteen et de Wilde, 2004, p. 84).

Dans une perspective cette fois-ci de quantification, une recherche réalisée dans le cadre du PREBAT³⁸ s'intéresse à la même question (Laurent, 2006). Alors que son objectif affiché est prospectiviste quant aux systèmes énergétiques des bâtiments résidentiels, elle touche finalement aux potentiels qui pourraient être mobilisés à l'échelle d'un ilot ou d'un quartier grâce aux complémentarités des besoins de bâtiments à usages différents. Les auteurs analysent ainsi autant la pertinence de la mutualisation des productions que celle de la récupération de flux thermiques. Ils concluent de leur étude que pour que de telles complémentarités puissent être exploitées, l'aménagement du quartier doit être pensé en conséquence, les questions énergétiques devant être intégrées en amont à la réflexion.

Contrairement aux travaux présentés dans la section précédente, il est plus difficile de mettre au jour des filiations entre ceux que nous avons abordés ici. Tout au plus peut-on trouver une similarité dans les conclusions sous forme de critique de l'approche de l'efficacité énergétique à l'échelle du bâtiment qu'ils tirent de leurs recherches : la ville abrite une diversité importante d'activités dont il faut tirer parti par l'échange de flux d'énergie entre elles. Mutualisations et récupérations sont de nouveau perçues comme un vecteur d'efficacité énergétique du système urbain, conçu avant tout comme une agrégation de bâtiments auxquels sont assignées des fonctions typifiées (logements, bureaux, commerces ...) et, lorsqu'une quantification est envisagée, des consommations d'énergie standardisées. On relève en outre un point commun important avec les travaux discutés dans la section précédente : les conclusions de ces travaux sont des recommandations pour l'action publique, qui sont centrées sur la planification urbaine qui devrait favoriser une mixité fonctionnelle retenue comme condition nécessaire à la mise en œuvre de ces systèmes.

C. Distribution d'énergie et organisation des activités : une approche par le réseau

Le troisième et dernier ensemble de travaux révélé par notre revue de littérature s'intéresse également à l'efficacité d'un système, toutefois d'un autre ordre. Comme nous l'avons vu dans la première partie de ce chapitre, l'efficacité économique de toute infrastructure en

³⁸ Programme national de Recherche sur l'Energie dans les BÂTiments

réseau dépend en particulier de la diversité des courbes temporelles de consommation des usagers qui s'y connectent. Si cet état de fait est peu discuté dans la littérature académique pour les grands réseaux centralisés qui desservent des grandes régions regroupant de fait, par leur échelle, une grande diversité d'activités, elle l'est davantage pour les petits réseaux, et notamment ceux de chaleur.

Les approches développées dans cette optique s'appuient en général sur la notion de mixité fonctionnelle ou mixité d'usage des sols. Susan Owens, dans un ouvrage de référence sur les relations entre la ville et l'énergie, fait déjà le constat qu'une mixité d'usage des sols permet de réduire les coûts d'un réseau de distribution (Owens, 1986, p. 54)³⁹. Mais de manière plus particulière, deux systèmes techniques spécifiques sous-tendent son intérêt pour de telles notions : les réseaux de chaleur et la cogénération⁴⁰. Elle affirme en effet que si les centres villes sont plus à même d'être fournis en chaleur et électricité par un système de cogénération, c'est non seulement parce qu'on y trouve des densités suffisantes⁴¹, mais aussi parce que ces densités sont en général associées à une mixité d'usage des sols qui permet de produire des courbes de charge agrégées plus étendues, entraînant un usage des centrales thermiques et du réseau de distribution plus proche de leur capacité réelle. Le même type de considérations est exposé par Koen Steemers lorsqu'il explique que pour que l'électricité et la chaleur produites par de tels systèmes soient utilisées de manière optimale, la demande d'énergie doit être mixte (Steemers, 2003, p. 5). Dans les deux cas, ces développements restent qualitatifs. Toutefois, une analyse ayant quant à elle un objectif purement quantitatif est menée par Tin Tai Chow *et al.*, cette fois-ci pour ce qui concerne les réseaux de froid (Chow, Chan et Song, 2004). Les auteurs, partant des mêmes constats que les précédents, cherchent en effet à calculer le meilleur partage des surfaces entre diverses activités au sein d'un quartier fictif qui serait desservi par un réseau.

Plus récemment, une autre approche quantitative de la question, à laquelle nous avons déjà fait référence, est menée par le CETE de l'Ouest (2012). L'étude en question s'intéresse à l'influence de la densité et de la mixité fonctionnelle, reliées au concept de foisonnement, sur

³⁹ "For example, it can be shown that for cities exhibiting a pattern of radially decreasing demand, network costs would be reduced to 60% of those for the less realistic 'uniform' city assumed in the original models, and similar reductions result from assuming a mix of land uses rather than a wholly residential area." (Owens, 1986, p. 54)

⁴⁰ La cogénération désigne le fait de produire de l'électricité et de la chaleur au travers d'un même système technique.

⁴¹ L'efficacité, et même la rentabilité d'un réseau de chaleur sont fortement liées à la densité thermique du quartier qu'il fournit, elle-même liée à la densité d'usage du sol (Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement d'Ile-de-France, 2012).

la pertinence énergétique d'un réseau de chaleur. Les auteurs estiment alors que, du point de vue du réseau de chaleur, le foisonnement, et incidemment la mutualisation de besoins divers matérialisés par des courbes de charge différentes, offrent deux avantages (CETE de l'Ouest, 2012, p. 9-10) : ils permettent, d'une part, de réduire la puissance totale installée et, d'autre part, de lisser les courbes de charge et donc d'améliorer l'usage du système de production et de distribution. Si elles sont traduites dans les termes d'un énergéticien au travers de notions qu'il est possible de convertir en grandeurs chiffrées, les notions qui sont avancées sont donc toutefois proches de celles qui sont exposées par Susan Owens (1986). On tourne en effet de manière générale autour des concepts de lissage des courbes de charge et d'écrêtage des pics de besoin.

A notre sens, il est intéressant de constater que la méthodologie mise en œuvre dans cette étude diffère assez peu de celle mobilisée dans la recherche sur les systèmes énergétiques des bâtiments que nous avons présentée dans la section précédente (Laurent, 2006). Ce sont en effet les mêmes indicateurs énergétiques qui sont évalués : le pic de demande et l'aplanissement de la courbe de charge. Ces deux études abordent pourtant la question par des objets différents : le bâtiment ou les réseaux. L'évaluation des potentiels est d'ailleurs elle-même réalisée de manière différente. Dans le premier cas, on s'intéresse à la demande tandis que dans le second on prend en compte le système de production et de distribution d'énergie en lui-même. De manière plus générale, bien que les systèmes considérés au départ soient différents, les conclusions sont les mêmes que dans les sections précédentes. Encore une fois, on montre que la mixité d'activités bénéficie au fonctionnement des systèmes énergétiques urbains.

D. Des approches diverses pour une conclusion théorique et des recommandations communes

En somme, malgré des points d'entrée différents vers la récupération et la mutualisation d'énergie, les travaux relevés au cours de notre revue de littérature ont de nombreux points communs. Tout d'abord, les résultats de leurs recherches prennent le plus souvent la forme de recommandations aux acteurs des conceptions et productions urbaines et font ainsi fortement écho aux conceptions institutionnelles qui apparaissent dans la partie précédente. Un consensus se forme en particulier autour de l'importance de la mixité fonctionnelle à différentes échelles et l'on perçoit ainsi le rôle central de l'espace dans la mise en œuvre et le fonctionnement des échanges énergétiques considérés.

Toutefois, l'urbain y est simplement considéré comme un espace dans lequel sont répartis de manière hétérogène des points de production et de consommation d'énergie plutôt que comme un espace socialement construit. Les recommandations auxquelles parviennent ces travaux ne se positionnent donc pas face à l'ampleur des transformations que les évolutions qu'ils préconisent impliquent pour les acteurs qui construisent et vivent la ville. En somme, alors que le passage du réseau au post-réseau est pensé, comme nous l'avons vu dans la première partie, en termes de relations entre la technique et les sociétés urbaines, la question des échanges énergétiques alternatifs que sont la récupération et la mutualisation locale n'apparaît dans la littérature existante que sous la forme d'une relation technique-espace.

Ainsi, les enjeux, entre autres, de coordination d'acteurs, de processus de production, de choix techniques, de politiques énergétiques ou encore de stratégies urbaines, liés au développement de ces formes de circulation d'énergie sont passés sous silence. En d'autres termes, construire des principes de planification urbaine ne dit rien de la complexité des processus qui mèneraient à leur mise en œuvre et de ce qu'ils produiraient sur le fonctionnement urbain, ce dont nous entendons précisément faire l'objet de cette thèse.

IV. Un objet spatialisé travaillé par le triptyque société, flux, technique

Le début de ce chapitre nous a permis d'introduire l'objet empirique de notre recherche et de montrer qu'il faisait de manière grandissante partie de la vision du futur énergétique des villes que partagent les acteurs institutionnels. Nous avons alors vu que les approches académiques existantes de la mutualisation et de la récupération énergétiques adoptent une vision matérielle et technique de la ville dans laquelle ces formes d'échange énergétique sont perçues comme un vecteur d'efficacité. Leur diffusion est donc recommandée, sans pour autant que les transformations qu'elles pourraient engendrer quant au processus de production et au fonctionnement des systèmes urbains ne soient discutées. En somme, face à une promotion croissante de ces objets, il n'existe pas à ce jour d'approche de leurs effets autrement qu'en termes d'efficacité énergétique.

Dans cette dernière partie, nous montrons dans un premier temps en quoi cette restriction pose problème, en replaçant l'objet face à la dialectique « réseau » *versus* « post-réseau » actuellement explorée et en déduisons l'objectif de cette thèse (A). Dans un second temps, nous soutenons qu'un élargissement du regard vers les champs de l'analyse dite

« sociotechnique » des relations entre ville et énergie d'une part et de l'écologie industrielle d'autre part peut s'avérer fructueuse pour le saisir (B).

A. Un objet qui brouille les analyses de la coévolution des systèmes énergétiques et de la ville

Les discours institutionnels rapportés jusqu'ici ont, dans leur ensemble, une caractéristique bien particulière : ils se prononcent autant sur la nécessité de sources d'énergie, que sur celle de systèmes techniques spécifiques et d'une organisation de l'espace urbain. Ce sont en effet les sources d'énergie renouvelables et de récupération, décentralisées, qui sont favorisées, ce qui incite à promouvoir des systèmes techniques de récupération et de mutualisation. Dès lors, la mixité d'activités à des échelles diverses est valorisée pour permettre la circulation des flux d'énergie en fonction des complémentarités de productions et consommations. Au total, système énergétique et organisation spatiale des activités dans la ville sont conjointement mis dans la balance.

Partant, il apparaît que ces nouvelles formes de mise en lien de la ville par la circulation de flux d'énergie doivent être construites comme des objets urbains, constitués à la fois de flux d'énergie, d'une infrastructure support de la circulation de ce flux et d'activités (donc d'acteurs) humains qui produisent ou consomment de l'énergie, l'ensemble étant influencé par l'organisation spatiale des éléments qui le constituent.

Une caractéristique fondamentale de cette description est qu'elle ne diffère pas de celle que l'on peut faire des grands réseaux conventionnels, puisqu'eux-mêmes sont constitués de dispositifs techniques et de flux qui, comme l'a montré Thomas Hughes, façonnent la société autant qu'ils sont façonnés par elle (Hughes, 1993). En outre, comme le montre Susan Owens pour l'ensemble du système énergétique (Owens, 1986, 1990) et comme le rappellent plus récemment Andrew Karvonen et Simon Guy (2011), leur efficacité est fortement influencée par l'organisation spatiale de la société. Le même type de relations technique-espace-société se trouve donc au cœur de leur fonctionnement.

Pour cette raison, nous considérons *a priori* ces formes comme une évolution de la manière de mettre l'urbain en réseau et non nécessairement comme un affaiblissement de la forme réticulaire, distinguant ainsi notre approche de l'hypothèse du post-réseau. De là, le point de départ de cette thèse est l'interrogation qu'un tel processus mène à poser quant aux relations entre la ville (comme système social et matériel spatialisé) et le système qui l'approvisionne

en énergie. En effet, nous l'avons vu dans la première partie de ce chapitre, les travaux d'histoire des sciences et des techniques montrent que les grands réseaux centralisés ont eu une importance déterminante sur la façon dont les villes modernes se sont construites (Bocquet, 2006 ; Dupuy, 1984) et sur leur fonctionnement contemporain (Le Galès et Lorrain, 2003). On associe en effet aux grands réseaux centralisés les notions d'uniformité de service, de logique de croissance et diversification de la consommation et de solidarisation du territoire (Offner et Pumain, 1996), autant de caractéristiques qui, émergeant des relations au sein du triptyque technique-espace-société, ont de multiples influences sur le fonctionnement urbain.

Ainsi, par exemple, un affaiblissement des réseaux pourrait entraîner une dégradation des mécanismes de solidarité dont le résultat pourrait se trouver « en contradiction avec des objectifs plus traditionnels de cohésion sociale » (Coutard et Rutherford, 2013, 2015). Il aurait en outre des effets sur la façon de gouverner les villes, au sein desquelles la distribution homogène des services urbains joue un rôle important pour l'assise du pouvoir des gouvernements locaux (Lorrain, 2002a, 2005) ainsi que sur le financement et les modèles d'affaire associés à ces services et à leurs infrastructures pour l'instant favorables à des acteurs historiques nationaux (Saint-André, 2008).

De ce point de vue, les systèmes de récupération et mutualisation d'énergie brouillent les analyses pouvant être menées sur la base d'une dualité réseau/post-réseau. En effet, se fondant sur une logique de relocalisation des productions et de la circulation des flux ainsi que de sobriété des consommations, ils s'appuient pourtant sur le développement de nouvelles infrastructures et connexions. Ils empruntent ainsi à l'un comme à l'autre des idéaux-types, sans être toutefois des « ensembles composites » (Jaglin, 2012) qui formeraient des connexions entre le système conventionnel et des dispositifs décentralisés.

L'objectif de cette thèse est de se confronter à cette ambiguïté. Il s'agit ainsi de comprendre les reconfigurations du rapport entre la ville, les flux d'énergie qui la traversent et la forme réseau qui émergent au travers de ces systèmes urbains. Nous visons en cela à compléter et discuter les appréhensions existantes des relations entre les territoires urbains et leurs systèmes énergétiques.

B. Elargir le regard : les approches sociotechniques des relations villes-énergie et l'écologie industrielle en appui

Toutefois, alors que mutualisation et récupération ne sont pas abordées en tant qu'objets spécifiques, il ne faut pas en conclure que les relations entre la fabrique de la ville, dans ses dimensions matérielle, sociale et spatiale, et les évolutions énergétiques récentes sont oubliées de la recherche urbaine. Bien au contraire, on trouve des recherches récentes qui touchent à la mise en œuvre de la transition énergétique dans les projets d'aménagement (Tardieu, 2015), à la conception énergétique dans ces mêmes projets (Blanchard, 2014), à la « coordination énergétique » dans la production des éco-quartiers (Debizet *et al.*, 2015 ; La Branche, 2015) ou encore à l'impact de différents scénarii de transition énergétique sur le fonctionnement urbain et les relations d'acteurs (Debizet, 2016).

Les travaux du projet Nexus (Debizet *et al.*, 2015), notamment, entendent mettre au jour les changements de « régimes sociotechniques » dans l'approvisionnement énergétique des quartiers et des villes, selon la conception qui est faite des « transitions sociotechniques » par la « perspective multi-niveaux » (Geels, 2010a). Ils s'intéressent en particulier aux évolutions qu'entraînent l'introduction d'énergies renouvelables intermittentes et de technologies de stockage à ces échelles et proposent de montrer qu'il existe « non pas un mais une pluralité de régimes énergétiques en œuvre dans les villes et que la transition énergétique passera par une recomposition conjointe de ces régimes et, ce faisant, une redistribution spatiale des « autonomies énergétiques » » (Debizet, 2016, p. 75). Les parallèles avec la question de l'émergence des synergies sont donc nombreux puisqu'on parle bien de l'évolution d'un système énergétique en place dont les conséquences doivent être considérées de manière spatialisée.

L'usage du terme « sociotechnique » à plusieurs reprises fait ici référence à tout un courant de recherches en sciences sociales qui vise à analyser les relations entre techniques et sociétés (Bijker *et al.*, 2012) dont plusieurs auteurs ont montré la possible application à l'urbain, conceptualisant ainsi la ville comme un « système sociotechnique » (Guy et Karvonen, 2011). En d'autres termes, ces derniers proposent de voir la ville comme un entrelacs indémêlable d'artéfacts techniques et d'acteurs sociaux qui s'influencent mutuellement.

L'existence des travaux cités plus haut, qui se placent explicitement dans cette perspective, montre donc que les relations entre production et fonctionnement de la ville et changement des systèmes énergétiques s'ouvrent à de telles analyses. Cependant, puisqu'ils ne partent pas

de la question spécifique du rôle de la forme réticulaire, leurs objets ne sont pas le nôtre, bien que certaines des études de cas qu'ils développent puissent en fournir une illustration⁴².

Sur un autre plan, on trouve quelques travaux provenant des pays scandinaves ou de Chine qui s'intéressent à la récupération de chaleur fatale industrielle au travers du jeu d'acteurs ou du modèle économique qui la sous-tendent (Broberg *et al.*, 2012 ; Di Lucia et Ericsson, 2014 ; Fang *et al.*, 2013) s'éloignant ainsi des approches purement technico-spatiales dont nous avons fait la revue. L'approche développée, qui fait référence au champ de l'écologie industrielle avec lequel nous nous sommes déjà familiarisés, n'est cependant pas urbaine, ce qui explique que ces travaux n'aient pas été intégrés à notre revue de littérature : les analyses portent sur le processus de diversification du mix énergétique (*low carbon transition*), ou bien sur le modèle économique qui pourrait favoriser la récupération d'un tel flux.

À travers ces quelques pistes, nous comprenons que pour construire un cadre de références à l'analyse des objets empiriques que sont les récupérations et mutualisations énergétiques locales, il nous faut élargir quelque peu notre regard, pour deux raisons. D'une part, les approches sociotechniques de l'urbain peuvent nous fournir des méthodes et un cadre de référence plus large quant aux relations entre systèmes énergétiques et fonctionnement urbain. D'autre part, nous percevons ici que le champ de l'écologie industrielle ne se résume pas à l'application de principes physiques à des systèmes humains mais que la dimension précisément humaine de ces derniers est pleinement prise en compte dans certains travaux. En cela, elle peut nous offrir une ouverture quant à la conceptualisation des circulations de flux entre activités humaines.

Conclusion

Dans les discours comme dans certaines initiatives récentes des acteurs institutionnels impliqués dans le devenir énergétique et urbanistique de nos sociétés, on voit émerger des objets que nous ne parvenons pas à placer dans la dialectique jusqu'ici dessinée « réseau » *versus* « post-réseau ». Au contraire, sous prétexte de favoriser le déploiement de sources d'énergie plus locales, qui s'opposent donc à celles qui sont distribuées par le grand réseau centralisé conventionnel, ces acteurs promeuvent l'émergence de nouvelles formes de mise en réseau de l'urbain pour échanger et partager des flux d'énergie. Nous sommes donc face à un

⁴² Voir par exemple le cas de mutualisation abandonnée dans le projet des entrepôts MacDonald présenté dans la thèse de Charlotte Tardieu (Tardieu, 2015) ou les questions de solidarité énergétique dans les travaux liés au projet Nexus (Debizet, 2016).

discours ambivalent qui, d'un côté, remet en cause le modèle conventionnel en réseau et, de l'autre, semble promouvoir un accroissement des connexions par l'énergie au sein de l'urbain.

Nous avons alors constaté que l'approche de ces formes dans la littérature académique urbaine reste purement matérielle ou technique, c'est-à-dire qu'elle se place dans une vision de la ville limitée à celle d'un objet physique. Si cette dernière permet de construire des concepts et des recommandations pour la production urbaine, elle met de côté toute la complexité des processus qui la sous-tendent. Pourtant, nous avons montré que le rôle des grands réseaux dans la construction et le fonctionnement tant matériel et technique que social des villes contemporaines est déterminant, si bien qu'on peut supposer qu'une évolution de ce dernier ait une influence non négligeable sur l'ensemble de ces dimensions.

Quelques travaux montrent pourtant que l'analyse des implications urbaines des récentes évolutions énergétiques dans une telle perspective est possible et fructueuse. Ils ouvrent ainsi des pistes par leur inscription dans des champs de recherche dont l'exploration pourrait nous permettre de saisir plus finement les implications du changement qui se profile. Il s'agit précisément du travail que nous proposons de mener dans le chapitre suivant en investiguant les différentes approches sociotechniques et socioécologiques de la ville et les liens qui les unissent.