



HAL
open science

Les modèles d'îlots/quartiers à système énergétique local bas carbone: fondamentaux techniques et économiques, conditions institutionnelles de mises en oeuvre et conséquences pour les modes de vie

Miléna Marquet

► **To cite this version:**

Miléna Marquet. Les modèles d'îlots/quartiers à système énergétique local bas carbone: fondamentaux techniques et économiques, conditions institutionnelles de mises en oeuvre et conséquences pour les modes de vie. Economies et finances. Université Grenoble Alpes, 2018. Français. NNT : 2018GREAE006 . tel-02012064

HAL Id: tel-02012064

<https://theses.hal.science/tel-02012064v1>

Submitted on 8 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Sciences Economiques**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Miléna MARQUET

Thèse dirigée par **Patrick CRIQUI**, Directeur de recherche émérite CNRS, et préparée au sein du **Laboratoire GAEL**, dans l'École Doctorale de Sciences Economiques

Les modèles d'îlots/quartiers à système énergétique local bas carbone : fondamentaux techniques et économiques, conditions institutionnelles de mise en œuvre et conséquences pour les modes de vie

Thèse soutenue publiquement le **17 octobre 2018**, devant le jury composé de :

Monsieur Yannick PEREZ

Maître de conférences (HDR), Université Paris-Sud (Rapporteur)

Madame Catherine BAUMONT

Professeur des universités, Université de Bourgogne (Rapporteur)

Monsieur Daniel LLERENA

Professeur des universités, Université Grenoble-Alpes (Président)

Monsieur Gilles DEBIZET

Maître de conférences, Université Grenoble-Alpes (Membre)

Monsieur Patrick CRIQUI

Directeur de recherche émérite CNRS, Université Grenoble-Alpes (Invité)

Monsieur Servan LACIRE

Directeur Innovation et Technologies, Bouygues Energies et Services (Invité)



Remerciements

« Faire une thèse, moi ? Jamais de la vie ! ». Voici la réponse pleine de désinvolture apportée à la question un peu « folle » de mon maître de stage lorsqu'il me proposa l'air de rien de me lancer dans un travail de recherche. Il faut dire que l'idée de consacrer plusieurs années à un sujet obscur sans garantie de résultats m'effrayait. L'utilité de l'exercice m'échappait : Révolutionner la science ? Devenir le Yoda des écoquartiers? Mais pour quoi faire ? Toutefois, comme le dit si bien l'adage « *Il ne faut jamais dire jamais* » ! De discussions en réflexions, je me décidais finalement à me lancer dans l'aventure.

Tous ceux ayant tenté l'exercice peuvent l'attester, faire une thèse n'est pourtant pas chose facile. Certains considèrent que l'on entre en thèse comme on rentre dans les ordres avec toute l'humilité et l'abnégation qu'il faut trouver pour servir une cause qui nous dépasse. Umberto Eco quant à lui teinte cet exercice des couleurs du premier amour. Cette passion aussi belle que douloureuse que l'on n'oublie jamais et qui vous transforme à vie. A mon échelle, ce fut comme parcourir un long et périlleux chemin rempli d'obstacles sous une brume épaisse. Combien de fois, j'ai haï le jour où j'ai accepté de commencer ce travail. Combien de fois me suis-je demandée comment je m'en sortirai.

Pourtant, aujourd'hui, je mesure le chemin parcouru. Outre une connaissance approfondie sur un sujet donné, cet exercice m'a donné une détermination sans faille contre l'adversité et une fierté sans égale sur un parcours jugé par certain comme atypique. En cherchant à répondre à un problème technique, j'ai répondu à une question plus grande : Qui suis-je ? Je n'étais pas sûre de moi et encore moins de mes capacités au moment de me lancer dans cette aventure. Or, je me suis trouvée comme un randonneur qui découvre que ce n'est pas tant la beauté de la destination que le chemin pour y arriver qui rend l'expérience si unique.

Durant ces quatre longues années, j'ai fait la rencontre de plusieurs personnes qui m'ont aidé autant professionnellement que personnellement à avancer le long de ce tortueux chemin. Sans eux, ce travail ne serait pas ce qu'il est.

Je souhaite tout d'abord remercier mon comité de direction académique et industriel, et en premier lieu, le Professeur Patrick Criqui qui m'a fait l'honneur d'être mon directeur de thèse. Je remercie aussi Philippe Menanteau et Gilles Debizet qui par leurs rendez-vous réguliers m'ont offert de précieux conseils pour l'amélioration de mon mémoire. Je remercie également Etienne Gaudin et Charles Paradis, membres du groupe Bouygues qui ont également participé à la réflexion. Enfin, je souhaite remercier plus particulièrement Servan Lacire, Directeur Innovation et Technologies de Bouygues Energies et Services, pour avoir vu en moi des capacités que j'ignorais. J'espère avoir été à la hauteur.

Je remercie également le laboratoire GAEL et plus particulièrement les membres de l'axe Energie, représentants de l'ancien EDDEN, qui m'ont accueilli dans leurs locaux et avec qui j'ai partagé la vie de laboratoire. J'ai une pensée particulière pour Odile Blanchard, Catherine Locatelli, Jean-Christophe Simon et Sylvain Rossiaud pour l'aide et les conseils apportés dans le travail de recherche. Je remercie également Céline Rival et Danielle Revel, deux femmes solaires qui égaient de toute leur gentillesse le laboratoire. Enfin, je n'oublie pas l'ensemble des doctorants et contractuels que j'ai pu rencontrer et dont certains sont devenus des amis.

Comme « *Y a des impulsifs qui téléphonent, d'autres qui se déplacent* », je remercie les équipes Innovations et Technologies et Qualité, Sécurité et Environnement de Bouygues Energies et Services pour m'avoir fait une place au septième étage lors de mes venues en région parisienne. Merci encore à Michel Cozic de m'avoir fait monter dans l'Orient-Express de sa passion. T'écouter est toujours un régal ! Merci à Sophie Lacombe qui est devenue au fil des cafés une amie dont la sincérité me touche et me fait avancer. Merci à Constance Dubourdieu pour nos échanges professionnels et amicaux et surtout pour avoir cru en moi afin de reprendre ton travail à la ZGO.

Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes avec qui j'ai partagé ces trois années à Grenoble et qui ont subi mes émotions en cascade. A tous, je vous dois beaucoup. Un grand Merci à German mon ami et collègue qui a su m'appriivoiser, à Laetitia pour ton écoute et ta rage d'avancer, à Laureline pour ton ouverture d'esprit, à Randa pour tes rires, à Hélène et François les urbanistes de choc ¹, à la team du lundi (Colin, Nico, Faf et Loic) dont les recettes et les potins me manquent dans mon petit Versailles, à Stéphane et Rattena mes partenaires de soirées théâtre, à Vini mon rayon de soleil venu du Brésil, à la team des coureurs (Colin, Nico –encore vous-, Jean-Gui, Jon, Fif, et tous les autres), à Camille ma petite sœur grenobloise, à Emma ma belle anglaise, à Mathis qui m'a appris à sourire, à deux très belles rencontres qui m'ont fait grandir et à tous mes autres partenaires de soirées, bike trip (Joao, Penny, François), bivouacs, jeux ou de verres. Vous avez tous eu un rôle dans cette histoire. Je suis devenue, grâce à vous, une Grenobloise de cœur !

Je remercie aussi Béné, Booba, Malo, Nico, Yandou et Zoeffrey pour qui je me suis faite rare en région parisienne et qui ont accepté la distance. Je suis prête à rattraper le temps perdu ☺ J'ai également une grande pensée pour un jeune journaliste et ami de longue date. Romain, je suis tellement fière de toi !

Je souhaite encore remercier quatre femmes et un homme qui ont tous à leur façon été d'une grande aide durant ces quatre années. Merci à Karine dont aucun mot ne peut exprimer la place que tu tiens dans mon cœur. Te voir heureuse me comble de joie et me prouve que tout est possible. Merci à Aimie, je ne compte plus les années et les souvenirs qui nous lient. La femme que tu es devenue est un exemple pour moi. Merci à Claire pour m'avoir supporté pendant ces longues semaines, pour nos séances de shopping

¹ Balaye F., Haller H., Marquet M., 2018, « Petites discussions entre amis », Actes de conversation Messenger, Editions Facebook. 1748 pages

et nos discussions autour de ces fameuses tasses de tisane. Merci à Fabrice pour m'avoir donné ma chance. Merci à Florence F, sans vous je n'aurais pas pu me relever.

Je ne pourrai pas finir mes remerciements sans avoir une pensée pour ma famille. Malgré les maladroites et la distance prise, je ne doute pas d'une chose : vous avez tous souhaité ma réussite. Que ce mémoire soit la preuve de celle-ci et ouvre une nouvelle page de notre histoire. Je tiens également à dire à Jean-Noël Marquet combien son soutien aussi bien physique que moral durant ces quatre années m'a été précieux. Tu es mon meilleur conseiller et un phare auquel je peux me raccrocher.

Pour conclure, je finirai par une phrase de Xavier Dolan, réalisateur de génie, prononcée lors d'une remise de prix à Cannes et qui exprime avec brio ce que j'ai appris de ces quatre dernières années :

« Je pense que tout est possible à qui rêve, ose, travaille et n'abandonne jamais »

Miléna

Résumé

Le développement du quartier comme échelle d'un développement urbain plus durable s'inscrit dans une période de prise de conscience liée au changement climatique pour lequel l'Union Européenne a mise en place une politique de transition énergétique. Actuellement, les écoquartiers se structurent autour de deux points clés au niveau énergétique : l'efficacité énergétique et l'approvisionnement énergétique. L'efficacité énergétique qui englobe la performance énergétique du bâtiment et la maîtrise de la demande énergétique est le fer de lance des politiques de transition énergétique locale existante. A l'opposé, l'approvisionnement énergétique bas carbone ne semble pas avoir encore atteint une maturité suffisante pour être réalisé en totalité à l'échelle du quartier. Néanmoins, l'analyse des projets d'écoquartiers montre l'intérêt croissant porté à la création d'une offre énergétique bas carbone employant les ressources locales. Cet intérêt traduit, notamment, la volonté de certains acteurs locaux d'atteindre un certain degré d'autonomie énergétique. Afin d'envisager le quartier comme une échelle pertinente pour l'approvisionnement énergétique bas carbone, il est nécessaire d'analyser les conditions technico-économiques et institutionnelles à mettre en œuvre. Elles révèlent le besoin d'un changement de paradigme dans la structuration des systèmes énergétiques passant de systèmes centralisés à des systèmes décentralisés. Or, ce nouveau paradigme est conditionné par la maturité technico-économique des infrastructures pouvant être installées dans le quartier et par la capacité à trouver un modèle d'affaire viable rendant l'investissement rentable à cette échelle. D'un point de vue institutionnel, il provoque une modification des relations entre les acteurs utilisant les vecteurs énergétiques étudiés (électricité et chaleur). L'essor de nouveaux profils de production avec le développement des énergies renouvelables et l'émergence de nouveaux profils de consommateurs devenant des producteurs modifient la chaîne de valeur énergétique et obligent à garantir la flexibilité des systèmes énergétiques pour garantir leur bon fonctionnement. Pour tenter d'apporter un éclairage sur les possibles formes que pourraient prendre ces relations, une démarche méthodologique reposant sur la construction d'idéal-types a été réalisée. Elle fait apparaître le besoin d'un nouvel acteur, le gestionnaire de l'énergie, pour garantir le bon fonctionnement des systèmes énergétiques installés dans les quartiers.

Mots-clés : quartier, énergie bas carbone, réseaux, flexibilité

Summary

The development of the neighborhood as a scale of a more sustainable urban development takes part in a period of awareness linked to climate change for which the European Union has implemented an energy transition policy. In this context, the eco-neighborhoods are structured around two key points in terms of energy: energy efficiency and energy supply. Energy efficiency, which encompasses the energy performance of buildings and the control of energy demand, is the spearhead of existing local energy transition policies. In contrast, the low-carbon energy supply does not seem to have reached sufficient maturity to be fully implemented at the neighborhood level. Nevertheless, the analysis of eco-district projects shows the growing interest in the creation of a low carbon energy supply using local resources. This interest reflects, in particular, the willingness of some local actors to reach a degree of energy autonomy. In order to consider the neighborhood as a relevant scale for low-carbon energy supply, it is necessary to analyze the technical-economic and institutional conditions to be implemented. It reveals the need for a paradigm shift in the structuring of energy systems from centralized to decentralized systems. However, this new paradigm is conditioned by the technical and economic maturity of the infrastructures that can be installed in the district and by the ability to find a viable business model making the investment profitable on this scale. For the institutional part, it causes a modification of the relations between the actors using the energetic vectors studied (electricity and heat). The rise of new production profiles with the development of renewable energies and the emergence of new consumer profiles becoming producers, alters the energy value chain and makes it necessary to guarantee the flexibility of energy systems to ensure their correct functioning. To plan a different pathway that these relationships might take, a methodological approach based on the construction of the ideal-type was carried out. It shows the need for a new player, the energy manager, to ensure the proper functioning of the energy systems installed in the neighborhoods.

Keywords : district, low carbon energy, networks, flexibility

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	5
Summary.....	6
Table des Figures	13
Table des Tableaux.....	15
Table des Cartes	16
Liste des abréviations	17
Introduction.....	19
Chapitre 1 : L’Energie dans les écoquartiers.....	25
1. La transition énergétique : un enjeu pour les différentes échelles de gouvernance.....	25
1.1. Transition énergétique et gouvernance internationale du climat	25
1.1.1. Premières actions de la gouvernance mondiale.....	25
1.1.2. L’Union Européenne, la lutte contre le changement climatique et la transition énergétique	28
1.1.3. Le rôle des Etats Membres de l’Union Européenne dans la transition énergétique.....	30
1.2. Les villes s’emparent progressivement du sujet de la transition énergétique.....	31
1.2.1. Les engagements des villes européennes	31
1.2.2. Les ambitions des villes en matière de durabilité énergétique	34
1.2.3. Les leviers d’actions des villes européennes dans la transition énergétique.....	35
2. Le quartier : nouvelle échelle stratégique pour la ville du futur ?	36
2.1. Histoire d’un échelon territorial méconnu.....	37
2.1.1. Le quartier comme objet de recherche	38
2.1.2. Les proto-écoquartiers.....	39
2.1.3. Le développement des écoquartiers	40
2.2. Mise en œuvre du développement urbain durable au niveau du quartier	42
2.2.1. Densité et étalement urbain	43
2.2.2. Le rôle de l’innovation technologique	44
2.2.3. Les services urbains	45
2.2.4. La gouvernance	46
3. Les enjeux énergétiques dans les écoquartiers.....	48
3.1. L’efficacité énergétique dans les quartiers	49
3.1.1. La performance énergétique des bâtiments	50
3.1.2. La maîtrise de la demande d’énergie.....	53
3.2. L’approvisionnement énergétique des quartiers	55
3.2.1. L’approvisionnement en chaleur.....	55
3.2.1.1. Production et Consommation de chaleur.....	56
3.2.1.2. Les réseaux de chaleur urbains en Europe.....	57
3.2.2. L’approvisionnement en électricité.....	59

3.2.2.1.	Production et consommation d'électricité.....	60
3.2.2.2.	Les réseaux de distribution d'électricité	61
4.	Une base d'information sur les profils énergétiques des écoquartiers en Europe.....	63
4.1.	La base d'information et les grandes catégories de variables.....	67
4.1.1.	Les données générales.....	71
4.1.2.	Les caractéristiques du territoire	71
4.1.3.	L'approvisionnement énergétique	72
4.1.4.	Les acteurs.....	73
4.1.5.	Le financement des projets	73
4.2.	Analyse de la base d'information	73
4.2.1.	Contexte et nature des projets urbains.....	73
4.2.2.	Le rôle des labels	74
4.2.3.	L'approvisionnement énergétique	75
4.2.3.1.	Production et distribution de chaleur	75
4.2.3.2.	Production et distribution d'électricité.....	77
4.2.3.3.	Les mix énergétiques des écoquartiers.....	79
4.2.4.	Les acteurs.....	80
4.3.	Bilan sur la base d'information	81
5.	Conclusion.....	83
Chapitre 2 : Trois études de cas : analyses techniques, économiques et institutionnelles		85
1.	Le choix de trois études de cas.....	85
1.1.	Sélection des études de cas.....	86
1.2.	Méthodologie des études de cas.....	87
2.	Le projet Queen Elizabeth Olympic Park.....	88
2.1.	Une réalisation en deux temps.....	88
2.1.1.	La localisation.....	88
2.1.2.	Chronologie générale du projet	89
2.1.3.	L'aménagement urbain après les Jeux Olympiques.....	90
2.2.	Les acteurs du projet.....	92
2.3.	Le projet énergétique du Queen Elizabeth Olympic Park.....	94
2.3.1.	L'efficacité énergétique	94
2.3.2.	L'approvisionnement énergétique du parc.....	95
2.4.	Conclusion du projet Queen Elizabeth Olympic Park	98
3.	Le projet GreenCity à Zurich.....	99
3.1.	La démarche dans laquelle s'intègre le projet GreenCity : la Société à 2 000 Watts	99
3.2.	Intégration du concept Société à 2 000 Watts dans la politique énergétique helvétique	101
3.2.1.	La politique énergétique Suisse à l'horizon 2050.....	102
3.2.2.	La politique énergétique des cantons et le cas du Canton de Zurich.....	104
3.3.	Présentation du projet GreenCity	105

3.3.1.	Greencity et la labellisation « Site à 2 000 Watts »	105
3.3.2.	Le cadre de réalisation de GreenCity	107
3.3.3.	Les acteurs ayant participé au projet GreenCity	109
3.3.4.	Le financement du projet GreenCity	111
3.4.	La proposition énergétique du projet GreenCity	111
3.4.1.	La performance énergétique des bâtiments	111
3.4.2.	Le projet initial en matière d’approvisionnement énergétique	112
3.4.3.	Le projet GreenCity tel que réalisé depuis 2015	114
3.5.	Conclusion du projet Greencity	116
4.	Le projet Ecocité de Grenoble.....	118
4.1.	Grenoble : une ville durable avant l’heure ?	118
4.1.1.	Une ville engagée et récompensée dans le domaine du développement durable	119
4.1.2.	Une organisation originale de l’approvisionnement énergétique	121
4.2.	Présentation du projet Ecocité de Grenoble	123
4.2.1.	Le concept de l’Ecocité Grenobloise : le système urbain intégré.....	125
4.2.2.	Les échelles de réalisation de l’Ecocité proposées par la ville de Grenoble.....	127
4.2.2.1.	L’échelle urbaine : une vision globale pour la ville	128
4.2.2.2.	La polarité Nord-Ouest.....	129
4.2.2.3.	L’échelle administrative : La ZAC Presqu’Ile.....	130
4.2.3.	Le financement du projet Ecocité Grenobloise	132
4.2.4.	Présentation des acteurs énergétiques présents dans Ecocité.....	133
4.3.	La proposition énergétique du projet Ecocité.....	135
4.3.1.	Le projet initial, présenté dans la candidature Ecocité.....	135
4.3.1.1.	Les ambitions sur le bâti	136
4.3.1.2.	La proposition initiale d’approvisionnement thermique.....	136
4.3.1.3.	La proposition d’approvisionnement électrique.....	137
4.3.1.4.	Le monitoring territorial	137
4.3.2.	Le projet énergétique en cours de réalisation.....	138
4.3.2.1.	L’énergie thermique : abandon de la boucle d’eau tiède.....	138
4.3.2.2.	La centrale de cogénération.....	140
4.3.2.3.	L’énergie électrique.....	140
4.3.2.4.	Le monitoring territorial	140
4.4.	Conclusion	141
5.	Analyse conclusive des études de cas.....	142
Chapitre 3 : Analyse technico-économique des systèmes sociotechniques de l’énergie		146
1.	Les systèmes sociotechniques de l’énergie : cadrage théorique et illustration	147
1.1.	Cadrage théorique des systèmes sociotechniques de l’énergie	147
1.1.1.	Diversité des analyses des liens entre infrastructures et systèmes sociaux	148
1.1.2.	L’apport de l’approche Multi-Niveaux dans l’analyse des systèmes sociotechniques	154

1.2.	La reterritorialisation de l’approvisionnement comme transition technique dans les systèmes sociotechniques de l’énergie.....	159
1.2.1.	L’approvisionnement énergétique au niveau local : typologie et échelle	159
1.2.2.	Lecture de la décentralisation comme Transition sociotechnique.....	163
2.	Analyse technico-économique des technologies pouvant être installées dans les écoquartiers ..	164
2.1.	La production d’énergie renouvelable	165
2.2.	Les réseaux électriques de distribution.....	172
2.3.	Les réseaux de chaleur urbains.....	179
2.4.	Le stockage décentralisé d’énergie	185
2.4.1.	Le stockage électrique.....	187
2.4.2.	Le stockage thermique	189
2.4.3.	Le couplage stockage thermique et réseau électrique	191
3.	L’éco-quartier comme système énergétique: réflexion autour d’un modèle technico-économique	192
3.1.	Les enjeux de la reterritorialisation de l’offre au niveau du quartier : réflexion systémique	193
3.2.	Les spécificités des infrastructures de réseau	195
3.3.	Modèle technico-économique d’un système énergétique à l’échelle de l’écoquartier	195
4.	Conclusion.....	199
Chapitre 4 : La régulation des systèmes sociotechniques de l’énergie : analyse Néo Institutionnelle 201		
1.	Les spécificités de l’approvisionnement énergétique : le réseau et ses enjeux.....	202
1.1.	Caractérisation de l’approvisionnement énergétique comme une ressource essentielle	203
1.2.	Les industries de réseaux et les obligations de service universel	204
1.3.	Le paradigme traditionnel de l’approvisionnement des industries de réseau énergétique... 206	
1.3.1.	Emergence de la notion d’industrie de réseaux.....	206
1.3.2.	Les externalités des industries de réseaux.....	207
1.3.3.	Le monopole dans les industries de réseau.....	208
1.3.3.1.	Apports de la théorie néoclassique.....	209
1.3.3.2.	Limites de l’apport de l’analyse néoclassique	212
2.	L’évolution des institutions dans les industries de réseaux énergétiques.....	214
2.1.	Le courant historique de la nouvelle économie institutionnelle	214
2.2.	Les institutions comme vecteur de la dynamique de réseau énergétique.....	216
2.3.	Le rôle des institutions externes aux industries énergétiques	218
2.3.1.	Première période 1880-1910 : les balbutiements d’une nouvelle industrie	219
2.3.2.	Seconde période 1910-1930 : l’essor de l’électricité	221
2.3.3.	Troisième période 1930-1980 : la consolidation.....	222
2.3.4.	Quatrième période 1980-1995 : Les débuts de la dérégulation.....	224
2.3.5.	Cinquième période 1995-2010 : Ouverture des marchés électriques à la concurrence ...	226
2.3.6.	Sixième période depuis 2010 : Interconnexion et décentralisation.....	230

2.4.	Vers un nouveau dispositif institutionnel dans les industries énergétiques : infrastructures techniques et institutions dans la transition	231
3.	La dynamique de décentralisation technique vue en termes d'analyse des coûts de transaction	233
3.1.	La théorie des coûts de transaction	233
3.2.	Les hypothèses méthodologiques pour l'analyse des systèmes énergétiques décentralisés	239
3.2.1.	Le poids des technologies sur l'évolution des transactions	239
3.2.2.	L'influence de l'environnement des transactions	241
3.3.	Evolution des échanges transactionnels dans l'approvisionnement énergétique.....	241
3.3.1.	Les caractéristiques transactionnelles de l'électricité et de la chaleur	242
3.3.2.	La spécificité des actifs électriques et thermiques	244
3.3.3.	Evolution des relations contractuelles liées à la décentralisation	245
3.3.3.1.	La propriété du sol.....	245
3.3.3.2.	La propriété de l'infrastructure.....	248
3.3.3.3.	L'apport des technologies de l'information.....	249
3.3.3.4.	La gestion des flux.....	250
4.	Conclusion.....	251
	Chapitre 5 : Trois idéal-types pour la territorialisation de l'énergie.....	253
1.	La gestion de la flexibilité à l'échelle du quartier : valorisation économique et jeu d'acteurs....	255
1.1.	La gestion de la flexibilité sur le réseau électrique	255
1.1.1.	Les options liées à l'offre d'électricité.....	255
1.1.2.	La flexibilité de la demande	258
1.1.3.	L'accroissement des besoins de flexibilité à l'échelle locale dans les années futures	260
1.2.	La valorisation économique de la flexibilité.....	261
1.2.1.	Le fonctionnement actuel du marché électrique	261
1.2.2.	Le développement des mécanismes de marché à l'échelle locale	264
1.2.2.1.	La gestion active de la demande ou <i>demand/response</i>	265
1.2.2.2.	Les centrales électriques virtuelles (<i>virtual power plants</i>)	266
1.3.	Valorisation des ressources locales via les systèmes multi-fluides	268
2.	L'approvisionnement énergétique bas carbone des quartiers : quelle forme dans le futur ?.....	269
2.1.	Idéal-type n°1 : Un approvisionnement bas carbone pour le quartier garanti contractuellement	270
2.1.1.	Cartographie du territoire.....	270
2.1.2.	Traitement de l'efficacité énergétique dans le quartier.....	271
2.1.3.	L'approvisionnement électrique bas carbone du quartier	272
2.1.4.	L'approvisionnement en chaleur du quartier	275
2.1.5.	Un approvisionnement « 100% bas carbone » garanti contractuellement.....	277
2.2.	Idéal-Type n°2 : Le quartier comme territoire de la flexibilité.....	278
2.2.1.	Cartographie du territoire.....	279
2.2.2.	L'efficacité énergétique	280

2.2.3.	L’approvisionnement électrique du quartier	281
2.2.4.	L’approvisionnement en chaleur du quartier	284
2.2.5.	La valorisation de la flexibilité énergétique dans le quartier	286
2.3.	Idéal-Type n°3 : Le quartier comme échelle pertinente pour l’autonomie énergétique bas carbone	287
2.3.1.	Cartographie du territoire	287
2.3.2.	L’efficacité énergétique	288
2.3.3.	L’approvisionnement électrique dans la copropriété énergétique	289
2.3.4.	L’approvisionnement en chaleur	290
2.3.5.	Relation entre les acteurs de la copropriété et les réseaux extérieurs	290
2.3.6.	Nouveau statut pour le quartier : la copropriété énergétique	291
3.	Emergence d’un nouvel acteur dans le réseau de valeur énergétique : le gestionnaire de l’énergie	293
3.1.	Le quartier comme copropriété dont l’approvisionnement énergétique est décentralisé et bas carbone	293
3.2.	Les fonctions du gestionnaire de l’énergie comme administrateur de la copropriété	298
3.2.1.	La gestion des flux à l’intérieur de la copropriété	299
3.2.2.	La gestion des flux à l’extérieur de la copropriété	301
3.3.	Le développement du statut au niveau de l’Union Européenne	304
4.	Conclusion	309
	Conclusion Générale	311
	Bibliographie	314
	Annexes	0

Table des Figures

Figure 1 : Répartition de la consommation d'énergie finale en Europe pour 2014 –Eurostat, 2014, en % de tep -	34
Figure 2 : Origine de l'offre d'énergie thermique pour la demande de chaleur dans les secteurs des bâtiments résidentiels et tertiaires –source : Connolly et al, 2013-	56
Figure 3 : Approvisionnement en énergie primaire pour le chauffage des bâtiments en 2010 avec différents niveaux de pénétration des réseaux de chaleur –source : Connolly et al, 2012, p 4-	59
Figure 4 : Consommation d'électricité par secteur dans l'Europe des 28 en 2014 –source : Eurostat-	60
Figure 5 : Production électrique par énergie primaire dans l'Union Européenne des 28 de 1990 à 2013 –Eurostat--	61
Figure 6 : Capacités de production de chaleur installées dans les quartiers [Construction de l'auteur]	75
Figure 7 : Mode de distribution de la chaleur à l'échelle du quartier [Construction de l'auteur]	76
Figure 8 : Capacités de production d'électricité installées dans les quartiers [Construction de l'auteur].....	78
Figure 9 : Mode de distribution de l'électricité dans les quartiers [Construction de l'auteur]	79
Figure 10 : Energies renouvelables et bas carbone utilisées dans les quartiers [Construction de l'auteur].....	80
Figure 11 : Energy use per time and capita in various countries and within countries -Spreng, 2005, p 1908-	100
Figure 12: Objectifs de la ville de Zurich par rapport aux objectifs de la Société à 2 000 Watts –sources : Ville de Zurich, 2016, p 10-	105
Figure 13: Résultats tirés du catalogue de critères de la Société à 2000 Watts pour Greencity -Source : Suisse Energie, 2014b-	107
Figure 14 : L'approvisionnement énergétique de GreenCity –source : Losinger Marazzi SA, 2014b, p34-35-	112
Figure 15: Schéma décrivant le système urbain intégré Source : Ecocité Grenobloise : Vivre la ville post-Carbone dans les Alpes, Dossier de candidature, mars 2011, 79p, p56.....	127
Figure 16: Cadre simplifié des relations interdépendantes ayant lieu dans les systèmes sociotechniques [Construction de l'auteur].....	148
Figure 17 : Définition évolutive d'un réseau par Gabriel Dupuy –source : Dupuy, 1991-.....	151
Figure 18 : Croissance des systèmes sociotechniques inspirée par la réflexion de T.P.Hughes [Construction de l'auteur].....	153
Figure 19 : L'approche multi-niveaux des transitions sociotechniques [Geels, 2004]	155
Figure 20 : Typologie de l'approvisionnement énergétique au niveau local [Construction de l'auteur]	160
Figure 21 : Les degrés de complexités des systèmes techniques décentralisés [Construction de l'auteur].....	163
Figure 22 : Production d'énergie renouvelable en Europe –source : EurObersv'Er 2015-.....	165
Figure 23 : LCoE et prix des vecteurs énergétiques de référence (€/MWh) –source ; EurObserver, 2016, p193-	170
Figure 24 : Investissements mondiaux dans les réseaux de transport et de distribution électrique –source : AIE, 2016b, p148-	178
Figure 25 : Les drivers de l'investissement dans les réseaux de distribution –Eurelectric, 2014, p5-	179
Figure 26 : Consommation d'énergie finale dans le secteur résidentiel –source ; CE, 2014a, p37-	180
Figure 27 : Consommation d'énergie finale dans le secteur tertiaire –source ; CE, 2014, p38-	180
Figure 28 : Coûts annuels du chauffage dans les bâtiments dans l'Europe des 27 de 2010 à 2050 –source : Connolly et al, 2012, 2012, p 55-	182

Figure 29 : Estimation des capacités de stockage d'énergie installées dans le monde (avril 2010) – source : DOE & Electricity Advisory Committee : « Energy Storage Activities in the US Electricity Grid » May 2011- E-Cube, 2012.....	185
Figure 30 : Maturité des technologies de stockage énergétique –source : AIE, 2014, p16-	186
Figure 31 : Critères pour un modèle technico-économique des systèmes énergétiques installés dans un écoquartier [Construction de l'auteur].....	198
Figure 32 : Système sociotechnique de l'énergie au regard de la transition énergétique inspiré par Chappin et al, 2014 [Construction de l'auteur].....	200
Figure 33 : Présence d'un monopole naturel [Construction de l'auteur].....	210
Figure 34 : Modèle de Noam [Noam, 1992, p 32].....	211
Figure 35 : Equilibre de long terme du monopole public et du monopole privé [Construction de l'auteur].....	212
Figure 36 : Evolution des chaînes de valeur électrique et de chaleur [Construction de l'auteur] ...	219
Figure 37 : Impact de la libéralisation sur les industries de réseaux [Construction de l'auteur]....	227
Figure 38 : Oliver Williamson, "Comparative Economic Organization: the Analysis of Discrete Structural Alternatives", Administrative Science Quarterly, vol.36, n°2, 1991, p 284.....	236
Figure 39 : Les relations entre acteurs évoluant lors de la décentralisation de l'approvisionnement énergétique [Construction de l'auteur].....	245
Figure 40 : Impact du statut juridique de l'écoquartier sur les infrastructures intégrées dans son périmètre [Construction de l'auteur].....	247
Figure 41 : Exemple d'application de la flexibilité de la demande-source : CRE, 2015-.....	259
Figure 42 : Mix des énergies renouvelables constituant les 25% de production d'électricité bas carbone de l'Union Européenne –source : Eurostats- [Construction de l'auteur]	260
Figure 43 : Fonctionnement du marché de gros [Construction de l'auteur]	262
Figure 44 : Illustration de l'ordre de présence économique Construction de l'auteur].....	263
Figure 45 : Séquence de marché entre le marché infra-journalier et le mécanisme d'ajustement – source Microeconomix-.....	264
Figure 46 : Most important smart grid investments according DSO directors –source : Eurelectric, 2014, p24-.....	267
Figure 47 : Schéma de l'approvisionnement électrique au niveau du quartier –Idéal-type n°1- [Construction de l'auteur].....	274
Figure 48 : Schéma de l'approvisionnement en chaleur au niveau du quartier –Idéal-type n°1- [Construction auteur].....	276
Figure 49 : Schéma de l'approvisionnement électrique au niveau du quartier dans l'idéal-type n°2 [Construction de l'auteur].....	282
Figure 50 : Schéma de l'approvisionnement en chaleur au niveau du quartier dans l'idéal-type n°2 [Construction de l'auteur].....	285
Figure 51 : Schéma de l'approvisionnement électrique dans la copropriété dans l'idéal-type n°3 [Construction de l'auteur].....	289
Figure 52 : Schéma de l'approvisionnement en chaleur au niveau du quartier -l'idéal-type n°3 [Construction de l'auteur].....	290
Figure 53 : Les différents profils de copropriété énergétique ayant besoin de recourir à un gestionnaire de l'énergie [Construction de l'auteur]	298
Figure 54 : Les différentes fonctions du gestionnaire de l'énergie [Construction de l'auteur].....	303

Table des Tableaux

<i>Tableau 1 : Comparaison des Chartes d'Athènes de 1933 et 1998 basée sur les travaux de Salomon, 2009</i>	33
<i>Tableau 2 : Pourcentage des citoyens desservis par des réseaux de chaleur urbains en Europe – source : EuroHeat&Heat, Statistic Overview, 2015, data : 2013-</i>	58
<i>Tableau 3 : Les écoquartiers étudiés dans la base d'information</i>	65
<i>Tableau 4 : Les variables de la base d'information</i>	68
<i>Tableau 5 : Capacités de production cumulées des deux centres énergétiques sur le parc [Construction de l'auteur]</i>	97
<i>Tableau 6 : Valeur 2005 et 2012 et valeurs cibles à atteindre pour la réalisation de la société à 2 000 Watts en Suisse, selon la consommation d'énergie finale (gauche) et la consommation globale (pondérée) –source : Suisse Energie, 2014a, p 1-</i>	101
<i>Tableau 7 : Les principaux chiffres clés de l'énergie en Suisse –source : OFEN, 2015-</i>	102
<i>Tableau 8 : Hypothèses des scénarios "Poursuite de la politique actuelle", "Mesures politiques du Conseil Fédéral" et "Nouvelles politiques énergétique" - source : OFEN, 2013, p3-</i>	103
<i>Tableau 9 : Objectifs territoriaux du PAEC adopté en 2014 par la Métropole de Grenoble [Grenoble Alpes Métropole, 2015, p 3]</i>	120
<i>Tableau 10 : Présentation des dimensions et des dynamiques présentes dans la démarche Ecocité – source : http://www.territoires.gouv.fr/les-ecocites, consulté le 23 août 2015-</i>	124
<i>Tableau 11 : Tableau récapitulatif des ambitions des différents projets d'éco-quartiers étudiés [Construction de l'auteur]</i>	144
<i>Tableau 12 : Type de production distribuée en fonction de la capacité installée [Ackerman et al, 2001]</i>	174
<i>Tableau 13 : Technologies pour la production distribuées [Ackerman et al, 2001]</i>	174
<i>Tableau 14 : Liste des avantages technologiques et économiques de l'utilisation des systèmes de stockage [Construction de l'auteur]</i>	187
<i>Tableau 15 : Energy capacities, power efficiency and storage time of thermal energy storage technologies – source : IEA, 2011, p 20-</i>	191
<i>Tableau 16 : Réseau et développement urbain durable : deux paradigmes antagoniques –source : Coutard, 2009-</i>	194
<i>Tableau 17 : La gouvernance efficace selon Williamson-source : Williamson O, 1994, " Les institutions de l'économie", p 106</i>	237

Table des Cartes

<i>Carte 1: Localisation du Parc Olympique Reine Elizabeth par rapport à Londres - source : Google Maps-</i>	89
<i>Carte 2 : Aménagement du Parc Olympique Reine Elizabeth -source : LLDC, 2012b, p29</i>	91
<i>Carte 3 : Réseaux de chaleur et de froid du Queen Elizabeth Olympic Park – McDonald, 2012, slide 22-</i>	96
<i>Carte 4: Les cités de l'énergie en Suisse en fin 2013 –source : Suisse Energie, 2013, p 6-</i>	106
<i>Carte 5: Cartes de la ville de Zurich avec localisation du quartier de Manegg -Source : Google Map-</i>	108
<i>Carte 6: Plan du site GreenCity avec répartition des bâtiments (Vert Foncé : Tertiaire ; Vert Sapin : Résidentiel ; Bleu : Affectations Spéciales) –source : Suisse Energie, 2015d, slide 5-</i>	112
<i>Carte 7 : Structuration de l'agglomération grenobloise autour de trois polarités, en relais du cœur de ville/cœur d'agglomération. Source : Ecocité Grenobloise : Vivre la ville post-Carbone dans les Alpes, Dossier de candidature, mars 2011, 89 p, p12</i>	129
<i>Carte 8 : Périmètre de la polarité Nord-Ouest dans laquelle le projet Ecocité prendra place -Source : Ecocité Grenobloise : Vivre la ville post-Carbone dans les Alpes, Dossier de candidature, mars 2011, 89 p, 29</i>	130
<i>Carte 9 : Les différentes zones de la Presqu'île -site : http://www.grenoble.fr/545-presqu-ile.htm, consulté le 30 novembre 2016-</i>	131
<i>Carte 10 : 63 régions stratégiques pour les réseaux de chauffage dans 16 Etats Européens – in Persson et al, 2014-</i>	183
<i>Carte 11 : Nombre et taille des opérateurs de système de distribution en Europe –source : Eurelectric, 2012, "Power Distribution in Europe : Facts and Figures", 26 slides, slide 7-</i>	228
<i>Carte 12 : Type d'opérateur de système de distribution -Eurelectric, 2012,"Power Distribution in Europe : Facts and Figures", 26 slides, slide 8-</i>	229

Liste des abréviations

AEE : Agence Européenne de l'Environnement

AIE : Agence Internationale de l'Energie

AMN : Approche Multi-Niveau

CCIAG : Compagnie de Chauffage Intercommunale de l'Agglomération Grenobloise

CE : Commission Européenne

CEU : Conseil Européen des Urbanistes

DGALN : Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature

EM : Etats Membres

ETS : Emission Trading Scheme

GES : Gaz à Effet de Serre

GEG : Gaz et Electricité de Grenoble

HRE : Heat Roadmap Europe

IDT : Idéal-type

LLDC : London Legacy Development Corporation

LOCOG : London Organization Committee of the Olympic paralympic Games

MLETR : Ministère de la Cohésion des Territoires

MST : Macro-Système Technique

NTIC : Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication

ODA : Olympic Delivery Authority

PAC : Pompe A Chaleur

PCE : Plan Climat-Energie

PIA : Programme d'Investissement d'Avenir

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

PUCA : Plan Urbanisme Construction Architecture

REA : Renewable Energy Association

RPT : Réseau de Projet Transactionnel

TAR : Théorie de l'Acteur Réseau

TE : Transition Energétique

UCPTE : Union for the Co-Ordination of Production and Transmission of Electricity

UE : Union Européenne

VPP : Virtual Power Plant

Introduction

Le travail de recherche présenté ci-après s'inscrit dans le cadre d'une réflexion amorcée au début des années 2010 par le groupe Bouygues, sur les formes que pourraient prendre la ville durable du futur. Une échelle d'analyse et d'action a alors suscité l'intérêt du groupe, dans sa recherche d'innovation et de développement de la soutenabilité au sein de ses différents domaines d'expertises. Il a ainsi été décidé de lancer un travail de recherche sur les modèles de quartiers durables, échelle peu appréhendée jusqu'alors par les énergéticiens et les industriels de la construction. Ce choix résulte d'un triple mouvement engagé au niveau de différents territoires.

Un premier mouvement provient de la multiplication des projets d'aménagement urbains s'inscrivant dans une optique de modernisation de la ville et de respect des principes du développement durable à des échelles qui n'étaient pas celle de la ville mais qui n'étaient pas non plus le simple bâtiment. Un second mouvement résultait de l'augmentation des exigences en matière de performance énergétique notamment dans les bâtiments neufs. Enfin, un dernier mouvement se déployait à partir des impératifs de transition énergétique qui supposent un développement rapide des énergies renouvelables dès l'horizon 2020, et au-delà.

L'importance des quartiers pour le déploiement d'un développement urbain durable

Le choix du quartier comme échelle d'analyse résulte de la multiplication des propositions d'aménagement urbain conçus à ce niveau en Europe depuis le tournant du vingt et unième siècle. Un grand nombre de ces projets voient le jour sur d'anciennes friches urbaines qui sont réhabilitées. Le but de ces actions est alors de promouvoir la modernisation de la ville, ce qui passe par l'offre de ressources nécessaires au développement économique et social de la population résidant sur le périmètre tout en maîtrisant l'impact environnemental des activités humaines.

Ces projets urbains sont souvent perçus comme un moyen d'expérimenter la ville durable du futur en cherchant à répondre aux enjeux que constituent la soutenabilité, l'amélioration de la participation et de l'intelligence collective ainsi que le respect de l'environnement dans lequel ces structures urbaines sont installées. Ces propositions se caractérisent par une même volonté de renouveler la ville suite à une prise de conscience liée au besoin de repenser le vivre-ensemble et d'intégrer la perspective de limitation des ressources naturelles.

L'efficacité énergétique des bâtiments dans les nouveaux quartiers

La dimension la plus visible de la réalisation de ces nouveaux quartiers, dans des territoires déjà urbanisés, est celle des bâtiments qui les constituent.

Ces constructions neuves ou rénovées doivent répondre aux évolutions des exigences réglementaires mise en place par les Etats et par l'Union Européenne. Différents textes réglementaires poussent depuis plusieurs années à une amélioration de la performance énergétique des bâtiments. Le monde de la construction doit donc intégrer ces contraintes et repenser le bâtiment afin de répondre aux exigences de la transition énergétique. Dans ce cadre, plusieurs transformations sont engagées que ce soit pour adapter le cahier des charges de la construction et rendre les bâtiments plus performants, ou pour encourager les consommateurs à développer de nouvelles manières de consommer l'énergie au sein des bâtiments. Les perspectives de déploiement de différentes technologies de l'information et de la communication dans les bâtiments afin d'analyser différents flux énergétiques va également dans le sens de l'amélioration de l'efficacité énergétique en permettant un accès plus aisés des consommateurs à leurs profils de consommation.

L'essor des énergies renouvelables au niveau local

La transition énergétique confirmée en Europe avec le Paquet Climat Energie de 2008 fixe un objectif à atteindre pour les énergies renouvelables de 20% de la consommation totale d'énergie des pays de l'Union en 2020. Or, le développement de ces énergies doit passer, entre autres moyens, par l'installation de capacités de production au niveau local. Or, le déploiement des capacités de production à cette échelle repose sur un processus de décentralisation qui est encore nouveau pour les acteurs classiques de l'énergie (producteur, opérateur de réseau, consommateur).

Le développement de nouveaux usages de l'énergie (autoconsommation, autoproduction,...) à l'échelle des quartiers interroge la possible émergence de nouveaux profils d'acteurs (consomm'acteur, prosumers, agrégateur,...). Le choix des technologies à opérer pour répondre aux besoins de ces nouveaux périmètres de production ainsi que sur les modèles économiques permettant de les faire fonctionner restent donc encore largement à définir. De plus, la décentralisation des systèmes techniques de l'énergie conduit à repenser les relations entre tous les acteurs de la chaîne énergétique (producteur, opérateur de réseaux, consommateur,...).

Problématique et thèse défendue

Dans ce contexte, Bouygues Energies et Services, filiale spécialisée dans l'énergie de Bouygues Construction, a choisi de se concentrer sur le traitement de l'énergie au niveau des quartiers. L'entreprise ayant historiquement un cœur de compétences axé sur les réseaux extérieurs énergétiques cherche à se diversifier en développant de nouvelles solutions techniques et de nouveaux services pour répondre aux besoins de ses clients publics (collectivités, syndicats d'électrification,...) et privés (constructeurs, exploitants de bâtiments,...). Dans ce cadre, elle a besoin d'envisager le champ des possibles pour pouvoir envisager les différentes évolutions d'activités de l'entreprise dans un avenir à moyen et long

terme. L'étude de l'approvisionnement énergétique au niveau du quartier lui permet de préparer son positionnement pour les prochaines années dans ce secteur.

Le groupe Bouygues étant un acteur historique dans la construction, notre travail de recherche s'est naturellement porté sur le traitement de l'approvisionnement énergétique des bâtiments construits dans les quartiers. Ce choix fut également soutenu par le fait que les bâtiments résidentiels et tertiaires forment les deux principaux postes de consommation des villes européennes. De plus, le choix des flux énergétiques à étudier a été basé sur les consommations en énergies finales des bâtiments qui reposent essentiellement sur les besoins thermiques (chauffage, eau chaude sanitaire,...), l'éclairage et les usages électroménagers. Ainsi, il a été choisi de se concentrer sur les modes de production et de distribution de la chaleur et de l'électricité.

L'accent est mis sur la production énergétique car celle-ci a été jusqu'alors peu envisagée à des échelles plus petites que l'échelle urbaine. L'enjeu est alors de comprendre comment les systèmes d'approvisionnement énergétique majoritairement gérés de manière centralisée à des échelles urbaines et supérieures peuvent aujourd'hui être remis en cause par l'émergence de la décentralisation technique au niveau infra-urbain, soit l'installation de capacités de production de faibles capacités et d'infrastructures de distribution permettant d'alimenter les consommateurs locaux. De ce fait, les nouvelles échelles de l'approvisionnement imposent d'analyser les systèmes techniques et les systèmes institutionnels à mettre en œuvre afin d'assurer le bon fonctionnement du système énergétique.

La thèse développée dans ce travail de recherche défend l'idée que l'enjeu de la décentralisation de l'approvisionnement énergétique à l'échelle du quartier se situe au niveau de la gestion et de la valorisation des flexibilités énergétiques rendant ce territoire autonome. Ces flexibilités sont les capacités de production et d'effacement de l'énergie présentes sur le périmètre du quartier. Pour que le quartier devienne une échelle pertinente en matière d'approvisionnement énergétique il faut que soient réunies un ensemble de conditions techniques, économiques et institutionnelles dont l'identification et la conjonction n'est pas aujourd'hui évidente.

Développement logique du travail de thèse

Cette thèse repose sur une approche originale qui s'appuie sur un jeu de trois hypothèses qui ont permis de cadrer le travail de recherche.

La première hypothèse suppose que les modèles d'approvisionnement énergétiques intégrés dans les quartiers traduisent une ambition que porteraient les collectivités locales d'évoluer vers des systèmes énergétiques bas carbone plus décentralisés. Cette hypothèse repose sur le constat d'une part de la prise en compte des politiques de promotion de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables mises en œuvre par l'Union Européenne et ses Etats-Membres depuis la fin des années 1990, et d'autre part

sur l'appropriation de ces problématiques énergétiques par les collectivités territoriales au travers des Agendas 21 et l'engagement de ces dernières dans des chartes spécifiques.

Une seconde hypothèse établit que les choix technologiques réalisés dans les quartiers dépendent d'un ensemble de facteurs qui rendent ces systèmes en grande partie spécifique au contexte local (préférences, ressources, compétences, etc) et ne permettent pas encore d'identifier les futurs modèles technologiques. Or, ces facteurs sont difficilement appréhendables de prime abord en raison de l'absence de cadrage dans le mode de réalisation des projets d'écoquartiers. Il nous faut donc comprendre comment le choix des technologies de production et de distribution installées dans les quartiers est effectué tout en interrogeant la viabilité économique de ces projets.

Enfin, la dernière hypothèse établit que la décentralisation technique suppose une évolution des règles du jeu régissant les relations entre les acteurs de l'énergie. Avec le développement de l'autoconsommation et de l'autoproduction, la place et le statut du consommateur dans la chaîne de valeur de l'énergie va profondément se modifier ainsi que ceux de l'opérateur de réseau de distribution de l'énergie confronté à la bidirectionnalité des flux. Ces évolutions et l'instabilité qui peut en résulter devrait permettre l'émergence de nouveaux acteurs sur la chaîne de valeur énergétique.

Afin de valider ces hypothèses, nous avons mis l'accent sur la compréhension des modalités à mettre en œuvre pour que le quartier devienne une échelle pertinente pour l'approvisionnement énergétique. L'analyse de ces conditions repose sur une approche originale mêlant deux disciplines de recherche. Ainsi, la mobilisation des apports des sciences de l'urbanisme et de l'économie doit permettre de traiter le sujet en révélant les enjeux du territoire tout en montrant l'importance des relations à construire entre les solutions techniques et les institutions.

L'émergence du quartier comme échelle de l'approvisionnement énergétique ne va, en effet, pas de soi. L'approche par l'urbanisme va donner des clés de compréhension au choix de ce territoire dans le cadre d'un renouvellement urbain. L'analyse économique enrichie de cette approche va se concentrer sur les enjeux que soulève cette échelle que ce soit pour rendre les modèles économiques viables mais également pour assurer le bon fonctionnement des jeux d'acteurs. L'utilisation de l'économie et de l'urbanisme permet également de révéler et de formaliser les liens forts existants entre les infrastructures et les institutions.

Structure de la thèse

Une première partie de la thèse regroupant les chapitres 1 et 2 a pour ambition à travers un certain nombre d'exemples de montrer la manière dont ont été traitées les problématiques liées à l'énergie dans les projets récents d'aménagement urbains réalisés à la taille du quartier.

Le premier chapitre examine l'apparition de la thématique énergie à l'échelle des quartiers à travers une perspective historique. Cette échelle étant encore très inhabituelle, il a fallu dans un premier temps comprendre les raisons de son émergence et de caractériser plus précisément la notion de « quartier ». Dans un second temps, notre attention a portée sur la prise en compte des différents enjeux énergétiques au sein de cette échelle. Suite à l'élaboration d'une base d'information, nous mettons en évidence le rôle prépondérant de la demande énergétique qui est généralement traitée sous l'angle de la performance énergétique du bâtiment et de la maîtrise de la demande. A l'inverse, nous avons vu que l'offre énergétique reste très marginale à cette échelle que ce soit pour la chaleur et l'électricité ; et ce, même si la chaleur s'accommode plus facilement de cette échelle que l'électricité.

Le second chapitre présente trois exemples d'écoquartiers Queen Elizabeth Olympic Park, Greencity et Ecocité Grenobloise situés respectivement à Londres (Angleterre), à Zurich (Suisse) et à Grenoble (France). Ces trois études de cas nous permettent de mieux saisir les raisons du déséquilibre existant entre le traitement de l'efficacité énergétique et de l'approvisionnement énergétique. Au travers de ces trois exemples, il apparaît que la prise en compte de la thématique énergétique est croissante dans les projets d'aménagement urbains. Ainsi, les acteurs pilotant ces projets s'attachent à répondre aux impératifs européens et nationaux en matière d'efficacité énergétique. L'approvisionnement énergétique est plus perçu dans ces projets comme un argument permettant de montrer le traitement innovant de la thématique énergétique que comme un impératif à prendre en compte obligatoirement. Ainsi, les projets d'aménagement urbains réalisés à l'échelle d'un quartier incorporant une dimension d'approvisionnement énergétique bas carbone sont encore en phase d'apprentissage.

Dans un deuxième temps nous essayons de comprendre les enjeux technico-économiques et institutionnels liés à la décentralisation de l'approvisionnement énergétique à l'échelle du quartier. L'élargissement du périmètre des projets urbains à une échelle dépassant le simple bâtiment sans toutefois être la ville entraîne une difficulté à distinguer l'ensemble des variables interagissant à ce niveau lorsqu'il s'agit de réaliser une étude technico-économique. De plus, la décentralisation de l'approvisionnement énergétique augmente la complexification des jeux d'acteurs en raison d'une modification des conditions d'usages de l'énergie à cette échelle. Pour répondre à cette réflexion, nous avons choisi de mobiliser deux cadres théoriques complémentaires et qui sont tous deux traversés par la prise en compte des dimensions fondamentales de l'économie des industries de réseaux.

Le troisième chapitre s'appuie sur les systèmes sociotechniques via l'analyse de la Perspective Multi-Niveau proposée par F.Geels. L'intérêt de ce cadrage théorique est de montrer la complexité de l'évolution des systèmes techniques qui reposent sur des variables techniques, économiques, réglementaires et sociales en interaction. L'approche sociotechnique permet d'intégrer tous les angles de vue afin d'élaborer une vision claire des schémas d'innovation impliqués dans la décentralisation. Elle est utilisée par la suite pour la construction d'une grille d'analyse des différentes variables à prendre en compte lors du dimensionnement des infrastructures de production et de distribution d'énergie d'un quartier.

Le quatrième chapitre tend à définir les enjeux institutionnels de la décentralisation de l'approvisionnement énergétique à partir d'une double lecture néo-institutionnaliste. Nous expliquons ainsi les enjeux de la décentralisation d'un point de vue historique en ayant recours à une analyse approfondie de la construction de l'approvisionnement électrique en Europe depuis les débuts de l'électricité jusqu'à aujourd'hui et cela, en se focalisant sur le rôle des institutions de régulation. Nous mettons ensuite en évidence la nécessité de faire évoluer les relations entre les opérateurs de réseau de distribution et les consommateurs devenus producteurs à l'échelle du quartier. Cette lecture permet de souligner la possibilité d'avoir recours à de nouveaux acteurs dans la chaîne de valeur de l'énergie (agrégateurs, consommateurs,....).

La dernière partie constituée du dernier chapitre, explore les possibles formes que la décentralisation de l'approvisionnement énergétique au niveau du quartier pourrait prendre grâce à la construction d'idéal-types.

Le cinquième chapitre débute sur l'enjeu qu'impose de relever la décentralisation des systèmes énergétiques à l'échelle du quartier. Il est ainsi montré qu'il sera impératif d'assurer la flexibilité des systèmes énergétiques afin de garantir le bon fonctionnement des réseaux énergétiques. Afin d'envisager quelles formes pourraient prendre l'approvisionnement énergétique bas carbone dans le quartier tout en assurant la flexibilité des systèmes techniques, nous avons choisi de réaliser des idéal-types reflétant différents futurs possibles. Le premier idéal-type repose sur un quartier qui est clairement axé sur l'efficacité énergétique et où l'approvisionnement énergétique bas carbone est garanti essentiellement contractuellement et non localement. Le second idéal-type propose à une décentralisation des capacités de production bas carbone à l'échelle du quartier sans que celle-ci soit complète et fait émerger le besoin d'un nouvel acteur pour pouvoir réussir à gérer les flexibilités. Enfin, le dernier idéal-type envisage de créer un nouveau statut pour le quartier dans lequel les différents usagers du quartier seraient réunis sous une forme juridique unique. Elle serait pensée comme un système autonome où le système technique aura été optimisé pour répondre aux besoins du quartier tout en étant géré par un acteur dédié. Enfin, dans la dernière partie, nous proposons l'émergence d'un gestionnaire de l'énergie pour le quartier. Ce nouvel acteur faisant écho aux besoins exprimés dans les deux derniers idéal-types.

Chapitre 1 : L'Énergie dans les écoquartiers

1. La transition énergétique : un enjeu pour les différentes échelles de gouvernance

Les alertes répétées des scientifiques sur l'augmentation de la fréquence des catastrophes environnementales et sur le changement climatique ont progressivement mobilisé la communauté internationale depuis une trentaine d'années. Des préoccupations nouvelles ont entraîné une profonde remise en question des modes de développement économique et social à différentes échelles de gouvernance internationales et nationales. La préservation du climat, en particulier, a imposé de planifier une rapide transformation de nos modes d'approvisionnement énergétique afin de réduire très fortement nos émissions de carbone. Par ailleurs, les territoires urbains se sont saisis des questions posées sur la durabilité pour redéfinir les fonctions urbaine et intégrer des actions relatives à l'énergie dans leurs politiques de logement, des transports ou de l'aménagement du territoire.

1.1. Transition énergétique et gouvernance internationale du climat

La montée en puissance des préoccupations environnementales et les réflexions sur l'impact des activités économiques sur les ressources ont entraîné, à partir des années 1960, une remise en question des stratégies de croissance et de développement au niveau de la communauté internationale. Cette reconsidération s'est traduite par l'instauration de mesures visant à limiter l'impact des activités anthropiques sur l'environnement.

1.1.1. Premières actions de la gouvernance mondiale

En 1971, le Message de Menton adressée par deux-mille-deux-cents hommes de sciences de vingt-trois pays au Secrétaire Général des Nations Unies U Thant a cherché à alerter les « *trois milliards et demi d'habitants de la planète Terre* » pour les mettre en garde contre « *le danger sans précédent* » que faisait courir la société industrielle à la planète [Le Courrier, 1971]. Cette première initiative a été le point de départ d'un ensemble de réflexions sur les stratégies de croissance à adopter dans un monde aux ressources épuisables.

En 1972, le Club de Rome, dans son rapport supervisé par D. Meadows et intitulé « Halte à la croissance », proposait de repenser la croissance et le développement². Le rapport dénonçait les effets de la croissance économique dans un monde de plus en plus peuplé avec pour conséquence des impacts catastrophiques sur la gestion des ressources naturelles en raison de la loi des rendements décroissants [Meadows et al, 1972]. L'audience du texte a été très importante du fait de la tenue simultanée du premier Sommet de la Terre à Stockholm. Cette conférence internationale qui mettait pour la première fois en avant au niveau international les préoccupations environnementales est à l'origine du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) qui vise à aider les Etats dans la mise en œuvre des politiques environnementales³.

En 1973, le premier choc pétrolier, faisant suite à la guerre du Kippour entre Israël et les pays arabes environnants a frappé de plein fouet la communauté internationale. Les pays du Golfe ont décidé de réduire leur production de pétrole par mesure de rétorsion contre les pays alliés d'Israël. Le prix du baril a alors augmenté brusquement passant de 4 à 16 dollars en quelques jours. Ce choc a entraîné un brusque arrêt de la croissance économique et une montée du chômage. Il a également révélé la dépendance des économies occidentales par rapport au pétrole. Cette première alerte sur la dépendance énergétique des pays occidentaux s'est encore amplifiée après le second choc pétrolier qui intervient lors de la chute du Shah d'Iran en 1979 alors que le pays est l'un des principaux producteurs de pétrole. Le prix du baril augmente alors pour la seconde fois de manière brutale passant de 20 à 40 dollars.

Ces événements ont montré la nécessité d'infléchir le mode de développement assis sur la croissance économique de la société industrielle. En écho à cette prise de conscience, le rapport dirigé par Gro Harlem Brundtland intitulé « Notre avenir à tous » est présenté lors de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement initiée par l'Organisation des Nations Unies en 1987. Le rapport établit un nouveau concept, le développement durable, qui se définit comme « *le développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre les capacités des générations futures de répondre aux leurs* ». Lors de la Déclaration de Rio sur l'Environnement et le Développement en 1992, ce concept qui vise un développement efficace, socialement équitable et écologiquement soutenable est officiellement adopté.

² Le Club de Rome est un groupe de réflexion réunissant des scientifiques, des diplomates et des industriels. A la suite de la prise de conscience environnementale des années 1960, ils vont réfléchir sur les impacts des activités humaines sur l'environnement. Le rapport intitulé « Halte à la croissance » de 1972 indique le danger que constitue une croissance économique et démographique exponentielle au regard de l'épuisement des ressources.

³ Le PNUE a pour mission de montrer la voie de la protection environnementale que ce soit par la coopération internationale ou en informant les Etats et leur population sur les moyens dont ils disposent et les actions à engager grâce à de nombreux rapports.

En 1988, le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat placé sous l'égide du PNUE et de l'Organisation Météorologique Mondiale est créé. Il a pour objectif de réaliser un suivi scientifique des processus de réchauffement climatique. Sa création ainsi que la deuxième conférence sur le climat de La Haye en 1990 ont participé à la reconnaissance internationale du risque que représente le changement climatique et de ses potentielles conséquences sur l'environnement, l'économie et la société. La Convention de la Haye servira de base scientifique à la Convention Cadre sur le Climat établi lors du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro de 1992 signée par 162 états qui énonce dans son article 2 l'objectif de « *stabiliser, ..., les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique.* ». Pour répondre à cette exigence, l'article précise qu'« *Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable.* ». Les Etats présents au Sommet de Rio reconnaissent donc le changement climatique et adoptent le principe de précaution⁴ (art 3) « *pour prévoir, prévenir ou atténuer* » le changement climatique. Dans le même temps, les douze états de la Communauté Economique Européenne s'engagent à stabiliser leurs émissions de CO₂ au niveau de 1990 d'ici à l'an 2000.

⁴ Principe selon lequel l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque dans les domaines de l'environnement, de la santé ou de l'alimentation. (site <http://www.vie-publique.fr/th/glossaire/principe-precaution.html>)

Lors de la troisième Conférence des Nations Unies sur les Changements Climatiques en décembre 1997 le « Protocole de Kyoto » est adopté. Il établit des objectifs de réduction des Gaz à Effet de Serre (GES)⁵. Le texte précise que « *Le présent protocole entre en vigueur le quatre-vingt-dixième jour qui suit la date (...) d'adhésion par 55 parties à la Convention au minimum, par lesquelles, les Parties visées à l'annexe I dont les émissions totales de dioxyde de carbone représentaient en 1990 au moins 55% du volume total des émissions de dioxyde de carbone de l'ensemble des Parties visées à cette annexe.*»⁶. Trente-huit pays industrialisés dont l'Union Européenne (UE) regroupés sur l'annexe B du Protocole s'engagent à réduire leurs émissions de GES de 5,2% en moyenne à l'horizon de 2012 par rapport au niveau de 1990. Pour cela plusieurs mécanismes sont mis en place tels que les quotas d'émission associés à un marché international des droits d'émission ainsi que des mécanismes de projet comme le Mécanisme pour un Développement Propre ou l'Application Conjointe pour les pays industrialisés. Malgré le désengagement de certains Etats dont le Canada, le Japon et les Etats-Unis lors de sa mise en œuvre à partir de 2008, le Protocole de Kyoto n'en marqua pas moins un tournant majeur dans la prise en compte des problématiques climatiques au niveau mondial.

1.1.2. L'Union Européenne, la lutte contre le changement climatique et la transition énergétique

En écho aux actions engagées par la communauté internationale, l'Union Européenne s'engage progressivement en faveur de la protection de l'environnement et du développement durable. Ainsi, le Traité de Maastricht en 1992 qui marque principalement le passage de la Communauté Economique Européenne à l'Union Européenne admet la prise en considération de l'environnement dans la politique de l'Union⁷. En 1997, le Traité d'Amsterdam reconnaît le développement durable comme une base de sa stratégie de développement⁸. En 2013, le Parlement Européen et le Conseil Européen adoptent le septième Programme d'Action Général de l'Union pour l'environnement à l'horizon 2020. Ce

⁵ Les Gaz à Effet de Serre ciblés par le Protocole de Kyoto sont le CO₂ (Dioxyde de carbone), le CH₄ (Méthane), le N₂O (Protoxyde d'Azote), HFC (Hydro fluorcarbures), PFC (Hydrocarbures per fluorés), SF₆ (Hexafluorure de Soufre).

⁶ Si le premier seuil ne fut pas difficile à atteindre, il n'en fut pas de même pour le second. Il faudra ainsi attendre l'adhésion en 2004 de la Fédération de Russie qui représentait environ 17% du total des émissions au protocole pour permettre l'entrée en vigueur du Protocole. Les Parties ayant ratifiées le protocole et présentes dans l'Annexe I ne représentaient globalement que 44,2% du volume des émissions des pays industrialisés en 1990.

⁷ Dans le septième considérant du traité de Maastricht, il est inscrit : « *Déterminés à promouvoir le progrès économique et social de leurs peuples, dans le cadre de l'achèvement du marché intérieur et du renforcement de la cohésion et de la protection de l'environnement, et à mettre en œuvre des politiques assurant des progrès parallèles dans l'intégration économique et dans les autres domaines,* ».

⁸ Le septième considérant énonce que les Etats Membres sont : « *Déterminés à promouvoir le progrès économique et social de leurs peuples, compte tenu du principe du développement durable et dans le cadre de l'achèvement du marché intérieur, et du renforcement de la cohésion et de la protection de l'environnement, et à mettre en œuvre des politiques assurant des progrès parallèles dans l'intégration économique et dans les autres domaines,* ».

programme a pour objectif d'intensifier les actions de protection de l'environnement en se concentrant sur neuf axes prioritaires dont celui de « *faire de l'Union une économie efficace dans l'utilisation de ses ressources, verte, compétitive et à faibles émissions carbone* » et « *renforcer le caractère durable des villes de l'Union* » [CE, 2014a].

La prise en compte du changement climatique par l'Union Européenne s'est traduite par l'évolution très significative de sa politique énergétique. L'énergie tient une place centrale dans l'histoire de l'UE puisque l'origine de sa création repose sur la constitution de la Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier en 1950. A cette période, l'enjeu était principalement politique. A partir de 1987, l'Acte Unique Européen a finalisé la mise en place du marché intérieur avec la suppression des barrières permettant ainsi la libre circulation des marchandises, des capitaux, des services et des personnes. Le secteur de l'énergie a été intégré au processus de libéralisation avec la mise en concurrence des opérateurs, la séparation des acteurs du transport et de la distribution pour le gaz et l'électricité et la mise en place d'un marché. La problématique énergie-climat émerge progressivement par la suite, après le premier rapport du GIEC et la Conférence de Rio, respectivement en 1990 et 1992.

En 2007, le Traité de Lisbonne reconnaît l'importance de la création d'une politique énergétique en réservant un chapitre spécifique à ce sujet dans les traités fondateurs de l'Union⁹. Les compétences de l'UE sont alors clairement définies. Elle est habilitée à prendre des mesures pour assurer le bon fonctionnement du marché de l'énergie, la sécurité de l'approvisionnement énergétique de l'Union et promouvoir l'efficacité énergétique ainsi que l'interconnexion des réseaux énergétiques. L'énergie devient une compétence partagée entre l'UE et les Etats Membres et est soumise au principe de subsidiarité¹⁰.

Enfin, le Paquet Climat Energie (PCE) établi en 2008 annonce trois engagements chiffrés pour mettre en place une politique énergétique plus soutenable à l'horizon 2020 : diminuer de 20% les émissions de GES par rapport au niveau de 1990, atteindre 20% d'énergies renouvelables dans le mix énergétique européen et améliorer l'efficacité énergétique de 20%. Afin de préparer la Conférence des Parties qui aura lieu en décembre 2015 à Paris, l'UE annonce de nouveaux engagements chiffrés pour 2030. Le second PCE reprend donc les objectifs du premier tout en les renforçant avec un nouvel objectif de réduction des émissions de GES d'au moins 40% par rapport au niveau de 1990. Pour atteindre cet objectif, les secteurs couverts par le système d'échange de quotas d'émissions de l'Union Européenne¹¹

⁹ Article 194 du Traité de Fonctionnement de l'Union Européenne

¹⁰ Le principe de subsidiarité détermine le niveau d'intervention le plus pertinent pour les domaines de compétences partagées entre l'Union Européenne et les pays de l'UE.

¹¹ *L'Emission Trading Scheme* est un mécanisme de droits d'émissions de carbone mise en place dans l'Union Européenne suite à la ratification de cette dernière au Protocole de Kyoto. Cette bourse lancée en 2005 fonctionne sur le principe du plafonnement et des échanges. Un plafond est défini pour limiter le niveau des émissions par les installations éligibles au système. Au fur et à mesure du temps, ce plafond diminue afin de

(ETS –Emission Trading Scheme-) devront réduire leurs émissions de 43% par rapport à 2005. Quant aux secteurs non couverts par l'ETS, ils devront réduire leurs émissions de 30% par rapport à 2005. En ce qui concerne les deux autres engagements, les Etats membres doivent accroître la part des énergies renouvelables de façon à atteindre 27% de la consommation brute de l'UE et améliorer l'efficacité énergétique de 27% d'ici à 2030¹².

Le PCE peut ainsi être considéré comme le premier pas politique de l'Union Européenne vers la transition énergétique¹³ mais le passage d'un système énergétique carboné utilisant des ressources énergétiques non renouvelables à un système énergétique bas carbone utilisant des ressources énergétiques renouvelables ne pourra être réalisé sans une participation active des Etats Membres.

1.1.3. Le rôle des Etats Membres de l'Union Européenne dans la transition énergétique

Bien qu'une Europe de l'Energie soit en construction, les Etats Membres (EM) de l'Union Européenne sont également moteurs dans le processus de la transition énergétique puisqu'ils gardent un certain nombre de compétences leur permettant notamment de choisir leur mix énergétique.

Les EM disposent du droit à choisir leurs sources d'approvisionnement énergétique et par conséquent leur mix énergétique ainsi que les conditions de leur exploitation. Ce droit a d'ailleurs été réaffirmé lors du Traité de Lisbonne de 2007. Par conséquent, ils jouissent encore d'une grande part de liberté dans la définition de leur politique énergétique. Ce choix résulte notamment de la grande diversité des mix énergétiques présents dans l'Union mais également des divergences de points de vue des Etats Membres sur la prise en compte du nucléaire¹⁴.

faire baisser le niveau des émissions. Dans le cadre de ce plafond, les entreprises reçoivent ou achètent des quotas d'émissions qu'elles peuvent échanger avec d'autres en fonction des besoins. Elles peuvent également acheter de manière limitée des crédits internationaux dégagés par la réalisation de projets de réduction des émissions dans le monde.

¹² En 2020, les objectifs en matière d'efficacité énergétique pourront être revalorisés à 30% en fonction des résultats fournis.

¹³ Ce terme apparu en Allemagne dans les années 1980 et repris en particulier lors de l'élaboration des Grenelle de l'environnement en France en 2007 et 2008 [Rojey, 2008] sera employé dans la suite du travail de thèse comme terme générique pour parler du passage d'un mix énergétique carboné à un mix énergétique bas carbone quel que soit le niveau de gouvernance traité.

¹⁴ Article 194 du Traité de Fonctionnement de l'Union Européenne

Dans le même temps, ils peuvent élaborer leur propre réglementation en matière énergétique en respectant le cadre imposée par l'UE voire en le dépassant. Celle-ci peut aller au-delà des dispositions inscrites dans les textes internationaux. La France a ainsi promulgué la loi de Transition Énergétique pour une Croissance Verte (Loi TECV) en 2015¹⁵ afin de contribuer à la lutte contre le dérèglement climatique, d'améliorer son indépendance énergétique et de préserver l'environnement. Parmi les objectifs figure l'accroissement de la part des énergies renouvelables à 32% de la consommation finale brute d'énergie en 2030 ou encore la réduction de la consommation d'énergie finale de 50% en 2050 par rapport à la référence de 2012.

D'autres échelons de gouvernance - infranationaux - se saisissent également des enjeux de développement durable et de transition énergétique. De nombreuses collectivités locales ont aussi engagé depuis quelques années des politiques dans le domaine de l'énergie et du climat : elles utilisent les leviers d'actions dont elles disposent dans ce domaine.

1.2. Les villes s'emparent progressivement du sujet de la transition énergétique

Bien que n'occupant que 2% de la surface du globe, les villes représentent 80% des émissions de gaz à effet de serre et 75% de la consommation énergétique mondiale tout en concentrant plus de la moitié de la population mondiale depuis 2007 [Véron, 2007 ; ADEME, 2013a]. C'est pourquoi, en écho à la formule « *Penser global, agir local* »¹⁶ lancée lors du premier sommet de la Terre en 1972, des initiatives locales vont apparaître progressivement dès cette date afin d'interroger le futur des villes. Dans ce cadre, elles vont orienter au fur et à mesure leur réflexion sur la durabilité autour des thématiques énergétiques.

1.2.1. Les engagements des villes européennes

Lors du second Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, les 2 500 recommandations de l'Agenda 21 visent à inciter les collectivités territoriales du monde entier à prendre des mesures en matière de développement durable sur des thématiques telles que l'environnement (gestion des ressources en eau, pollution, désertification,...), l'action sociale (lutte contre la pauvreté, la modification des modes de consommation,...) ou l'économie (gestion des ressources, mécanismes financiers à mettre en place...).

¹⁵ Loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte

¹⁶ Formule employée par René Dubos lors du 1^{er} sommet sur l'environnement en 1972 et emprunté à Jacques Ellul. Dès le Premier Sommet de la Terre, qui s'est déroulé à Stockholm en 1972, le rapport préliminaire dirigé par Barbara Ward et René Dubos intitulé « Nous n'avons qu'une Terre » prouve la nécessité que tous les échelons de la société puisse agir avec la célèbre formule « Penser Global, agir local ».

Dans le prolongement de cette initiative, 80 villes européennes signent le 27 mai 1994 la « *Charte des villes européennes pour un développement durable* », plus communément connue sous le nom de « *Charte d'Aalborg* » (du nom de la ville d'Aalborg au Danemark). Les villes signataires s'engagent à mettre en œuvre des projets de développement durable dans leurs territoires et inscrivent leurs actions dans la continuité explicite de l'Agenda 21. Regroupées sous le terme d'Actions Locales 21, elles s'inscrivent dans une approche holistique du développement territorial : gouvernance et démocratie participative, gestion locales vers la durabilité, protection de biens naturels communs et garantie d'un accès équitables à ceux-ci, économie locale vivante et durable, équité sociale et justice,....

Les villes s'interrogent alors sur la mise en pratique de ces engagements politiques et remettent notamment en question les principes de l'architecture moderne inscrits dans la Charte d'Athènes de 1933¹⁷ [Salomon, 2009]. La vision rationaliste de l'urbanisme est contestée avec l'apparition du concept de la ville durable qui intègre des réflexions autour de la compacité et de la fonctionnalité du territoire urbain, de la qualité du cadre de vie et de l'équité. Il prend aussi en compte les dynamiques et les inerties dans la lutte contre les externalités négatives causées par le développement urbain [Laigle, 2008]. Pour répondre aux attentes de la ville durable, de nouveaux textes tentent d'en dessiner les contours. Une nouvelle Charte d'Athènes est adoptée par le Conseil Européen d'Urbanisme en 1998 actualisant la charte de 1933 et montrant ainsi l'émergence d'une nouvelle culture urbaine. Les dimensions normatives de cette nouvelle charte affichent clairement la relecture de l'urbanisme sous le prisme du développement durable. La prise en compte de l'environnement et plus particulièrement des problématiques énergétiques est particulièrement visible dans cette charte [CEU, 1998 ; Emelianoff, 2004 ; Salomon, 2009] [Tableau 1 : Comparaison des Chartes d'Athènes de 1933 et 1998].

¹⁷ La charte d'Athènes de 1933 a été, réalisée dans le cadre du Congrès International des Architectes Modernes. Elle avait pour ambition de définir un urbanisme moderne, fonctionnaliste et progressiste. Les auteurs de la charte considéraient en effet que les villes ne remplissaient plus leur rôle premier qui est de satisfaire les besoins biologiques et physiologiques de leur population. La charte définissait un modèle international de ville caractérisée par une séparation spatiale des fonctions principales grâce au principe du zonage autour de quatre fonctions principales (habiter, travailler, circuler et se recréer) devant leur permettre de reprendre leur destinée en main [Salomon, 2009].

Tableau 1 : Comparaison des Chartes d'Athènes de 1933 et 1998 basée sur les travaux de Salomon, 2009

	Charte d'Athènes 1933	Charte d'Athènes 1998
Objectifs de la charte	Moderniser la ville en faisant table rase du passé	Partir de l'existant dans le respect du développement durable
Fonction de la ville	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Habiter ➤ Travailler ➤ Se recréer ➤ Circuler 	
Approche spatiale	Zonage (dédensification de l'espace)	Mixité fonctionnelle (densification)
Composition urbaine	Style international	Respect de la diversité locale et respect du patrimoine urbain
Circulation	Séparation des circulations selon leur nature pour la fluidifier	Favoriser les déplacements doux
Environnement	Vue par le prisme de l'hygiène et de la santé	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Préserver les ressources non renouvelables ➤ Favoriser les énergies et les technologies les plus propres ➤ Diminuer les déchets et recycler ➤ Flexibiliser le processus décisionnel Considérer le sol comme une ressource à part entière
Acteurs	Architectes tout puissant	Participation des citoyens et évolution du métier d'urbanisme

L'engagement des villes européennes en matière de développement durable est conforté par la création d'une seconde Charte d'Aalborg signée en 2004 par 110 représentants de collectivités locales qui présente pour la première fois des stratégies et des principes communs en faveur du développement durable pour l'ensemble des collectivités signataires¹⁸. Par la suite, la Charte de Leipzig sur la ville européenne durable signée en 2007 par les ministres européens en charge du développement urbain établira deux orientations prioritaires : la première relative au développement urbain intégré, c'est-à-dire à « *la prise en compte simultanée et équitable des impératifs et des intérêts essentiels au développement des villes* » et la seconde centrée sur les quartiers défavorisés. Dans le cadre du développement urbain intégré, les rédacteurs de la charte considèrent la modernisation des réseaux d'infrastructure et l'augmentation des rendements énergétiques ainsi que de la performance énergétique des bâtiments anciens comme des moyens d'actions importants pour renforcer la compétitivité des villes européennes.

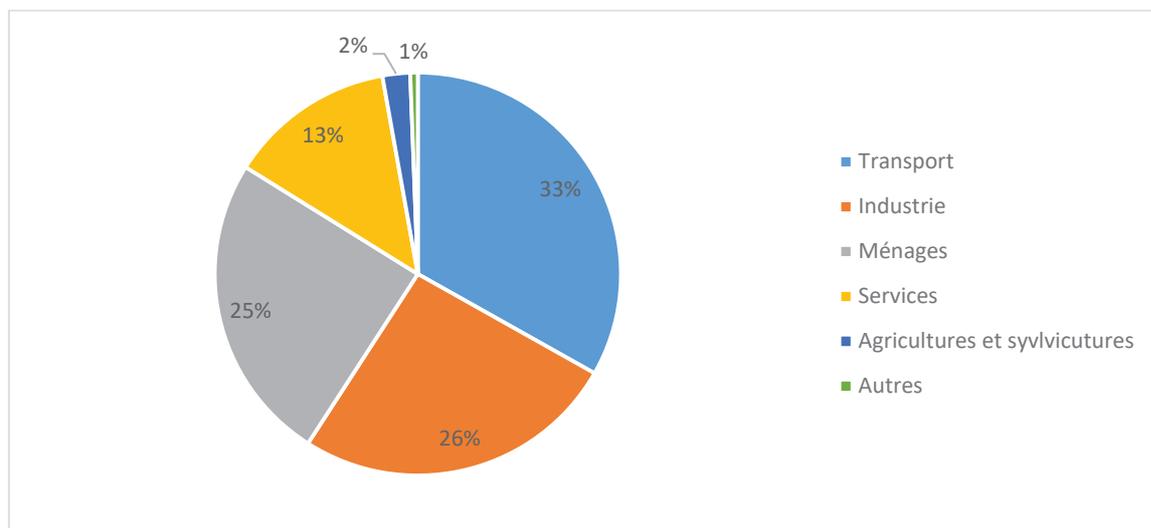
¹⁸ Il existe 10 thèmes à prendre en compte : la gouvernance, la gestion locale vers la durabilité, les biens naturels communs, la consommation responsable et les choix de style de vie, la planification et conception, la mobilité et le trafic limité, les actions locales pour la santé, l'économie locale vivante et durable, l'équité sociale et la justice et enfin agir du local au global.

1.2.2. Les ambitions des villes en matière de durabilité énergétique

Suite aux engagements pris dans ces chartes, certaines villes européennes se sont engagées dans un processus de transition énergétique qui vise à les faire évoluer vers une « ville bas carbone ». Ce concept, apparu lors de la création du Post Carbone Institute aux Etats-Unis en 2003, puis repris par la Commission Européenne à partir de 2007, caractérise une zone urbaine ayant réussi à fortement limiter sa dépendance aux énergies fossiles, grâce notamment aux énergies renouvelables, ce qui lui permet d'être très faiblement émettrice de GES. Selon le rapport *Repenser les villes dans la société post-carbone* publié par l'ADEME, ce type de ville doit atteindre trois objectifs : diminuer ses émissions de GES dans un rapport de trois à quatre par rapport au niveau de 1990 ; être largement autonome par rapport au pétrole pour ce qui concerne la mobilité et aux énergies fossiles de manière plus générale ; enfin, pouvoir s'adapter au réchauffement climatique dans l'hypothèse d'une augmentation des températures de 2 à 4 degrés [ADEME, 2013a].

Rappelons qu'en 2014, la consommation d'énergie finale se répartit majoritairement entre les transports (33,2%), les ménages (24,8%) et l'industrie (25,9%). Les bâtiments résidentiels (ménages) et tertiaires (services) représentent ensemble près de 38,1% de la consommation et constituent donc avec les transports individuels et les transports en commun l'essentiel de la consommation énergétique en ville¹⁹ [Figure 1 : Répartition de la consommation d'énergie finale en Europe pour 2014].

Figure 1 : Répartition de la consommation d'énergie finale en Europe pour 2014 –Eurostat, 2014, en % de tep -



19

Eurostat : [http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/File:Final_energy_consumption_EU28_2013_\(%C2%B9\)_\(%25_of_total,_based_on_tonnes_of_oil_equivalent\)_YB15-fr.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/File:Final_energy_consumption_EU28_2013_(%C2%B9)_(%25_of_total,_based_on_tonnes_of_oil_equivalent)_YB15-fr.png), consulté en janvier 2016

Pour réduire leur impact énergétique, les villes doivent engager des actions en faveur de l'efficacité énergétique dans le bâtiment, l'éclairage public et le transport. Depuis la Directive relative à l'Efficacité Energétiques dans les utilisations finales de 2006, la Commission Européenne demande aux collectivités de devenir des acteurs exemplaires dans ce domaine de l'efficacité énergétique. Pour cela, elles ont la possibilité de réaliser des audits énergétiques, d'installer des équipements plus performants, de rénover les parcs existants de bâtiments ou de véhicules, etc. ..., en s'appuyant éventuellement sur des dispositifs innovants tels que les Contrats de Performance Energétique (CPE) ou en recourant au tiers investissement. Ces politiques de maîtrise de l'énergie se traduisent par l'élaboration de plans d'actions et l'instauration d'objectifs clairs de réduction des consommations d'énergie [ADEME, 2008a].

Pour certaines villes ces politiques énergétiques locales ne doivent pas se limiter à l'amélioration de la performance énergétique mais intégrer également un volet de production d'énergie locale et renouvelable dans une perspective de transition énergétique [Magnin, 2013 ; ADEME, 20013]. Certaines collectivités se saisissent ainsi des enjeux de la transition énergétique pour amorcer une réflexion sur la production locale bas carbone en mobilisant des solutions innovantes pour tenter de concilier production locale d'énergie et maîtrise des coûts d'approvisionnement [Parés-Ramos et al, 2010 ; CEDIS, 2012].

1.2.3. Les leviers d'actions des villes européennes dans la transition énergétique

Certaines villes souhaitent prendre une part active à la transition énergétique, notamment en matière d'approvisionnement énergétique, et s'appuient pour cela sur un ensemble de leviers d'action dans différents domaines (institutionnel, technique et économique).

Certaines se sont ainsi engagées dans la réalisation de schémas directeurs tels que les Plan Energie Climat Territorial. C'est un outil qui vise à quantifier les sources d'émissions de GES à l'échelle territoriale dans un premier temps, puis à mettre en place un plan d'action pour les réduire à l'horizon 2050. L'instauration d'un calendrier et d'objectifs quantitatifs et qualitatifs à atteindre permet d'envisager une trajectoire de réduction des émissions de GES en 2050. De nombreuses villes européennes, comme Stockholm en Suède, Graz en Autriche ou encore la ville de Londres en Angleterre ont établi des plans ambitieux à cet égard. Ces derniers favorisent l'émergence de nouvelles formes d'organisations permettant d'apporter de la cohérence à la politique locale en matière de transition énergétique [Mor, 2011; IRENA, 2016].

Au niveau technique, les villes bénéficient du développement rapide et massif des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) pour améliorer la gestion de leur territoire. L'intégration de ces technologies associée à l'intelligence collective doit rendre les villes plus performantes tout en améliorant la qualité de la vie au sein des zones urbaines [Giffinger et al, 2007 ; Toppeta, 2010]. L'apport des NTIC ne se limite pas à faciliter la gestion des flux économiques et sociaux mais elles peuvent également être mises au service de l'environnement. Ainsi, les NTIC permettent l'optimisation des ressources naturelles grâce à l'utilisation de systèmes de relevés d'information et de gestion des données [Chourabi et al, 2012]. Actuellement dans le domaine énergétique, elles permettent essentiellement de réaliser le suivi de la consommation des infrastructures (bâtiments, mobiliers urbains, éclairage public) mais il est envisageable que dans les prochaines années, les collectivités puissent par ce biais gérer les flux énergétiques circulant dans leur territoire de façon plus dynamique [Toppeta, 2010].

Au niveau économique, les villes investissent dans la transition énergétique entre autres afin de créer de la valeur ajoutée et dynamiser leur territoire. Ces investissements permettent non seulement de développer les services publics énergétiques locaux mais également de développer les emplois locaux (bureaux d'études, fabricants, développeurs,...). La création d'un opérateur local d'énergie public peut également produire des effets budgétaires positifs pour la collectivité. Les relations entre la collectivité et l'entreprise pouvant alors participer à ce que les bénéfices obtenus par l'entreprise locale restent dans le territoire et soient mutualisés afin de participer au financement d'autres services publics [Energy Cities, 2017 ; IRENA, 2016].

Les villes qui qui s'engagent dans ces directions ambitionnent de contribuer à dessiner les futures villes durables et bas-carbone. Compte tenu de l'importance des transformations que la transition énergétique nécessite, ces expérimentations sont souvent menées à une échelle réduite. Il s'agit du quartier qui est considéré comme un échelon pertinent pour mettre en pratique le développement urbain durable et la transition énergétique du fait de la diversité des fonctions et des usages urbains (bâtiments, éclairage, mobilité,...) [Emelianoff, 2007a&b; Yepèz-Salmon, 2011 ; Dind JP et al, 2007].

2. Le quartier : nouvelle échelle stratégique pour la ville du futur ?

Pour envisager la ville de demain, une nouvelle tendance apparaît dans la réalisation d'ouvrages urbains. L'essor des écoquartiers comme espaces permettant d'expérimenter, d'innover et de vivre en ville s'est progressivement imposé dans les villes du monde et plus particulièrement dans les villes européennes. Afin de comprendre les raisons de leur développement, nous étudions la chronologie de l'émergence de ces territoires ainsi que les critères qui les caractérisent.

2.1. Histoire d'un échelon territorial méconnu

Si le terme « *quartier* » apparaît dès le début du 20^{ième} siècle dans le langage des spécialistes de l'urbanisme, il n'est véritablement employé qu'à partir des années 1930 consécutivement aux études entreprises sur le développement de la ville jardin où des îlots et des quartiers ont été construits comme projets d'expérimentation d'un urbanisme ouvert à la nature. Néanmoins, les études sur cette échelle restent extrêmement marginales jusqu'à la seconde partie du 20^{ième} siècle, les études urbaines et supra-urbaines restant la norme jusque-là [Humain-Lamoure, 2006].

Durant cette époque, le quartier est vu essentiellement comme une fraction de l'espace urbain fondé sur la division technique et sociale de l'espace (quartiers d'affaires, quartiers résidentiels, quartiers ethniques, ...). Une seconde vision moins fonctionnaliste envisage quant à elle ce territoire comme un lieu d'épanouissement rassurant face à l'immensité d'une ville susceptible d'apparaître comme déstructurée et annihilant le lien social. Ces visions sont introduites par les sociologues qui feront du quartier un champ d'étude récurrent pour l'analyse de la distribution et du mouvement des populations dans l'espace, des pratiques et des attitudes des individus vivant en milieu urbain ou encore des actions publiques ou privées qui prennent part à l'organisation, au fonctionnement et aux transformations de la ville [Grafmeyer, 2006].

Dans la seconde moitié du 20^{ième} siècle, le quartier prend une place de plus en plus importante dans la manière de réinventer le territoire urbain. Les collectivités se saisissent ainsi de cette échelle pour réaliser leur projet de planification urbaine. Parallèlement à ces actions, les écoquartiers apparaissent. Portés à l'origine par une volonté d'exprimer un idéal en opposition avec le modèle économique et social dominant, ils deviennent progressivement des lieux d'expérimentations techniques pour finalement adopter un rôle d'anticipation de l'avenir des villes sur le plan social, économique et environnemental. La présentation qui suit l'évolution de ces territoires est réalisée en référence aux grandes tendances historiques définies par Taoufik Souami dans son ouvrage *Ecoquartiers – Secrets de Fabrications-* [Souami, 2009].

2.1.1. Le quartier comme objet de recherche

A partir des années 1970, le quartier devient un objet de recherche à part entière mais son rapport aux autres échelles spatiales est encore débattu au sein des sciences sociales. L'École de Chicago²⁰ analyse « *l'inscription spatiale de processus sociaux* » à l'échelle urbaine voire à l'échelle du quartier. Le quartier est alors étudié non pas pour lui-même mais pour son rapport à la ville, l'échelle urbaine étant selon cette École, l'échelle d'analyse à favoriser. S'il est encore essentiellement regardé d'un point de vue fonctionnel le quartier devient un objet d'étude pour essayer de comprendre quelles sont les interactions entre la société et l'espace avec l'apparition d'une nouvelle façon d'appréhender le vivre ensemble. Cette volonté de repenser les modes de vie et la relation de l'individu à l'environnement va se traduire par deux mouvements à la fois distincts dans leur fonctionnement et complémentaires dans l'idéal à atteindre.

Le premier mouvement se caractérise par la création de projets militant dans des zones rurales ou peu habitées. Un des projets les plus emblématiques de cette tendance, « The Farm » se situe aux États-Unis : « ..., le militant politique S. Gaskin, fondateur de l'organisme « *Plenty international* », crée en 1971 l'éco-village « *The Farm* » près de la ville de Summertown dans le Tennessee. En lien avec les associations écologistes de San Francisco, il réunit rapidement près de 300 habitants autour d'une charte de vie collective qui exige pour l'essentiel des vœux de pauvreté, la collectivisation des biens personnels et le renoncement aux techniques industrielles nuisibles à la biosphère. » [Renauld, 2012, p 16]. Ce nouveau mode de vie à la fois solidaire, communautaire et respectueux de l'environnement va se diffuser dans le monde sous l'appellation d'éco-village. En tant que projet militant l'éco-village²¹ se définit comme « *L'écovillage idéal, qui n'existe pas encore, est un établissement humain durable, en harmonie avec tous les aspects de la vie, y compris les dimensions culturelles, écologiques et spirituelles* »²²; il sera par la suite institutionnalisé dans les années 1990 pour répondre à l'Agenda 21 présenté au Sommet de la Terre de Rio en 1992. Aujourd'hui, les plus célèbres éco-villages sont les projets Queensland en Australie, le projet Lothian au Royaume-Uni ou encore le projet à Yhteiskyla en Finlande²³.

²⁰ L'école de Chicago représente le courant de pensées issu du laboratoire de sociologie de Chicago. Fondé en 1892 par Albion Small, il est le premier laboratoire de sociologie au monde. Cette école va s'orienter sur l'étude des comportements urbains (la ville, la manière d'habiter des minorités raciales, les marginaux,...) en ayant comme principal terrain d'analyse la ville de Chicago qui connaît un développement sans précédent due à une forte arrivée de migrants entre la fin du XIX siècle et la première moitié du XX siècle.

²¹ Le terme d'éco-village apparaît pour la première fois lors du Séminaire de Gaia Trust à Thy, au Danemark en 1991 préparé par Diane et Robert Gilman lors du Context Institute à Seattle.

²² Site de Gaïa consulté en novembre 2014. <http://www.gaia.org/gaia/>

²³ Site de Gaïa consulté en novembre 2014. <http://www.gaia.org/gaia/>

Le second mouvement répond également à une vision idéale de l'art de vivre en ville. Toutefois, contrairement aux éco-villages qui se situent en marge du modèle économique et social dominant, ceux-ci se distinguent par leur partenariat avec la collectivité publique et sont généralement présents dans un contexte urbain. En 1994, à Culemborg au Pays-Bas, les membres de l'association EVA lancent avec la ville un projet de quartier où ils pourront vivre selon les principes écologiques qu'ils revendiquent. Décrit comme un quartier « *socio-écologique* » [ADEME, 2008a], le quartier EVA-Lanxmeer construit sur une ancienne friche de 24 hectares promeut une approche intégrée de l'urbanisme durable. Le projet intègre une réflexion sur les technologies, l'environnement et les comportements afin de parvenir aux objectifs de développement durable. Au niveau énergétique, l'ambition est d'atteindre un équilibre entre la consommation et la production locale d'énergie dans une perspective d'autonomie en installant des capacités de production issues des énergies renouvelables au sein de chaque bâtiment [ADEME, 2008a].

Dans les années 1980, le quartier apparaît progressivement comme un nouvel espace de territorialité. En ce sens, il est considéré comme une échelle idéale pour repenser les politiques socio-économiques urbaines en opposition avec le principe de zonage de l'après-guerre qui aboutit au développement massif de grands ensembles pour répondre aux besoins de logements sociaux. Synonyme de modernité et de progrès social à leur début, leur manque de fonctionnalité et de mixité a entraîné leur dépréciation et leur inefficacité en matière de politique sociale [Querrien, 2005 ; Desage, 2015].

2.1.2. Les proto-écoquartiers

A partir des années 1990, la prise de conscience du risque de changement climatique impacte également les politiques urbaines. Le quartier devient progressivement une zone d'expérimentation basée sur les engagements notifiés dans les Agenda 21 ou dans les chartes signées par les maires européens. Localisés principalement dans les pays du Nord de l'Europe, les premiers écoquartiers se caractérisent par leur aspect singulier, aussi bien du fait du contexte de leur réalisation que dans les choix techniques réalisés. A cette période, un élément déclencheur important de ces projets urbains est la participation à des grands événements urbanistiques suscitant le rayonnement mondial pour ces villes. Ils sont alors conçus comme des démonstrateurs, pour lesquels la question des coûts et des modes de financement passent au second plan [Souami, 2009a&b].

Le quartier BO01 à Malmö en Suède a été construit lors de la participation de la Suède au Green Building Challenge à Maastricht en 2000²⁴. L'exposition intitulée « La Ville de demain » qui s'est tenue en 2001, visait à proposer un territoire de grande qualité environnementale avec comme objectif central une consommation d'énergie ne dépassant pas 105 kWh/m² maximum et un approvisionnement énergétique 100% renouvelable. Pour atteindre cet objectif, une grande diversité de technologies allant des capteurs solaires aux pompes à chaleur en passant par l'utilisation de l'énergie éolienne a été utilisée pour l'approvisionnement énergétique du quartier. Les bâtiments ont quant à eux bénéficié d'une conception bioclimatique et de compteurs intelligents permettant aux consommateurs de surveiller et de maîtriser leur consommation [Emelianoff et al, 2010].

Toujours en Suède, le quartier d'Hämmarby à Stockholm a été proposé dans le cadre de la candidature de la ville aux Jeux Olympiques d'Été de 2004. La candidature n'a pas été retenue mais la ville a néanmoins décidé de construire ce projet pilote voué à être exemplaire en matière de développement durable. Des actions ont été menées dans de nombreux domaines tels que la mobilité urbaine, la dépollution des sols, le respect de la biodiversité ou encore le respect des matières premières dans la construction. Au niveau énergétique, le projet initial visait à réaliser des bâtiments performants consommant au maximum 50 kWh/m² et approvisionnés à 100% par des énergies renouvelables dont 80% proviendrait des déchets et du biogaz pour l'approvisionnement en chaleur [ADEME, 2008a].

Ces expériences montrent que des objectifs ambitieux peuvent être atteints sur le plan technique. Mais, le coût induit par de telles performances rend la démonstration difficile à diffuser à grande échelle limitant ainsi leur portée. Il faut attendre le tournant des années 2000 pour voir se généraliser des réalisations techniques moins ambitieuses mais financièrement plus soutenables.

2.1.3. Le développement des écoquartiers

L'entrée dans le vingt-unième siècle se caractérise par la multiplication des projets de quartiers durables dans le monde. Ainsi, selon Yepèz-Salmon, plus de 230 écoquartiers ont pu être répertoriés à travers le globe entre 2007 et 2010 dont 148 rien qu'en Europe. Le reste des propositions se répartissent entre le continent américain (77 dont 5 en Amérique Latine), la Chine (5), les Emirats- Arabe Unis (1) et l'Inde (1) [Yèpez-Salmon, 2011]. Contrairement aux décennies précédentes, ces nouveaux quartiers ne répondent plus seulement aux souhaits de groupes militants ou à une volonté de démonstration des avancées technologiques. Ils sont devenus des territoires moins singuliers qui conservent comme caractère particulier une prise en compte plus importante des enjeux de développement durable notamment environnementaux.

²⁴ L'exposition intitulée « La Ville de demain » a été ouverte aux visiteurs de mai à septembre 2001. Le quartier de 25 ha a été entièrement habité en 2003.

Taoufik Souami décrit ces nouveaux projets urbains comme étant « ...les projets [qui] sont initiés d'une manière classique et mobilisent des outils ordinaires de la construction et de l'aménagement, mais ils intègrent des objectifs de qualité environnementale. Autrement dit, ces quartiers adoptent des modes de production ordinaires non-exceptionnels pour les infléchir dans une perspective de développement durable.» [Souami, 2009a, p 33]. D'ailleurs certains auteurs tentent de séparer les termes d'éco-quartier et de quartier durable afin de faire ressortir les différences entre les démarches. La distinction est faite en particulier par Catherine Charlot-Valdieu et Philippe Outrequin. Pour ces auteurs, «Un écoquartier est un quartier conçu (ou renouvelé) avec une démarche environnementale, laquelle porte notamment sur le paysage ou « la végétalisation des quartiers » et la qualité environnementale des bâtiments. ». En ce sens, il se différencie du quartier durable qui «est structuré autour du croisement des objectifs ou finalités de développement durable avec les principes du développement durables. » [Charlot-Valdieu et al, 2009, p 52]. Ces deux termes seront utilisés de manière indifférenciée dans notre thèse.

L'accroissement du nombre de projets à l'échelle du quartier au cours de ces dernières années fait écho à la volonté de promouvoir un nouvel urbanisme durable comme le recommandait l'Accord de Bristol de 2005²⁵. L'intégration des enjeux de développement durable dans ces territoires se traduit donc par la prise en compte d'un ensemble de thématiques lors de leur réalisation. Ces thématiques sont nombreuses et ne sont pas traitées de la même façon d'un projet à un autre [Yèpez-Salmon, 2011].

Un écoquartier doit intégrer les trois piliers du développement durable que sont le social, l'économie et l'environnement. En ce qui concerne l'axe économique²⁶, celui-ci est traité sous l'angle de la mixité fonctionnelle qui se traduit par la présence de commerces de proximité, de lieux de cultures permettant aux individus de se déplacer en minimisant les moyens de transports motorisés tout en accédant à un maximum de commodités. La mixité fonctionnelle vise à rendre attractif le territoire grâce à la présence de zones d'activités différenciées.

Les écoquartiers prennent aussi en compte la mixité sociale voire la mixité intergénérationnelle en favorisant la présence de lieux de résidence pour différentes catégories socio-professionnelles (accession à la propriété et logements sociaux), de lieux de vie pour les différentes générations (écoles, maisons de retraite) ainsi que des espaces publics (parcs) et assure la mixité fonctionnelle (commerces de proximité, bâtiments tertiaires) tout en se fondant dans son environnement. C'est par exemple le cas pour le quartier des Docks de Saint-Ouen où 40% de logements sociaux ont été prévus. La mixité intergénérationnelle

²⁵ L'Accord de Bristol de 2005 définit le quartier durable comme « une zone de mixité fonctionnelle développant un esprit de quartier ; c'est un endroit où les personnes veulent vivre et travailler. » et qui est dans une optique de protection de l'environnement.

²⁶ Les quartiers dont il est question sur les deux prochains paragraphes font l'objet ou sont en cours de labellisation pour le label français Ecoquartier : <http://www.cohesion-territoires.gouv.fr/les-ecoquartiers>, consulté à partir de 2014

passer quant à elle par la présence de lieux d'éducatons ou de repos permettant à chaque classe d'âge de répondre à ses besoins spécifiques²⁷.

Enfin, la dimension environnementale est bien entendu particulièrement étudiée dans les projets d'écoquartiers. Cet axe intègre de nombreux domaines (eau, la gestion des déchets, la déforestation, l'énergie, la biodiversité,...) dans lesquels chaque collectivité peut choisir de s'investir selon ses affinités car aucune disposition réglementaire n'est imposée. Ainsi, en France, de nombreux projets d'éco-quartiers se sont tournés vers la promotion de la biodiversité en ville comme c'est le cas du quartier Clause Bois-Badeau de Brétigny-sur-Orge. Les problématiques hydriques ont aussi fait l'objet de dispositions nombreuses comme dans le quartier Hoche-Université à Nîmes où la gestion du risque d'inondation a été prise en compte. Quel que soit le projet, la question environnementale est traitée en intégrant les particularités physiques du lieu.

La multiplication des écoquartiers est encouragée par les procédures de certification des projets urbains. Ces démarches ont pour but de mettre en avant les réalisations exemplaires tout en encourageant les prises d'initiatives vers un développement urbain plus durable. Elles reposent soit sur un catalogue de bonnes pratiques à suivre sans caractère contraignant, soit sur un ensemble d'actions intégrant des objectifs contraignants. Les communes ayant fait l'objet d'une distinction sont ainsi mises en avant et deviennent des exemples pour les autres villes. Le label Ecoquartier décerné par le Ministère de l'aménagement et de l'habitat durable français valorise les projets urbains ayant été conçus selon les principes du développement durable sans toutefois se référer à des objectifs chiffrés. Le label Société à 2000 Watts décerné en Suisse valorise quant à lui une volonté de vivre dans une société juste et durable en ayant des objectifs chiffrés en matière de consommation énergétique²⁸.

2.2. Mise en œuvre du développement urbain durable au niveau du quartier

Le quartier est devenu une échelle urbaine à étudier dans une perspective d'expérimentation de l'urbanisme durable. La diversité des propositions et le manque de visibilité sur l'ensemble des projets entraînent certaines critiques qui tendent à dénoncer ces réalisations comme de purs produits marketing répondant à un simple objectif politique [Bouteaud, 2009; Allix, 2009]. Il faut donc s'interroger sur l'existence de préalables à leur création prouvant qu'ils sont la résultante d'une véritable démarche de développement durable et non d'un simple affichage politique ou commercial.

²⁷ Site Eco-quartiers : <http://www.eco-quartiers.fr/>

²⁸ Les labels Ecoquartiers et Société à 2 000 Watts seront présentés plus en détails dans le Chapitre 2.

Plusieurs typologies ont été réalisées par différents auteurs ou organismes publics pour définir les critères déterminants leur réalisation afin de mieux comprendre les choix adoptés. Le travail réalisé par Yepèz-Salmon permet de distinguer deux types de typologies régulièrement admises chez les auteurs [Yepèz-Salmon, 2011]. Une première est liée au contexte et au fonctionnement tandis qu'une seconde se concentre sur le modèle d'urbanisation et la façon de l'optimiser pour prendre en compte les principes de l'urbanisme durable. Ces différentes typologies se centrent sur des critères liés à la localisation et à l'échelle (friche, périphérie, ...), au fonctionnement interne (mixité sociale, intergénérationnelle, fonctionnelle,..) et aux choix des technologies installées [Souami, 2009a ; Lefèvre 2008 ; Barton, 2000].

En s'appuyant sur ces différents travaux, nous présentons un ensemble de critères essentiels pour reconnaître la mise en pratique du développement urbain durable dans ces projets urbains.

2.2.1. Densité et étalement urbain

Au cours des cinquante dernières années, les villes européennes se sont étendues en moyenne de 78% tandis que la population n'a augmenté que de 33%. L'étalement urbain²⁹ résultant de cette dynamique d'urbanisation et répondant à l'utopie fonctionnaliste de la Charte d'Athènes est actuellement remis en question dans le cadre de la transition vers une ville durable. L'étalement urbain réduit les espaces dédiés à l'agriculture ainsi que les espaces verts en favorisant la construction de nouveaux lieux de vie et de travail. Il entraîne une surconsommation d'énergie dans certains secteurs : au niveau du transport, par exemple, les consommations de carburants qui croissent de manière inversement proportionnelle à la densité urbaine. Au niveau de l'approvisionnement énergétique, la rentabilité des infrastructures est mise à mal. Enfin au niveau social, l'étalement urbain est synonyme de pertes de lien social, de gentrification et de cité dortoir [AEE, 2006 ; CEDIS, 2012 ; PUCA, 2008].

L'accroissement de la densité³⁰ urbaine peut alors être considéré comme un moyen de prévenir contre les maux de l'étalement urbain. Plusieurs atouts lui sont reconnus. Elle préserve les espaces agricoles nécessaires à l'autonomie alimentaire ainsi que les espaces naturels assurant le maintien des équilibres écologiques. Elle améliore également la mobilité en favorisant le développement des transports en commun : l'augmentation des flux de circulation permis par la densité permet de mieux cibler les zones de dessertes, d'assurer une meilleure rentabilité du service urbain, de réduire la dépendance des ménages et des travailleurs à la voiture et de développer les mobilités douces grâce à la proximité engendrée. Enfin au niveau énergétique, la densité permet une optimisation de la gestion des ressources. Les

²⁹ L'Agence Européenne pour l'Environnement définit l'étalement urbain comme étant la croissance en surface au sol de l'emprise de la ville entraînant une baisse de la densité.

³⁰ La densité est le rapport entre un élément quantifiable –habitant, emploi, m² de plancher- et la surface d'un espace de référence. On peut parler de densité de population, d'emplois, de bâti ou encore de densité résidentielle [CEDIS, 2012].

opérations d'aménagement peuvent être ainsi plus équilibrées financièrement en mutualisant les systèmes énergétiques [CEDIS, 2012 ; Dind et al, 2007].

La densité s'accompagne toutefois aussi d'une connotation négative (promiscuité subie) nécessitant la mise en place d'un ensemble d'actions pour promouvoir la mixité d'usages ou sociale et conférer aux écoquartiers une forte attractivité [CEDIS, 2012 ; PUCA, 2008 ; Dind et al, 2007].

Les quartiers durables qui se multiplient depuis plusieurs années semblent être un moyen de répondre à la contradiction apparente entre le désir de logements individuels, facteur d'étalement urbain, et la nécessaire compacité du bâti pour une plus une meilleure préservation des ressources [Lefèvre, 2008 ; Paris Innovation Review, 2013, ARENE, 2005]. « *L'échelle du quartier permet la planification de services urbains écologiques basés sur des économies d'échelles qui nécessitent une certaine concentration du bâti pour se développer.* » [Dind et al, 2007, p 67]. Pour limiter l'étalement urbain sans contraindre la croissance, la reconquête des friches, des zones de rénovation urbaine, des zones déstructurées avec une faible densité ou des dents-creuses³¹ peuvent également être utilisés par les écoquartiers [PUCA, 2008]. Ainsi, des écoquartiers ont été réalisés sur des friches industrielles, portuaires ou encore aéroportuaires. C'est notamment le cas pour le quartier de Riem à Munich construit sur une ancienne friche aéroportuaire ou encore le quartier Queen Elizabeth Olympic Park à Londres situé sur un ancien site industriel [CEDIS, 2012 ; LLDC, 2012b].

2.2.2. Le rôle de l'innovation technologique

L'innovation technologique dans les quartiers durables est consubstantielle à leur développement et se porte essentiellement sur les problématiques environnementales [ARENE, 2005]. La volonté d'explorer les formes que pourrait prendre la ville du futur sous une forte contrainte carbone donne la possibilité aux porteurs de projets d'écoquartiers d'expérimenter dans les différents secteurs urbains (bâtiments, réseaux techniques, ...). L'innovation technologique est par ailleurs un moyen pour les porteurs de projets, et en particulier les collectivités territoriales, de recevoir des subventions finançant leur projet ainsi que de communiquer sur leur dynamisme pour en augmenter l'attractivité.

La réalisation d'écoquartiers permet de mettre en place des expérimentations prenant en compte les enjeux environnementaux dans le long terme afin de penser la ville du futur. Dans ce cadre, plusieurs types de projets peuvent être distingués. La première catégorie de projet qui peut être proposée regroupe les démonstrateurs qui dépassent les normes techniques ou les cadres réglementaires en vigueur dans le cadre d'une démarche expérimentale. Leur rôle est d'apprécier et de tester la maturité des technologies au niveau technico-économique ainsi que d'identifier les verrous réglementaires à leur déploiement. C'est le cas par exemple du projet Issy-Grid à Issy-les-Moulineaux où sont installées des capacités de

³¹ Les « dents-creuses » sont des parcelles non-construites entourées de zones bâties.

stockage stationnaire avec des batteries de seconde vie. Le but de cette installation est la création des conditions de valorisation technique et économique du stockage de faible capacité pour réduire les appels de puissance³². La seconde catégorie de projets regroupe les « *écoquartiers types* » définis dans la partie 2.1 de ce chapitre où la maturité technique doit être suffisante pour permettre aux systèmes installés de fonctionner correctement sans défaillance. L'objectif n'est alors pas de démontrer la viabilité d'une technologie mais d'assurer le bon fonctionnement du quartier tout en lui reconnaissant une performance technique réduisant son impact sur l'environnement et le distinguant des territoires environnants.

Pour financer ces dispositifs innovants, les porteurs de projets se tournent vers des institutions nationales ou internationales qui acceptent de subventionner une partie des coûts supplémentaires de ces projets du fait de leur caractère exploratoire. De nombreux appels à projet sont régulièrement lancés pour financer des expérimentations que ce soit dans des projets de démonstrateurs ou dans des projets plus classiques. Ainsi, par exemple, le projet City-Zen financé par le 7^{ième} programme européen d'innovation et de développement a pour but de montrer les innovations énergétiques et les possibles méthodologies et outils de planification à mettre en place par les différents acteurs pour atteindre les objectifs des Plans Energie-Climat dans les villes de Grenoble (France) et d'Amsterdam (Pays-Bas)³³.

Le caractère innovant peut également être mise en valeur par l'utilisation de labels dans les écoquartiers. Il existe différents types de labels tels que les labels énergétiques liés au bâtiment (Passiv'Haus, Minergie, BBC) ou des labels plus globaux prenant en compte des critères comme la santé, le transport, l'eau ou les matériaux non limités au bâti (LEEDS, HQE, BREEAM, Société à 2000 Watts).

2.2.3. Les services urbains

Outre le vecteur énergétique, les projets d'aménagement urbain à l'échelle du quartier s'intéressent plus largement à la maîtrise des flux (eau, déchets, alimentation, transport,...) qui irriguent ou traversent ces territoires dans la perspective d'un urbanisme plus durable qui optimise les ressources, favorise l'approvisionnement local et limite les impacts environnementaux.

La réalisation de quartiers durables offre la possibilité de d'appréhender les questions environnementales en dépassant le périmètre du bâtiment tout en s'intégrant à l'espace urbain [Dindj et al, 2007, Parés-Ramos et al, 2010]. Des réflexions sont engagées sur les politiques urbaines via des schémas directeurs ou des feuilles de route sur le tri, la récupération des eaux pluviales, les modes de transport doux et les transports en communs...

³² Site de Embix : <http://embix.fr/portfolio/issy-grid/>, consulté en juin 2017

³³ <http://www.cityzen-smartcity.eu/fr/objectifs/>, consulté en janvier 2016

Le développement des nouvelles technologies de l'information et de la communication est aussi un moyen d'optimiser les flux à l'échelle territoriale. Ces outils ont pour vocation d'aider les acteurs urbains (entreprises, administrations, habitants) à prendre des décisions grâce à la remontée de l'information sur les flux afin d'optimiser les systèmes et ainsi d'augmenter la valeur ajoutée sur le territoire. Ces réseaux intelligents peuvent également être utilisés de manière mutualisée, des informations de différents flux présents dans le quartier pouvant être agrégées afin de déterminer différents profils de consommation. La connaissance apportée par l'analyse des données de consommation va permettre d'améliorer l'offre de ces flux au niveau local grâce à un effort fourni sur leurs modes d'approvisionnement [CEDIS, 2012 ; Association OSE, 2013].

La maîtrise des flux dans le quartier est une problématique essentielle dans une perspective de développement durable. L'enjeu est de mieux connaître les profils des usagers et les ressources énergétiques in situ disponibles afin d'installer les réseaux d'infrastructures répondant au mieux aux besoins et aux ressources exprimés à cette échelle. Néanmoins, le quartier est une partie d'un ensemble plus vaste qui impose d'harmoniser les réseaux à l'échelle de la ville afin que les fonctions techniques soient compatibles avec les ambitions sociales présentes dans les zones urbaines [Dupuy, 1991].

2.2.4. La gouvernance

La bonne réalisation des projets urbains, quelle que soit leur échelle, dépend du bon fonctionnement des systèmes de gouvernance qui se constituent dès leur conception. En matière de gouvernance, les écoquartiers se caractérisent par une multitude de relations entre les acteurs qui permettent de réaliser des innovations organisationnelles [ARENE, 2005]. On observe ainsi l'évolution des interactions entre trois types d'acteurs lors de la réalisation des quartiers durables : les collectivités territoriales, les habitants et les maîtres d'ouvrage.

Si historiquement, ce sont des habitants qui ont initié les premiers écoquartiers en étant à la fois les concepteurs, les usagers mais également les gestionnaires, cette tendance a évolué en laissant la place à des initiatives provenant d'acteurs majoritairement publics. Les collectivités voient dans la capacité d'initier des projets d'urbanisme durable un moyen de récupérer de l'autonomie face aux autres échelles administratives (Régions, Etats) sur des thématiques jugées essentielles et qui sont abordées dans les réalisations de projets durables [Emelianoff, 2004]. Afin de répondre aux enjeux de la transition énergétique, les municipalités développent de nouveaux systèmes de gouvernance en multipliant par exemple les initiatives de partenariat public-privé ou en développant des instruments de management environnemental [Bulkeley et al, 2013 ; PUCA, 2008]. De plus elles disposent de moyens pour influencer le développement spatial ou la réduction de la mobilité grâce à des instruments économiques et financiers. Elles peuvent ainsi s'appuyer sur des investissements dans les infrastructures primaires (ex : les réseaux), sur la réglementation des sols, l'intervention des marchés fonciers [Lefèvre et al, 2011].

Un des tournants observé avec les écoquartiers est la remise des habitants au cœur des processus de gouvernance lors de la réalisation de projets urbains. Ainsi, dans les pays du nord de l'Europe, les habitants sont des acteurs clés dans toutes les étapes du projet. L'investissement de la population dans le quartier est perçue comme une forme d'adhésion à un projet politique et idéologique [Souami, 2007 ; Souami, 2009a]. La prise en considération des futurs usagers de ces quartiers permet non seulement de mieux comprendre leurs besoins spécifiques mais également de pouvoir les sensibiliser à la bonne gestion du futur quartier. Cette prise en compte des citoyens n'est toutefois pas encore systématique dans les pays du sud de l'Europe où, elle pourrait éviter certains écueils conduisant à une incompréhension du projet ; ce fut notamment le cas dans la ZAC de Bonne à Grenoble où une partie des habitants n'a pas compris l'utilité de certains sols choisis et où les différentes fonctionnalités des nouvelles prises électriques installées non comprises ont entraîné une baisse de l'efficacité environnementale des innovations [Renauld, 2014].

Si les habitants doivent être intégrés lors des processus de réalisation de tels quartiers, il est toutefois encore difficile de définir le poids qu'ils pourraient prendre dans les décisions d'aménagement urbain dans les années futures. Pourtant le rôle de la société civile dans la gouvernance locale est incontestable. Dans un premier temps, la société civile pourrait bénéficier d'une meilleure formation et information sur les enjeux du développement durable à l'échelle urbaine. Dans un second temps, dans une démarche de démocratie participative, le citoyen pourrait être intégré à l'élaboration des projets urbains comme cela peut être le cas dans certains pays du Nord [Lefèvre et al, 2009 ; Souami, 2009a ; Association OSE, 2013].

D'autres acteurs que les citoyens tels que les architectes, les constructeurs, les promoteurs, les bailleurs, les entreprises de services urbains (eau, déchets, transports, énergies), les acteurs institutionnels (organismes nationaux, institutions européennes) constituant la maîtrise d'ouvrage, sont également partie prenante dans la réalisation des projets d'écoquartiers. La variété des systèmes juridiques, des possibilités des montages financiers et des modèles institutionnels ne permet pas de définir un modèle idéal et unique des relations à envisager entre les acteurs pour réussir les projets urbains à travers l'Europe. Toutefois, ils impulsent un décloisonnement des différents secteurs (maîtrise d'ouvrages urbains, architecturales, environnementales, promotion économique, la communication, ou encore la politique sociale) permettant à leurs acteurs de tisser de nouvelles relations. Ainsi, un noyau dur apparaît entre les services municipaux, des entreprises publiques, ou des agences municipales. Les relations entre les acteurs présents dans celui-ci et ceux évoluant en périphérie évoluent constamment ce qui permet aux acteurs de partager la charge du projet [Souami, 2007].

La gouvernance dans la réalisation des écoquartiers et dans son exploitation intègre un ensemble d'acteurs issus du domaine public, du domaine privé et de la société civile. L'originalité de l'approche des quartiers durables est de décloisonner les acteurs historiques limités à leur secteur d'activités. La participation de différents profils dès l'origine crée de nouvelles synergies ce qui permet de réaliser de nouvelles chaînes d'acteurs lors de la mise en œuvre des ouvrages urbains et d'assurer leur réussite que ce soit lors de leur conception puis lors de leur exploitation.

L'écoquartier est donc un quartier dans lequel un ensemble de facteurs tels que la densité, l'innovation technologique, la recherche de la maîtrise des flux et la gouvernance sont réunis pour proposer une image de la ville du futur. Même si ces caractéristiques apparaissent à des degrés divers dans chaque projet d'écoquartier, aucun ne répond à un cahier des charges standardisé. Chaque écoquartier est donc caractérisé par sa singularité contrairement aux constructions plus anciennes où les constructeurs avaient pour habitude de proposer des solutions souvent standardisées aux demandes d'aménagement urbain. Il est de ce fait difficile de répliquer à l'identique ce type de projet urbain contrairement à la volonté de certains acteurs [Emelianoff, 2007a&b]. L'écoquartier doit être perçu comme un territoire permettant d'envisager la durabilité où la prise en compte des enjeux de la transition énergétique oblige à s'interroger sur le traitement de l'énergie dans ces projets urbains.

3. Les enjeux énergétiques dans les écoquartiers

La montée des enjeux environnementaux et plus particulièrement de transition énergétique se traduit dans les politiques des villes par la recherche d'un meilleur équilibre entre l'offre et la demande d'énergie sur le territoire. Dans le même temps, les projets de quartiers essaient partout en Europe proposant de multiples visions de la ville durable. L'échelle du quartier devient alors une échelle d'expérimentation de la transition énergétique qui s'appuie sur la maîtrise des consommations et le développement des sources d'énergie bas-carbone avec notamment la valorisation de sources d'énergie renouvelable locales. L'intérêt de cette échelle est qu'elle permet de s'affranchir de la complexité de la ville, qui impose des coûts considérables et des contraintes importantes, tout en dépassant l'échelle du bâtiment qui est trop petite pour impulser de nouveaux modèles et ne permet pas d'envisager des approches intégrées [CEDIS, 2012 ; La fabrique de la cité , 2014].

Le quartier tel que nous allons l'étudier dans cette partie peut être défini comme un morceau de ville dans lequel se retrouve un ensemble diversifié de bâtiments (résidentiels, tertiaires,...). La problématique énergétique est abordée dans une perspective de limitation des émissions de GES, et donc, de réduction des consommations et développement de la production bas-carbone. Cette recherche d'un meilleur équilibre entre consommation et production d'énergie à l'échelle du territoire s'appuie notamment sur l'évolution de la réglementation thermique sur les bâtiments, le développement rapide des technologies de *smart grids* offrant une gestion intelligente de la demande et des flux, l'installation de capacités de

production décentralisées d'énergie et le déploiement d'une mobilité douce ou au moins faiblement émettrice de gaz carbonique grâce au développement du véhicule électrique.

Dans la partie suivante, nous nous intéresserons à la consommation énergétique des bâtiments en nous concentrant plus particulièrement sur la performance énergétique de l'enveloppe et sur les possibilités de maîtrise des consommations qu'offrent les compteurs intelligents.

L'analyse portera à la fois sur les usages de chaleur et d'électricité. Pour ce qui concerne l'offre d'énergie, nous nous concentrerons sur ces deux vecteurs, chaleur et électricité, en raison de leur poids dans la consommation et de la possibilité de produire sur place ces formes d'énergie. Notre analyse abordera successivement la production et la distribution de la chaleur et de l'électricité en nous concentrant sur les mix énergétiques et le rôle des réseaux dans l'approvisionnement énergétique à l'échelle locale.

Le choix a donc été fait de ne pas intégrer la problématique de la mobilité pour se concentrer exclusivement sur l'approvisionnement énergétique des bâtiments. Même si on peut penser qu'à terme les deux secteurs devraient être abordés conjointement (fonction de stockage apportée par les véhicules électriques) le centrage sur les bâtiments correspond aujourd'hui encore à la très grande majorité des projets d'aménagement urbain à l'échelle du quartier. En effet, les problématiques de mobilité actuellement traitées dans les écoquartiers relèvent des modes doux, des services de transports collectifs ou encore du stationnement automobile mais pas (encore) de l'approvisionnement énergétique au sein du quartier. En raison du découplage entre l'approvisionnement des véhicules de transports et celui des bâtiments dans les projets d'écoquartiers, nous avons opté pour une analyse portant sur la demande et l'offre d'énergie, intégrant les usages chaleur et électricité spécifiques, limités au seul secteur de l'immobilier.

3.1. L'efficacité énergétique dans les quartiers

L'efficacité énergétique³⁴ est un enjeu majeur de la politique européenne depuis son inscription dans le Plan Climat Energie de 2008 qui vise une progression de 20% d'ici à 2020 par rapport à 1990. La baisse de la consommation d'énergie et la lutte contre le gaspillage énergétique visent à réduire la dépendance énergétique, le coût de l'énergie et les émissions de GES [CE, 2016a]. Bien que cette ambition ait été rappelée par la Commission Européenne en 2010³⁵, le Conseil Européen a observé le 4 février 2011 que l'Union n'était pas en voie d'atteindre son objectif dans le temps imparti.

³⁴ L'efficacité énergétique est définie dans l'article 2 de la Directive sur l'Efficacité énergétique de 2012 comme « le rapport entre les résultats, le service, la marchandise ou l'énergie que l'on obtient et l'énergie consacrée à cet effet ».

³⁵ Communication du 10 novembre 2010 de la Commission Européenne intitulée Energie 2020

Différents outils économiques ou instruments de politique sont susceptibles d'agir sur l'efficacité énergétique et largement utilisés par les Etats Membres pour améliorer leur performance : taxes sur l'énergie ou le CO2, mécanismes de subvention ou d'incitations fiscales de type Contrat de Performance Energétique, dispositions réglementaires, élaboration de normes et de standards, programmes d'éducation,...)³⁶. A l'échelle des écoquartiers des moyens peuvent également être mis en œuvre pour accroître l'efficacité énergétique qui relève plutôt des actions de démonstration en faveur de solutions innovantes. En raison de la place centrale prise par ces deux pratiques dans les démarches d'écoquartier, nous nous concentrerons sur l'amélioration de la performance énergétique au niveau du bâti et la maîtrise de la demande énergétique grâce aux compteurs intelligents³⁷ [ADEME, 2008a ; CE, 2016a].

3.1.1. La performance énergétique des bâtiments

Le secteur du bâtiment représente 40% de la consommation finale d'énergie de l'Union Européenne, ce qui en fait le principal poste de consommation d'énergie à cette échelle. La consommation énergétique dans les bâtiments résidentiels et tertiaires se répartit, pour ce qui est des usages, entre l'utilisation de chaleur pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la cuisine, et l'utilisation de l'électricité pour les usages spécifiques tels que l'éclairage, l'électroménager ou l'électronique. A l'échelle européenne, l'énergie finale dans les bâtiments se répartit pour 60% en usage chaleur et 40% en électricité [O Broin, 2007]. Si les usages de chauffage ont tendance à diminuer depuis ces dix dernières années grâce aux améliorations apportées par les réglementations thermiques et la rénovation du parc ancien, les usages électriques ont quant à eux augmenté et ils vont continuer à croître dans les prochaines années en raison du développement de certains équipements comme ceux liés aux nouvelles technologies de l'information et de la communication [CE, 2014b ; Perez et al, 2008].

Les niveaux d'exigences attendus pour la performance énergétique des bâtiments

En Europe, la performance énergétique du bâtiment qui peut être défini comme « *la quantité d'énergie calculée ou mesurée nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques liés à une utilisation normale du bâtiment, ce qui inclut entre autres l'énergie utilisée pour le chauffage, le système de refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude et l'éclairage* »³⁸ a été reconnue dès 2002 comme un moyen d'améliorer l'efficacité énergétique³⁹. Pour la promouvoir, la réglementation européenne proposait une

³⁶ Directive 2012/27/UE du Parlement Européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique

³⁷ Fiche technique de l'Union Européenne : Efficacité énergétique, http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/fr/displayFtu.html?ftuId=FTU_5.7.3.html, consulté en janvier 2016

³⁸ Article 2 Directive 2010/31/UE du Parlement Européen et du Conseil du 19 mai 2010 sur la performance énergétique du bâtiment

³⁹ Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments.

méthode de calcul de la performance, des exigences minimales pour les bâtiments neufs et existants de grande taille et un dispositif de certification de la performance.

En 2010, cette directive a été remplacée par un nouveau texte visant à renforcer les exigences initiales de performance énergétique⁴⁰. Les performances imposées qui dépendent des conditions climatiques et des particularités locales de chaque Etat Membre, portent sur le chauffage, la production d'eau chaude, le système de refroidissement, la ventilation et l'éclairage. Elles concernent à la fois les bâtiments neufs et les bâtiments existants bénéficiant d'une rénovation thermique. La Directive de 2010 anticipe également sur la future réglementation en annonçant, pour les bâtiments neufs, un objectif de consommation nette proche de zéro en 2020. Concrètement, il s'agit d'atteindre « ... *des performances énergétiques très élevées* » de telle sorte que « *la quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à proximité.* »⁴¹.

Ces niveaux de performances doivent être intégrés dans la réflexion et la réalisation des écoquartiers afin que la demande énergétique du territoire soit la plus basse possible. En ce qui concerne les bâtiments existants, la directive de 2012 affirme l'existence d'important gisements d'économies d'énergies et rappelle « *le besoin pour les Etats membres d'établir une stratégie à long terme pour l'après-2020 destinée à mobiliser l'investissement dans la rénovation d'immeubles à usage résidentiel et commercial afin d'améliorer la performance énergétique du parc immobilier* »⁴². En ce qui concerne les bâtiments neufs, ceux-ci doivent répondre aux exigences minimales, voire les dépasser, afin d'anticiper les prochaines réglementations.

La certification de la performance

Plusieurs labels et certificats ont été créés en matière de performance énergétique et de performance environnementale ces dernières années à la demande de l'Union Européenne⁴³. Ils reposent sur un cadre général pour le calcul de la performance énergétique des bâtiments élaboré dès 2002 puis enrichi dans la Directive de 2010. La méthode de calcul est fixée par chaque Etat Membre au niveau national ou régional afin de tenir compte des particularités locales comme les conditions climatiques ou les rapports coût/efficacité propre à chaque Etat⁴⁴. Ce calcul est basé sur une méthode combinant les mesures

⁴⁰ Directive 2010/31/UE du Parlement Européen et du Conseil du 19 mai 2010 sur la performance énergétique du bâtiment.

⁴¹ Article 2 de la Directive 2010/31/UE du Parlement Européen et du Conseil du 19 mai 2010 sur la performance énergétique du bâtiment

⁴² Considérant 16 Directive 2012/27/UE du Parlement Européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique

⁴³ Article 7 de la Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments

⁴⁴ Considérant 9 et article 3 de la Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments

d'isolation thermique ainsi que d'autres facteurs tels que les installations de chauffage ou de climatisation, le recours à des sources d'énergies renouvelables et la conception du bâtiment⁴⁵.

Ces certifications ont pour objectif de communiquer les informations nécessaires au consommateur pour l'informer sur les performances techniques des bâtiments et permettre leur comparaison. La certification a également été développée dans certains pays pour attester que le niveau de performance du bâtiment dépasse les seuils réglementaires. C'est le cas des certifications Effinergie (France) et des labels Minergie (Suisse) ou Passiv'Haus (Allemagne) [Annexe 1 : Tableau comparatif des labels de performance énergétique]. D'autres labels et certifications ayant une démarche plus globale intègrent la performance énergétique du bâtiment dans un ensemble de critères environnementaux et sociaux. Il s'agit des labels BREAAAM (Royaume-Uni), HQE (France) ainsi que le label américain LEED très utilisé en Europe. Ces derniers présentent l'intérêt de disposer d'un cahier des charges qui peut être appliqué au niveau du quartier (BREEAM, LEED) [Annexe 2 : Tableau comparatif des labels environnementaux].

Chaque Etat étant libre de mettre en place ses propres méthodes de calculs et niveaux de performance énergétique il en résulte un certain manque d'harmonisation qui se traduit par un manque de lisibilité des labels. La fragmentation est amplifiée avec l'apparition massive de certificats et labels qui ne reflètent pas les mêmes niveaux d'engagements. La confusion entre les certifications est à la fois entre les exigences attendues à l'intérieur de chaque Etat mais également à l'intérieur de ces derniers. Ainsi en France, en Espagne et en Italie plus de 10 méthodes sont reconnues au sein de leur territoire [Deloitte, 2012 ; Andaloro et al, 2010]. Bien que des tentatives d'harmonisation aient été proposées par l'Union Européenne, la confusion règne encore sur les exigences de performance, les méthodes de calcul et les territoires d'applications.

La performance énergétique dans le bâti est un enjeu essentiel dans le processus de transition énergétique qui doit donc être traité lors de la réalisation des éco-quartiers. Le niveau de performance attendue ainsi que le choix des technologies installées dans les bâtiments sont donc motivés non seulement par les exigences réglementaires en matière énergétique mais également par la volonté d'afficher des réalisations exemplaires. L'intérêt est alors de positionner le territoire comme un lieu d'innovation et montrer le dynamisme des politiques urbaines.

⁴⁵ Considérant 10 de la Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments

3.1.2. La maîtrise de la demande d'énergie

L'efficacité énergétique telle que définie dans la Directive de 2012 ne se limite pas à la réalisation ou à la réhabilitation de bâtiments en respectant certains critères techniques de performance. Celle-ci passe également par la maîtrise de la demande d'énergie qui vise à inciter le consommateur final à réaliser des économies d'énergie en acquérant des équipements plus performants (électroménager par exemple) ou en modifiant son comportement.

La maîtrise de l'énergie suppose notamment une meilleure connaissance par les consommateurs des conséquences de leur comportements d'usage et des dispositifs d'incitation appropriés. vivant dans les bâtiments (ménages, employés, scolaires, retraités,...). Un des moyens envisagés pour cela est la diffusion de la technologie *smart grid* qui permettrait à la fois d'informer le consommateur sur son niveau de consommation et de transmettre des signaux tarifaires pouvant l'inciter à modifier son comportement. Le développement des compteurs intelligents (*smart meters*) est attendu dans les prochaines années et intégré aux mesures de promotion de l'efficacité énergétique⁴⁶. La Commission Européenne a ainsi décidé qu'au moins 80% des consommateurs devraient être équipés de systèmes de mesure intelligents d'ici à 2020 pour les systèmes électriques. L'impact effectif des compteurs intelligents sur les consommations d'énergie fait toutefois l'objet de recherche que les premiers retours d'expérience éclairent.

L'intérêt des compteurs intelligents dans le secteur résidentiel

La majorité des études de ces dernières années ont été réalisées dans le secteur résidentiel. Elles montrent qu'en moyenne les ménages réalisent 15% d'économie d'énergie électrique grâce aux compteurs intelligents. Il existe néanmoins une très grande variabilité autour de cette valeur moyenne. Une étude réalisée en Italie sur trente ménages montre ainsi que le niveau d'économie d'énergie varie de +57% à -32%, avec une moyenne de 18%. Cette variabilité est due aux différents profils de consommation rencontrés mais également à la façon dont les mécanismes d'incitation ont été reçus par les ménages [D'Oca et al, 2014].

Afin d'inciter les ménages à réaliser d'avantage d'économies d'énergies, certaines études ont cherché à déterminer le type d'affichage et le niveau d'information les plus efficaces. Les ménages vivant en maison individuelle seraient ainsi plus sensibles aux problématiques d'optimisation de la consommation énergétique car ils connaissent mieux leur consommation électrique que les ménages vivant en appartement. Les premiers consultent plus facilement les sites internet, les courriers électroniques ou les lettres d'informations que les seconds qui sont plus réceptifs à des informations délivrées par le biais d'affichage collectif en pieds dans l'immeuble. En ce qui concerne la nature du message à apporter, il

⁴⁶ Directive 2012/27/UE du Parlement Européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique

semble que les ménages soient plus sensibles à l'information leur indiquant les montants économisés qu'à l'information leur indiquant leurs gains réalisés en kilowattheure, plus difficiles à appréhender pour un public non averti [Vassileva et al, 2012].

Le suivi de consommation par les compteurs intelligents soulève aussi la problématique du niveau d'automatisation des équipements domestiques socialement acceptable pour réaliser les économies d'énergies. Une étude qualitative réalisée en Finlande montre que les ménages ne sont pas prêts au même niveau d'automatisation selon les vecteurs énergétiques considérés. Une faible automatisation sera préférée pour gérer la température interne du foyer car les ménages souhaitent pouvoir la faire évoluer s'ils le désirent même si cela revient à l'ajuster très peu de fois dans l'année. Pour la consommation électrique, à l'inverse, ils souhaitent que la gestion soit plus automatisée sans toutefois perdre le contrôle de cette dernière au profit d'un système entièrement automatisé. Une grande partie des ménages ont une faible connaissance du fonctionnement des systèmes énergétiques. Il faut donc réussir à lever les peurs liées à une méconnaissance des systèmes de suivi intelligent pour favoriser leur déploiement [Karjalainen, 2013].

Toutefois, ce qui permet de réaliser des économies d'énergies importantes à plus à voir avec la nature humaine qu'avec un calcul économique. De nombreuses études sur les bâtiments résidentiels montrent que la compétition entre individus est un moyen efficace pour que chaque ménage s'investisse dans un processus de réduction de sa consommation. Plus précisément ces études ont démontré que les sujets étudiés étaient plus à même de réaliser des économies d'énergie quand ils avaient la connaissance de leur propre niveau de consommation par rapport à celui de leurs voisins. L'envie de se situer par rapport aux autres apparaît comme une motivation supérieure à un simple apprentissage de bonne conduite ou à un simple suivi de sa propre consommation [D'Oca et al, 2014 ; Vassileva et al, 2012 ; Peischera et al, 2010].

Les compteurs intelligents dans les bâtiments tertiaires

Les dispositifs de suivi des consommations d'énergie sont moins répandus dans les bâtiments tertiaires même si des économies d'énergie y sont également possibles. Les gestionnaires de ces bâtiments sont plus lents à investir dans des systèmes de suivis de consommation car les technologies de *Building Energy Management Systems* sont considérées comme chères et pouvant compromettre le confort des occupants du bâtiment. Une difficulté supplémentaire dans les bâtiments tertiaires est de trouver le moyen d'inciter les utilisateurs à réaliser des économies d'énergie dans un lieu où ils n'y trouvent pas un intérêt financier direct [Gulbinas et al, 2014].

Parmi les études qui ont été réalisées pour déterminer si des économies d'énergie étaient possibles grâce au changement de comportement des utilisateurs, citons l'étude réalisée par Gulbinas et Taylor et qui concernait un bâtiment tertiaire de six étages datant de 1908 localisé dans le centre-ville de Denver. Les résultats de cette étude ont montré que l'information sur les historiques de consommation propres à chaque utilisateur n'avait pas de réel impact sur la réduction de la consommation d'énergie. Par contre le fait de donner la possibilité aux utilisateurs de voir les profils de consommation des autres utilisateurs pouvait entraîner des économies d'énergies significatives car ils consultaient plus souvent la plateforme dédiée au suivi des consommations [Gulbinas et al, 2014].

La maîtrise de la demande d'énergie repose donc sur une analyse fine du comportement humain (classe sociale, revenu, niveau d'études, genre, position géographique, sensibilité politique, condition physique, sensibilité environnementale,...) couplée à l'installation de systèmes techniques performants. Les analyses réalisées au niveau des bâtiments peuvent être transposées dans les écoquartiers. Elles montrent que la diffusion des systèmes de relevés et leur mutualisation pourraient contribuer à l'amélioration de la performance énergétique dans ces territoires et optimiser le dimensionnement des systèmes de production qui sont installés dans le quartier.

3.2. L'approvisionnement énergétique des quartiers

Outre la recherche de l'efficacité énergétique grâce à la performance énergétique et la maîtrise de la demande au sein des bâtiments, la réalisation d'écoquartiers amorce une réflexion sur une nouvelle façon d'appréhender l'approvisionnement énergétique au niveau local. Que ce soit pour l'approvisionnement en chaleur ou en électricité, le développement des capacités de production décentralisée et bas carbone oblige à repenser les mix énergétiques et le fonctionnement des réseaux de distribution afin d'améliorer la gestion des flux.

3.2.1. L'approvisionnement en chaleur

Longtemps peu étudiée et jugée peu centrale en matière de politique énergétique, la chaleur a récemment été reconnue comme un axe stratégique pour contribuer à la transition énergétique. La Commission Européenne a ainsi annoncé en avril 2016 sa volonté de mettre en place le premier plan stratégique pour la chaleur et le rafraîchissement. Cette décision repose sur le constat que l'énergie consommée pour la production de chaleur et de froid à destination des bâtiments et bâtiments et de l'industrie représente 50% de la consommation annuelle d'énergie de l'Union Européenne. La réalisation de ce plan a pour ambition de rendre ce secteur « *...intelligent, efficace et durable* » afin de réaliser des économies de coûts, de réduire l'impact carbone ainsi que de réduire les importations. Cette stratégie repose sur la rénovation des bâtiments, l'accroissement des énergies renouvelables et la réutilisation de l'énergie résiduelle provenant de l'industrie [CE, 2016b].

3.2.1.1. Production et Consommation de chaleur

En Europe, la demande d'énergie dans les bâtiments résidentiels et tertiaires est majoritairement constituée des usages de chaleur à la fois pour le chauffage, la cuisson et l'eau chaude sanitaire. Ainsi, plus de 80% de la consommation énergétique des bâtiments résidentiels et plus de 60% de ceux du secteur tertiaire correspondait à une demande de chaleur en 2010 [CE, 2014b]. Bien que cette consommation doive diminuer dans les prochaines années grâce aux réglementations en matière de performance énergétique, la consommation de chaleur dans les bâtiments restera importante. Ainsi, en 2050, il est attendu que plus de 60% des usages énergétiques soient de la chaleur pour le secteur résidentiel et qu'ils soient d'environ 50% pour le secteur tertiaire [CE, 2014b].

En ce qui concerne l'approvisionnement en chaleur de ces deux secteurs, celui-ci est dominé par les combustibles fossiles. Ils représentent environ 67% de l'approvisionnement en 2008 avec en tête le gaz naturel (45%) et les produits pétroliers (19%). Le charbon et les produits associés sont assez marginaux puisqu'ils ne participent qu'à hauteur de 3% à l'approvisionnement en chaleur. Le reste se répartit entre l'électricité (12%), la chaleur (12%) et les combustibles renouvelables dont fait partie la biomasse (9%), les autres énergies renouvelables (solaire, éolien, et géothermie) sont présentes de manière très marginales [Figure 2 : Origine de l'offre d'énergie thermique pour la demande de chaleur dans les secteurs des bâtiments résidentiels et tertiaires] [Connolly et al, 2013].

Figure 2 : Origine de l'offre d'énergie thermique pour la demande de chaleur dans les secteurs des bâtiments résidentiels et tertiaires –source : Connolly et al, 2013-.

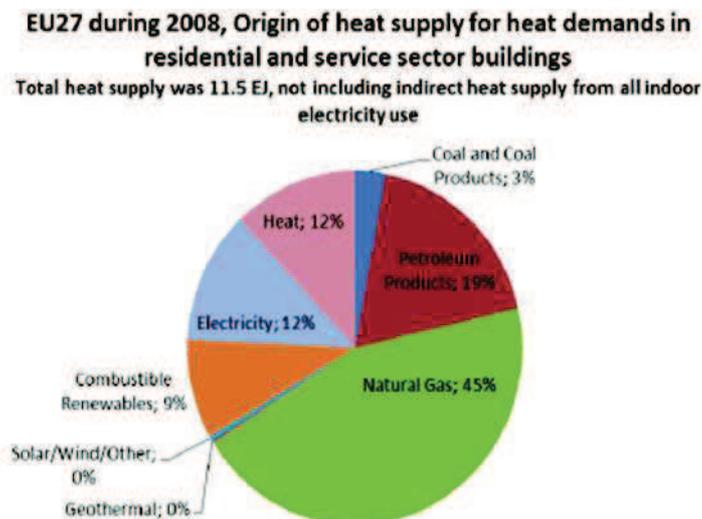


Figure 9: Composition of the origin for heat supply to residential and service sector buildings in EU27 during 2008. Labels refer to the standard commodity groups used in the IEA energy balances. Heat denotes mainly heat from district heating systems. Data sources: IEA energy balances for 2008 complemented with some external estimation. One EJ is 10^{18} Joule, equivalent to 1 million TJ or 278 TWh.

La production de chaleur issue des énergies renouvelables au niveau européen ne s'est pas encore imposée, elle est toutefois reconnue comme un moyen d'atteindre la part de 20% de production d'énergie renouvelable dans le mix énergétique attendue à l'échelle européen pour 2020 [CE, 2016b]. Bien qu'ils ne représentent que 12% de l'approvisionnement en chaleur, les réseaux de chaleur⁴⁷ peuvent jouer un rôle central dans la réalisation des objectifs du Paquet Climat Energie, car ils utilisent massivement des moyens de production performants ou bas carbone [Connolly et al, 2013]. La production de chaleur bas carbone pourrait encore être augmentée avec le recyclage de la chaleur fatale et l'utilisation des énergies renouvelables dans les systèmes de chauffage urbain existants où lors de la construction de nouveaux réseaux de chaleur urbains [Connolly et al, 2013]. Ces réseaux semblent donc être une opportunité pour réduire les consommations issues des combustibles d'origine fossile et par conséquent les émissions de GES.

3.2.1.2. Les réseaux de chaleur urbains en Europe

La Directive 2009 pour la promotion des énergies renouvelables encourage ainsi les autorités locales à développer les énergies renouvelables dans les réseaux de chaleur⁴⁸. La Commission insiste ainsi sur la nécessité pour les Etats Membres de « *...prévoir des mécanismes pour promouvoir le chauffage et le refroidissement urbains produits à partir de l'énergie provenant de sources renouvelables.* ». Dans le cadre de la Directive 2012 sur l'efficacité énergétique⁴⁹ qui vise à définir une réduction de 20% des consommations d'énergies pour 2020, les réseaux de chaleur et de froid sont considérés comme ayant un rôle important à jouer.

En Europe, les réseaux de chaleur couvrent actuellement en moyenne 12% des besoins de chauffage ce qui représente 60 millions de citoyens européens desservis quotidiennement par des systèmes de chauffage urbains. Cette situation reflète des réalités très différentes selon les pays⁵⁰. Ce constat s'explique par de nombreux facteurs internes propres à chaque Etat mêlant des conditions historiques, institutionnelles, économiques mais également des conditions liées aux disponibilités des énergies fossiles et au mix énergétique [EuroHeat&Power, 2015 ; Connolly et al, 2013] [Tableau 2 : Pourcentage

⁴⁷ Le réseau de chaleur peut être défini comme étant un « *un système de distribution de chaleur produite de façon centralisée, permettant de desservir plusieurs usagers. Il comprend une ou plusieurs unités de production de chaleur, un réseau de distribution primaire dans lequel la chaleur est transportée par un fluide caloporteur, et un ensemble de sous-stations d'échange, à partir desquelles les bâtiments sont desservis par un réseau de distribution secondaire.* ». Définition issue de Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, « Qu'est-ce qu'un réseau de chaleur ? », 2013 : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Qu'est-ce-qu'un-reseau-de-chaleur.html>

⁴⁸ Directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables

⁴⁹ Directive 2012/27/UE du Parlement Européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique

⁵⁰ Commission de régulation de l'énergie, site web, consulté en janvier 2016, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=reseaux-chaleur-froid-intelligents>.

des citoyens desservis par des réseaux de chaleur urbains en Europe] [Annexe 3 : Carte des principaux réseaux de chaleur en Europe].

Tableau 2 : Pourcentage des citoyens desservis par des réseaux de chaleur urbains en Europe –source : EuroHeat&Heat, Statistic Overview, 2015, data : 2013-

Pays	Pourcentage
Allemagne	12 %
Autriche	24 %
Danemark	63 %
Finlande	50 %
France	7 %
Italie	6 %
Pologne	53 %
Royaume-Uni	2 %
Suède	52 %
Suisse	4 %

Les possibilités d'évolution de cette situation en faveur des réseaux de chaleur sont réelles puisque 57% de citoyens européens vivent dans une zone où il existe déjà un réseau de chaleur [Connolly et al, 2012]. De plus, ce développement permettrait de réduire la part du chauffage individuel polluant lorsqu'il est alimenté par des sources fossiles. La consommation d'énergie pour la production de chaleur destinée au chauffage urbain représente un peu moins de 250 TWh par an en énergie primaire tandis que les systèmes de chauffage individuels consomment près de 3 100 TWh par an de combustibles. Le total d'environ 3 350 TWh par an pourrait diminuer de 40% si la part du chauffage urbain atteignait 50%. La consommation de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) diminuerait alors de 1 550 TWh par an au profit de systèmes fonctionnant en cogénération ou alimentés par la biomasse [Connolly et al, 2012] [Figure 3 : Approvisionnement en énergie primaire pour le chauffage des bâtiments en 2010 avec différents niveaux de pénétration des réseaux de chaleur].

Figure 3 : Approvisionnement en énergie primaire pour le chauffage des bâtiments en 2010 avec différents niveaux de pénétration des réseaux de chaleur –source : Connolly et al, 2012, p 4-

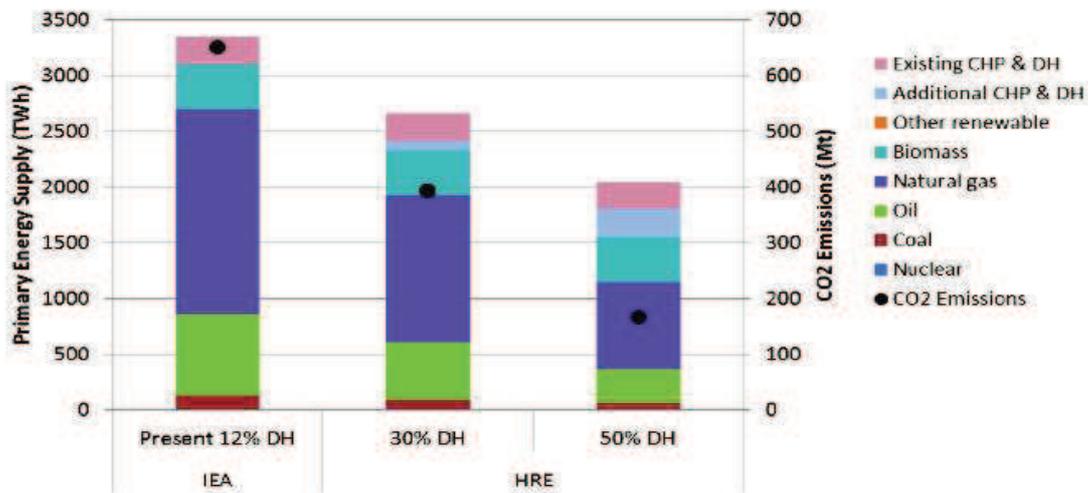


Figure 1: Primary energy supply and carbon dioxide emissions from hot water and the heating of buildings in the 2010 EU27 energy system at present and if district heating and CHP were expanded to 30% or 50%.

Bien qu'encore très limitée, la valorisation de la chaleur est aujourd'hui reconnue comme un outil indispensable dans le processus de transition énergétique. La mise en place de bâtiments efficaces et de systèmes d'approvisionnement thermique performants et bas carbone à l'échelle urbaine est ainsi encouragée. La possibilité de réaliser des extensions de ces réseaux ou de créer de nouveaux réseaux de chaleur urbains existe pour réaliser un approvisionnement local bas carbone. Ce type de solution peut ainsi être proposé aux écoquartiers pour assurer tout ou une partie de leur approvisionnement énergétique en chaleur.

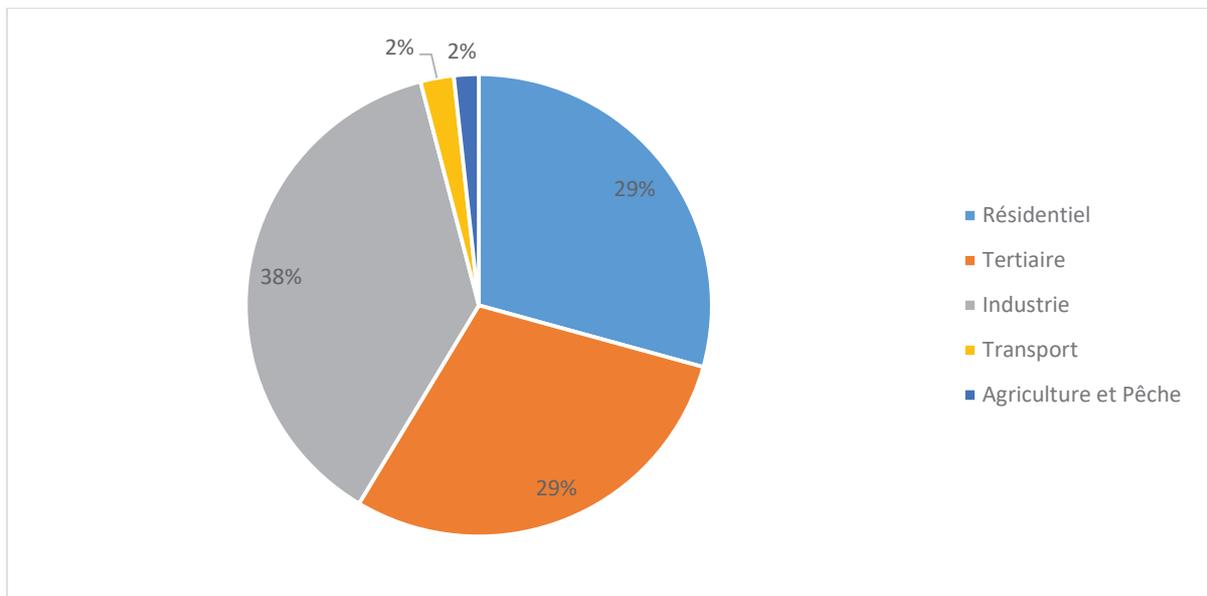
3.2.2. L'approvisionnement en électricité

La volonté de certaines villes de développer leurs propres moyens de production d'énergie se traduit par l'installation de capacités de production et de distribution d'électricité à l'échelle locale. Cette volonté s'observe notamment dans l'installation de moyens de production renouvelables pour l'approvisionnement électrique des bâtiments présents dans les écoquartiers [CE, 2010a].

3.2.2.1. Production et consommation d'électricité

En 2014, près de 60% de la consommation finale d'électricité est réalisé dans le résidentiel et le tertiaire avec une répartition pratiquement identique entre les deux secteurs (résidentiel : 29% et le tertiaire 30%). L'industrie consomme près de 37% du total suivi du transport avec 2% et de l'agriculture et pêche avec 1,7%. Si la consommation d'électricité était en augmentation constante depuis 1990, elle semble stagner voire diminuer depuis quelques années. Avant la crise économique, elle a augmenté de 13% sur la période 2000 à 2008, avant une baisse significative puis un rebond en 2010. Par la suite, une baisse est visible entre 2010 et 2014 qui est à rechercher dans un ensemble de facteurs tels que des conditions climatiques relativement clémentes, un ralentissement économique et une meilleure efficacité énergétique [Laponche, 2017] [Figure 4 : Consommation d'électricité par secteur pour l'Union Européenne des 28].

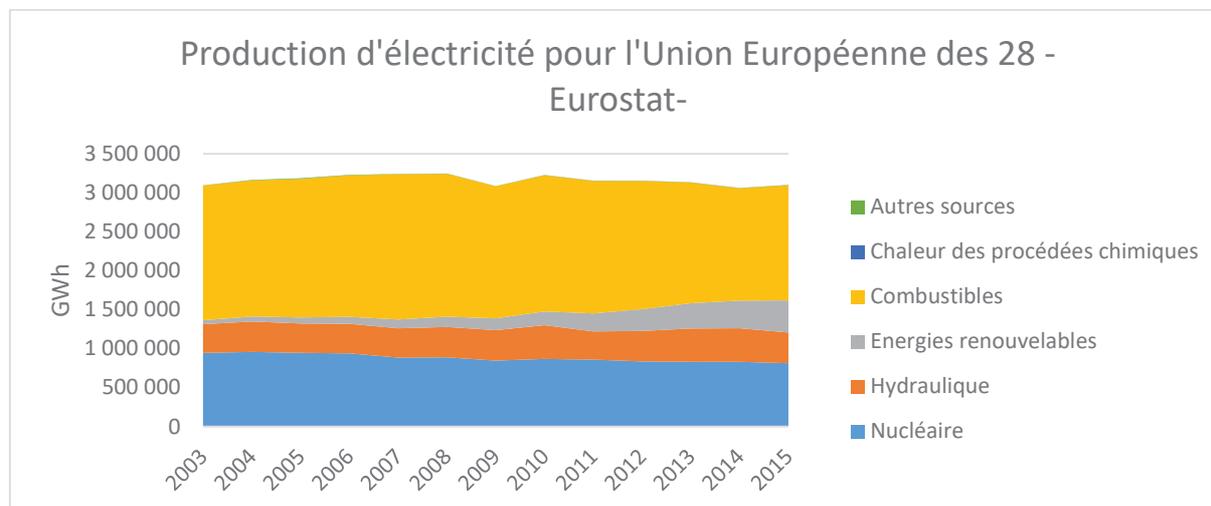
Figure 4 : Consommation d'électricité par secteur dans l'Europe des 28 en 2014 –source : Eurostat--



En 2014, la production nette d'électricité dans l'Europe des 28 était de 3,3 millions de gigawattheure soit un niveau légèrement inférieur à l'année précédente. La production est en baisse depuis 2010, ce qui est une tendance observable dans la majorité des pays de l'Union Européenne à l'exception de quelques pays tels que la Roumanie, la Suède, la Pologne, la Slovénie, la Bulgarie ou la République Tchèque et Malte. En 2014, la production d'électricité provenait à 47,6% des centrales fossiles (gaz naturel, charbon et pétrole) suivi de près par les centrales nucléaires avec 27,4%. Le dernier quart de production est constitué de la production issue des énergies renouvelables bas carbone (hydraulique 13%, éolien 8% et solaire 3%). La production renouvelable augmente depuis 2004 (de 13,5% à 24,9%

entre 2004 et 2014) tandis que la part des combustibles fossile diminue sur la même période de 55,9% à 47,9%⁵¹ [Figure 5 : Production électrique par énergie primaire dans l'Union Européenne des 28].

Figure 5 : Production électrique par énergie primaire dans l'Union Européenne des 28 de 1990 à 2013 –Eurostat⁵²--



La promotion de la production des énergies renouvelables par le Paquet Climat Energie de 2008 et son actualisation en 2014 a fait évoluer la production d'une électricité moins carbonée. Dans le même temps, la volonté des collectivités locales de répondre aux enjeux de développement durable ainsi que leur volonté d'accroître ou de récupérer des compétences dans les services urbains de l'énergie les a poussé à promouvoir la production locale d'énergie et en particulier d'électricité [Cité de l'énergie, 2012 ; Energy Cities, 2017 ; IRENA, 2016].

3.2.2.2. Les réseaux de distribution d'électricité

Les écoquartiers sont réalisés dans les territoires urbains qui sont traditionnellement raccordés aux réseaux électriques de distribution⁵³. Le développement de la production d'électricité issue des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien, hydraulique,...) concerne, a priori, les réseaux basse et moyenne tension. Le fonctionnement de ces réseaux, qui historiquement faisaient peu l'objet d'étude, devient

⁵¹ Eurostat, <http://ec.europa.eu/eurostat/fr/home>

⁵² Eurostat, <http://ec.europa.eu/eurostat/fr/home>

⁵³ Les systèmes électriques sont composés de quatre grands ensembles. Le premier concerne les moyens de production réalisés par des centrales à charbon, au gaz, au fioul ou encore des centrales nucléaires. L'électricité produite emprunte un ensemble de lignes permettant son transport, sa distribution et sa répartition. Techniquement, ces lignes sont différenciées par des niveaux de tension différents. Le second ensemble est constitué des lignes de transport et d'interconnexions en très haute tension qui assure le transport de l'électricité sur de longue distance tout en limitant les pertes. Ce réseau est interconnecté entre les pays limitrophes en Europe. Les réseaux régionaux ont des niveaux de tension de 225 000 volts ou compris entre 63 000 et 90 000 volt et raccordent les grands consommateurs industriels et les réseaux de distribution locaux. Enfin, les troisièmes et quatrièmes ensembles sont constitués par les réseaux de distribution et de répartition. Des échangeurs permettent de réduire la haute et très haute tension en moyenne (15 000 et 20 000 volt) et basse tension (380 et 220 volts). Ce sont ces derniers qui vont être analysés lors de la réalisation des projets urbains durables.

nécessaire dans le cadre d'un développement de la production locale qui modifie les principes de fonctionnement de la distribution d'électricité.

L'Europe comporte plus de 10 millions de kilomètres de lignes électriques dont 97 % sont spécifiques aux réseaux de distribution. Les réseaux de distribution desservent ainsi plus de 260 millions de consommateurs dont 99% sont représentés par le secteur résidentiel et tertiaire et les petites et moyennes entreprises [Eurelectric, 2012]. Ces profils de consommateurs font échos aux résidents des écoquartiers car ils sont construits dans un univers urbain regroupant des bâtiments à usages résidentiels et tertiaires. Leur profil de consommation électrique est relativement similaire et comprend essentiellement des usages spécifiques tels que l'éclairage, le froid (réfrigérateur et congélateur), l'audiovisuel et le lavage mais également le chauffage.

En 2010 et à la suite de l'établissement du Paquet Energie-Climat de 2008, la Commission Européenne souhaitait « *créer une Europe efficace sur le plan énergétique* » et « *accroître le rôle prépondérant joué par l'Europe dans le développement et l'innovation des technologies énergétiques* ». Elle estimait que pour réaliser une transition énergétique efficace, le développement des infrastructures électriques était indispensable⁵⁴. Le schéma directeur pour un réseau énergétique européen intégré de 2010 a ainsi établi les priorités en matière d'infrastructures pour 2020 et les décennies suivantes. Il s'agit de moderniser les réseaux électriques pour permettre l'accroissement de la part des énergies renouvelables tout en conservant le niveau de sécurité et de qualité de fourniture actuel [CE, 2010a].

Les réseaux européens vont donc requérir plus de 400 millions d'euros d'investissement d'ici à 2020 pour être modernisés. Dans un premier temps, les deux tiers des investissements iront à l'extension des réseaux de distribution. Ces investissements porteront donc sur la construction de nouvelles infrastructures mais il faut également remettre en état et moderniser les actifs en fin de vie. Les investissements doivent aussi prendre en compte l'intégration des nouvelles charges électriques comme les véhicules électriques, la production distribuée et les compteurs intelligents [Eurelectric, 2012].

La question de l'approvisionnement énergétique des écoquartiers comprend une double dimension : la maîtrise de la demande et l'offre énergétique. Pour ce qui concerne la demande énergétique, les stratégies envisagées portent assez classiquement sur la performance énergétique du bâti et la maîtrise de la demande par le biais des technologies de l'information et de la communication. Pour l'offre, les options envisagées pour l'approvisionnement de quartiers plus durables s'appuient sur le développement de la production in situ ou proche bas carbone. Du fait de la dépendance aux infrastructures existantes, les nouveaux modèles d'approvisionnement énergétique des écoquartiers diffèrent fortement selon les quartiers comme le montre notre base d'information.

⁵⁴ Communication de la Commission Européenne du 10 novembre 2010 intitulé « Stratégie pour une énergie compétitive, durable et sûre ».

4. Une base d'information sur les profils énergétiques des écoquartiers en Europe

Le choix des écoquartiers intégrés dans la base d'information repose sur la sélection de projets ayant axé leur réflexion autour des problématiques énergétiques. Nous avons ainsi sélectionné 46 projets à travers l'Europe [Tableau 3 : Les écoquartiers étudiés dans la base d'information]. Pour la France, la base d'information s'appuie sur le label Ecoquartiers et le concours Ecocité. Pour les pays européens, nous avons mené une recherche par les mots clés « Ecodistrict » ou « Econeighbourhood ».

En France, de plus en plus de projets d'aménagements sont présentés par les collectivités comme des écoquartiers. Toutefois, ces quartiers n'ont pas tous le même degré d'intérêt pour la thématique énergétique. C'est pourquoi, nous avons choisi de nous centrer sur deux démarches promouvant l'excellence en matière d'aménagement urbain et qui sont sanctionnées pour l'une par un label et par l'autre par le déclenchement de subventions. Dix-neuf projets ont ainsi été retenus :

Le label Ecoquartier décerné par le Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement est considéré comme un « *référentiel en matière d'aménagement durable* » et vise « *l'exemplarité* ». Lancé en 2012 à la suite du Grenelle de l'environnement, il est caractérisé par une approche intégrée de l'aménagement durable et est accessible à toutes les communes. Ce label repose sur une charte énonçant 20 thématiques qui regroupent des enjeux économiques, sociaux et environnementaux que les collectivités doivent s'engager à prendre en compte sur le long terme. Par exemple, le point 17 mentionne « *Viser la sobriété énergétique et la diversification des sources au profit des énergies renouvelables et des sources de récupération.* ». La signature de la Charte n'engage pas au niveau normatif mais vise à promouvoir les bonnes pratiques. Au 1^{er} février 2014, 88 chartes ont été signées, 32 projets sont engagés dans la labellisation et 13 projets ont été labellisés *Ecoquartier*. Seuls les 32 projets engagés et les 13 projets labellisés ont été étudiés, sur lesquels nous n'avons retenu que les projets ayant mis en valeur une réflexion sur l'énergie, soit 17 projets.

Le concours Ecocité animé par la Direction Générale de l'aménagement, du logement et de la nature vise à favoriser l'émergence d'une nouvelle façon de concevoir la ville en proposant une réflexion sur la durabilité. Plusieurs thématiques sont ainsi abordées comme la mobilité, l'économie durable et de la connaissance, les équipements et services ou encore l'énergie et les réseaux. Entre 2010 et 2014, 130 projets ont été soumis et seuls 19 ont été distingués. Ces projets sont généralement réalisés sur de grands territoires dépassant l'échelle du quartier, deux ont néanmoins retenus l'attention lors de la réalisation de la base d'informations. Il s'agit de l'Ecocité de Lyon et de l'Ecocité de Grenoble. Ces projets ont, en effet, fait des propositions énergétiques à l'échelle de quartier au niveau de la ZAC Confluence pour la ville de Lyon et de la ZAC Presqu'Île pour la ville de Grenoble.

En Europe, les écoquartiers se sont développés de manière très disparate depuis les années 1990. Si les pays du nord sont considérés comme des précurseurs en matière d'éco quartiers ; les pays du Sud ont démarré leur réflexion plus tardivement et semblent moins matures [Kyvelou et al, 2011]. Sans qu'ils soient nécessairement emblématiques, nous avons retenu 27 projets provenant principalement de l'Europe du Nord et de l'Europe Continentale. Sur l'ensemble de ces projets, 11 sont situés en Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Pays-Bas et Suède.

Les 16 autres projets restants sont regroupés dans deux pays, le Royaume-Uni et de la Suisse qui représentent respectivement 6 projets et 11 projets sur les 27 projets internationaux étudiés. Le Royaume-Uni est un pays ayant développé une approche rurale de la durabilité avant de se centrer sur les projets urbains. Cette tendance s'apprécie avec des projets d'envergures ou plus modestes dans lesquels l'énergie fait l'objet d'une attention particulière. Le cas de la Suisse nous a également paru intéressant du fait de son ambition de sortir du nucléaire en 2050 et de l'instauration du programme sur la réduction de la consommation énergétique intégré au programme Suisse Energie : la Société à 2 000 Watts.

L'objectif de cette base est d'informer les caractéristiques énergétiques des écoquartiers réalisés en Europe (objectifs poursuivis, nature des technologies utilisées, degré d'innovation, etc) et de tenter de faire apparaître des rapprochements ou des différences significatives.

Cette base d'information a également pour but de s'écarter des écoquartiers réalisés majoritairement dans les années 1990 qui bénéficient déjà d'une forte visibilité grâce à un grand nombre de publications scientifiques (ex : Malmö, Bedzed, GWZ,...). Le propos, ici, n'est pas de nier leur intérêt et leur pertinence par rapport au sujet de la thèse mais de développer la connaissance de propositions nouvellement réalisées ou en cours de réalisation ayant pu bénéficier du retour d'expérience des premiers projets et qui seraient de ce fait, en mesure de proposer de nouvelles approches.

La méthodologie mise en œuvre pour construire la base d'information consiste à définir un certain nombre de dimensions ou de critères permettant de caractériser les projets d'écoquartiers afin de réaliser une analyse comparative entre les différents projets à l'échelle européenne : i. Les données générales ; ii. Les caractéristiques du territoire ; iii. L'approvisionnement énergétique ; iv. Les acteurs ; v. Le financement. Les moyens d'information ayant permis de réaliser la base d'information reposent sur divers types de documents : articles de presse, articles scientifiques, rapports, sites internet spécialisés, etc.

Tableau 3 : Les écoquartiers étudiés dans la base d'information

NOM DU PROJET	VILLE	PAYS
BAHNSTADT	Heildeberg	Allemagne
TÜBINGEN	Tübingen	Allemagne
HAFENCITY	Hambourg	Allemagne
SOLAR CITY PROJECT	Litz	Autriche
ENERGY HUB PROJECT	Tweewaters Leven	Belgique
ODENSE	Odense	Danemark
MASTAL	Ile d'AerØ	Danemark
@22	Barcelone	Espagne
SOTO DEL HENARES	Torrejon de Ardos	Espagne
ZAC DE BONNE	Grenoble	France
PROJET DE CŒUR DE BOURG	La Rivière	France
FREQUEL-FONTARABIE	Paris	France
RAVINE BLANCHE	Saint-Pierre	France
GINKO	Bordeaux	France
LES GRISETTES	Montpellier	France
PORT MARIANNE	Montpellier	France
LE PLATEAU DE LA HAYE	Nancy-Laxou-Maxeville	France
ECOQUARTIER DU CHAMP DE FOIRE	Clisson	France
POLE DE L'ECOCONSTRUCTION DES VOSGES	Fraize	France
QUARTIER ARAGO	Pessac	France
NOUVEAU MONS	Mons en Baroeul	France
VIDALHAN	Balma	France
ZAC POMPIDOU LE MIGNON	Bois Colombe	France
CAP AZUR	Roquebrune	France
ECOQUARTIER ZAC DES ACIERIES	Saint Chamond	France
ECOQUARTIER DES DOCKS	Saint Ouen	France
ECOCITE GRENOBLOISE	Grenoble	France
ECOCITE DU GRAND LYON	Lyon	France
LEIDSCHER RINJ	Utrecht	Pays-Bas
QUEEN ELIZABETH OLYMPIC PARK	Londres	Royaume-Uni
GREENWICH MILLENNIUM VILLAGE	Londres	Royaume-Uni
MILTON KEYNES ENERGY PARK	Londres	Royaume-Uni
ELEPHANT AND CASTLE	Londres	Royaume-Uni
WAKEFIELD	Leeds	Royaume-Uni
SHERWOOD ENERGY VILLAGE	Olerton	Royaume-Uni
ALIDHEM	Umea	Suède
EIKENOTT	Gland	Suisse
LES PLAINES DU LOUP	Lausanne	Suisse
LES PRES DE VIDY	Lausanne	Suisse
ECOQUARTIER DE LA JONCTION	Genève	Suisse
GRENCITY	Zurich	Suisse

ECOPARC	Neuchâtel	Suisse
ERLENMATT	Bâle	Suisse
SCHWEIGHOF PARK	Kriens	Suisse
IMLENZ	Lenzburg	Suisse
OBERFERD	Berne	Suisse

4.1. La base d'information et les grandes catégories de variables

Les quartiers ont été étudiés sous l'angle de 5 grandes dimensions offrant une appréciation de l'esprit général du projet et des choix énergétiques proposés (Données générales, Caractéristiques générales du territoire, l'approvisionnement énergétique, les acteurs et le financement des projets) [Tableau 4 : Les variables de la base d'information].

Tableau 4 : Les variables de la base d'information

VARIABLES		DEFINITIONS	
DONNEES GENERALES			
1	Nom	Cette catégorie a pour objectif de pouvoir situer temporellement et géographiquement les projets étudiés.	
2	Pays		
3	Localisation		
4	Date et condition de lancement du projet		
CARACTERISTIQUES GENERALES DU TERRITOIRE			
5	Taille du terrain (hectare)	Cette catégorie a pour objectif de décrire de la façon la plus précise possible la zone étudiée en termes de besoin (profil de consommation)	
6	Bâtiments résidentiels		
7	Nombre de logements		
8	Nombre d'habitants		
9	Nombre bâtiment de logement		
10	Surface Totale		
11	Bâtiments Tertiaires		
12	Nombre de bâtiments tertiaires		
13	Nombre d'emplois prévus sur la zone		
14	Surface Totale		
15	Nombre total de bâtiments		
16	Espace Vert		
17	Surface espace vert (hectare)		
18	Rénovation/Réhabilitation		
19	Neuf		
20	Renouvellement urbain		
21	Friches		
22	Extension		
23	Structure administrative du quartier		
24	Labels (échelle quartier)		
25	Positionnement par rapport à la réglementation		
26	Approche bioclimatique		
27	Présence de Labels		
28	Types Labels Bâtiments		
APPROVISIONNEMENT ENERGETIQUE			
ELECTRICITE			
29	Réflexion à l'échelle du bâtiment		Cette catégorie permet d'avoir une image précise des infrastructures nécessaires à l'approvisionnement électrique des territoires étudiés.
30	Réflexion à l'échelle de la zone		
31	Redimensionnement du réseau de distribution		
32	Boucle approvisionnement ouverte		
33	Boucle approvisionnement fermée		
34	Présence de Production électrique sur le site		
	Type de réseau		
	P		
	r		
	o		
	r		

35		Pourcentage de production électrique sur le site	
36		Autres approvisionnement pour le site	
37		PV standard	
38		Production électrique issue des énergies renouvelables hors PV Standard	
39		Centrale PV	
40		Mix électrique	
41		Véhicule électrique	
42		Stockage	
43	Gestion électrique	Suivi de C/P	
44		Suivi de C/P dynamique (tps réel et gestion)	
ENERGIE THERMIQUE			
45		Réflexion à l'échelle du bâtiment	Cette catégorie permet d'avoir une image précise des infrastructures nécessaires à l'approvisionnement thermique des territoires étudiés.
46		Réflexion à l'échelle du quartier	
47		Réseau de chaleur interne ouvert	
48		Réseau de chaleur interne fermé	
49	Type de réseau	Réseau de chauffage urbain	
50		Approvisionnement local (hors solaire) périmètre inférieur à 50 km	
51	Technologies	Cogénération/Trigénération	
52		Géothermie	
53		Pompe à chaleur	
54		Chaufferie	
55		Stockage	
56		Solaire BT	
57		Ventilation double-flux avec récupération de chaleur	
58	Gestion chaleur	Suivi de C/P	
59		Suivi de C/P dynamique (tps réel et gestion)	
TYPES D'ENERGIE PRIMAIRE			
60	Froid		Cette catégorie permet de mettre en valeur le type d'énergie utilisé dans le
61	Solaire		
62	Eolien		

63	Biogaz	mix énergétique (chaleur et électricité) dans le territoire étudié
64	Biomasse	
65	Hydraulique	
66	Gaz	
67	Déchets	

ACTEURS

68	Union Européenne	Cette catégorie permet de détailler les acteurs ayant un rôle à jouer dans la réalisation et le fonctionnement de la zone.
69	Etat	
70	Collectivités territoriales	
71	Acteurs Privés	
72	Maitre d'ouvrage	
73	Assistant à Maitrise d'ouvrage	
74	Maitre d'œuvre	
75	Aménageur	
76	Architecte	
77	Opérateur de réseaux	
78	Autres	

TYPES DE FINANCEMENT

79	Subventions	Cette catégorie permet d'apporter un éclairage sur les modes de financement des projets infra-urbains.
80	Privé	
81	Public	
82	Coût total estimé	

4.1.1. Les données générales

Cette première catégorie est constituée des informations permettant de réaliser la carte d'identité du territoire étudié. Elle comprend le nom du projet, sa localisation (ville, pays) ainsi que la période de sa réalisation avec si possible la présence de quelques dates clés (date de début du projet, durée de réalisation du projet, date de fin du projet).

Les projets étudiés ont tous été réalisés au cours de ces quinze dernières années ; certains étaient encore en phase de réalisation (ex : Greencity à Zurich, Les plaines du loup à Lausanne, le Projet Ecocité à Grenoble, ...) au moment de constitution de la base de données.

4.1.2. Les caractéristiques du territoire

Cette seconde catégorie est constituée des informations liées à la structure territoriale et architecturale de la zone étudiée.

La superficie des sites est prise en compte afin de déterminer si l'écoquartier se rapproche d'un îlot (<10 hectares) ou d'un morceau de ville (>10 hectares).

Les informations liées à la superficie sont étoffées par la prise en compte de la typologie des bâtiments construits sur le site : bâtiments résidentiels (nombre de logements, nombre de bâtiments, surface et estimation de la population qui y résidera) et/ou tertiaires (nombre de bâtiments, surfaces, nombres d'emplois espérés sur la zone) afin de comprendre les usages attendus dans cette zone. Ces aspects vont permettre d'analyser le degré de mixité des usages présents sur la zone (mixité sociale, intergénérationnelle, fonctionnelle) pour voir dans quelle mesure le principe du développement durable est mis en œuvre.

Nous avons par ailleurs distingué les bâtiments neufs et ceux ayant fait l'objet d'une réhabilitation ou d'une rénovation⁵⁵. Le niveau de performance des bâtiments par rapport à la réglementation en vigueur a également été précisé lorsque l'information était disponible. La présence de labels (Passiv'Haus, Minergie, BBC, BREEAM,...) nous a permis d'identifier les bâtiments dont les performances dépassent la réglementation existante ou qui s'appuient sur une démarche architecturale spécifique (ex : bioclimatisme). Le type d'espace sur lequel est réalisé le projet urbain (friche, extension urbaine, renouvellement urbain) est également précisé.

⁵⁵ Il est à noter que la rénovation fait référence à l'action de rebâtir à neuf. La restauration est le fait de redonner au bâtiment son caractère. La réhabilitation est la mise aux normes du bâtiment.

Enfin, les informations sur la structure administrative du territoire infra-urbain permettent de déterminer quel type de gouvernance est attendue sur la zone (terrains publics ou privés). Les labellisations nationales au niveau du quartier sont également identifiées (Ecoquartiers, Ecocités, Société à 2000 Watts,...).

4.1.3. L’approvisionnement énergétique

La troisième catégorie est constituée des informations relatives aux modes d’approvisionnement énergétique mis en œuvre sur le territoire. L’approvisionnement énergétique fait référence dans la base d’information aux modalités de production et de distribution de l’énergie au sein du quartier. Les variables utilisées sont divisées selon le type d’énergie consommée dans les bâtiments (électrique et thermique). Les 40 variables utilisés pour décrire les territoires sont classés en 6 grandes catégories afin d’avoir une image la plus précise possible du système énergétique des zones étudiées.

En ce qui concerne les réseaux de distribution, le but est d’identifier quels sont les projets pour lesquels le mode de distribution a été repensé. Nous avons ainsi distingué la chaleur et l’électricité, et trois échelles spatiales, la métropole ou la ville, le quartier ou l’îlot et le simple bâtiment. La présence de boucles d’approvisionnement ouvertes sur le réseau classique ou fermées à ce réseau a été prise en compte.

Au niveau de la production, la structure du mix énergétique est précisée pour la chaleur et l’électricité. Les technologies de production (géothermie, centrale photovoltaïque, solaire thermique, ...) sont identifiées ainsi que les sources d’énergie utilisées (hydraulique, éolien, solaire, biomasse, etc) et la localisation des moyens de production à l’intérieur du périmètre du territoire étudié ou hors de ce territoire.

La présence de stockage (électrique ou thermique) a également été retenue comme un critère à prendre en compte en raison de l’importance potentielle de cette option dans la gestion décentralisée de l’énergie pour les prochaines années.

L’existence de dispositifs de type smart grids pour la gestion de l’énergie fait également partie des critères considérés tels que la présence de nouveaux dispositifs permettant d’étendre les fonctionnalités des réseaux de distribution (réseaux intelligents) depuis les relevés de consommation et/ou de production à distance jusqu’à la possibilité de gérer de manière dynamique (en temps réel ou avec un pas de temps plus long) la production et la consommation des bâtiments et les capacités de stockage sur la zone.

Un critère spécifique sur la question du refroidissement a été ajouté pour déterminer si cette thématique était intégrée lors de la mise en œuvre du projet et de son exploitation (ex : des propositions de trigénération par exemple).

4.1.4. Les acteurs

La quatrième catégorie est constituée par les différents profils d'acteurs susceptibles d'être présents lors de la réalisation et de l'exploitation des projets étudiés. Plusieurs profils sont proposés : les acteurs institutionnels (Union Européenne, Collectivités Locales), les maîtres d'œuvres, les maîtres d'ouvrages, les opérateurs de réseaux, les architectes, etc. La diversité des profils mobilisés et leur impact dans le projet sera analysé de manière plus approfondie dans le cadre des études de cas retenues (Chapitre 2).

4.1.5. Le financement des projets

La cinquième catégorie regroupe les modes de financements des projets étudiés. L'objectif est d'avoir une vision des modèles d'affaire de ces projets avec un ordre de grandeur des investissements nécessaires au financement des projets. Cette catégorie a été la moins bien renseignée en raison de la difficulté à trouver des informations claires et pertinentes dans les communications des différents projets.

4.2. Analyse de la base d'information

Dans cette section, nous nous intéresserons dans une première partie aux caractéristiques générales des quartiers figurant dans la base pour révéler les ambitions de durabilité des projets. Puis dans un second temps, nous nous concentrerons sur les informations relatives à l'approvisionnement énergétique dont la thématique est au cœur de la réflexion du sujet de thèse.

4.2.1. Contexte et nature des projets urbains

Les écoquartiers qui constituent la base d'information sont implantés sur des territoires d'une centaine d'hectares en moyenne avec toutefois une forte disparité selon les projets. Des projets ayant une aire de 1 hectare (Ecoquartier de la Jonction à Lausanne -1 ha-, Quartier Fréquel-Fontarabie à Paris -1 ha-) à des projets s'étendant sur plusieurs centaines d'hectares (22@ à Barcelone -200 ha-, Les Plateaux de la Haye à Nancy -440 ha-) ont été répertoriés. Il y a donc une multitude de quartiers qui se situent entre l'îlot et le morceau de ville sans qu'une taille particulière soit privilégiée.

Les projets d'écoquartiers présentent dans la grande majorité des cas une certaine mixité intergénérationnelle, sociale et fonctionnelle. Le quartier Eikenott à Gland en Suisse accueille ainsi sur son périmètre une crèche et une maison de retraite ; en France, le projet Ecocité Grenobloise accueille sur son site des logements pour les étudiants et les chercheurs de passage sur la zone. En matière de mixité sociale, il s'agit essentiellement de faire cohabiter logements sociaux, propriétaires occupants et accession à la propriété : le projet Riesfeld à Fribourg en Allemagne prévoit ainsi 30% de logements sociaux. La mixité fonctionnelle associe classiquement des bureaux, des commerces ou des équipements

administratifs. Le projet Greencity à Zurich en Suisse prévoit, par exemple, plus de 60 000 m² de bureaux, des écoles et un centre de santé. Le projet Leidsche Rijn à Utrecht au Pays-Bas espère la création de 40 000 nouveaux emplois grâce à 72 000 m² et 270 hectares dédiés à des activités industrielles. Les écoquartiers respectent ainsi les préceptes de la ville durable moderne où la mixité des usages tient une place centrale dans la réflexion.

Les bâtiments présents dans ces projets sont pour l'essentiel des bâtiments neufs répondant au minimum aux normes en vigueur. Ainsi, à peine 27% des projets font une proposition de rénovation ou de réhabilitation de bâtiments. Il s'agit alors souvent de bâtiments emblématiques qui marquent l'ancrage historique ou culturel du quartier. Ainsi, la ZAC de Bonne à Grenoble a été réalisée sur une ancienne friche militaire, sur laquelle les bâtiments de la caserne ont été sauvegardés et rénovés. Cette faible prise en compte des bâtiments anciens dans les écoquartiers est souvent due à la nature du projet urbain. Ceux-ci sont souvent construits sur des friches. Ce choix correspond également à une volonté politique de la part des collectivités de modernisation de leur ville et se traduit par le choix de réaliser des infrastructures neuves et innovantes.

4.2.2. Le rôle des labels

Dans certains pays, l'Allemagne, la France, le Royaume-Uni et la Suisse notamment, les projets d'écoquartiers mettent en avant la présence de labels attestant de la performance ou de la qualité environnementale des constructions. La plupart des projets faisant appel à la labellisation vont généralement vers des labels reconnus au niveau national (Effinergie, Minergie) voire au niveau international (Passiv'Haus) mais certains écoquartiers vont encore plus loin avec la création de leur propre label. Sur le projet Hafencity à Hambourg en Allemagne, la société Hafencity Hamburg GmbH délivre un label écologique pour les projets considérés comme particulièrement durables. Le label est décerné lorsque plusieurs dispositions sont prises telles que la réduction du besoin en énergie primaire des édifices, l'utilisation de matériaux de construction préservant l'environnement ou encore l'exploitation durable du bâtiment.

L'écoquartier peut lui aussi faire l'objet d'une labellisation qui va au-delà de la simple prise en compte de la performance technique des bâtiments présents sur son territoire. Ces labels intègrent les trois piliers du développement durable (social, économique et environnemental) et la performance énergétique du bâtiment est alors une variable parmi d'autres. Certains labels environnementaux de type BREEAM, LEEDS ou HQE sont plus spécifiques. Le label Ecoquartier en France impose quant à lui un engagement sur 20 points (faire des projets autrement, améliorer le quotidien, dynamiser le territoire et répondre à l'urgence climatique et environnementale) sans toutefois que des objectifs chiffrés soient définis [Annexes 1 et 2].

Certains projets font référence à la construction bioclimatique qui consiste à profiter le plus possible de l'environnement direct du bâtiment en prenant en compte les interactions entre le climat et l'écosystème. Les intérêts de ce type de constructions sont principalement de se prémunir des aléas du climat (froid, chaud, pluie, vent,...) ou de profiter des bienfaits de certains apports gratuits (lumière, chaleur ou fraîcheur, brise,...). Certains projets d'écoquartiers font part de cette réflexion dans la réalisation des bâtiments. Ainsi, la ZAC Balma-Gramont à Vidailhan ou le projet Ginko à Bordeaux font explicitement référence à cette démarche.

4.2.3. L'approvisionnement énergétique

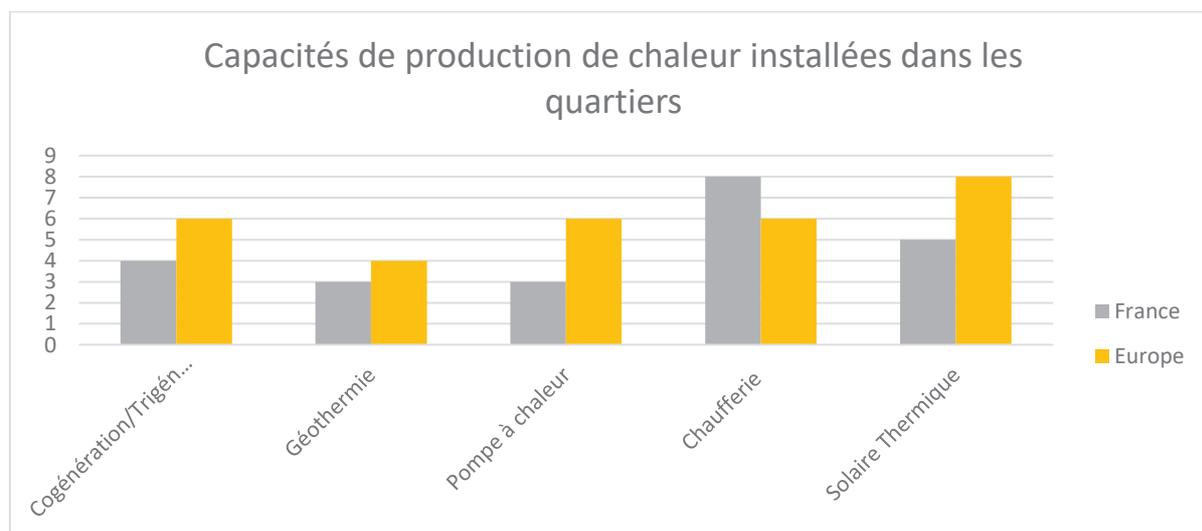
Les dispositifs d'approvisionnement énergétique, comprenant la production et la distribution, mis en œuvre dans les projets écoquartiers sont dissociés entre la chaleur et l'électricité. Ce choix correspond à la volonté de discerner au mieux les spécificités dans le traitement de ces deux énergies en matière d'approvisionnement énergétique.

4.2.3.1. Production et distribution de chaleur

Production thermique

La grande majorité des quartiers étudiés produisent sur leur territoire de la chaleur destinée aux usages de chauffage et d'eau chaude sanitaire. C'est le cas de 31 des 48 projets étudiés. Les capacités employées pour produire de la chaleur produite sur place sont multiples. Cinq principaux modes de production de chaleur ont été distingués : les chaufferies bois ou au gaz, les systèmes de cogénération ou de trigénération, les pompes à chaleur, la géothermie et le solaire thermique [Figure 6 : Capacités de production de chaleur installées dans les quartiers].

Figure 6 : Capacités de production de chaleur installées dans les quartiers [Construction de l'auteur]

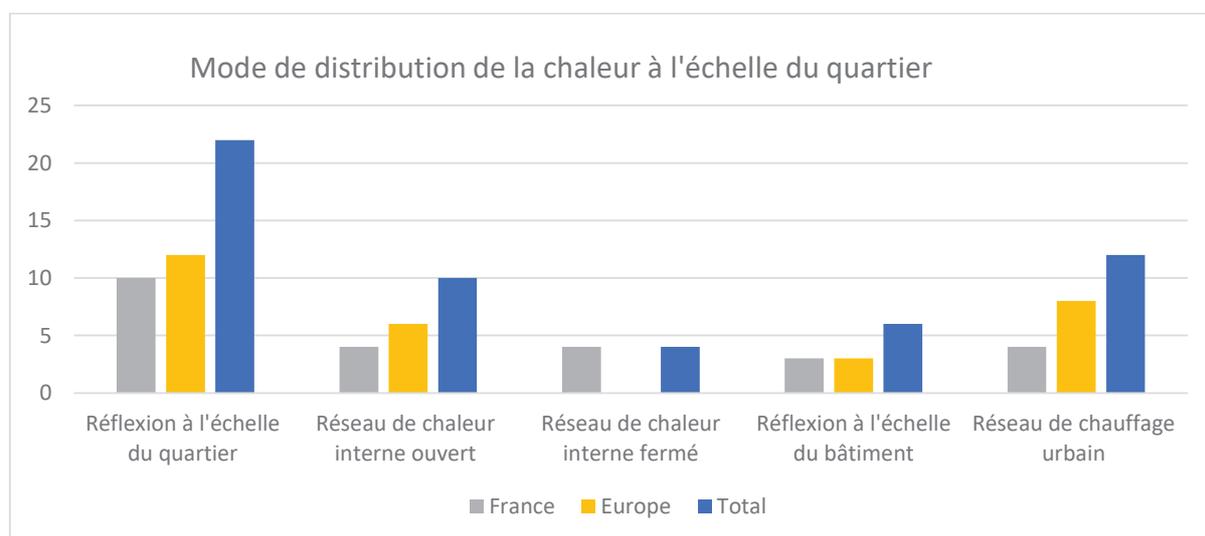


Des préférences pour certaines technologies apparaissent : les pays européens étudiés ont plus facilement recours à la cogénération/trigénération, au solaire thermique, aux pompes à chaleur, à la géothermie. Tandis que les projets français ont quant à eux plus souvent recours aux chaufferies classiques alimentées soit par du gaz soit par de la biomasse. Le gaz est présent dans quelques projets. Bien que cette source d'énergie ne soit pas renouvelable ; elle est tout de même envisagée en couplage avec d'autres propositions.

Distribution thermique

Dans la grande majorité des projets étudiés, des systèmes d'approvisionnement de chaleur ont été mis en place à l'échelle du quartier. Dans la base d'information, il a été convenu de caractériser de trois manières différentes les modes d'approvisionnement en chaleur. La première correspond à un réseau de chaleur autonome à l'intérieur du quartier, qui dispose donc de ses propres moyens de production de chaleur. Le réseau peut être connecté au réseau de chaleur urbain préexistant pour les périodes de demande de pointe ou en cas de défaillance des moyens de production locaux, ou bien fonctionner en boucle fermée sur le territoire. La seconde configuration d'approvisionnement en chaleur correspond à une extension du réseau de chauffage urbain préexistant mais sans moyens de production spécifiques au quartier. Enfin, la troisième configuration consiste à approvisionner le quartier en chaleur à partir de dispositifs de production (chaudières individuelles ou collectives) installés dans les bâtiments. [Figure 7 : Modèle de distribution de la chaleur à l'échelle du quartier].

Figure 7 : Mode de distribution de la chaleur à l'échelle du quartier [Construction de l'auteur]



La réalisation d'un réseau de chaleur à l'échelle du quartier est la proposition la plus fréquente. En majorité, ces réseaux sont ouverts sur l'extérieur. Ils sont alors interconnectés avec le réseau de chaleur urbain existant sans pour autant dépendre de ce dernier pour leur approvisionnement. En l'absence d'un réseau existant, le réseau local est ouvert sur l'extérieur si les capacités de production sont supérieures aux stricts besoins du quartier et permettent d'envisager le rattachement ultérieur de territoires alentours.

Les projets français sont surreprésentés dans la réalisation de projets de réseau de chaleur fermés ; c'est-à-dire limités au quartier. Ainsi, sur les cinq projets entrant dans cette proposition, quatre sont français (Ginko à Bordeaux, Cap Azur à Nice, les docks de Saint-Ouen à Saint-Ouen et Projet Presqu'Ile à Grenoble). Les autres projets sont reliés au - ou partie du - réseau de chauffage urbain (Pôle de l'Ecoconstruction des Vosges à Fraize, Ecoquartier de la Jonction à Genève, Elephant and Castle à Londres, Solar City à Linz). Quelques projets peu nombreux ont privilégié une production de chaleur à l'échelle du bâtiment (Quartier Fréquel-Fontarabie à Paris, Ecoparc à Lausanne ou Hafencity à Hambourg).

D'autres projets urbains combinent plusieurs échelles de distribution de la chaleur. Certains immeubles de la ZAC de Bonne à Grenoble sont raccordés au réseau de chauffage urbain de la ville, d'autres disposent de leur propre cogénération et donc production de chaleur.

Stockage et relevé d'information

Le stockage thermique est relativement peu développé en Europe. Seuls quelques projets européens ont installé des capacités de stockage (GreenCity à Zurich, Queen Elizabeth Olympic Park à Londres, Energy Hub Project à Tweewaters, SolarCity en Autriche, Marstal à Marstal).

Enfin le relevé de consommation et/ou de production grâce des compteurs intelligents reste encore marginal pour les projets étudiés : seulement douze projets (6 européens et 6 français). La gestion dynamique des flux de chaleur est encore plus rare : elle n'est mise en œuvre que dans deux projets (Cap Azur en France et Energy Hub Project en Belgique).

4.2.3.2. Production et distribution d'électricité

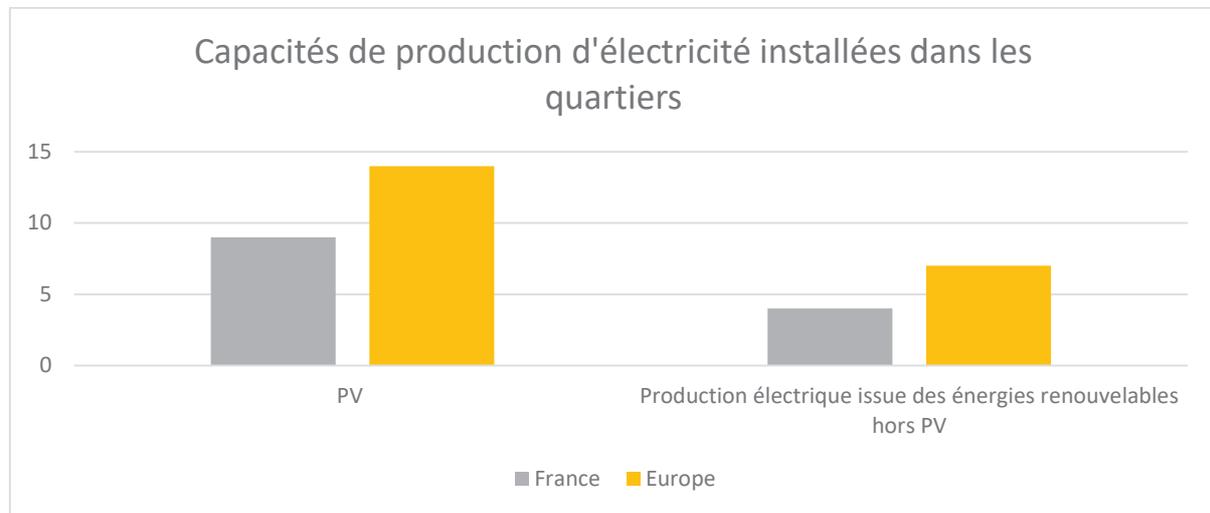
Production électrique

Sur les 45 projets étudiés, 23 comportent des systèmes de production locale d'électricité dont 9 en France et 14 en Europe. Les projets ne produisant pas d'électricité sur site sont généralement français car les projets d'écoquartiers français n'ont pas obligation à développer une réflexion sur l'approvisionnement électrique. Pour les projets européens, seuls les projets ayant clairement affirmé une production d'électricité sur le site ont été pris en compte.

L'énergie utilisée pour la production locale d'électricité, est majoritairement issue de l'énergie solaire avec l'utilisation de panneaux photovoltaïques. Nous qualifions de « photovoltaïque standard » les panneaux photovoltaïques intégrés aux bâtiments. Cette solution technique est une option de plus en plus présente dans les écoquartiers qui accompagne la réalisation de bâtiments très performants ou à énergie positive. Hors ce qui est considéré comme du « photovoltaïque standard », les moyens de production d'électricité que l'on trouve le plus couramment sont la cogénération ou l'hydraulique au fil de l'eau. Sur la ZAC de Bonne, par exemple, des centrales de cogénération ont été installées dans des

bâtiments et couvrent une partie de leur besoin en électricité⁵⁶ [Figure 8 : Capacités de production d'électricité installées dans les quartiers].

Figure 8 : Capacités de production d'électricité installées dans les quartiers [Construction de l'auteur]



Bien que certains écoquartiers prévoient l'installation de capacités de production locale d'électricité, la majorité de l'électricité consommée dans les quartiers provient de l'extérieur. Il est en effet très difficile de produire, en zone urbaine et avec des énergies renouvelables, une quantité d'électricité suffisante pour couvrir la totalité de la consommation d'un quartier. Le projet GreenCity à Zurich propose pour contourner cette impasse technique d'avoir recours à des garanties d'origine prouvant que l'énergie finale consommée par les usagers est bien issue d'une production renouvelable provenant de l'extérieur du périmètre du projet⁵⁷.

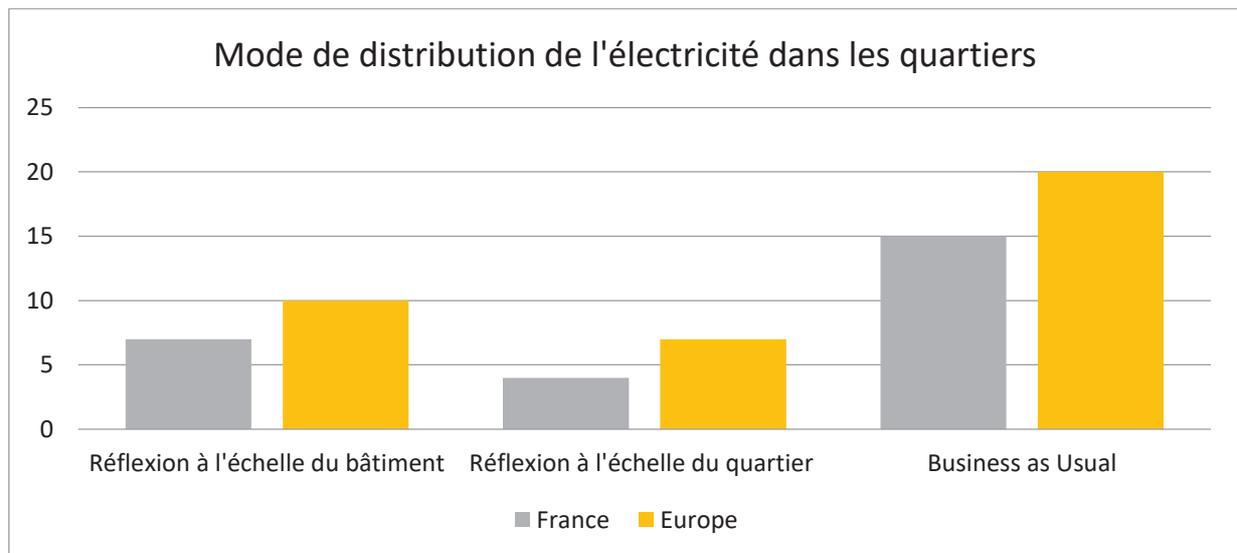
Distribution électrique

La grande majorité des territoires étudiés restent dans des propositions classiques en ce qui concerne le réseau de distribution électrique sur le territoire de l'écoquartier [Figure 9 : Mode de distribution de l'électricité dans les quartiers]. Ainsi, il n'existe pas de projet proposant une boucle de distribution électrique fermée sur le quartier contrairement aux systèmes de distribution de chaleur. Des propositions de distribution d'électricité sont réalisées au niveau du quartier mais toujours avec des boucles ouvertes sur les réseaux extérieurs aux périmètres étudiés. Le projet Queen Elizabeth Olympic Park à Londres propose grâce à un système de tri-génération (chaleur, refroidissement et électricité) d'approvisionner le quartier voire même des zones extérieures à ce dernier.

⁵⁶ Bobroff J., 2011, « La caserne de Bonne à Grenoble : Projet emblématique d'un développement durable à la française », *PUCA*, 81 pages

⁵⁷ Suisse Energie, 2015, « Greencity, Zurich », 2 pages

Figure 9 : Mode de distribution de l'électricité dans les quartiers [Construction de l'auteur]



Stockage et relevé d'information

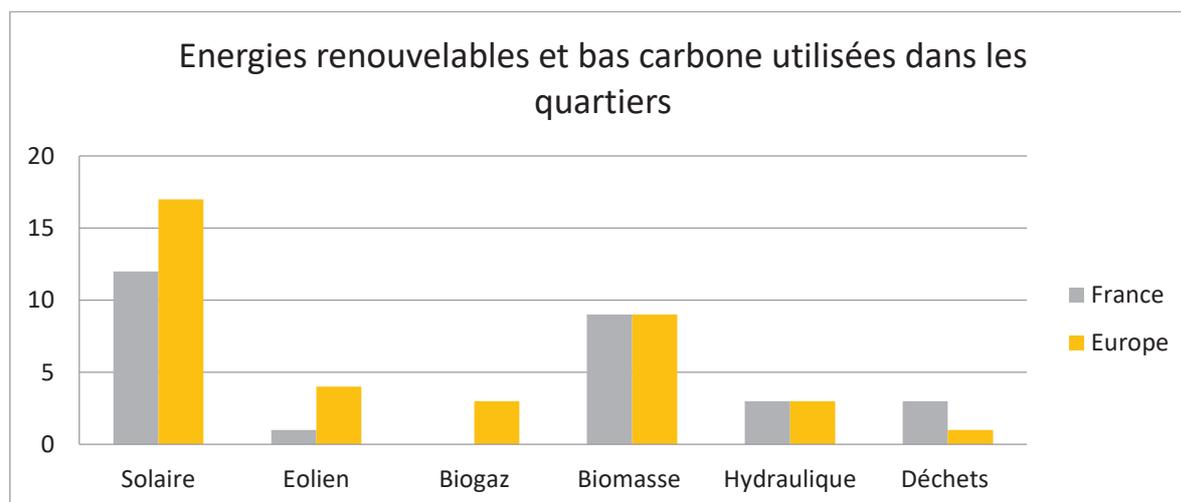
Le stockage électrique est absent des projets étudiés à l'exception d'un seul, l'Energy Hub Project à Tweetwaters en Belgique.

En ce qui concerne le relevé de consommation et/ou de production grâce à des compteurs intelligents, les projets sont encore marginaux. Toutefois, les propositions de suivi de consommation et/ou de production sont plus nombreuses pour l'électricité que pour la chaleur. Ainsi, on dénombre 14 projets proposant des suivis de consommation et/ou de production en Europe. La prise en compte d'une gestion dynamique des flux est seulement annoncée dans deux projets : GreenCity à Zurich en Suisse et l'Energy Hub Project à Tweetwaters en Belgique.

4.2.3.3. Les mix énergétiques des écoquartiers

Les énergies utilisées dans les mix énergétiques des écoquartiers sont essentiellement le solaire et la biomasse. L'énergie solaire est utilisée pour la production d'électricité avec le photovoltaïque et la production thermique avec les panneaux thermiques. La biomasse est essentiellement utilisée pour la production de chaleur avec des chaudières classiques ou en cogénération [Figure 10 : Energies renouvelables et bas carbone utilisées dans les quartiers].

Figure 10 : Energies renouvelables et bas carbone utilisées dans les quartiers [Construction de l'auteur]



L'éolien est très peu représenté en milieu urbain en raison de la faiblesse habituelle de la ressource. Toutefois des projets proposent d'utiliser l'éolien comme le projet Erlenmatt à Bâle en Suisse qui a composé son mix électrique avec 90% d'énergie hydraulique et 10% d'énergie éolienne.

La section appelée « déchets » représente les projets où la chaleur est produite grâce aux eaux usées et à la combustion des déchets. Ainsi, le projet à Cap Azur utilise des pompes à chaleur fonctionnant grâce à la récupération des calories des eaux traitées issues de la station d'épuration de Roquebrune-Cap-Martin. Ainsi, plus de 50% des besoins énergétiques de l'écoquartier en chauffage, climatisation et eau chaude sanitaire sont couverts. Le projet d'Alidhem en Suède propose une boucle de chaleur pour l'eau chaude sanitaire basée sur un système de recyclage des déchets grâce à l'incinération (31%) et d'utilisation de la biomasse à (60%).

Pour ce qui est du biogaz, les propositions sont présentes mais encore peu diffusées. L'énergie hydraulique est utilisée notamment pour produire de l'électricité mais nécessite bien entendu la présence d'un cours d'eau comme pour le projet GreenCity à Zurich ou le projet des Docks de Saint-Ouen à Saint-Ouen.

4.2.4. Les acteurs

Différents acteurs sont présents dans la réalisation des projets d'écoquartiers comme le met en valeur la diversité des profils d'acteurs recherchés dans la base d'information. Il est clair que la réalisation de ces derniers dépend d'un ensemble d'acteurs publics et privés dont la coordination est essentielle pour l'aboutissement du projet.

La base d'information n'est pas suffisamment précise pour qualifier le rôle des acteurs et leur influence dans la réalisation des projets. La variété des situations propres à chaque pays, voire à chaque projet rend tout aussi difficile l'établissement d'une liste d'acteurs-types. L'analyse du rôle des acteurs dans la gouvernance des projets se limite aux études de cas (Chapitre 2).

4.3. Bilan sur la base d'information

Au-delà des spécificités propres à chaque projet (taille, lieu, types de technologies choisies...), des caractéristiques communes se dessinent dans les écoquartiers. La recherche de l'efficacité énergétique dans les bâtiments est assez généralement annoncée et réalisée tandis que la mobilisation d'énergies renouvelables sur site est encore peu développée. Sur ce plan, les résultats montrent également un écart entre les ambitions affichées et la réalité du terrain.

La recherche de la performance énergétique concerne des bâtiments neufs : non seulement elle est plus élevée que la réglementation en vigueur mais elle fait aussi l'objet d'un suivi des consommations. Les quartiers durables étant majoritairement réalisés sur des friches urbaines, les constructions sont principalement neuves. Certains écoquartiers intègrent la réhabilitation ou la rénovation de bâtiments présents antérieurement au projet urbain ; la Caserne de Bonne à Grenoble a ainsi conservé un ancien bâtiment présent sur la friche militaire et le projet GreenCity à Zurich transforme l'ancienne usine présente sur la zone en un bâtiment d'habitation. Néanmoins ces projets de rénovation ou de réhabilitation ne constituent pas la majorité des réalisations architecturales dans les écoquartiers car leur objectif est souvent la modernisation de territoires délaissés. Une volonté de modernité et une recherche de performance qui se traduisent plutôt dans la construction de bâtiments neufs.

Les bâtiments construits dans les écoquartiers dépassent les réglementations en vigueur et préfigurent leurs futures évolutions. Il s'agit de tester la maturité des nouvelles technologies et la possibilité d'imposer sur les futurs nouveaux bâtiments neufs ou rénovés des niveaux de performance encore plus élevés. Cette volonté d'innovation a également l'avantage de renforcer l'image de modernité que veulent présenter les écoquartiers. L'utilisation des labels permet de mettre en avant le caractère innovant des réalisations et d'anticiper sur le renforcement de la réglementation. Le label français Bâtiment Basse Consommation (BBC) qui s'appliquait aux bâtiments dont la consommation inférieure à 50 kWh/m² a ainsi préparé le renforcement de la réglementation thermique pour les bâtiments neufs de 2012 qui impose un seuil de consommation identique alors que la consommation de référence dans la RT 2005 était de 150 kWh/m².

En ce qui concerne le suivi de la consommation, voire de la production décentralisée, grâce aux compteurs intelligents, on observe un décalage entre les objectifs formulés par la commission européenne et la réalité constatée sur le terrain. De manière générale, les compteurs intelligents sont

encore peu présents dans les projets et, lorsqu'ils le sont, leur usage est limité au suivi de la consommation d'électricité.

En ce qui concerne la production et la distribution, des différences importantes existent en matière de décentralisation des systèmes énergétiques entre la chaleur et l'électricité. Une majorité des projets infra-urbains dispose de système de production locale et de distribution de chaleur en réseau, que ce soit sur des réseaux en boucles fermées, et donc autonomes, ou sur des réseaux existants. Pour alimenter ces réseaux, différentes sources d'énergies renouvelables ou à faible niveaux d'émission sont mobilisées. La biomasse, en particulier, est largement mise à contribution avec ou sans cogénération, ainsi que la récupération d'énergie ou de sources de chaleur diffuses. Associées à de nouveaux réseaux basse température, ces ressources pourraient constituer les modes d'approvisionnement en chaleur bas carbone pour des villes du futur.

La prise en compte de la dimension locale apporte pour l'instant peu de changements visibles dans les systèmes d'approvisionnement électrique. La contribution de la production locale d'origine renouvelable reste faible par rapport à la consommation d'électricité des territoires urbains concernés. En dehors des productions issues des panneaux photovoltaïques et de l'hydraulique, peu de propositions sont réalisées à l'exception des systèmes de cogénération. Ces capacités de production sont insuffisantes pour satisfaire la totalité des besoins des consommateurs de ces territoires ainsi que pour contribuer de manière significative à leur approvisionnement électrique. L'origine de l'électricité consommée dans les projets d'écoquartiers fait donc encore largement appel aux énergies fossiles. Et même lorsque la production locale contribue de façon significative à l'approvisionnement électrique, le réseau de distribution du quartier est raccordé au réseau interconnecté pour assurer la stabilité et la sécurité de l'approvisionnement.

Lors de la réalisation de la base d'information, nous nous étions également intéressés à l'installation de capacités de stockage, thermiques ou électriques, mais celles-ci sont encore peu présentes dans les réalisations d'écoquartiers. Certains projets intègrent des stockages électriques mais à titre expérimental comme par exemple le projet Issy-Grid à Issy-les-Moulineaux. Au niveau thermique, le stockage est un peu plus présent mais reste largement minoritaire dans les territoires infra-urbains.

La base d'information montre que les choix techniques réalisés en matière d'approvisionnement énergétique, qu'il s'agisse de la chaleur ou de l'électricité, s'appuient rarement sur des innovations de rupture. En ce sens, elle confirme l'analyse issue du projet de recherche Ecoquartier Nexus Energie⁵⁸ qui comparait les similitudes et les différences entre les écoquartiers français et européens [Menanteau et al, 2014]. Les résultats de cette analyse comparative montrent que les projets français s'attachent plus à l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments qu'à la transformation du système d'approvisionnement énergétique. Ils sont en ce sens moins ambitieux et innovants que les écoquartiers européens. L'écart est peu marqué en ce qui concerne l'approvisionnement en chaleur, avec un développement comparable des réseaux en France et en Europe, mais il est particulièrement visible en ce qui concerne l'électricité, la production locale étant beaucoup moins développée dans les projets français.

5. Conclusion

En réponse au risque de changement climatique confirmé par la communauté scientifique au cours de ces dernières années, des politiques visant à engager un processus de transition énergétique vers des mix énergétiques bas carbone ont été mises en œuvre conjointement à diverses échelles nationales, internationale. A partir des années 90, un nombre croissant de villes européennes se sont emparées de ces problématiques et contribuent à explorer de nouvelles options pour un urbanisme plus durable et moins carbonés.

Dans ce cadre, le quartier apparaît comme un territoire intéressant pour l'expérimentation d'une ville plus durable. Il permet d'appréhender les problématiques urbaines sans se confronter à toute la complexité présente dans une ville. Il est employé dans un premier temps à la démonstration de futurs urbains portés par un projet politique ou par une volonté de démonstration technique. Certaines des nouvelles techniques se généralisent ensuite rendant moins singuliers les quartiers qui les adoptent. Il propose aussi des réponses à des problématiques urbaines comme l'étalement urbain, la gestion des flux ou encore la gouvernance. Le quartier devient un écoquartier.

Si l'énergie n'a pas toujours été l'élément central dans la réflexion sur les quartiers, cette thématique s'impose progressivement en raison des enjeux de transition énergétique. La demande et l'offre énergétique sont prises en compte dans ces nouveaux projets urbains. La demande énergétique est traitée sous l'angle de l'efficacité énergétique qui repose sur un ensemble de mécanismes dont la performance énergétique des bâtiments et de la maîtrise de la demande de l'énergie font partie. Les dispositifs

⁵⁸ Le projet Ecoquartier Nexus Energie regroupait un ensemble d'acteurs (collectivités, entreprises, chercheurs) avec une approche multidisciplinaire (sociologie, économie, politique urbaine,...). Il fut soutenu par un partenariat entre plusieurs laboratoires et institutions de recherche de Rhône-Alpes (PACTE, INNOVACS, UPMF, UJF, CNRS, CEA, Grenoble Ecole de Management) et un financement de l'ADEME. Le projet qui s'est déroulé de 2011 à 2015 est maintenant terminé.

d’approvisionnement énergétique sont conçus pour répondre à la demande de chaleur et d’électricité qui en résulte en exploitant au mieux les ressources énergétiques disponibles à l’échelle du quartier, et donc essentiellement des sources d’énergie renouvelable.

Les écoquartiers européens intègrent peu la rénovation thermique. Il s’agit de réaliser des projets avec des nouveaux bâtiments performants mobilisant des ressources locales parfois équipés de compteurs intelligents. En ce qui concerne l’offre d’énergie, l’approvisionnement privilégie la production locale – voire in situ – et nécessairement bas carbone. Il semble toutefois que les ambitions dans ce domaine ne présentent pas le même degré d’engagement selon qu’il s’agit de chaleur ou d’électricité.

Suite à l’analyse de la base d’information, certaines interrogations apparaissent. Premièrement, nous nous interrogeons sur les déterminants de la réalisation de projets énergétiques dans les écoquartiers. Deuxièmement, nous cherchons à comprendre pourquoi l’efficacité énergétique est davantage traitée que l’approvisionnement bas carbone. Pour cela des études de cas approfondies ont été réalisées à partir d’une sélection opérée sur la base d’information.

Chapitre 2 : Trois études de cas : analyses techniques, économiques et institutionnelles

1. Le choix de trois études de cas

Les projets identifiés dans la base d'information ont permis de déterminer un ensemble de résultats portant sur les ambitions des projets en matière de développement durable. En ce qui concerne la thématique énergie, deux tendances ont été mises en évidence dans le chapitre précédent [Chapitre 1]. Il s'agit d'une part, de la mise en pratique de l'efficacité énergétique et d'autre part, de l'ambition d'expérimenter de nouveaux modèles d'approvisionnement énergétique. L'efficacité énergétique tel que défini dans le chapitre 1 prend en compte la performance énergétique des bâtiments⁵⁹ et la maîtrise de la demande d'énergie. L'approvisionnement énergétique prend en compte, quant à lui, le choix des capacités de production et de dimensionnement des réseaux de distribution dans les territoires étudiés.

La conclusion de la base d'information est que les projets infra-urbains sont à l'heure actuelle majoritairement tournés vers l'efficacité énergétique. L'ambition semble moindre pour ce qui est de l'approvisionnement énergétique. Si des projets intègrent des capacités de production utilisant des énergies renouvelables et/ou une production locale, rares sont ceux qui annoncent pouvoir atteindre une production 100% bas carbone et locale sur leur territoire. Pour ce qui est de la distribution de l'énergie, les différences sont flagrantes entre la chaleur et l'électricité du point de vue des modèles mis en œuvre.

L'objectif des études de cas présentées ici est de confirmer les premiers résultats obtenus avec la base d'information en examinant de manière plus approfondie un nombre limité de cas d'études. En allant au-delà des informations immédiatement disponibles pour l'essentiel dans les plans de communication des collectivités à l'origine des projets, les études de cas ont pour vocation d'éclairer les processus amenant aux choix énergétiques lors de la réalisation des projets.

⁵⁹ Au sens de l'article 2 de la Directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments qui définit cette dernière comme « la quantité d'énergie calculée ou mesurée nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques liés à une utilisation normale du bâtiment, ce qui inclut entre autres l'énergie utilisée pour le chauffage, le système de refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude et l'éclairage; »

La simple lecture des plans de communication dont le but est de présenter un discours cohérent et clair sur le déroulement des projets ne permet en effet pas d'appréhender les subtilités du projet. Les éco-quartiers en tant que projets urbains sont le résultat d'un processus de prise de décision complexe et non linéaire entre différents acteurs (collectivités, entreprises privées, élus, techniciens, ...) qui est difficilement perceptible dans les plans de communication [Idt, 2012 ; Trender-Pittion, 2014]. Les études de cas doivent donc apporter un nouvel éclairage, en particulier, sur les déterminants politiques, techniques, économiques qui ont amenés à faire des propositions d'approvisionnement énergétique innovantes.

1.1. Sélection des études de cas

La sélection des études de cas a été réalisée à partir de l'échantillon constituant la base d'information. Afin de sélectionner les cas d'études, une grille de critères révélant les choix techniques pris en compte par les projets a été conçue. Cette grille comporte 19 caractéristiques prenant en compte à la fois la recherche de la performance énergétique du bâtiment (présence de labels, rénovations,...), l'approvisionnement électrique (production électrique photovoltaïque et hors photovoltaïque, véhicule électrique, suivi de consommation, stockage,...), l'approvisionnement thermique (présence de réseau de chaleur initialement, production renouvelables, stockage,...), la production locale (ie sur le territoire) et la gestion dynamique de l'énergie [Annexe 4 : Grille d'évaluation et Classement des éco-quartiers issus de la base d'information].

Les autres thématiques présentes dans la base d'information ont été volontairement exclues afin de sélectionner des réalisations présentant un certain niveau d'ambition sur le plan énergétique. Chaque occurrence vaut un point dont la somme donne une note générale. Par la suite, les projets ont été classés par ordre de mérite et les trois projets ayant obtenu le plus de points ont été sélectionnés⁶⁰ [Annexe 4 : Grille d'évaluation et Classement des éco-quartiers issus de la base d'information]:

- **GreenCity à Zurich** –Suisse- (15 points) ;
- **Projet Ecocité Grenobloise** –France- (13 points) ;
- **Queen Elizabeth Olympic Park à Londres** –Royaume-Uni- (12 points).

⁶⁰ Trois projets avaient reçu la note de 15 points. Outre les projets Greencity et Ecocité, il y avait également le projet Tweewaters à Louvain en Belgique. Ce dernier n'a pas été retenu car bien qu'affichant plusieurs innovations techniques, il présentait plus le caractère d'un démonstrateur que d'un projet urbain représentatif d'une tendance généralisée. Le projet anglais, arrivé en quatrième position, a alors été sélectionné.

1.2. Méthodologie des études de cas

Les études de cas ont été réalisées principalement sur la base d'entretiens menés avec des acteurs clés pour les projets GreenCity et Ecocité mais cela n'a pas été possible pour le projet Queen Elizabeth Olympic Park. Les acteurs ciblés ont été prioritairement les porteurs de projets présents dans les collectivités où s'élaborent les projets et les opérateurs de réseaux de distribution.

Pour les entretiens, il a été décidé de se baser sur la méthode de l'entretien semi-directif souvent employée en sociologie [Annexe 5 : Grille d'entretien]. Cette méthode qualitative repose sur la procédure suivante : l'enquêteur pose au début de l'entretien une question unique qui peut être perçue comme une consigne générale à l'enquêté ou aux enquêtés. A la suite de l'annonce de la consigne, le déroulement peut être conforme à une situation de non-directivité où l'enquêteur laisse parler librement l'enquêté. Néanmoins, si certains thèmes ne sont pas spontanément abordés durant l'entretien, l'enquêteur va les impulser dans l'ordre qu'il juge le plus opportun en les raccrochant aux thèmes discutés précédemment ou il peut aussi choisir de lancer des thèmes nouveaux. L'intérêt de cette méthode est de permettre l'approfondissement par l'enquêté de son discours et elle donne à l'enquêteur la possibilité de réaliser une comparaison des discours produits entre les différents acteurs interrogés [Kauffman, 2004 ; Bréchon, 2011]. Par la suite, les entretiens ont été retranscrits et croisés afin de produire une analyse du discours des enquêtés.

La réalisation des trois études de cas devait à l'origine reposer sur la même méthodologie. En raison de difficultés pour entrer en contact avec certains acteurs, rencontrer les interlocuteurs clés et en raison d'une contrainte temporelle, toutes les études de cas n'ont pas été approfondies avec le même niveau de détail.

Pour le quartier **Queen Elizabeth Olympic Park à Londres** (Royaume-Uni) il ne nous a pas été possible de rencontrer les acteurs clés du projet. La présentation du projet londonien est donc la plus succincte des trois études de cas mais elle s'appuie sur des documents de présentation détaillée des tenants et aboutissants du projet auxquels il nous a été possible d'accéder.

L'analyse du quartier **GreenCity à Zurich** (Suisse) repose essentiellement sur des entretiens réalisés avec le maître d'ouvrage du projet (Losinger Marazzi).

L'analyse de l'**Ecocité Grenobloise** repose aussi essentiellement sur plusieurs entretiens au cours du premier semestre 2015. La proximité des acteurs nous a permis de les rencontrer plusieurs fois et d'approfondir certaines thématiques tout en suivant l'évolution du projet.

2. Le projet Queen Elizabeth Olympic Park

Le projet Queen Elizabeth Olympic Park, situé dans le périmètre du Grand Londres ⁶¹(*Greater London*) en Angleterre, présente la particularité d'avoir été élaboré dans le cadre de la candidature de la ville de Londres aux Jeux Olympiques et Paralympiques de 2012⁶². C'est d'ailleurs la première fois qu'un projet de candidature olympique ambitionnait d'allier un projet d'urbanisme durable à la démesure infrastructurelle nécessaire à un tel évènement [Lowenstein, 2012]. On retrouve ici certains éléments figurants dans les quartiers réalisés en Europe à la fin des années 1990 dont l'ambition était de promouvoir un nouvel urbanisme tout en réalisant des performances techniques sur le périmètre.

Au niveau énergétique, ce projet est présenté comme le plus grand projet de production décentralisée d'énergie du Royaume-Uni. Ainsi, il a été prévu une production de chaleur, de froid et d'électricité sur le périmètre, en particulier grâce à deux unités de production installées dans le quartier. Outre, une réflexion poussée sur la production, des engagements ambitieux en matière d'efficacité énergétique ont été pris pour les bâtiments construits sur le territoire [LLDC, 2012a]. Ce projet d'envergure tant pour les conditions de sa réalisation que pour son projet énergétique en font un cas d'étude intéressant dans le but de mieux comprendre les facteurs qui ont orienté les choix énergétiques.

2.1. Une réalisation en deux temps

Le quartier Queen Elizabeth Olympic Park est réalisé sur une ancienne friche industrielle extrêmement polluée. Sur ce territoire laissé à l'abandon s'est déroulé une grande partie des Jeux Olympiques de 2012. Il est devenu ensuite un territoire urbain basé sur les piliers du développement durable [LLDC, 2012b].

2.1.1. La localisation

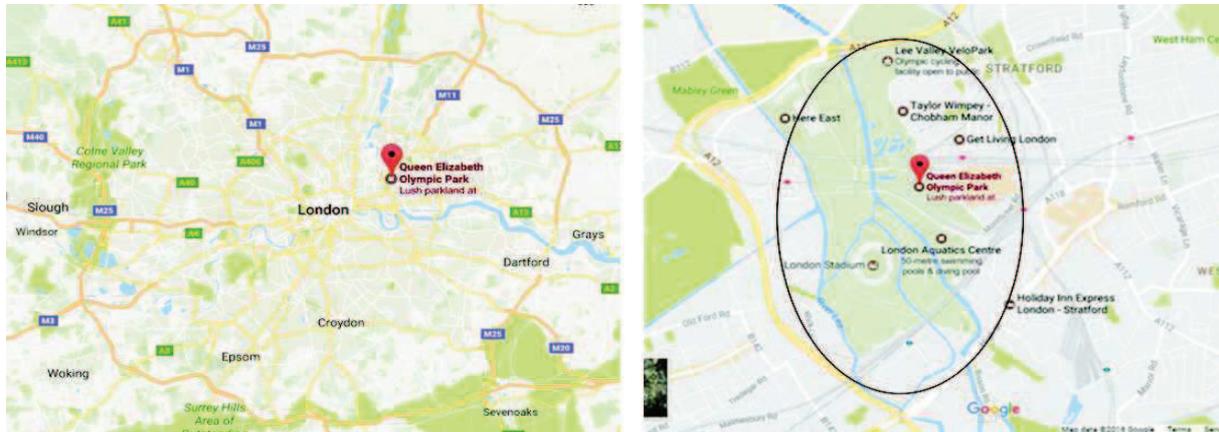
Queen Elizabeth Olympic Park se situe des deux côtés de la rivière Léa dans le Lower Lea Valley et occupe près de 250 hectares. Le parc olympique est au centre du développement du projet néanmoins le territoire couvert par le projet dépasse celui-ci en couvrant une zone plus large afin d'intégrer dans les plans directeurs d'autres projets plus marginaux. Ainsi, les communautés déjà existantes de Hackney Wick, Fish Island, Bromley-by-Bow, Leyton et Stratford à Stratford City ont également fait l'objet de

⁶¹ Le Grand Londres (*Greater London*) est une échelle administrative anglaise créée en 1965 pour administrer la capitale britannique. Le territoire s'étend sur 1 572 km² et concentre environ 14 millions d'habitants en 2015. Ce territoire est administré par une collectivité locale disposant de larges responsabilités depuis 2000 (*Greater London Authority*). Il est subdivisé en 32 arrondissements qui sont administrés par un conseil d'arrondissement. Il est également considéré comme une région anglaise depuis 1994 et il équivaut à une circonscription au Parlement Européen depuis 1999.

⁶² Les Jeux Olympiques se sont déroulés du 27 juillet 2012 au 12 août 2012. Les Jeux Paralympiques se sont quant à eux déroulés du 29 août au 9 septembre 2012.

plans d'aménagement [Carte 1 : Localisation du Parc Olympique Reine Elizabeth par rapport à Londres] [LLDC, 2012b].

Carte 1: Localisation du Parc Olympique Reine Elizabeth par rapport à Londres - source : Google Maps-



2.1.2. Chronologie générale du projet⁶³

Queen Elizabeth Olympic Park est un projet de développement urbain issu d'une réflexion engagée lors de la candidature de la ville de Londres aux Jeux Olympiques et Paralympiques de 2012. Si la décision de rénover l'ancienne friche industrielle s'explique par la candidature à l'évènement sportif, les porteurs du projet souhaitaient transformer cette zone pour en faire une destination majeure de l'est Londonien à l'issue des jeux. Cette décision était motivée par la présence d'un haut niveau de services et d'infrastructures [LLDC, 2012b]. Le projet a réellement débuté en 2007 lorsque l'autorisation de planification et de construction a été accordée par l'*Olympic Delivery Authority* (ODA). Le projet est divisé en trois phases représentant trois périodes : la mobilisation, la transformation et la régénération [LLDC, 2012 a&b].

La phase de mobilisation, qui s'étale de 2009 à 2012, permet l'élaboration de différents projets environnementaux par l'ODA, la LLDC et la *London Organizational Committee of the Olympic and Paralympic Games* (LOCOG). Ces acteurs se centrent sur les projets de développement du réseau de chauffage urbain du site, l'utilisation des eaux non potables et leur traitement, et le développement d'une stratégie de lutte contre le gaspillage dans la zone du Parc [LLDC, 2012a].

La phase de transformation débute lorsque la *Development Corporation* prend l'entière propriété du Parc en 2012 et elle se termine en 2015. Cette période permet d'assurer la transition entre l'organisation d'un évènement international sur le territoire et la création d'un territoire attractif pour la vie quotidienne des londoniens. Durant cette période, les différents quartiers sont connectés grâce à un ensemble de

⁶³ Annexe 6 : Chronologie du projet Queen Elizabeth Olympic Park

service d'intendance, la création d'une trame verte, la labellisation BREEAM des salles et l'organisation d'évènements visant à rendre attractif le Parc.

La phase de régénération qui aura lieu entre 2015 et 2030 est la plus longue. Elle est considérée comme la phase de développement des quartiers durables sur la zone. Durant cette période, 8 000 habitations répondant aux critères de durabilité les plus élevés ainsi qu'un ensemble d'infrastructures offrant des services pour la communauté (écoles, crèches, centres de santé) doivent être construits. Les innovations et les nouvelles technologies seront aussi implantées pour favoriser le développement durable du territoire (biodiversité, recyclage, ...).

2.1.3. L'aménagement urbain après les Jeux Olympiques

L'aménagement de l'écoquartier prend en compte l'ensemble des thématiques du développement durable. Les volets économiques et sociaux du projet sont présentés dans un premier temps avant le développement de la partie liée à l'environnement. La thématique énergétique est traitée dans une autre partie.

Mixité sociale et mixité fonctionnelle

Comme indiqué plus haut, plus de 8 000 habitations réparties dans cinq quartiers doivent être construites au cours de la 3eme phase du projet [Carte 2 : Aménagement du Parc Olympique Reine Elizabeth] :

- Une zone résidentielle Sweetwater à l'est de Fish Island ;
- Des bâtiments résidentiels et tertiaires à East Wick à l'est de Hackney Wick ;
- Un quartier résidentiel, Chobbam Manor, à l'ouest de Leyton ;
- Marshgate Wharf un quartier à forte densité le long des quais de Stratford ;
- Pudding Mill qui est un quartier mixte dans ces usages attenants à Greenway et Pudding Mill.

Les habitations réalisées sont inspirées par l'héritage architectural londonien qui se traduit par la présence de maisons mitoyennes, de maisonnettes, de nouvelles habitations, d'immeubles ruraux (*storey mansion blocks with apartments*), d'immeubles urbains (*storey urban blocks with apartments*) ainsi que de grandes tours d'immeubles dans certaines zones [Carte 2 : Aménagement du Parc Olympique Reine Elizabeth] [LLDC, 2012b]. Au niveau des infrastructures sociales, deux écoles primaires et une école secondaire sont prévues ainsi qu'une bibliothèque, une crèche, des centres communautaires et des centres de santé. Outre des habitations et les infrastructures sociales, le parc accueille des activités tertiaires (zone commerciale, cluster digital, ...) des espaces industriels installés dans la zone de Pudding Mill [LLDC, 2012b].

Carte 2 : Aménagement du Parc Olympique Reine Elizabeth - source : LLDC, 2012b, p29



Les ambitions environnementales

Outre, l'énergie, le projet Queen Elizabeth Olympic Park a également fait l'objet d'une réflexion importante sur d'autres thématiques environnementales comme la biodiversité, les déchets et l'eau. La mobilité a également été prise en compte avec la promotion des transports en commun et de la mobilité douce.

Différents espaces (prairies, bois friches, parcs et espaces de loisirs, rivières, toits végétalisés pour un total de 45 ha) permettent de favoriser la biodiversité sur le site [LLDC, 2012a, 2014].

De même, le recyclage des déchets a été pris en compte avec l'objectif d'atteindre le zéro déchets directs en réduisant au maximum leur production et en favorisant le plus possible le recyclage et la réutilisation. L'objectif est de recycler à hauteur de 60 % les déchets domestiques à l'horizon 2020 contre 32% de recyclage en 2012 à Londres [LLDC, 2012a]. Lors de la construction des projets, il a été demandé à réutiliser au minimum 50% des déchets engendrés lors de la déconstruction de certains ouvrages [LLDC 2014].

Une réflexion a également été engagée sur l'eau : « *using every drop* ». L'objectif est de réduire les usages de l'eau potable dans les habitations afin que la consommation arrive à 90 litres par personne et par jour contre 142 litres par personne et par jour en moyenne au niveau national. L'eau consommée peut provenir d'eau recyclée et des réflexions sont en cours pour approvisionner certains usages dans les habitations à partir des réseaux d'eau non potable [LLDC, 2012a, 2014].

La mobilité

Le quartier Queen Elizabeth Olympic Park a l'ambition de devenir l'une des zones les plus connectées de Londres en termes de réseaux de transports en commun. L'ambition est qu'aucune habitation ne soit à moins de 350 mètres d'une station de bus. Pour faciliter la fluidité du transport, en commun ou individuel, plus de 30 ponts et passages souterrains ont été aménagés et la route A 12 est proche du parc. Des bornes pour les véhicules électriques ont aussi été intégrées dans le parc et des pistes cyclables ainsi que des voies pédestres ont été développés dans le Parc pour favoriser les modes de transport doux [LLDC, 2012a&b, 2014].

2.2. Les acteurs du projet

La candidature aux Jeux Olympiques de 2012 a été portée par l'Etat britannique et le Grand Londres dans le but de construire un projet novateur autour du concept de legs olympique (*Olympic legacy*) qui vise à renouveler profondément le paysage urbain. Cet objectif de renouvellement urbain permet à l'Etat et à la municipalité de substituer à Stratford, une banlieue industrielle londonienne en déclin, un territoire plus attractif dans un contexte de métropolisation. Pour réaliser ce « legs » dans le court temps imparti et les conditions exceptionnelles de la réalisation des Jeux, ces deux acteurs vont dessaisir les autorités

locales de leurs compétences en aménagement. Deux organes de planification spécialement créés pour les jeux remplacent ainsi les acteurs classiques de planification urbaines⁶⁴ : l'*Olympic Delivery Authority* (ODA) et le *London Organising Committee for the Olympic and Paralympic Games* (LOCOG). Le LOCOG est l'organisme temporaire sous tutelle du gouvernement britannique en charge de l'organisation de la manifestation sportive [Appert, 2012 ; LLDC 2012b].

L'*Olympic Delivery Authority* (ODA) est l'organisme statutaire responsable de l'aménagement des sites olympiques. Il a pris la suite de la London Development Agency⁶⁵ (LDA) et du Transport for London⁶⁶ (TfL) en 2006, à la fin des travaux préparatoires réalisés par ces derniers. Le comité de direction de l'ODA regroupe des membres de la Greater London Authority, de la London Thames Gateway Development Corporation qui gère les permis de construire sur le site et ses alentours, des représentants du monde de la culture et de l'immobilier ainsi qu'un représentant du syndicat des transports. Le rôle de cet organisme est d'assurer le bon déroulement des Jeux mais également d'aider à la transformation du parc en un territoire attractif à la suite de l'événement sportif [Appert, 2012].

La *London Legacy Development Corporation* (LLDC), qui a repris la direction du Parc Olympique Queen Elizabeth à la suite de l'*Olympic Park Legacy Compagny*⁶⁷ en Octobre 2012, est une corporation⁶⁸ créée par la mairie de Londres afin de mettre en œuvre les promesses incluses dans le dossier de candidature aux Jeux Olympiques de la ville de Londres. Son rôle est de développer l'est londonien et plus particulièrement le parc Olympique dans le quartier de Stratford dans une optique de développement durable au niveau économique, social et environnemental⁶⁹ [LLDC, 2014].

⁶⁴ Annexe 7 –Comparatif des procédures d'aménagement classique et spécifique aux Jeux Olympiques–

⁶⁵ La London Development Agency est l'agence régionale de développement économique de Londres.

⁶⁶ Transport for London est l'organisme en charge du transport en commun à Londres.

⁶⁷ Créé en 2009

⁶⁸ Les sociétés de développement (*Development Corporation*) sont des organismes créés en Angleterre et au Pays de Galles par le gouvernement britannique. Elles sont en charge du développement urbain d'une zone, en dehors du système habituel de planification urbaine et territoriale du Royaume-Uni. Le Localism Act de 2011 a établi que la Mairie de Londres pouvait créer des sociétés de développement en son nom (*Mayoral Development Corporation*) dans le cadre du Grand Londres. Depuis 2012, deux corporations ont été créées : *London Legacy Development Corporation* pour le Queen Elizabeth Olympic Park en 2012 et *Old Oak and Park Royal Development Corporation* pour le Old Oak Common en 2015. La possibilité donnée à la mairie de Londres de créer ses propres corporations a été donnée par le *Localism Act* en 2011. Cette loi du Parlement fait évoluer le pouvoir des gouvernements locaux en Angleterre ; le but étant de faciliter la décentralisation du pouvoir de prise de décisions du gouvernement central aux administrations locales.

⁶⁹ La LLDC a de nombreux rôles et responsabilités dont certains s'étendent au-delà des limites du parc lui-même pour mener à bien les ambitions du projet. Premièrement, la LLDC a pour ambition d'utiliser une partie des terrains dont elle est propriétaire pour réaliser un nouveau quartier d'habitation au niveau de Chobham Manor. Deuxièmement, la LLDC est également gestionnaire immobilier. Elle doit donc surveiller l'entretien du parc et de certains lieux comme le London Aquatics Centre, le Copper Box Arena, ArcelorMittal Orbit, le Stade, The Podium et le Timber Lodge Café et le centre communautaire. Troisièmement, la LLDC est également une autorité de planification locale qui est responsable de la publication d'un plan local d'urbanisme qui expose les principes que doivent suivre les promoteurs souhaitant construire sur la zone. Quatrièmement, la LLDC est aussi un employeur qui emploie environ 130 salariés pour s'occuper de la zone et pour organiser des événements en tant qu'hôte [LLDC, 2014].

Cofely⁷⁰ est responsable des centres d'énergie et des réseaux d'infrastructure sur le site grâce à un contrat de concession passé avec l'ODA et Stratford City Developments Ldts. L'entreprise a pris en charge le financement mais également le design et la réalisation des centres. Elle doit également assurer le fonctionnement et la maintenance. Elle gère ainsi non seulement la production et la distribution mais aussi l'achat de toute l'énergie primaire (gaz, électricité, carburants renouvelables) qui sera convertie en chaleur, en froid et en électricité. Cofely a obtenu que tout développement résidentiel ou tertiaire du parc soit connecté au réseau dont elle a la gestion. Elle définit également les prix des énergies pour les différents consommateurs finaux [Woods, 2015]. Le coût total des Jeux Olympiques de 2012 a été estimé à 10,3 milliards d'euros.

2.3. Le projet énergétique du Queen Elizabeth Olympic Park

Queen Elizabeth Olympic Park est présenté comme le plus grand projet de production d'énergie décentralisée du Royaume-Uni avec une production de chaleur, de froid et d'électricité réalisée sur deux sites situés à l'intérieur de l'éco-quartier. La performance énergétique dans les bâtiments a aussi reçu une attention toute particulière.

2.3.1. L'efficacité énergétique

Les bâtiments répondent aux ambitions environnementales définies par le gouvernement britannique en termes de consommation bas carbone⁷¹. Certains de ces engagements, contenus notamment dans le *Low Carbon Plan*⁷² et le *Green Deal*⁷³, concernent l'écoconception. Ces textes énoncent plusieurs actions, politiques, économiques ou techniques, à réaliser afin de promouvoir l'efficacité énergétique et notamment la performance énergétique des bâtiments. A partir de 2016 toutes les nouvelles maisons doivent être neutres en carbone et tous les nouveaux immeubles à partir de 2019 [LLDC, 2012a&b].

A l'intérieur des habitations, l'objectif est de réduire au maximum la consommation énergétique grâce à différents outils et démarches. Des compteurs intelligents sont installés pour aider les habitants à se familiariser avec la question énergétique et prendre conscience de leur consommation énergétique. Un premier objectif est de sensibiliser les habitants afin d'amener une évolution de leur comportement. Le second objectif est qu'ils puissent monitorer leurs consommations énergétiques grâce à la connaissance

⁷⁰ Cofely est une société française de service énergétique spécialisée dans la performance énergétique.

⁷¹ Les aspects techniques attendus dans la réalisation des bâtiments sont regroupés dans le Code for Sustainable Home. Le guide technique de 2010 fait référence aux technologies permettant d'abaisser les émissions carbone grâce à l'utilisation des énergies renouvelables listées dans la Directive 2009/28/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables [Communities and Local Government, 2010].

⁷² Le *National Planning Policy Framework* a été publié par le Département des Communautés et du gouvernement local en mars 2012. Il consolide deux douzaines de documents publiés antérieurement et regroupés dans le *Planning Policy Statement* et le *Planning Policy Guidance Notes*.

⁷³ Le *Green Deal* est un plan du gouvernement britannique lancé en 2013 qui permet aux consommateurs d'améliorer l'efficacité énergétique de leur habitation par un système de prêts remboursés par les gains énergétiques réalisés.

de leur profil de consommation [LLDC, 2012a]. Les bâtiments sont conçus pour tirer le meilleur parti de l'environnement (bioclimatisme). L'objectif est d'obtenir le plus grand confort de la façon la plus naturelle possible en employant le moins possible de moyens mécanisés et de sources d'énergie extérieures au site, en profitant au maximum du soleil en hiver et en s'en protégeant en été [LLDC 2012a, 2015].

La labellisation des bâtiments n'est pas mise en avant dans les communications du projet Queen Elizabeth Olympic Park. Néanmoins, certaines réalisations ont été labellisées BREEAM⁷⁴. C'est le cas du Timber Lodge Cafe. Cette labellisation montre la bonne qualité de réalisation du bâtiment, le bon emploi des matériaux et une consommation exemplaire. Si tous les bâtiments ne sont pas labellisés, les aménageurs ont tenté de s'en approcher en dépassant largement les réglementations en vigueur [LLDC, 2012a, 2014 ; Hyder Consulting Limited, 2013].

2.3.2. L'approvisionnement énergétique du parc

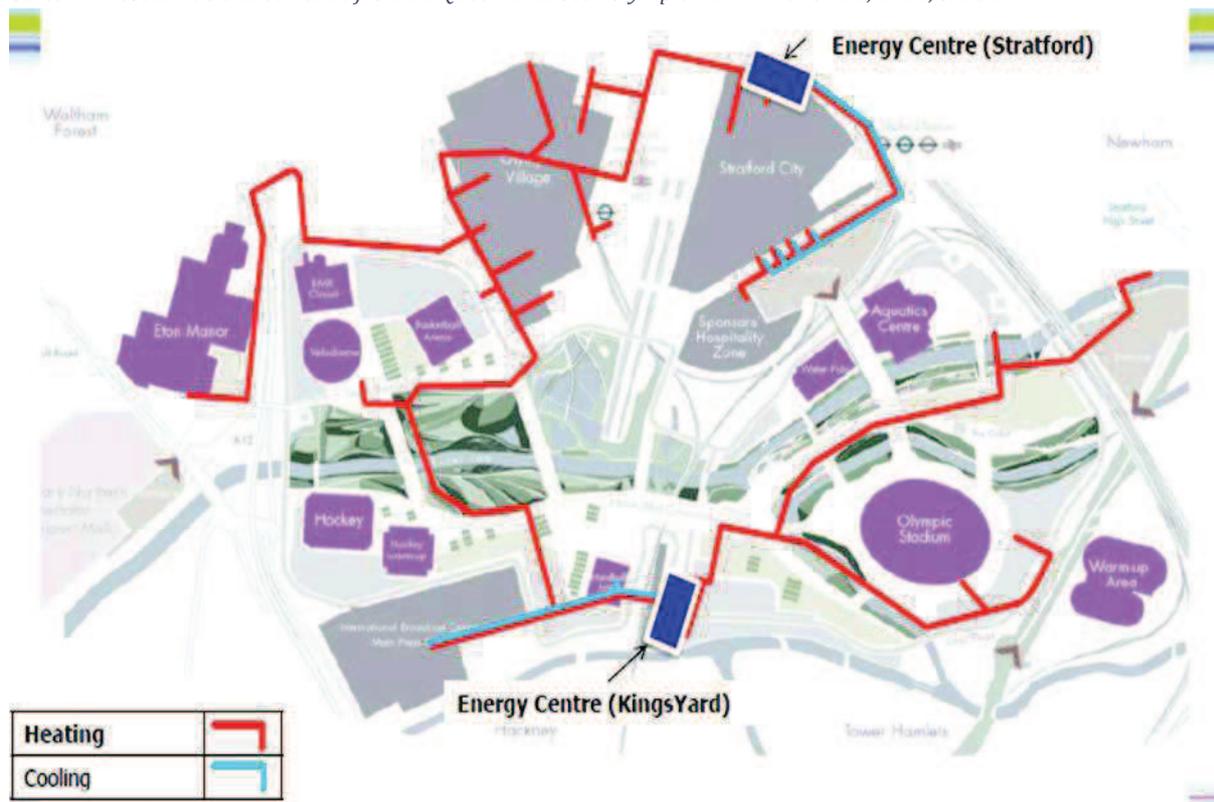
Le projet Queen Elizabeth Olympic Park est considéré comme le plus grand projet de production d'énergie décentralisée du Royaume-Uni. La majorité de l'énergie consommée dans le parc est produite sur deux sites situés dans le parc qui produisent de la chaleur, du froid et de l'électricité. L'objectif est de limiter les émissions carbone grâce à la production décentralisée et d'atteindre une réduction des émissions sur le site de 31% par rapport à un approvisionnement classique [McDonald, 2012].

L'approvisionnement énergétique

La construction des sites de production a débuté en 2008. Le premier centre énergétique (Stratford City) fournit en chaleur et en froid les neuf plus grandes salles de compétitions sportives situées dans le Parc Olympique, le village Olympique et l'International Broadcast & Media Centre. Le second centre énergétique (Kings Yard) fournit les mêmes services pour le WestField's Broadcast & Media Centre [Carte 3 : Réseaux de chaleur et de froid du Queen Elizabeth Olympic Park] [Mc Donald, 2012 ; Grigoryan, 2015].

⁷⁴ Le label BRE Environmental Assessment Method (BBREAM) est une méthode d'évaluation du comportement environnemental des bâtiments proposée par le Building Research Establishment un organisme privé de recherche en bâtiment britannique. Il est l'équivalent des labels Haute Qualité Environnemental (HQE) français, LEED en Amérique du Nord ou encore GreenStar en Australie. Les conditions d'obtention du label ont été développées dans le Chapitre 1.

Carte 3 : Réseaux de chaleur et de froid du Queen Elizabeth Olympic Park – McDonald, 2012, slide 22-



La station Kings Yard Energy Centre est une centrale d'une capacité de production de 3,1 MWe en cogénération, 4 MW de froid, 3,5 MW de centrale biomasse, 40 MW de chaudière conventionnelle (gaz) et de 14 MW VC de froid. La station de Westfield Stratford a une capacité de production avec deux fois 3,1 MWe de cogénération, 4 MW de froid, 40 MW de chaudière conventionnelle et de 35 MW VC de froid. La construction des deux centres énergétiques et des 16 km de lignes fournissant la chaleur et l'eau réfrigérée a été terminée en 2010 [Tableau 5 : Capacités de production cumulées des deux centres énergétiques sur le parc] [Woods, 2015].

De plus, des panneaux photovoltaïques doivent être installés sur les toits du Media Press Centre, du parking, du Timber Lodge Café et sur du mobilier urbain⁷⁵ pour augmenter la capacité de production électrique sur le site [LDDC, 2012a, 2014].

⁷⁵ Site PowerCor : <http://www.powercor.co.uk/blog/working-on-solar-pv-at-queen-elizabeth-olympic-park/> consulté en novembre 2016

Tableau 5 : Capacités de production cumulées des deux centres énergétiques sur le parc [Construction de l'auteur]

Technologie	Capacité de production totale sur le parc
Cogénération (CHP plant)	9,5 MW
Chaudière conventionnelle (boiler plant)	83,5 MW
Capacité de refroidissement	57 MW

Il est prévu une capacité combinée allant jusqu'à 200 MW de chauffage, 64 MW de refroidissement et 30 MW d'électricité sur le site grâce au réseau énergétique construit sur le parc. Ce réseau constituera une réponse à l'ambition de réaliser un parc Olympique bas carbone dans les années à venir avec la réalisation des nouvelles constructions (maisons et bâtiments tertiaires) [Grigoryan, 2015].

La tarification

Cofely a obtenu la concession pour l'approvisionnement énergétique du parc pendant 40 ans et a investi 113 millions de livres sterling dans la réalisation du projet des centres énergétiques. Le contrat de concession⁷⁶ signé entre Cofely East London Energy, Stratford City Developments Ltd et l'Autorité de Délégation Olympique contient plusieurs engagements pour Cofely. En échange de la fourniture exclusive d'énergie sur la zone, Cofely gère la construction, l'installation, l'exploitation et la maintenance des centres énergétiques. Elle gère également l'achat de l'énergie primaire nécessaire (gaz, électricité et carburant vert), les processus de conversion de ces énergies primaires en chaleur, froid ou électricité tout en minimisant les émissions de carbone, et la distribution de chaleur aux consommateurs à travers le réseau. Les bâtiments qui seront construits par la suite sur le parc devront être obligatoirement raccordés au réseau d'infrastructures dont Cofely a la concession [Woods, 2015].

Cofely fixe les prix de vente de l'énergie sur la zone. Il est ainsi prévu que le prix de la chaleur soit équivalent au prix de la chaleur produite avec un système conventionnel [Woods 2015]. Le système tarifaire pour la chaleur et le refroidissement est structuré sur une base classique avec une part fixe représentant le coût d'amortissement de l'infrastructure (kW) et une part variable représentant le coût d'usage (kWh) pour le consommateur que celui-ci soit un consommateur résidentiel ou commercial. Les factures payables par tous les clients pour la fourniture de chauffage sont déterminées par une formule de contrôle des prix indexés sur différents indices (Heren Index NBP-GAs RPIX index of inflation et BEAMA Labour Cost Price Index) [McDonald, 2012].

⁷⁶ Le contrat de concession est un contrat liant un fabricant à un revendeur dans le cadre d'un réseau de distribution. En vertu de ce contrat, le concédant distribue ses produits à un concessionnaire. Ce dernier s'engage à acheter les produits du concédant pour les vendre. Le concédant s'engage à travers le contrat de concession à fournir ses produits de manière exclusive à son concessionnaire sur une zone géographique donnée [Roig, 2014]

2.4. Conclusion du projet Queen Elizabeth Olympic Park

Le projet Queen Elizabeth Olympic Park a pour ambition de donner une seconde vie à une ancienne friche industrielle. Réhabilité dans le cadre de la participation des Jeux Olympiques par la ville de Londres, le projet est axé sur les enjeux de développement durable. Ainsi, il est proposé un renouvellement urbain basé sur la mixité sociale et fonctionnelle avec la construction de lieux de résidence et des commerces tout en conservant les infrastructures sportives. Outre, la réflexion autour de la durabilité comme élément différenciant dans la réalisation de l'évènement international, le projet énergétique apporte également une réflexion innovante en matière de décentralisation et de production bas carbone. Il est ainsi présenté comme l'un des plus ambitieux du Royaume-Uni.

Le traitement de l'approvisionnement énergétique est traité de manière différente selon qu'il s'agit d'électricité ou de chaleur. L'approvisionnement local en électricité est très restreint malgré la présence d'une centrale de cogénération et de panneaux photovoltaïques. L'innovation se situe essentiellement sur l'approvisionnement en chaleur qui est structuré autour de deux systèmes de production. Ces derniers ont été initialement raccordés aux infrastructures sportives avant de l'être aux différents quartiers d'habitation.

Le projet Queen Elizabeth Olympic Park fait échos aux projets d'éco-quartiers réalisés dans les années 1990 dans le cadre de la participation de collectivités à de grands évènements internationaux comme le projet Hammarby Sjöstad à Stockholm. L'innovation est de produire localement avec une infrastructure technologiquement mature et avec une réflexion sur un mix énergétique bas carbone.

3. Le projet GreenCity à Zurich

L'éco-quartier zurichois Greencity propose un approvisionnement énergétique à 100% issu des énergies renouvelables pour l'électricité, la chaleur et le froid. Ce projet est structuré autour du concept de la Société à 2 000 Watts dont l'ambition est d'atteindre une société moins consommatrice d'énergie en réduisant dans le même temps les émissions de carbone. Initialement utilisé à l'échelle nationale, ce concept a été décliné progressivement sur les différentes échelles territoriales de la Suisse. Aujourd'hui, il structure les réflexions de la politique énergétique de l'ensemble des échelles administratives suisses, et donc en particulier la ville de Zurich. L'utilisation de ce concept et la réflexion autour d'un approvisionnement énergétique local bas carbone offrent une proposition poussée d'un approvisionnement énergétique décentralisé dans une perspective de transition énergétique.

Ce projet se distingue des deux autres études de cas par sa philosophie particulière et les choix techniques réalisés. Il est réalisé autour d'un concept qui propose une réflexion sur la transition énergétique et se décline de l'échelle nationale à l'échelle locale. Au niveau technique, la proposition est particulièrement aboutie en matière de décentralisation bas carbone locale. Contrairement aux deux études de cas, les trois flux énergétiques principaux (électricité, chaleur et froid) sont produits localement grâce à des énergies renouvelables, à l'intérieur ou à l'extérieur du quartier.

3.1. La démarche dans laquelle s'intègre le projet GreenCity : la Société à 2 000 Watts

Naissance et définition du concept de la Société à 2 000 Watts

Le concept de société à 2000 Watt a été élaboré à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich par le laboratoire Novatlantis⁷⁷ dans les années 1990. Ce laboratoire est à l'origine d'une réflexion sur les moyens de réaliser un approvisionnement énergétique durable en prenant en compte le risque de changement climatique, les enjeux de développement économique et social et l'augmentation de la consommation énergétique à l'échelle mondiale. L'objectif était de permettre un développement durable à long terme, et pour cela de fixer un plafond de consommation de 2000 W par habitant et par an qui équivaut à la moyenne mondiale de consommation énergétique des années 2000⁷⁸ [Figure 11 : Energy use per time and capita in various countries and within countries] [Spreng, 2005].

⁷⁷ Le programme NOVANTLIS –la durabilité dans le domaine des Ecoles Polytechniques Fédérales- est une interface entre la recherche, l'industrie, la société civile et le secteur public. L'objectif est de contribuer à un développement durable de façon permanente pour la société en tenant compte des aspects environnementaux, économiques et sociaux. Les recherches issues du programme sont transdisciplinaires et ont pour ambition de fournir des résultats tangibles et utilisables par les collectivités.

⁷⁸ Le calcul permettant de retrouver les chiffres clés annoncés par la Société à 2000 Watts est le suivant. Il s'agit d'une énergie annuelle exprimée en terme de puissance moyenne : $2'000W * 8760h = 17500 kWh = 1.75 tep / hab$. La puissance continue de consommation exprimée se rapporte à la consommation en énergie primaire résultant d'une puissance continue et d'un facteur temps. L'énergie grise n'est pas prise en compte directement. Société à 2000 Watts.com, consulté en janvier 2016,

cours des trente prochaines années. Dans le même temps, les émissions de gaz à effet de serre devront être réduites par quatre afin de passer de 8,5 tonnes de CO₂ par habitant et par an à 2 tonnes par habitant et par an en 2050. Les objectifs globaux de la Société à 2 000 Watts ne pourront être réalisés qu'à l'horizon 2150⁸⁰ [Tableau 6 : Valeur 2005 et 2012 et valeurs cibles à atteindre pour la réalisation de la société à 2 000 Watts en Suisse, selon la consommation d'énergie finale (gauche) et la consommation globale (pondérée)] [Cité de l'énergie, 2012, Suisse Energie, 2014a].

Tableau 6 : Valeur 2005 et 2012 et valeurs cibles à atteindre pour la réalisation de la société à 2 000 Watts en Suisse, selon la consommation d'énergie finale (gauche) et la consommation globale (pondérée) –source : Suisse Energie, 2014a, p 1-

Tableau 1:
Valeurs 2005 et 2012 et valeurs cibles à atteindre pour la réalisation de la société à 2000 watts en Suisse, selon la consommation d'énergie finale (gauche) et la consommation globale (droite).

	Consommation d'énergie finale pondérée				Consommation globale pondérée			
	2005 Valeur effective	2012 Valeur effective ¹	2050 Valeur cible	2100 Valeur cible	Bal- ance import/ export ²	2005 Valeur effective	2012 Valeur effective	2150 Valeur cible
Energie primaire globale en watt de puissance continue par personne	6300	5500	3500	2000	2000	8300	7500	2000
Emissions de GES ³ en tonnes par personne et par an	8.6	7.2	2.0	1.0	4.2	12.8	11.4	1.0

1 La moyenne suisse de 5900 watts figurant dans la version originale intégrale ne prend pas en compte le mix d'électricité suisse pour l'année 2012, dont les chiffres n'étaient pas encore connus au moment de la publication. Ceci explique la différence avec la valeur mentionnée dans le présent document. Le mix d'électricité suisse est en effet relevé tous les deux ans. Le dernier relevé date de 2013 et a été publié en juin 2015 (rapport sur le marquage de l'électricité 2013 / OFEN / juin 2015, en allemand).

2 Etude Jungbluth et al. (2012), année de référence 2005.

3 Les émissions de GES non liées à des processus énergétiques en Suisse (fabrication du ciment, agriculture) ne sont pas comptabilisées.

3.2. Intégration du concept Société à 2 000 Watts dans la politique énergétique helvétique

L'élaboration du concept de Société à 2 000 Watts impacte la politique énergétique suisse en étant un vecteur de réflexion pour l'approvisionnement énergétique au niveau national. Il devient également un argument de politique énergétique au niveau cantonal en étant inscrit dans les textes législatifs.

⁸⁰ Ces objectifs doivent être atteints en 2100 si l'on exclut la balance import/export d'énergie grise pour les biens et services, respectivement 2150 si l'on inclut la balance import/export d'énergie grise pour les biens et les services.

3.2.1. La politique énergétique Suisse à l'horizon 2050

Présentation du mix énergétique Suisse

La production indigène⁸¹ suisse en 2015 est issue de l'énergie hydraulique (142 150 TJ), de l'énergie issue des déchets ménagers et industriels (56 630 TJ), de l'énergie du bois (38 060 TJ), de l'énergie issue de d'autres énergies renouvelables (26 000 TJ)⁸². A cette production indigène de 262 840 TJ, il faut ajouter les importations de 718 260 TJ pour une offre énergétique suisse totale de 981 100 TJ. Ainsi, le pays importe majoritairement des produits pétroliers (337 620 TJ), des combustibles nucléaires (241 040 TJ), du pétrole brut (121 340 TJ), du charbon (5 440 TJ), de l'énergie du bois (2 100 TJ), et d'autres énergies renouvelables (1 800 TJ). Une part significative de l'électricité est également importés (152 300 TJ). La Suisse est donc très importatrice d'énergie mais dispose d'une production nationale relativement verte en raison des capacités naturelles du territoire helvétique [Tableau 7 : Les principaux chiffres clés de l'énergie en Suisse] [OFEN, 2015].

Tableau 7 : Les principaux chiffres clés de l'énergie en Suisse –source : OFEN, 2015-⁸³

	2013	2014	2015
Importation, nette¹			
Pétrole brut, produits pétroliers, en milliers de t	11'807	10'711	10'296
Charbon, en milliers de t	228	192	223
Gaz, en térajoules	129'030	111'770	119'420
Electricité, en GWh	-2396	-5491	-1035
Production d'électricité			
Total, en GWh	66'180	67'278	63'661
Part des centrales hydrauliques, en %	57,9	56,5	59,9
Part des centrales nucléaires, en %	36,4	37,9	33,5
Consommation finale			
Total, en térajoules	894'950	825'780	838'360
Combustibles pétroliers, en %	18,8	15,4	16,0
Carburants, en %	33,5	36,1	34,7
Electricité, en %	23,9	25,1	25,0
Gaz, en %	13,5	13,0	13,5
Autres agents énergétiques, en %	10,3	10,4	10,9
Consommation finale d'énergie renouvelable, en %	21,1	21,4	23,0
Dépenses des consommateurs finaux			
en millions de francs	32'830	30'220	26'360 ^P
en % du PIB	5,2	4,7	4,1 ^P

¹ Correspond au solde entre l'importation et l'exportation

⁸¹ Production interne au pays

⁸² Ces chiffres font référence à la production indigène qui comprend l'ensemble de la production d'énergie primaire produite sur le territoire.

⁸³ Site de l'OFEN : https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/energie.html#22_1461223460514_content_bfs_fr_home_statistiken_energie_jcr_content_par_tabs, consulté le vendredi 11 novembre 2016

La politique énergétique de la Suisse à l'horizon 2050

La politique énergétique de la Suisse a connu un tournant majeur avec la mise en place du programme « Perspectives Energétiques 2050 » publié en 2013 par l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) [OFEN, 2013]. La nouveauté de ce programme est d'intégrer une réflexion approfondie sur la politique nucléaire à la suite de la catastrophe nucléaire de Fukushima intervenue en 2011. Le Conseil Fédéral Suisse, renonce ainsi à prévoir le remplacement des centrales nucléaires en cours de fonctionnement à la fin de leur période d'exploitation [OFEN, 2013].

Ce rapport fondé sur l'évolution de l'offre et de la demande énergétique propose trois scénarios prospectifs. Parmi eux, le scénario intitulé « Nouvelle politique énergétique » analyse comment la Suisse pourrait réduire ses émissions de CO₂ à environ 1,5 tonnes par habitant. Ce scénario fait référence à l'objectif de l'Union Européenne de réduire de 80% ses émissions de CO₂ en 2050 par rapport à 1990. Il se rapproche également des ambitions du projet de Société à 2000 Watts [OFEN, 2013] [Tableau 8 : Hypothèses des scénarios "Poursuite de la politique actuelle", "Mesures politiques du Conseil Fédéral" et "Nouvelles politiques énergétique »].

Tableau 8 : Hypothèses des scénarios "Poursuite de la politique actuelle", "Mesures politiques du Conseil Fédéral" et "Nouvelles politiques énergétique" - source : OFEN, 2013, p3-

Poursuite de la politique actuelle	Mesures politiques du Conseil fédéral	Nouvelle politique énergétique
Ménages privés, bâtiments		
<ul style="list-style-type: none"> • Mise à jour modérée du MoPEC • Programme Bâtiments : 200 millions de francs • Promotion des énergies renouvelables à partir du programme Bâtiments • Mise à jour modérée des normes 	<ul style="list-style-type: none"> • Renforcement du MoPEC • Remplacement des chauffages à résistance • Programme Bâtiments : 300 millions de francs à partir de 2014 - 600 millions de francs à partir de 2015 • Renforcement des normes pour les appareils, technique du bâtiment • Nouvelles constructions de remplacement • SIA 380/4 : obligatoire pour les immeubles résidentiels et les bâtiments d'habitation mixtes 	<p>Objectifs stratégiques prioritaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Emissions de CO₂ de 1-1,5 tonne par habitant jusqu'en 2050 • Potentiels durables de la biomasse limités <p>Conditions stratégiques connexes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Efficacité avant les énergies renouvelables • Economiser la chaleur domestique (énergie de chauffage) • Efficacité électrique essentielle (notamment refoidissement) • Mobilité électrique nécessaire • Légères modifications des volumes de trafic et de la répartition modale • Biomasse prioritaire au niveau du transport de marchandises et de la production de courant par CCF
Industrie et services		
<ul style="list-style-type: none"> • Appels d'offres publics : 16 à 27 millions de francs par an • Engagements individuels librement consentis 	<ul style="list-style-type: none"> • Appels d'offres publics : 100 millions de francs par an • Bonus d'efficacité ou prélèvement sur la taxe sur le CO₂ et prélèvement sur la RPC • Optimisation de l'exploitation des bâtiments • Promotion des installations ORC 	
Transports		
<ul style="list-style-type: none"> • Valeurs limites pour les émissions – conformément à la directive UE (130/95 g de CO₂/km)- atteintes en 2030 • Amélioration de l'efficacité de l'aménagement des transports 	<ul style="list-style-type: none"> • Valeurs limites plus sévères pour les émissions du parc automobile – conformément à la directive UE (130/95g de CO₂/km) atteintes en 2020 (35 g CO₂/km en 2050) • Organisation des transports 	

Sources: OFEN, Prognos 2012

3.2.2. La politique énergétique des cantons et le cas du Canton de Zurich

La Suisse est une confédération d'Etats qui ont chacun leur propre constitution et leur propre législation. Néanmoins, ces derniers suivent la ligne directrice donnée par l'Etat fédéral notamment en matière de politique énergétique.

Ainsi l'article 106 de la Constitution de l'Etat de Zurich énonce que « *L'Etat crée des conditions de base favorables à un approvisionnement énergétique suffisant et sûr, qui soit économiquement optimal et qui ménage l'environnement.* ». Pour ce faire, il incite à l'utilisation rationnelle de l'énergie et au développement des énergies renouvelables. Au niveau électrique, il veille à ce que l'approvisionnement soit sûr et économiquement optimal. Pour réaliser ces points, les cantons sont aidés par les villes suisses qui peuvent également se saisir de la politique énergétique.

La ville de Zurich et le concept de Société à 2 000 Watts

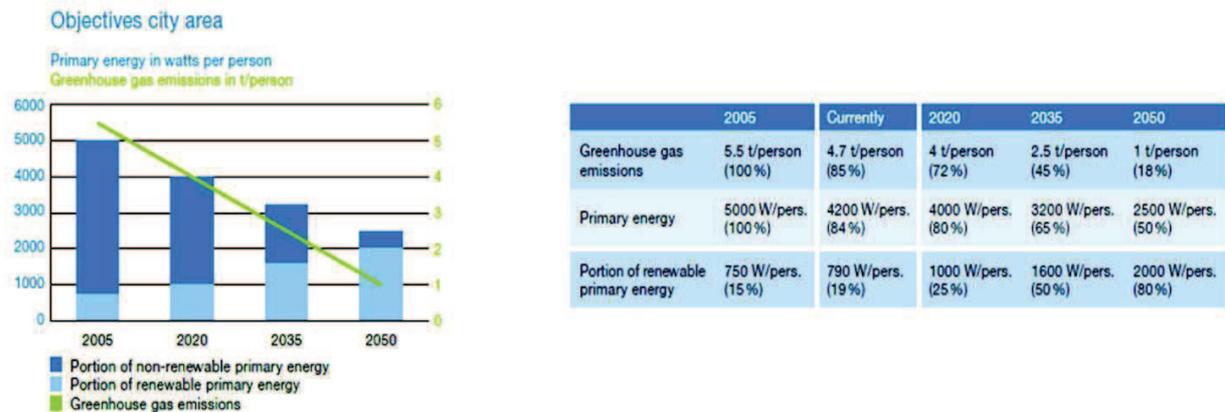
La Ville de Zurich a démontré très tôt sa volonté d'avoir un développement énergétique durable. Elle est d'ailleurs devenue l'une des premières villes helvétiques à intégrer le concept de la Société à 2 000 Watts dans sa politique énergétique.

La commune a été labellisée Cité de l'Energie⁸⁴ en 2004. En 2008, les électeurs de la ville de Zurich ont approuvé l'introduction du concept de la société à 2000 Watts dans la politique énergétique de la ville basée sur trois objectifs majeurs : investir dans les énergies renouvelables, développer l'efficacité énergétique et réaliser des économies d'énergies [Suisse Energie, 2010 ; Ville de Zurich, 2016].

En 2012, le Plan Directeur de l'Energie de la ville de la Zurich a été établi. Il pose les ambitions de la ville en matière de politique énergétique pour 2050 : « réduire les émissions de gaz à effet de serre », « réduire la consommation d'énergie primaire », « sécuriser une offre énergétique adéquate, compétitive et éco-responsable ». Pour mettre en œuvre ces trois axes stratégiques, le Plan Directeur définit des objectifs quantifiés qui vont au-delà de la législation en matière de CO2 et des objectifs de la société à 2000 Watts [Figure 12 : Objectifs de la ville de Zurich par rapport aux objectifs de la Société à 2 000 Watts]. Des actions sont réalisées, dans cette optique, comme la création d'un réseau intelligent avec pilotage et stockage. La ville promeut également l'achat de sources d'énergie de haute-qualité (*to purchase higher-quality energy sources*) et mettre en place des installations de capacités de production électrique dans la ville [Ville de Zurich, 2016].

⁸⁴ Le label Cité de l'énergie est une distinction pour les communes qui prouvent qu'elles mènent une politique énergétique durable en utilisant les énergies renouvelables, en ayant une gestion plus durable des ressources ainsi qu'en proposant une mobilité moins polluante.

Figure 12: Objectifs de la ville de Zurich par rapport aux objectifs de la Société à 2 000 Watts –sources : Ville de Zurich, 2016, p 10-



3.3. Présentation du projet GreenCity

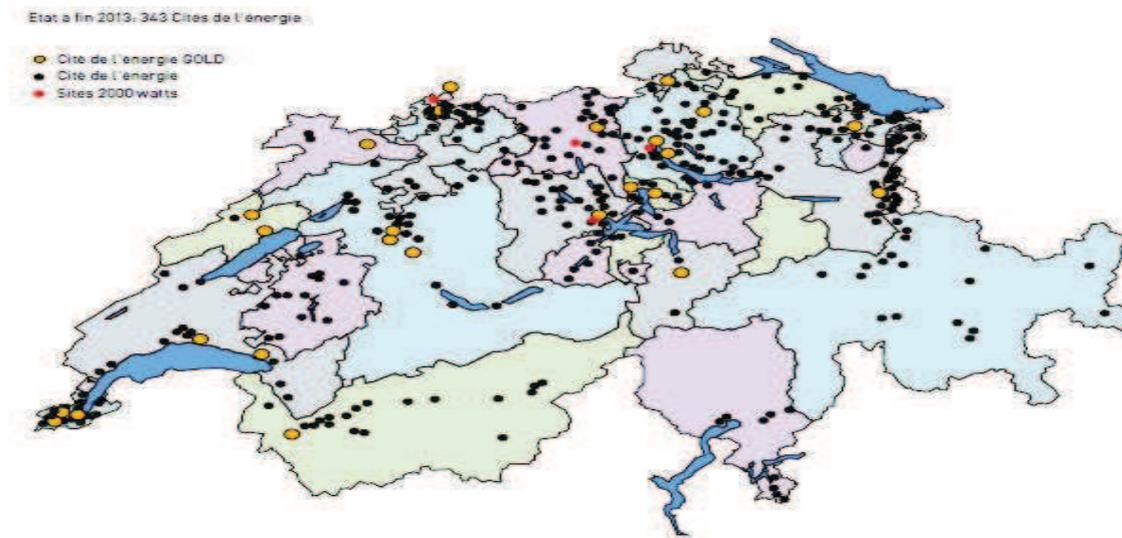
Le projet Greencity propose une réflexion approfondie au niveau énergétique que ce soit au niveau de l'efficacité énergétique ou de l'approvisionnement énergétique. L'approvisionnement énergétique du quartier est annoncé comme étant 100% à base d'énergie renouvelable et locale.

3.3.1. Greencity et la labellisation « Site à 2 000 Watts »

Le processus de labellisation « Site à 2 000 Watts »

La Suisse a développé un ensemble d'outils à l'intention des communes et cantons pour favoriser la transition énergétique sur leur territoire. Parmi eux, la certification délivrée par l'Association Cité de l'Énergie en relation avec l'Office Fédéral de l'Énergie distingue plusieurs catégories selon les besoins et les enjeux des territoires : Cité de l'Énergie, Cité de l'Énergie Gold, Région-Énergie, Gestion de la mobilité, Smart City et Quartiers Durables. La certification Site à 2 000 Watts fait partie de cet ensemble de certifications dédiées aux collectivités. Fin 2013, il y avait 343 Cités de l'Énergie et 4 territoires labellisés Site à 2 000 Watts [Carte 4 : Les Cités de l'énergie en Suisse en fin 2013] [Suisse Energie, 2013].

Carte 4: Les cités de l'énergie en Suisse en fin 2013 –source : Suisse Energie, 2013, p 6-

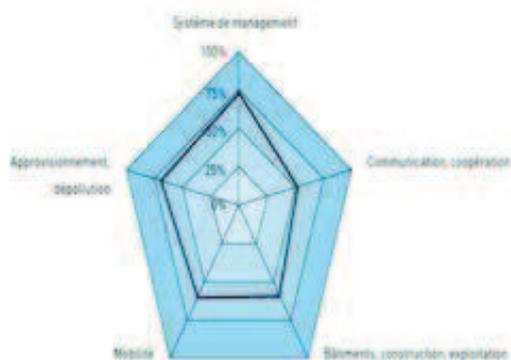


L'intérêt d'une certification *Site à 2 000 Watts* est initialement de mettre l'accent sur les grands ensembles bâtis qui proposent une vision de l'urbanisme de demain. L'échelle choisie se dissocie du simple bâtiment pour prendre en compte un ensemble bâti ce qui permet d'intégrer plusieurs thématiques liées à la durabilité comme la question de la densité, les mixités d'usages (bâtiments résidentiels et tertiaires), l'exploitation des réseaux (approvisionnement, production et stockage) et la mobilité. Par ailleurs, le bilan de l'énergie globale utilisée prend en compte non seulement l'énergie consommée dans le bâtiment mais également l'énergie grise et les consommations liées à la mobilité. Enfin, la certification court sur plusieurs phases du projet allant de la conception à la phase d'exploitation [Suisse Energie, 2015 a&b].

La labellisation « Site à 2 000 Watts » de GreenCity

Le certificat « Cité de l'Energie-Site Société à 2000 Watts » délivré par l'Association Cité de l'Energie a été attribué au projet GreenCity, le 03 septembre 2012. GreenCity devenait ainsi le premier projet de construction durable certifié « Site Société à 2000 Watts » [Figure 13 : Résultats tirés du catalogue de critères de la Société à 2000 Watts pour GreenCity] [Losinger Marazzi, 2012, Suisse Energie, 2014b]. Le label atteste que le projet respecte le cadre contraignant défini dans le guide « Réhabiliter les friches industrielles pour réaliser la Société à 2000 Watts » élaboré par l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) en partenariat avec la ville de Zurich. En 2015, GreenCity s'est vu décerner pour la deuxième fois la certification Site à 2 000 Watts [Suisse Energie, 2015b].

Figure 13: Résultats tirés du catalogue de critères de la Société à 2000 Watts pour Greencity -Source : Suisse Energie, 2014b-⁸⁵



Objectifs	Score
Système de Management	92 (74%)
Communication, Coopération	51 (51%)
Bâiments, construction, exploitation	46 (58%)
Approvisionnement, dépollution	59 (59%)
Mobilité	67 (71%)
Total	315 (63%)

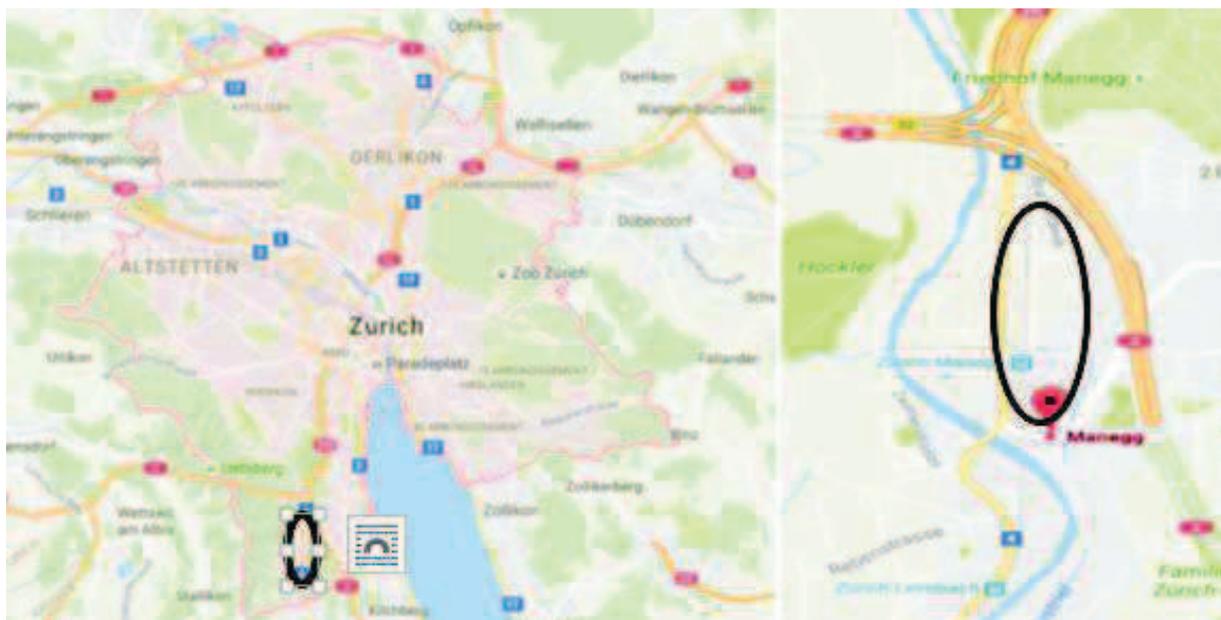
3.3.2. Le cadre de réalisation de GreenCity

La localisation

Le projet GreenCity est localisé dans le quartier de Manegg situé dans la vallée de la Sihl au pied de l'Üetliberg au sud de la ville de Zurich [Carte 5 : Cartes de la ville de Zurich avec localisation du quartier de Manegg]. Ce quartier est profondément marqué par les activités industrielles qui se sont succédées sur ce territoire depuis plus d'un siècle. En 1857, un bâtiment accueille une filature et une usine de céramique puis celui-ci est transformé en une fabrique de papier détenue par la société Papierfabrik an der Sihl AG qui emploiera jusqu'à 500 personnes durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle. La production de papier s'arrêtera finalement en 2007 [Losinger Marazzi SA, 2014a].

⁸⁵ Ce diagramme en toile d'araignée représente la part (en %) du potentiel d'action atteint par Greencity. Pour obtenir le certificat de « Site 2000 watts », chaque site doit réaliser 50 % de son potentiel. Greencity atteint 63 %.

Carte 5: Cartes de la ville de Zurich avec localisation du quartier de Manegg -Source : Google Map-



Le processus d'aménagement du quartier

Le projet de réhabilitation de la friche industrielle pour répondre à la pression immobilière à Zurich et proposer un nouveau lieu de vie aux zurichois commence dès le début des années 2000 en anticipation de la fermeture de la papeterie. Entre 2000 et 2002, une planification coopérative de développement est mise en place entre la ville et les propriétaires du terrain. En 2006, le terrain est classé en zone centre-ville Z5. En 2009, le plan d'aménagement privé est mis en place suivi deux ans plus tard par sa validation. En 2012, il y a la création du plan d'aménagement complémentaire ainsi que l'élaboration des sous-projets pour les dépôts de permis. A partir de 2013, le plan d'aménagement complémentaire est accepté, les permis sont déposés et les premières parcelles obtiennent des permis de construire. Les travaux sont lancés en 2014. Les premiers emménagements sont prévus à partir de 2016 et s'échelonnent jusqu'en 2020 [Annexe 8 : Chronologie du projet GreenCity] [Losinger Marazzi SA, 2014a].

La philosophie du quartier

Le quartier GreenCity est construit comme un quartier durable avec une volonté fortement affichée de respecter les piliers du développement durable (social, économie, environnement). En ce qui concerne le volet social, la mixité sociale et la mixité intergénérationnelle sont mises en œuvre avec 30% de logements coopératifs, le reste étant réparti entre des logements locatifs et des logements accessibles à la propriété. Il y a également la création d'une école pour les enfants et la réalisation de 60 logements pour les personnes âgées sur le territoire. En ce qui concerne la mixité fonctionnelle, celle-ci se traduit par la présence de commerces de proximités, de restaurants, de bureaux et d'un hôtel. Ces activités tertiaires ont pour but de rendre ce quartier économiquement attractif. Enfin, au niveau environnemental,

la réflexion sur le projet s'est principalement axée sur la performance énergétique des bâtiments, l'approvisionnement énergétique et les problématiques liées à la mobilité.

Le traitement de la mobilité

Le quartier présente une situation géographique le rendant facilement accessible par voiture mais il offre aussi d'autres modes de transport comme les transports en commun ainsi que la mobilité douce. Les propositions en matière de mobilité ont un rôle prépondérant dans l'obtention du certificat « Site à 2 000 Watts ». La prise en compte du nombre de place de stationnement ou encore le niveau de desserte du site par les transports en commun font partie des critères qui déterminent l'obtention du label [Suisse Energie, 2015a]. Signalons également que 10% des places de parking seront aménagées pour les véhicules électriques et que des bornes publiques pour les vélos électriques seront installées, ainsi que deux stations Mobility permettant le partage de voitures [Losinger Marazzi SA, 2012].

3.3.3. Les acteurs ayant participé au projet GreenCity

Le projet GreenCity regroupe plusieurs dizaines d'acteurs qui ont pris part à la réalisation de l'ensemble des projets techniques, sociaux et économiques. Nous nous limiterons toutefois à présenter les acteurs ayant un lien direct avec le secteur de l'énergie. La liste d'acteurs présentée ainsi que leur rôle dans le projet sont le résultat de la base d'information réalisée au cours de l'année 2015 et de l'enquête de terrain réalisée du 2 au 4 juin de la même année.

La Ville de Zurich s'est investie dans le projet GreenCity de manière relativement passive. Dans un premier temps, la ville a participé à une large concertation avec les propriétaires fonciers de la zone et Losinger Marazzi pour déterminer le lieu et le périmètre du futur projet. Le projet est ainsi installé sur le dernier grand terrain constructible de Zurich. Dans un second temps, la ville de Zurich, ayant été labellisée Ville Energie en 2008 et faisant partie du réseau Cité de l'Energie, a tenu à ce que GreenCity obtienne le label Site à 2 000 Watts. Cette volonté a été transcrite dans le préambule lançant le projet d'écoquartier qui fut rendu par la ville de Zurich, le 14 novembre 2012. Il énonce « *«Le propriétaire du terrain souhaite... un développement axé sur les objectifs de la société à 2000 watts. Il s'engage à contrôler la réalisation des objectifs dans le cadre d'un processus de controlling à long terme.»* ». Dans un troisième temps, lors de la réalisation technique du projet, la ville a joué un rôle de second plan en n'intervenant pas de façon directe dans les choix concernant la définition du processus d'approvisionnement énergétique ou les technologies à installer sur le site. Son rôle s'est alors limité à valider les aspects administratifs du projet (ex : permis de construire,...).

Le rôle de maître d'ouvrage a été dévolu à Losinger Marazzi qui est une entreprise privée de construction⁸⁶. L'entreprise s'est fortement impliquée durant tout le déroulé du projet de son élaboration jusqu'à sa livraison. Dans ce cadre, elle a élaboré une gestion originale du pilotage du projet par rapport aux entreprises classiques de Bâtiments et Travaux Publics. Habituellement, ces dernières répondent à la demande du client sans être force de proposition. Dans le cadre de GreenCity, Losinger Marazzi a dépassé ce rôle et a élaboré l'ensemble du projet GreenCity. Les acteurs interrogés considèrent que cela a permis à l'entreprise de développer des compétences spécifiques en matière d'approvisionnement énergétique et de développement durable.

A l'origine du projet, Losinger Marazzi a eu recours à des bureaux d'étude afin de développer le concept de GreenCity, notamment Amstein+Walther un bureau d'étude ayant l'expérience des quartiers connectés. Toutefois, le travail d'Amstein+Walther n'a pas pu aboutir en raison de problèmes de coordination avec les autres bureaux d'étude sélectionnés par Losinger Marazzi. Losinger Marazzi a alors repris l'intégralité des problématiques et les a traitées en interne. Pour la partie énergétique, Losinger Marazzi a élaboré une solution puis recherché des partenaires susceptibles de la mettre en œuvre.

Elektrizitätswerk der Stadt (EWZ) est l'entreprise locale d'approvisionnement énergétique de la ville de Zurich depuis 1982. Elle alimente en énergie la ville de Zurich et quelques villes du canton des Grisons. En 2015, elle fournissait près de 225 994 clients avec une production électrique de 5 473 GWh constituée à 50% d'hydroélectricité, 41% de nucléaire, 3,5% d'éolien et de solaire et 2,5% de biomasse. Elle fournit également la ville en chaleur et en froid à hauteur de 289 GWh [EWZ, 2012 ; EWZ, 2015]. L'entreprise s'engage dans une production bas carbone en développant les énergies renouvelables, avec par exemple des capacités éoliennes, de façon à réduire son impact carbone et palier à son désengagement progressif de l'énergie nucléaire. Dans le cadre du projet Greencity, EWZ a remporté l'appel d'offre lancé par Losinger Marazzi pour la partie approvisionnement énergétique (électrique et thermique) du projet.

Les propriétaires des terrains ont également participé à l'élaboration du projet. Ils ont ainsi été des parties prenantes lors de la construction du partenariat avec la ville de Zurich et Losinger Marazzi afin de lancer le projet.

Les propriétaires des bâtiments ont divers profils. Il s'agit soit d'investisseurs privés comme des banques, soit d'acheteurs privés, soit de coopératives⁸⁷.

⁸⁶ Losinger Marazzi est une entreprise de développement immobilier et de construction qui a pour ambition de devenir le leader de la construction durable en développant des projets phares comme GreenCity à Zurich ou Eikenott à Gland.

⁸⁷ Les coopératives d'habitation sont une forme d'habitat entre la location et la propriété qui représentent 5% du parc immobilier suisse. L'intérêt de ce système est de fournir des logements à des prix modérés à des membres de coopératives. Le fonctionnement d'une coopérative repose sur la mise en commun du

3.3.4. Le financement du projet GreenCity

Le projet GreenCity est développé par Losinger Marazzi qui a investi dans sa réalisation dès 2006. L'entreprise a pris en charge les plans d'études qui ont permis d'aboutir au concept proposé afin de répondre aux critères de la Société à 2000 Watts. Losinger Marazzi intervient dans la réalisation technique du projet en construisant les bâtiments, ce qui est d'ailleurs son cœur de métier. L'entreprise se finance donc grâce à la vente des bâtiments construits sur le terrain de GreenCity. Bien que Losinger Marazzi ait eu la volonté de faire une proposition novatrice en matière énergétique, le projet n'a fait l'objet d'aucune subvention. L'absence de subvention est justifiée par le fonctionnement institutionnel de la Suisse où les subventions publiques sont quasiment inexistantes. Le choix des technologies permettant l'approvisionnement énergétique a donc été déterminé par un jeu de contraintes technico-économique qui fait dire à un acteur ayant participé au projet qu' « *il y a ce que l'on a envie de faire, ce que les autorités nous autorisent à faire et puis il y a ce que le bilan financier ou l'économie du projet permet.* ».

3.4. La proposition énergétique du projet GreenCity

Nous présentons dans cette partie, les aspects techniques du volet énergétique du projet ainsi que les acteurs ayant permis de le réaliser.

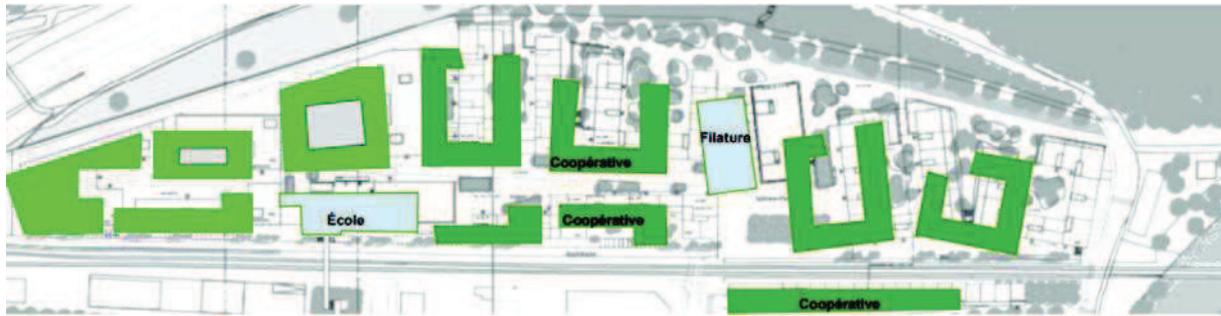
3.4.1. La performance énergétique des bâtiments

La surface du site est de 8 hectares avec une surface exploitable de 65 223 m², pour une surface utile⁸⁸ de 163 000 m². Cette zone comporte 740 appartements pour une surface utile de 85 400 m² ainsi que des bureaux (65 000 m²) et des commerces (6 600 m²) et à terme une crèche et une école primaire (6 000 m²). Au total, la répartition entre les bâtiments est la suivante: 52% de logements ; 40% de bureaux, 4% d'écoles et 4% de surfaces commerciales [Carte 6 : Plan du site GreenCity avec répartition des bâtiments] [Losinger Marazzi SA, 2014a].

capital des coopérateurs-habitants afin d'acquérir un terrain ou un immeuble. La coopérative devient propriétaire du terrain et/ou de l'immeuble et les coopérateurs sont locataires. Ces acteurs participent de manière importante aux décisions concernant l'ensemble de l'immeuble dans une volonté de favoriser l'échange, le partage et la solidarité.

⁸⁸ L'article R353-16 du code de l'urbanisme et de l'habitat définit la surface utile comme étant la surface habitable du logement à laquelle il faut ajouter la moitié de la surface des annexes suivantes : les caves, les sous-sols, les remises, les ateliers, les séchoirs et celliers extérieurs au logement, les resserres, les combles et greniers aménageables, les balcons, les loggias, les vérandas et les parties de terrasses accessibles en étage ou aménagées sur ouvrage enterré ou à moitié enterré dans la limite de 9m². En revanche, ne doivent pas être prises en compte dans ce calcul : les surfaces mentionnées précédemment qui ne seraient pas réservées à l'usage exclusif de l'occupant du logement ou dont la hauteur sous plafond est inférieure à 1m80, les surfaces des jardins, cours et garages.

Carte 6: Plan du site GreenCity avec répartition des bâtiments (Vert Foncé : Tertiaire ; Vert Sapin : Résidentiel ; Bleu : Affectations Spéciales) –source : Suisse Energie, 2015d, slide 5-

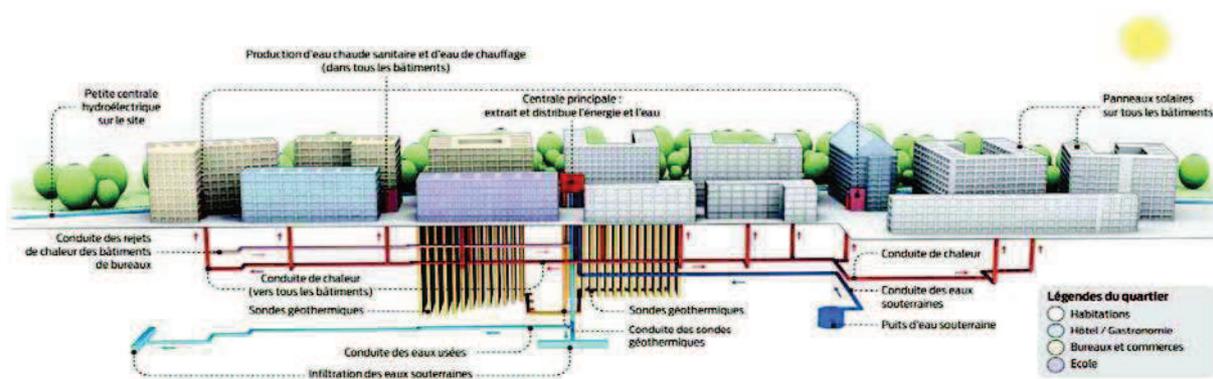


La volonté des concepteurs est de présenter des bâtiments exemplaires en matière environnementale. Ainsi tous les bâtiments devront être certifiés Minergie P-Eco pour le résidentiel et Leed-Platinum pour les bâtiments tertiaires [Cf. Chapitre 1-Annexes 1 et 2]. La labellisation Minergie P-Eco distingue des réalisations qui vont au-delà de la réglementation en vigueur : la consommation énergétique attendue pour les bâtiments neufs est ainsi de 30 kWh/m²/an contre les 38 kWh/m²/an selon la réglementation en vigueur. Le label Leed-Platinum quant à lui caractérise une réflexion poussée en matière d’environnement (matériaux, qualité de l’air, innovation, énergie,...).

3.4.2. Le projet initial en matière d’approvisionnement énergétique

Lors de la réalisation de la base d’information, les documents rassemblés sur le projet Greencity annonçaient une approche originale en matière d’approvisionnement énergétique. Trois réseaux distincts devaient assurer l’approvisionnement énergétique en électricité, chaleur et froid. La consommation du quartier ne devait pas dépasser 11 000 mégawattheures par an grâce à des choix techniques innovants l’approvisionnement devait être basé à 100% sur les énergies renouvelables [Figure 14 : L’approvisionnement énergétique de GreenCity] [Losinger Marazzi SA, 2014b].

Figure 14 : L’approvisionnement énergétique de GreenCity –source : Losinger Marazzi SA, 2014b, p34-35-



L’approvisionnement thermique et le froid

A l’origine, l’approvisionnement du quartier en chaleur devait s’appuyer sur un mix d’énergies renouvelables présentes localement et intégrées dans un réseau développé pour l’occasion.

La chaleur devait être produite à partir des sources suivantes [Suisse Energie, 2014b]:

- nappes phréatiques (27%)
- sondes géothermiques (39%)
- récupération de chaleur (17%)
- électricité pour les pompes à chaleur (17%)

La chaleur issue de la nappe phréatique et des sondes géothermiques devait être acheminée par un réseau de chaleur basse température et alimenter les bâtiments en chauffage et en eau chaude sanitaire par l’intermédiaire de pompes à chaleur. Les eaux usées étaient également récupérées. La chaleur excédentaire produite en été devait par ailleurs être stockée dans le sous-sol grâce à des sondes géothermiques et récupérée pendant la période de chauffage [Losinger Marazzi SA, 2014b]. Les bâtiments devaient être refroidis de manière passive en utilisant la technique de *Free Cooling*, qui utilise la différence de température entre l’intérieur et l’extérieur des bâtiments entre le jour et la nuit [Suisse Energie, 2014b].

L’approvisionnement électrique

L’approvisionnement électrique du quartier était initialement envisagé comme une combinaison entre un approvisionnement extérieur et une production issue d’énergies renouvelables localisées sur le territoire. Ce choix était justifié en raison de difficultés techniques ne permettant pas de réaliser un approvisionnement électrique bas carbone total sur le périmètre du quartier.

La production électrique devait donc se répartir de la manière suivante [Suisse Energie, 2014b]:

- 46% d’énergie hydraulique sur le site ;
- 24% énergie photovoltaïque sur le site ;
- 30% d’énergie renouvelable (achetée)

Le réseau électrique devait être alimenté par une microcentrale hydroélectrique fonctionnant sur le site ainsi que par des panneaux photovoltaïques installés sur l'ensemble des bâtiments du quartier. Le reste l'approvisionnement électrique devait provenir du réseau électrique national. Toutefois, afin de garantir un approvisionnement décarboné, les contrats de fourniture des usagers du quartier devaient obligatoirement être des contrats d'électricité verte ; c'est-à-dire des contrats garantissant que l'électricité achetée par le consommateur est issue de la production d'énergies renouvelables.

Il était également prévu, l'installation d'un réseau intelligent afin de contrôler la production, la distribution et le stockage d'électricité, celle-ci étant notamment utilisée pour recharger les véhicules électriques pendant la nuit [Losinger Marazzi SA, 2014b].

3.4.3. Le projet GreenCity tel que réalisé depuis 2015

Des entretiens réalisés au cours du mois de Juin 2015 ainsi que des éléments d'information rendus disponibles après la finalisation du projet (notamment la fiche publiée par Suisse Energie sur le projet le 10 octobre 2015 [Suisse Energie, 2015b]) ont montré des évolutions importantes entre le projet initial tel que décrit précédemment et les réalisations effectives. Si l'ambition du projet reste tournée vers l'atteinte d'un approvisionnement énergétique 100% énergies renouvelables, les moyens techniques destinés à y parvenir ont largement évolué [Suisse Energie, 2015c]. Cette partie va donc présenter les changements réalisés en les contextualisant et en expliquant les raisons de ces évolutions.

L'approvisionnement thermique et le froid

Le projet initial élaboré par Amstein+Walther prévoyait une boucle de chauffage basse température (8 à 10°C) sur le site qui devait alimenter les systèmes de chauffage des différents bâtiments par l'intermédiaire de pompes à chaleur. La boucle devait être alimentée par des sondes géothermiques raccordées à la nappe phréatique. En complément, une centrale à gaz alimentée au biogaz devait permettre de passer les pics de demande thermique en hiver. L'intérêt de cette deuxième centrale était d'éviter de sur-dimensionner le réseau géothermique qui prévoyait l'installation de 220 sondes avec une profondeur de 320 mètres allant puiser de l'eau dans la nappe phréatique à la température de 35°C. Il était prévu deux types de pompes : une pour l'eau chaude sanitaire et une autre pour le chauffage. Il était également prévu une tour de refroidissement.

Toutefois, plusieurs éléments ont entraîné des changements importants dans le projet initial d'approvisionnement énergétique. En premier lieu, l'équilibre économique du projet était trop incertain pour que Losinger Marazzi choisisse de développer cette solution. D'autre part, des problèmes techniques comme le manque d'eau dans la nappe phréatique qui n'aurait pas permis de répondre à la demande thermique sur le site ont été soulevés. En conséquence, Losinger Marazzi a décidé de passer d'une boucle fermée à une boucle ouverte connectée aux quartiers avoisinant afin de profiter des

capacités de production de chaleur hors du site. L'option finalement retenue pour l'approvisionnement en chaleur a ainsi perdu son caractère le plus innovant et est devenu plus classique.

Le site sera néanmoins équipé d'un réseau de chaleur à basse température utilisant les eaux souterraines à 41% et la présence à 59% de pompes à chaleur. Les excédents de chaleur seront également stockés selon les saisons dans le sol grâce à ces sondes géothermiques. L'ensemble des technologies installées sont maîtrisées techniquement. Losinger Marazzi a ainsi fait le choix d'avoir une technologie maîtrisée avec des coûts maîtrisés plutôt qu'un projet plus innovant mais qui se serait révélé beaucoup moins sûr au niveau technique et plus cher.

L'approvisionnement électrique

Pour Losinger Marazzi, la conception du projet GreenCity sur le plan énergétique a débuté par l'identification des sources d'énergie renouvelable disponibles sur le site. L'enjeu était de trouver le moyen de répondre aux objectifs de la Société à 2000 Watts inscrits dans le cahier des charges du projet. La présence d'une nappe phréatique et d'un cours d'eau se rattachant à la Silh ont été identifiés comme des caractéristiques importantes pour l'alimentation du site en énergie thermique. Le cabinet Amstein+Walther qui avait déjà travaillé sur des thématiques similaires dans le passé a été sollicité par Losinger Marazzi afin de proposer une solution technique innovante. La proposition faite par Amstein+Walther était basée sur la réalisation d'une boucle énergétique dans laquelle chaque bâtiment peut soutirer ou injecter de l'énergie selon son profil de consommation. L'intérêt de ce projet était de profiter des synergies pour limiter au maximum la production énergétique. Le projet du cabinet de conseil Amstein+Walther sera toutefois abandonné en raison de difficultés de coordination avec Losinger Marazzi et ses collaborateurs.

Une nouvelle proposition a été formulée par Losinger Marazzi qui a repris l'intégralité du dossier de l'approvisionnement énergétique. La proposition d'approvisionnement électrique repose sur l'usage d'une centrale hydroélectrique déjà présente sur le terrain et l'installation de panneaux photovoltaïques sur les différents bâtiments de la zone. La production électrique attendue de ces dispositifs correspondait à 80% des besoins estimés. Le reste devait reposer sur la fourniture d'énergie verte. Cette option complémentaire est proposée en raison de la difficulté technique à fournir une production d'électricité 100% renouvelable avec des systèmes de production décentralisés à l'échelle du quartier. Losinger Marazzi suggère alors que chaque habitant du quartier aura l'obligation de contracter un contrat d'approvisionnement en électricité 100% renouvelable. Cette obligation faite aux habitants est, selon un acteur interrogé, acceptée par la société suisse même si cela entraîne un surcoût si le service semble collectivement profitable. Les contrats de fourniture contournent donc la difficulté technique d'une production bas carbone entièrement décentralisée au niveau local tout en garantissant un approvisionnement 100% renouvelable.

La mise en place de la centrale hydraulique sur le territoire de GreenCity a toutefois fait l'objet de frictions avec les propriétaires des centrales hydrauliques situées en aval. Ces derniers considéraient que l'exploitation de la microcentrale pourrait entraîner des changements de débits préjudiciables à leur propre fonctionnement. Lors des entretiens, les négociations étaient toujours en cours mais les informations disponibles sur le site de la Société à 2 000 Watts, le 21 octobre 2015, semblent indiquer que les propriétaires des centrales hydrauliques environnantes ont eu gain de cause. Le projet de centrale hydraulique n'étant plus à l'ordre du jour, l'approvisionnement électrique sera effectué grâce à 20% de panneaux photovoltaïques et à 80% d'énergies renouvelables achetées via des contrats de fourniture d'électricité verte.

En parallèle, Losinger Marrazi a souhaité intégrer dans le projet un « mini » réseau intelligent. Malgré le scepticisme du fournisseur local d'énergie, en raison notamment du coût d'investissement, la proposition a été retenue avec l'idée d'expérimenter le suivi de consommation énergétique.

3.5. Conclusion du projet Greencity

L'écoquartier Greencity est un projet original dans le traitement de l'énergie puisqu'il doit s'intégrer dans une politique énergétique structurée autour du concept de Société à 2 000 Watts. L'ambition affichée est d'atteindre un haut niveau de performance en ce qui concerne les bâtiments, un approvisionnement décentralisé bas carbone et 100% d'énergie renouvelable réalisé le plus possible localement.

L'intérêt du projet est d'avoir pu réussir à atteindre ces ambitions malgré des évolutions importantes entre le projet initial et la réalisation effective. L'approvisionnement en chaleur est réalisé au niveau local grâce à un réseau de chaleur ouvert utilisant les eaux souterraines et des sondes géothermiques. L'évolution du projet a été plus importante en ce qui concerne l'approvisionnement électrique. L'abandon de la micro-centrale hydraulique a entraîné une baisse importante de la part de la production électrique produite dans le quartier. L'obligation prévue dès l'origine du projet pour les habitants de souscrire des contrats de fourniture d'électricité mentionnant que la production est issue d'énergie renouvelable a permis de compenser en partie cet abandon. Ainsi, si la part de la production électrique produite localement n'a pas pu atteindre les objectifs initiaux, celle-ci reste assurée par des énergies renouvelables.

Le concept de Société à 2 000 Watts permet d'apporter une réflexion approfondie sur la politique énergétique et climatique à réaliser pour permettre la transition énergétique. Sa traduction dans les différents échelons administratifs de la Suisse et la sanction de leur projet par la labellisation permet de créer une émulation pour la création de politiques énergétiques et d'aménagement du territoire. Lors de l'élaboration du projet GreenCity, les réflexions issues de la Société à 2 000 Watts ont été utilisées comme lignes directrices pour structurer les propositions sociotechniques du quartier. Cette manière de

se saisir d'une thématique environnementale, de structurer une action et de la décliner à tous les échelons territoriaux est une innovation institutionnelle qui ne se retrouve pas dans les autres études de cas.

4. Le projet Ecocité de Grenoble

La ville de Grenoble a montré une sensibilité importante aux sujets relatifs au développement durable et plus particulièrement à la transition énergétique depuis plusieurs années. L'élaboration d'une politique environnementale tournée vers l'innovation et l'atteinte d'objectifs ambitieux s'est traduite par de nombreuses distinctions lui offrant ainsi une forte visibilité. Sa participation au concours Ecocité s'inscrit dans la continuité de cette politique en offrant une réflexion sur les moyens de dynamiser l'agglomération tout en s'inscrivant dans une perspective de développement durable et de lutte contre le changement climatique à l'échelle d'un morceau de ville.

L'originalité de la proposition grenobloise pour Ecocité est de réaliser un système urbain intégré. Ce concept repose sur une vision systémique du territoire, en particulier en matière de traitement des flux énergétiques. Ainsi, une part conséquente du projet est centrée sur l'idée d'un approvisionnement énergétique bas carbone et local à la fois pour la chaleur et pour l'électricité. Le territoire choisi pour cette expérimentation est celui de la Presqu'île Grenobloise. La réalisation de ce projet est facilitée par la présence d'acteurs locaux dont la mission est de gérer l'approvisionnement énergétique à l'échelle urbaine tout en promouvant les énergies renouvelables.

Outre la proposition de système urbain intégré, la principale innovation technique proposée est une boucle locale basse température pour l'approvisionnement en chaleur. Les diverses propositions ainsi que le positionnement de la ville de Grenoble sur le traitement de la thématique énergie font du projet Ecocité, une étude de cas intéressante pour comprendre les différents enjeux (techniques, économiques et institutionnels) d'un projet urbain.

4.1. Grenoble : une ville durable avant l'heure ?

Grenoble est une collectivité ayant très tôt pris en compte les problématiques de développement durable dans sa démarche politique. Cet intérêt est soutenu par les acteurs de l'approvisionnement énergétique de la ville de Grenoble dont le mode d'organisation fait partie des exceptions françaises.

4.1.1. Une ville engagée et récompensée dans le domaine du développement durable

Les engagements en matière énergétique

Preuve de son intérêt pour l'environnement, la ville de Grenoble a intégré dès 2004 des ambitions en matière climatique et énergétique avec l'élaboration du Plan Air-Energie-Climat⁸⁹ dont le but est de coordonner les différentes démarches engagées par la collectivité dans les domaines de l'énergie et du climat.

En 2008, la ville de Grenoble annonce le lancement du programme Facteur 4 qui ambitionne de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 par rapport à 1990⁹⁰[Ville de Grenoble, 2012, 2013]. Ce plan constitué de 32 actions s'axe principalement autour de l'aménagement, de l'habitat, de la mobilité, de l'énergie et de la préservation des ressources naturelles. Au niveau énergétique, il cible la réduction des émissions de gaz à effet de serre du réseau de chaleur et la production d'électricité renouvelable.

En 2013, la part des énergies décarbonées dans le réseau de chaleur urbain grenoblois a sensiblement augmenté ce qui a permis de réduire les émissions de GES à un niveau de 137 g/kWh contre 200 g/kWh quelques années plus tôt (l'objectif initial était de 140g/kWh). La part de la production de chaleur issue d'énergies renouvelables a même atteint le seuil symbolique de 50% pour l'approvisionnement du réseau de chaleur (biomasse, farines animales et déchets). En ce qui concerne l'approvisionnement électrique, l'accroissement de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique est moins marqué. Néanmoins, la production solaire a été multipliée par 10 entre 2005 et 2013 (1 228 kWc de solaire étaient raccordés sur le réseau électrique en 2013 contre 35 kWc en 2005). Un projet de production de petite hydraulique sur le Drac (< 1,5 MW) et la possibilité de construction d'une centrale de cogénération ont également été étudiés à l'époque pour développer le mix électrique bas carbone de la ville [Ville de Grenoble, 2013].

⁸⁹ Les plans climats apparaissent dès 2004 en France mais ils ne sont pas obligatoires. L'article 75 de la Loi Grenelle 2 va rendre l'élaboration de cette démarche obligatoire pour un ensemble de collectivités dont les régions, les départements, les communautés urbaines, les communautés d'agglomération, les communautés de communes et les communes de plus de 50 000 habitants. La loi de TECV la rend obligatoire pour la métropole de Lyon et tous les EPCI de plus de 50 000 habitants. Depuis 2018, ce seuil a été abaissé aux EPCI de plus de 20 000 habitants. Les PCAET s'appuient sur les plans des émissions de gaz à effet de serre. Ils doivent comporter 3 parties : les objectifs stratégiques et opérationnels pour s'adapter au changement climatique, lister les actions à réaliser (efficacité énergétique, production d'énergies renouvelables, réduction des activités de gaz à effet de serre,...) ainsi qu'un dispositif de suivi et d'évaluation des résultats.

⁹⁰ Cette volonté fait écho à la prise en compte par la Convention Européenne des Maires du Paquet Climat-Energie voté par l'Union Européenne en 2008⁹⁰. Ce programme repose sur une trentaine d'objectifs dans les domaines de l'habitat, de la production d'énergie ainsi que de la sensibilisation, préservation et l'économie des ressources naturelles [Ville de Grenoble, 2012, 2013].

Aujourd'hui, les objectifs liés au Plan Climat Energie du Territoire et au plan Facteur 4 ont évolué pour laisser place à des démarches plus structurées avec des paliers à atteindre en 2020, 2030 et 2050 [Tableau 9 : Objectifs territoriaux du PAEC adopté en 2014 par la Métropole de Grenoble]. Afin d'atteindre ces objectifs, six axes d'actions ont été définis : aménager le territoire pour consommer moins et s'adapter au changement climatique, diminuer la dépendance de l'habitat aux énergies fossiles en améliorant la qualité thermique des logements, se déplacer plus sobrement en préservant la qualité de l'air, consommer et produire localement en limitant l'impact sur l'environnement, réduire l'impact du patrimoine et des services, mobiliser les acteurs pour construire ensemble la transition énergétique

Tableau 9 : Objectifs territoriaux du PAEC adopté en 2014 par la Métropole de Grenoble [Grenoble Alpes Métropole, 2015, p 3]

	Emissions GES	Consommation d'énergie/habitant	Production d'énergie renouvelable (part de la production locale dans la consommation du territoire)	Emissions PM10	Emissions NOx
A l'horizon 2020	-35%	-30%	20%	-40%	-65%
A l'horizon 2030	-50%	-40%	30%		
A l'horizon 2050	-75%	-50%			

Les distinctions de la ville de Grenoble

La ville de Grenoble a été récompensée à de nombreuses reprises pour des projets urbains durables prouvant une action réelle dans ce domaine.

La ville a ainsi reçu le label « Ruban du développement durable »⁹¹ pour son plan d'action Facteur 4 en 2013. L'Ecoquartier ZAC de Bonne⁹² construit sur une ancienne friche militaire en plein cœur de la ville est considéré comme l'un des éco-quartiers français les plus emblématiques. Il a obtenu le Grand Prix National du Palmarès Ecoquartier en 2009 ainsi que le label Ecoquartier. Grâce à sa participation au programme européen Concerto dans la catégorie SESAC (*Sustainable Energy Solutions for Advanced Cities*), la ville de Grenoble a également été lauréate en 2005 d'un prix pour la création de la ZAC de

⁹¹ Les Rubans du Développement Durable visent à identifier et valoriser les démarches jugées exemplaires de collectivités locales intégrant de manière efficace le développement durable dans leur politique. Ce label a été lancé en 2002 par Dexia Crédit Local, Comité 21, l'Association des maires de France et l'Association des Maires des Grandes Villes de France.

⁹² La Caserne de Bonne est un projet urbain qui s'inscrit dans une volonté de modernisation et de restitution du site à la collectivité dans une perspective de développement durable. Ainsi, les différents axes de la durabilité ont été traités comme la mixité sociale, intergénérationnelle (école, maison de retraite) et fonctionnelle (5000 m² de bureaux, hôtel, commerces). En ce qui concerne, la proposition énergétique, celle-ci se centre autour de la construction de bâtiments ayant une consommation de 50 kw/m²/an pour le chauffage, de 20 kWg/m²/an pour l'ECS et de 15 kWh/m²/an pour l'électricité. En ce qui concerne la production, celle-ci est basée sur 1 500 m² de panneaux solaires thermiques et autant de photovoltaïques, 9 micro-centrales de cogénérations au gaz et l'utilisation du réseau de chauffage urbain. Enfin, en ce qui concerne le froid, celui-ci est réalisé grâce à l'utilisation de la nappe phréatique pour le centre commercial et pour le reste par une ventilation par double flux [Bobroff, 2011]

Bonne. Enfin, la ville participe au programme européen *Smart Cities and Communities* et elle a été lauréate du projet City Zen en 2012 qui sera développé dans le cadre de l'Ecocité [MELTR, 2013].

La ville de Grenoble montre une claire volonté de s'intégrer dans une logique de développement durable ; elle est aujourd'hui considérée comme l'une des villes françaises les plus innovantes en la matière⁹³. Au niveau énergétique, la politique de la ville est clairement tournée vers la réduction des gaz à effet de serre en s'appuyant notamment sur la réduction de la consommation d'énergie et l'évolution de son mix énergétique. Pour atteindre cet objectif, la collectivité s'appuie sur un jeu d'acteur original ce qui renforce sa spécificité en ce qui concerne le traitement des enjeux énergétiques.

4.1.2. Une organisation originale de l'approvisionnement énergétique

Grenoble a un rapport particulier à l'énergie puisqu'avec Gaz et Electricité de Grenoble (GEG) et la Compagnie de Chauffage de Grenoble (CCIAG), elle fait partie des quelques villes françaises qui exercent la supervision et le contrôle des entreprises gestionnaires des réseaux de distribution d'énergie, et ce faisant, de l'essentiel de l'approvisionnement énergétique.

Gaz et Electricité de Grenoble

L'histoire de GEG a débuté en 1903 lorsque le gaz et l'électricité ont été regroupés dans un même service municipal suite à une période de forte concurrence pour l'équipement de la ville. A l'époque, les deux entreprises se faisaient concurrence pour moderniser la ville et diffuser leur système technique. La compagnie électrique de l'époque, la Société Grenobloise d'Eclairage Electrique, s'est développée sur l'éclairage public et des grands commerces (hôtels, boutiques, cafés,...) obligeant le Service Municipal d'Exploitation et de Distribution du Gaz à innover (bec de gaz « Auer ») pour survivre. La collectivité consciente de l'intérêt de ce nouveau vecteur énergétique a décidé de regrouper les deux entreprises afin de soutenir leur essor et de continuer à moderniser la ville [Delestre, 2015].

La régie municipale puis Société d'Economie Mixte est devenue, en 115 ans d'existence, l'acteur central pour l'approvisionnement électrique et gazier de la ville de Grenoble. Cette Entreprise Locale de Distribution est présente sur l'ensemble de la chaîne de valeur énergétique (production, distribution, fourniture). En tant que sixième distributeur français d'électricité et quatrième distributeur français de gaz, GEG fournit 400 GWh d'électricité à 98 000 et 300 GWh de gaz à 45 000. Son chiffre d'affaire 2016 s'élève à 187 millions d'euros⁹⁴.

⁹³ Terraeco, 2014, « L'intégralité du palmarès des villes durables en chiffres », consulté en mai 2016. <http://www.terraeco.net/L-integralite-du-palmares-des,53774.html>

⁹⁴ Site de GEG : <https://groupe.geg.fr/65-nos-chiffres-cles.htm>, consulté en janvier 2018

En ce qui concerne les capacités de production, GEG tente de développer les énergies renouvelables. GEG a ainsi largement investi dans l'hydroélectricité avec 10 centrales d'une puissance de 24 MW pour une production de 82 GWh par an. L'entreprise a également investi dans 20 centrales solaires photovoltaïques pour une puissance installée de 11,4 MWc et pour une production de 82 GWh par an. GEG possède également 8 éoliennes pour une puissance de 7,6 MW et une production de 16 GWh par an. Elle a également investi dans des capacités de cogénération qui permet de produire 1,6 GWh d'électricité et 10,7 GWh de chaleur par an. Enfin, au niveau de la production de gaz, elle possède une unité de valorisation de biogaz basée sur une station d'épuration qui produit 17 GWh par an⁹⁵.

Actuellement GEG a orienté son modèle de développement autour des enjeux de transition énergétique et de durabilité. L'entreprise innove au travers de multiples projets énergétiques bas carbone et intelligents. Ainsi, l'écoquartier Caserne de Bonne et l'Ecocité Grenobloise sont centrés sur l'efficacité énergétique et sur l'approvisionnement énergétique local et bas carbone. Le projet Greenlys⁹⁶ auquel participe GEG introduit une réflexion sur les *smart grids* tandis que le projet VivaCité traite de la maîtrise de la demande énergétique grâce à des dispositifs communicants adaptés aux différents acteurs (résidentiels, collectivités, opérateur de réseaux, gestionnaire de bâtiments,...) [Delestre, 2015].

La Compagnie de Chauffage Intercommunale de l'Agglomération Grenobloise

La Compagnie de chauffage de Grenoble (CCIAG) est une Société d'Economie Mixte dont le capital est majoritairement détenu par la ville de Grenoble. Par délégation de service public, elle gère le second réseau de chaleur urbain en France après celui de Paris avec près de 170km de réseaux. En plein développement de l'agglomération, la création du réseau de chaleur en 1960 résulte de la volonté publique de garantir avec fiabilité la fourniture énergétique. Dans les années 1970, les chocs pétroliers ont poussé la CCIAG à investir dans un incinérateur d'ordures ménagères. A partir des années 2000, la société se tourne vers les énergies renouvelables.

Actuellement, la CCIAG fournit 758 GWh à 100 000 équivalents logements sur les sept communes qu'elle dessert grâce à 861 MW de puissance installée. Pour garantir son approvisionnement énergétique tout en intégrant les enjeux de transition énergétique, la CCIAG s'est tournée vers les énergies renouvelables et bas carbone. Entre 1990 et 2016, la part de la production issue des énergies renouvelables et bas carbone est passée de 20% à plus de 60%, soit ordures ménagères (36%), bois (28,1%) et farines animales (2,3%). Le reste de l'approvisionnement est constitué de charbon (16,8%), de gaz naturel (11,3%) et de fioul TBTS (5,5%)⁹⁷.

⁹⁵ Idem

⁹⁶ Ces différents projets seront développés dans les prochaines parties du projet.

⁹⁷ Site de GEG : <https://groupe.geg.fr/65-nos-chiffres-cles.htm>, consulté en janvier 2018

Les capacités de production qui alimentent le réseau de la CCIAG sont principalement présentes localement. Ainsi, cinq centrales de chauffe produisent une grande partie des besoins en chaleur et eau chaude sanitaire et les 80 000 tonnes de bois recyclé et de plaquettes utilisés proviennent de sites environnants. La CCIAG souhaite continuer à développer cette filière avec un objectif de 140 000 tonnes de bois transformés pour atteindre 75% de production issue des énergies renouvelables.

4.2. Présentation du projet Ecocité de Grenoble⁹⁸

A la suite des lois « Grenelle de l'Environnement I et II » de 2007 et 2008 visant à impulser une nouvelle politique en matière de développement durable et de prévention du changement climatique, un ensemble de programmes d'actions a été lancé. Le Plan d'action Ville Durable présenté fin 2008 *vise à favoriser l'émergence d'une nouvelle façon de concevoir, construire et gérer la ville »*⁹⁹. Ce dispositif a pour ambition de mettre en valeur les opérations d'aménagement innovantes sur le plan environnemental ou social et de susciter l'envie de réaliser de nouvelles opérations de la part des collectivités et de l'ensemble des acteurs de la ville. Dans le cadre de ce plan, quatre concours ont été lancés pour favoriser la réflexion sur la façon d'aménager les villes dans le futur. Il s'agit des concours Transports Collectifs en Site Propre¹⁰⁰, Ecoquartiers¹⁰¹, Ecocités et Nature en Ville¹⁰².

⁹⁸ Annexe 9 -Chronologie du projet Ecocité de Grenoble-

⁹⁹ Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, site, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-plan-d-actions-Ville-durable.html>, consulté le 28 novembre 2016

¹⁰⁰ Le concours Transports Collectifs en Site Propre (TCSP) vise à aider les collectivités à développer les transports publics en raison de l'ambition du Grenelle de l'Environnement de multiplier par six la longueur totale de ces axes de transport. Les TCPS rassemblent « ...un système de transport public de voyageur utilisant une voie ou un espace affecté à sa seule exploitation, bénéficiant généralement de priorités aux feux et fonctionnant avec des matériels allant des autobus aux métros, en passant par les tramways. »¹⁰⁰. Il existe trois familles de TCSP : le métro, le tramway et le bus à haut niveau de service. Près de cent projets sont soutenus depuis 2009. L'Etat subventionne ce concours à hauteur de 450 millions d'euros inscrits sur le budget de l'Agence de financement des infrastructures de transport de France. L'ensemble des projets représente 5, 2 millions d'euros d'investissement public. - Ministère de l'écologie et du développement durable, site, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-transports-collectifs-en-site.html>, consulté le 23 Août 2015-

¹⁰¹ Le concours Ecoquartiers vise à promouvoir les opérations d'aménagement urbain exemplaires des collectivités à l'échelle du quartier grâce à un processus de labellisation. Les opérations d'aménagement prennent la forme d' « un projet d'aménagement urbain qui respecte les principes de développement durable tout en s'adaptant aux caractéristiques de son territoire. ». Afin de déterminer si la participation d'un quartier au concours est pertinente ou non, il a été défini une charte des Ecoquartiers constituée de vingt engagements non chiffrés sur des thématiques sociales, économiques et environnementales. Au niveau environnemental, certains engagements font référence au changement climatique, à la sobriété énergétique et à l'offre durable d'énergie. Entre 2012 et 2015, trente-neuf quartiers ont été labélisés pour un total de 55 000 logements. -Définition de l'Ecoquartier par le Ministère du Logement, de l'égalité des territoires et de la ruralité, <http://www.territoires.gouv.fr/les-ecoquartiers#article>, consulté le 23 Août 2015-

¹⁰² Le plan « Restaurer et valoriser la nature en Ville »¹⁰² est l'un des engagements du Grenelle de l'environnement de 2009 inscrit dans le quatrième volet du plan Ville Durable. Ce volet a pour objectif d'aider à la reconnaissance du rôle de la nature dans le changement climatique et la transition énergétique. Pour le réaliser, quatre thématiques ont été travaillées : Fonction écologique de la nature en ville et qualité de vie, Eau, Nature et Ville, Formes de Villes, Echelles de territoires,, trame verte et bleue et enfin Economie de la nature en Ville.

Le concours Ecocités vise à explorer les possibilités d'un renouvellement urbain dans une perspective de développement durable [Tableau 10 : Présentation des dimensions et des dynamiques présentes dans la démarche Ecocité]. Les Ecocités sont donc définies comme des « *grands projets d'aménagement urbain durable avec une cohérence architecturale, énergétique et sociale* »¹⁰³. L'échelle considérée est celle des grands projets urbains afin de traiter des « morceaux de ville ». L'intérêt de cette échelle est de prendre en compte des enjeux variés (mobilité, ressources, habitat) d'une manière transversale et intégrée [MLETR, 2013]. Les territoires sélectionnés dans le concours Ecocités représentent trente et une intercommunalités¹⁰⁴ qui regroupent 10 millions d'habitants soit l'équivalent de 15% de la population française en 2015. La mise en œuvre du concours se caractérise par le soutien financier de l'Etat via le Programme d'Investissement d'Avenir¹⁰⁵ à hauteur de 668 millions d'euros [MLETR, 2016].

Tableau 10 : Présentation des dimensions et des dynamiques présentes dans la démarche Ecocité –source : <http://www.territoires.gouv.fr/les-ecocites>, consulté le 23 août 2015-

Les dimensions	Les dynamiques
Renouveler l'espace urbain	Affirmation d'une identité métropolitaine Intégration du fonctionnement environnemental Valorisation des ressources foncières
Repenser les aménités urbaines	Amélioration de l'environnement urbain et écologique Renouvellement des paysages de la ville Redécouverte de la ville des proximités par des nouveaux usages
Soutenir les écosystèmes énergétiques et industriels	Economie circulaire pour une gestion plus autonome et mieux intégrée Utilisation des ressources renouvelables locales Sobriété des constructions
Développer des systèmes de mobilité plus urbains	Optimisation des chaînes de mobilité Diversification des choix modaux Evolution du rôle de l'automobile
Favoriser l'intelligence urbaine	Recours aux outils numériques Création de nouveaux services innovants Expérimentation par les usages

¹⁰³ Ministère du Logement, de l'Égalité des Territoires et de la Ruralité, site, <http://www.territoires.gouv.fr/les-ecocites>, consulté le 23 Août 2015

¹⁰⁴ Les Ecocités regroupent 31 intercommunalités dont 13 franciliennes en 2015.

¹⁰⁵ Issu du rapport Juppé-Rocard de 2009, le Programme d'Investissement d'avenir est piloté par le Commissariat Général à l'Investissement. Ce programme vise à préparer aux enjeux de demain en finançant des investissements innovants sur le territoire. Trois mots doivent être respectés : excellence, innovation et coopération. Depuis 2010, 47 milliards d'euros ont été alloués à ce programme (en 2010 : 35 milliards et en 2014 ; 12 milliards d'euros). En 2016, 10 milliards d'euros ont été débloqués pour le troisième volet des PIA.

Pour bénéficier des financements Ecocité, le projet urbain doit présenter plusieurs des caractéristiques du tableau ci-dessus au niveau de la conception, des modalités de concertation et de la mise en œuvre [DGALN, 2008, 2011]. Il doit aussi impacter une aire urbaine dont la population avoisine les 100 000 habitants. Enfin, l'agglomération doit avoir une ambition démographique planifiant une augmentation de 30% de la population présente sur l'aire urbaine ou une augmentation de 50 000 habitants dans un horizon temporel de 20 à 25 ans.

Depuis 2010, la démarche Ecocité inscrite dans le programme « Ville de Demain » a distingué plus d'une trentaine de projets dont les projets Ecocités de Bordeaux Plaine de Garonne, Grand Lyon et Grenoble Alpes Métropole¹⁰⁶.

4.2.1. Le concept de l'Ecocité Grenobloise : le système urbain intégré

La stratégie globale de l'Ecocité Grenobloise

Le projet grenoblois soumis au concours Ecocités en 2011 se centre autour de trois thématiques distinctes : l'environnement, la mobilité et la qualité de vie [Ville de Grenoble, 2011].

Au niveau environnemental, l'objectif est de démontrer que les cibles visées dans le cadre du programme Facteur 4 peuvent être atteintes. Il est ainsi envisagé de réaliser sur le périmètre de la Presqu'Île un approvisionnement énergétique zéro carbone grâce à la production décentralisée, l'augmentation de la part des énergies renouvelables, l'adaptation des réseaux de distribution pour collecter la production décentralisée, la mutualisation et la réutilisation des rejets énergétiques, la récupération des affluents, le stockage de la chaleur et l'utilisation de la nappe phréatique présente sur le territoire.

Au niveau de la mobilité, l'ambition est de réduire la part modale de la voiture individuelle de 20%. Cet objectif s'inscrit dans une politique plus ancienne de la collectivité, ayant déjà permis de réduire l'usage de la voiture individuelle de 53% à 47% entre 2005 et 2010. Ce but est d'autant plus ambitieux qu'une augmentation de l'intensification urbaine est attendue sur le territoire grenoblois dans les années à venir. Cet objectif doit être atteint grâce au changement de comportement des consommateurs obtenu par une sensibilisation de la population aux problèmes associés aux véhicules urbains et par le développement de l'offre de transports en commun ainsi que par l'augmentation de l'attractivité des modes de transport doux.

Au niveau de la qualité de vie, la collectivité devra faire face au triple enjeu du renforcement de la cohésion sociale, de l'amélioration du cadre de vie et de l'augmentation de l'attractivité du territoire grenoblois. Pour ce faire, un cadre favorisant l'équilibre entre l'emploi et l'habitat tout en permettant l'apparition de nouveaux usages de la ville sera envisagé.

¹⁰⁶ Ministère du Logement, de l'Égalité des Territoires et de la Ruralité, site, <http://www.logement.gouv.fr/les-ecocites> -, consulté le 23 Août 2015

Les actions techniques attendues

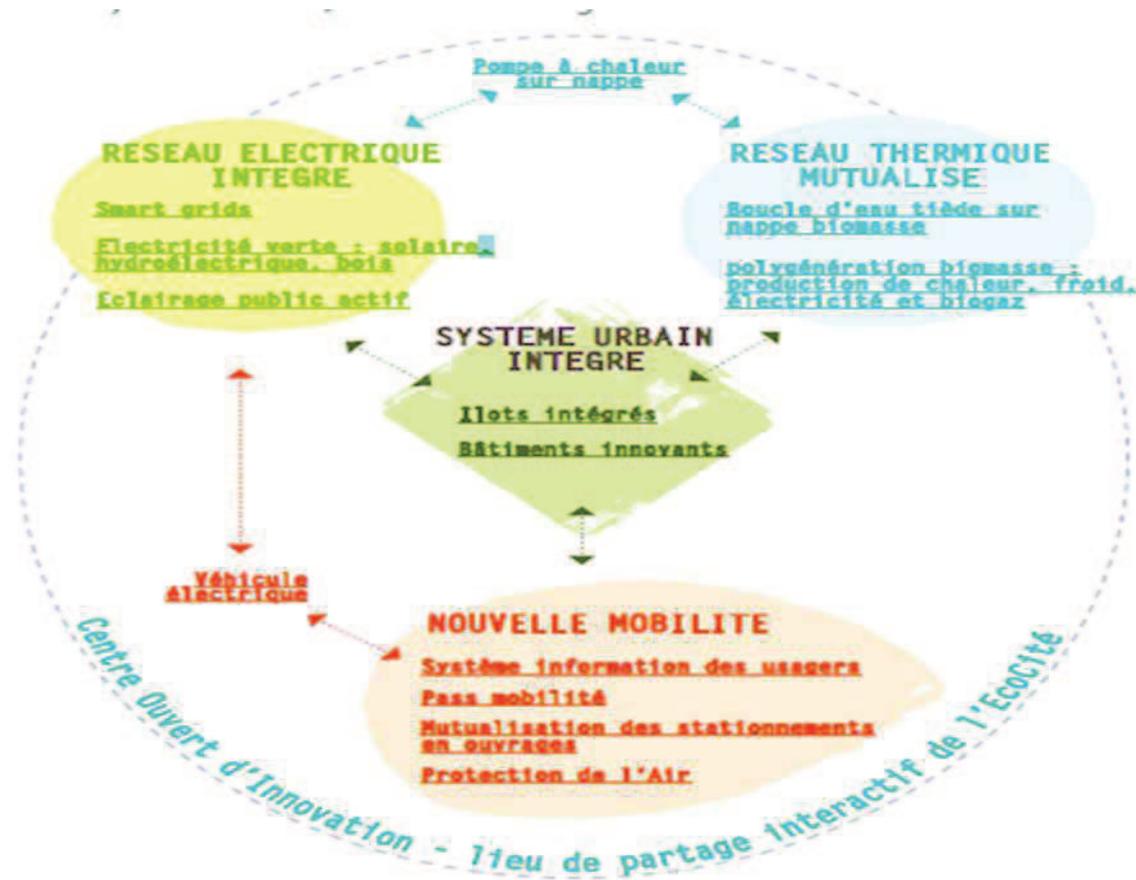
La proposition grenobloise dans le cadre du concours Ecocités vise à proposer un véritable « démonstrateur » de la ville de demain¹⁰⁷ en s'appuyant sur le concept d'« *Ilot urbain intégré* ». Ce concept a été choisi car « *L'ilot urbain, regroupement de plusieurs bâtiments et d'espaces extérieurs à partager, semble être une bonne échelle de cellule de vie pour penser de nouveaux modes de vie et tendre vers la ville post-carbone. Il constitue la brique de base qui doit s'intégrer à la fois à la ville et à son environnement naturel. Toutes les thématiques du projet (énergies, usages, mobilités, formes urbaines...) doivent être pensées à l'échelle de l'ilot de manière cohérente et dans un esprit de développement durable.* » [Ville de Grenoble, 2011, p 59].

La vision systémique du projet grenoblois s'articule autour de trois thématiques: le système urbain intégré, l'énergie et la mobilité¹⁰⁸ [Figure 14 : Schéma décrivant le système urbain intégré]. Le système urbain intégré vise à faire dialoguer le réseau électrique, le réseau thermique et la mobilité grâce à la « *mutualisation des moyens, des espaces et des usages* » [Ville de Grenoble, 2011, p 57]. L'objectif est que l'Ecocité devienne une zone à énergie positive et neutre en carbone. Quatre filières innovantes vont être centrales dans le développement du projet : la mobilité avec la promotion du véhicule électrique et des modes de transports alternatifs, le bâti avec un haut niveau de performance des constructions attendu et l'évolution des métiers du bâtiment, l'approvisionnement électrique avec l'installation de réseaux intelligents et enfin, le bois-énergie avec la structuration de la filière bois au niveau régional. Cette vision systémique est décomposée en douze actions phares organisées en vingt-quatre fiches actions [Annexe 10 : Fiches Actions du projet Ecocité] [Ville de Grenoble, 2011].

¹⁰⁷ Le terme revient 17 fois dans le dossier de candidature à propos du projet Presqu'île.

¹⁰⁸ Dans le cadre de cette analyse, seul l'aspect énergétique sera traité, la partie mobilité est exclue

Figure 15: Schéma décrivant le système urbain intégré Source : Ecocité Grenobloise : Vivre la ville post-Carbone dans les Alpes, Dossier de candidature, mars 2011, 79p, p56



4.2.2. Les échelles de réalisation de l'Ecocité proposées par la ville de Grenoble

Le dossier de candidature élaboré par la ville de Grenoble (« *Ecocité Grenobloise : vivre la ville post-carbone dans les Alpes* »¹⁰⁹) montre la forte volonté de la collectivité de réaliser une transition énergétique et durable sur ce territoire. Cette ambition vise non seulement le renouvellement et l'intensification urbaine mais également le développement de la mixité fonctionnelle autour de l'enseignement supérieur, de la recherche, de l'emploi, de la haute qualité environnementale et de la qualité des services. L'enjeu est de concrétiser la ville durable sur l'ensemble de l'agglomération au-delà des projets d'aménagement déjà nombreux sur le territoire urbain¹¹⁰ [Ville de Grenoble, 2011 ; MELTR, 2013].

¹⁰⁹ Grenoble Alpes Métropole et Ville de Grenoble, mars 2011, « *Ecocité Grenobloise : vivre la ville post-carbone dans les Alpes* », dossier de candidature, 79 p

¹¹⁰ Il peut être cité la ZAC de Bonne, le quartier Flaubert, les aménagements du quartier Châtelet ou encore les aménagements de l'Abbaye et la création du pôle d'échange au niveau de la gare.

Le projet Ecocité de Grenoble est présenté comme une réflexion à l'échelle urbaine dans laquelle différentes propositions illustrent les multiples facettes de la ville durable. Ainsi, le démonstrateur du concept de système urbain intégré s'étend sur une zone qui englobe le Nord-Ouest de la ville de Grenoble et les communes voisines. Le projet technique est quant à lui exécuté dans le périmètre défini par la ZAC Presqu'Ile qui s'étend sur 250 hectares subdivisés en 3 grandes zones de réalisations.

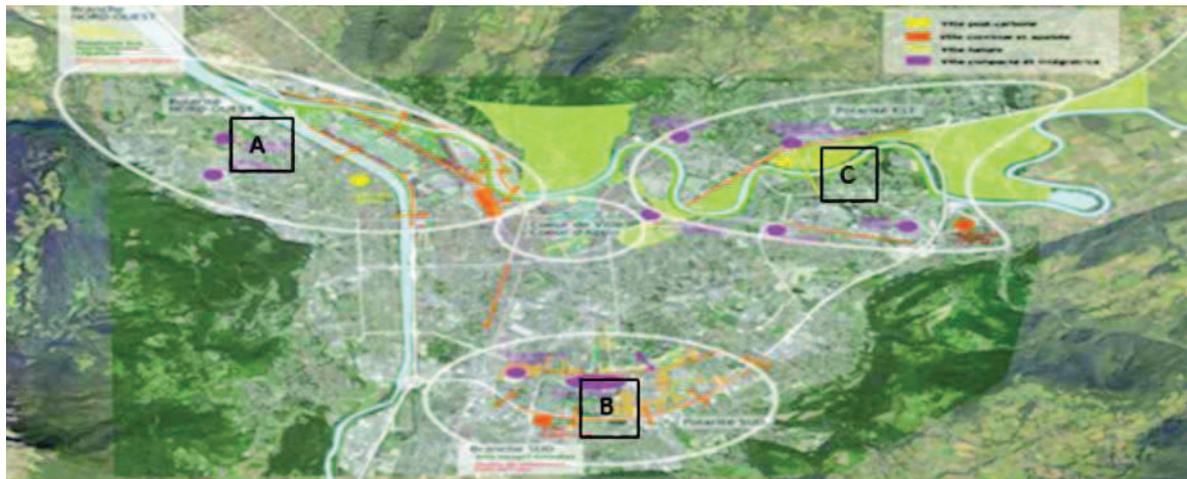
4.2.2.1. L'échelle urbaine : une vision globale pour la ville

Les orientations stratégiques de la collectivité grenobloise s'articulent autour de quatre thématiques [Grenoble Alpes Métropole et Ville de Grenoble, 2011] :

- **Une ville post-carbone**, qui sera économe en énergie et en ressources grâce à des technologies performantes, de nouvelles pratiques et de nouveaux usages. Elle sera construite autour de trois objectifs : atteindre le facteur 4 pour 2050, respecter l'objectif du Paquet Climat-Energie (PCE) inscrit dans la Convention des Maires et atteindre le « 3*14 » pour 2014. Ce dernier point repose sur le même concept que le PCE mais avec des objectifs de réduction de 14% des émissions à l'horizon 2014 pour l'agglomération ;
- **Une ville continue et apaisée**, sans ruptures urbaines. Ce but traduit une volonté de faire de la ville le support d'une plateforme de services de proximité maillés et reliés par l'espace public tout en développant un réseau d'équipements structurants et une offre fournie de mobilité. Elle se traduit également par une volonté de réduire les nuisances urbaines telles que le bruit, la pollution et les îlots de chaleur urbains ;
- **Une ville nature**, qui réalise la continuité des espaces verts et bleus au sein de l'agglomération ;
- **La ville intégratrice**, qui permette une mixité sociale et fonctionnelle dans l'ensemble de la ville ce qui se traduit par une intensité urbaine, une haute qualité de service, le renforcement des aménités, le fait de concevoir et faire vivre des quartiers intégrés dans la ville par de nouvelles formes urbaines ainsi que par le développement de la participation des habitants dans les projets urbains.

Le programme d'actions transversales est décliné sur trois zones urbaines qui intègrent plusieurs communes [Carte 7 : Structuration de l'agglomération grenobloise autour de 3 polarités en relais du cœur de ville/cœur de l'agglomération]. Correspond à la polarité Nord-Ouest, la zone A est structurée autour de la Presqu'Ile à la confluence du Drac et de l'Isère. Localisée sur la polarité Sud, la zone B se caractérise par une forte concentration de l'habitat et plusieurs équipements structurants. Enfin, située de part et d'autre de l'Isère, la zone C correspond à la polarité Est ; elle regroupe le site Est du campus et la plaine amont encore peu urbanisée. Ces trois ensembles urbains sont tous desservis par une gare et des transports en commun offrant des possibilités d'intensification urbaine importantes.

Carte 7 : Structuration de l'agglomération grenobloise autour de trois polarités, en relais du cœur de ville/cœur d'agglomération.
Source : Ecocité Grenobloise : Vivre la ville post-Carbone dans les Alpes, Dossier de candidature, mars 2011, 89 p, p12

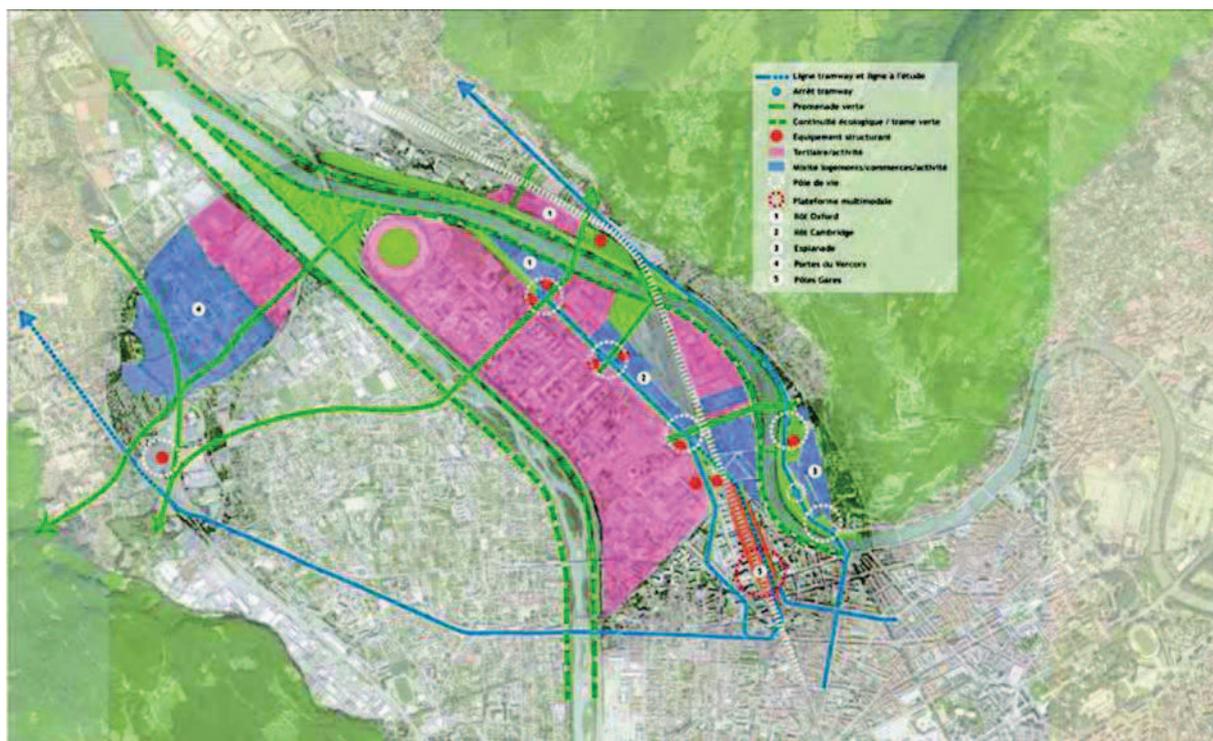


4.2.2.2. La polarité Nord-Ouest

La polarité Nord-Ouest située autour de la Presqu'île à la confluence du Drac et de l'Isère a été choisie pour candidater au programme Ecocité [Zone A]. Elle se situe sur un territoire qui comporte quatre communes avec Saint-Martin-le-Vinoux à l'est, Grenoble au sud, Fontaine et Sassenage à l'ouest. Le choix de cette polarité s'explique par son orientation géographique et son potentiel à devenir un nœud de transport urbain stratégique pour la ville à la fois au niveau ferroviaire et au niveau routier (proximité des axes autoroutiers A48 et A480 et des gares ferroviaire et routière de Grenoble).

Le territoire de la « Presqu'île scientifique est repéré[e] comme la figure emblématique de l'agglomération Grenobloise » car il concentre de nombreuses activités à forte valeur ajoutée [Novarina & Seigneuret, 2013, p 67]. Le développement de ces activités initié par l'installation du Commissariat à l'Energie Atomique dans les années 1950 continue aujourd'hui avec la présence de grands instituts de recherche publics (CNRS, CEA, Minatech,...) et privés (Sun Microsystems, Xerox Research Centre Europe, HPLab) ainsi qu'avec l'installation d'activités industrielles (Schneider, Siemens, STElectroincs, Biomérieux) et tertiaires (Palais de Justice, Grenoble Ecole de Management,...). Bien que cette zone soit riche d'activités, elle est néanmoins perçue comme déconnectée du reste de la ville en raison de son caractère enclavé par la présence des lignes de chemins de fer et de l'autoroute qui l'isolent du reste de la ville. L'enjeu est donc de redynamiser cette zone et de la reconnecter au reste du territoire urbain [Carte 8 : Périmètre de la polarité Nord-Ouest dans laquelle le projet Ecocité prendra place].

Carte 8 : Périmètre de la polarité Nord-Ouest dans laquelle le projet Ecocité prendra place -Source : Ecocité Grenobloise : Vivre la ville post-Carbone dans les Alpes, Dossier de candidature, mars 2011, 89 p, 29



4.2.2.3. L'échelle administrative : La ZAC Presqu'île

Le projet Ecocité est situé sur la Presqu'île grenobloise, au confluent du Drac et de l'Isère ; ce qui représente 1 million de m² de SHON¹¹¹ à construire sur un territoire de 250 hectares [Carte 9 : Les différents secteurs de la Presqu'île]. L'essentiel de ce territoire a fait l'objet en 2009 d'une nouvelle Zone d'Aménagement Concertée (ZAC)¹¹² afin de financer la réalisation d'infrastructures publiques [Grenoble Alpes Métropole et Ville de Grenoble, 2011]. D'après le dossier de candidature, le périmètre de la ZAC Presqu'île représente pratiquement 15% de la surface de la ville et regroupe principalement des pôles de compétitivité¹¹³, des laboratoires de recherche internationaux et des industries. Alors que

¹¹¹ La Surface Hors d'œuvre Nette (SHON) est une mesure de superficie des planchers pour les projets de construction immobilière. Cette mesure était utilisée en droit de l'urbanisme français jusqu'en mars 2012.

¹¹² La Zone d'Aménagement Concertée (ZAC) a été définie par la loi d'orientation foncière du 30 décembre 1967 et modifiée par la loi n°2000-1208 du 13 décembre 2000 -art 7-. Elle est définie dans le code de l'urbanisme à l'article L.311.-1 comme suit « Les zones d'aménagement concertée sont les zones à l'intérieur desquelles une collectivité publique ou un établissement public y ayant une vocation décide d'intervenir pour réaliser ou faire réaliser l'aménagement et l'équipement des terrains, notamment de ceux que cette collectivité ou cet établissement a acquis ou acquerra en vue de les céder ou de les concéder ultérieurement à des utilisateurs publics ou privés. »

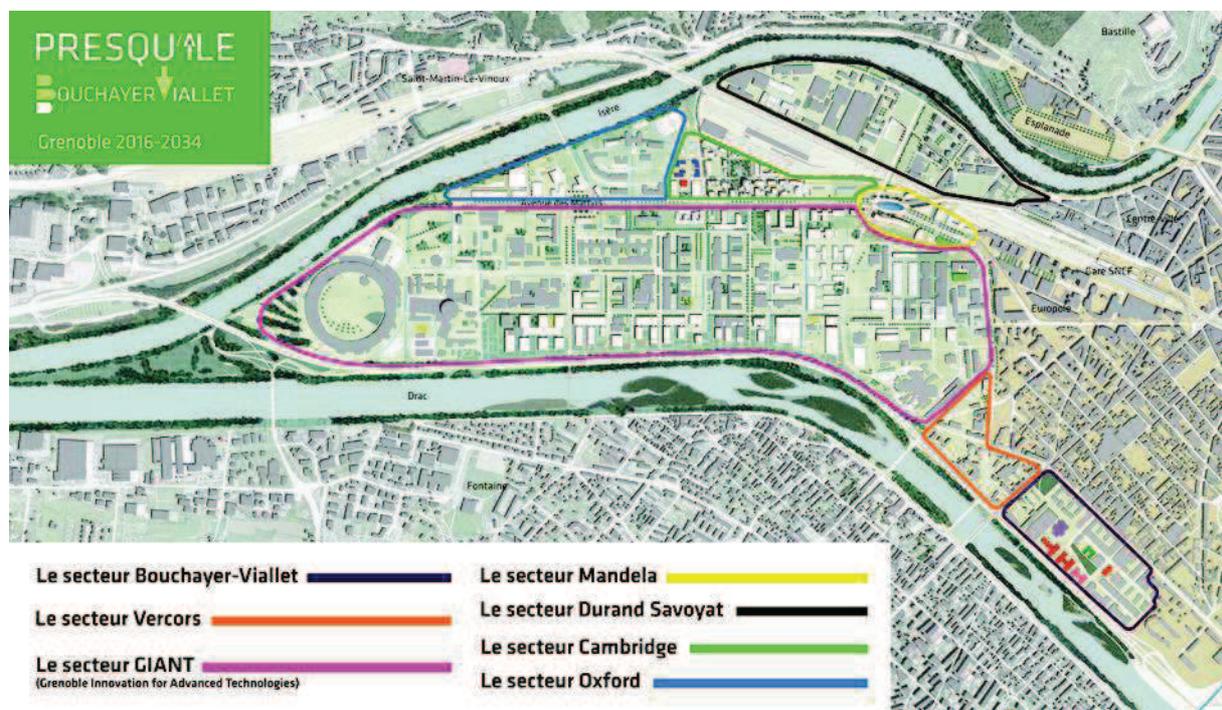
¹¹³ L'article 24 de la loi n°2004-1484 du 30 décembre 2004 énonce que « Les pôles de compétitivité sont constitués par le regroupement sur un même territoire d'entreprises, d'établissements d'enseignement supérieur et d'organismes de recherche publics ou privés qui ont vocation à travailler en synergie pour mettre en œuvre des projets de développement économique pour l'innovation. ». Cette définition est le pendant des pôles d'innovation définis par l'Union Européenne.

ce secteur était presque exclusivement tertiaire, le projet vise à faire de ce lieu de travail un lieu de vie. C'est pourquoi, il prévoit aussi :

- 1 800 à 2 200 logements familiaux dont 30% de logements sociaux ;
- 2 700 à 3 300 logements pour étudiants et chercheurs ;
- 25 000 m² de commerces, loisirs et services ;
- 25 000 m² d'équipements collectifs et de loisirs ;
- 800 000 m² d'activités économiques, de recherche et d'enseignement supérieur.

L'ensemble de ces infrastructures doit être réparti dans différents secteurs constituant la ZAC Presqu'Ile. Nous nous intéresserons plus particulièrement à 3 de ces secteurs dans les sous-parties suivantes [Carte 9 : Les différentes zones de la Presqu'Ile].

Carte 9 : Les différentes zones de la Presqu'Ile –site : <http://www.grenoble.fr/545-presqu-ile.htm>, consulté le 30 novembre 2016-



L'Ecocité de Grenoble a l'originalité de proposer une réflexion multi-échelles du renouvellement urbain. La Presqu'Ile, territoire grenoblois emblématique pour son fort potentiel scientifique et technique, est divisée en plusieurs secteurs ayant des fonctions diverses qui rendent compte non seulement de l'histoire mais également du besoin d'accroître l'attractivité économique et sociale sur le périmètre.

Le secteur GIANT

Le campus Grenoble Innovation for Advanced Technologies (GIANT) réunit sur une même zone, la recherche, les plateformes technologiques, les instituts d'enseignement supérieur et les partenaires industriels. Le campus prend principalement place sur le site du Commissariat à l'Energie Atomique. Il est prévu 150 000 m² de bâtiment scientifique et 50 000 m² de bâtiment universitaire. L'école universitaire de l'énergie GreEN-Er (Grenoble Energie Ressources) portée par la communauté d'universités et établissements de Grenoble (COMUE) et pilotée par l'Institut Polytechnique de Grenoble (Grenoble INP) est déjà construite.

Le secteur Oxford

Le secteur Oxford s'étend sur 5,5 hectares et doit accueillir des activités tertiaires comme 23 000 m² de bureaux pour Schneider Electric et de 12 000 m² de bureaux pour le Crédit Agricole. Ces bâtiments sont en cours de construction.

Le secteur Cambridge

Le secteur Cambridge sera une zone de mixité fonctionnelle et sociale. En termes de mixité sociale, 960 logements et 450 chambres étudiantes doivent être construits sur cette zone. La répartition des logements est de 50% de logements en accession à la propriété, 40% de logements locatifs et 10% d'accession sociale. La mixité intergénérationnelle est représentée par la présence d'une crèche publique et la présence de chambre universitaire. La mixité fonctionnelle est prévue avec 2 300m² dédiés aux commerces de proximité (boulangerie, restaurant, pharmacie). Une réflexion a également été entreprise sur la mobilité des personnes que nous ne détaillerons pas ici Le secteur Cambridge est la zone principale de réalisation du projet énergétique.

4.2.3. Le financement du projet Ecocité Grenobloise

Les projets Ecocités sont financés par le fond Ville de Demain issu du Programme d'Investissement d'Avenir (PIA) piloté par le Commissariat Général à l'Investissement. Ce programme a été créé à la demande de l'Etat afin de financer des investissements innovants permettant le développement du territoire. Le PIA était doté de près de 47 milliards d'euros entre 2010 et 2015 (en 2010 : 35 milliards d'euros et en 2014 : 12 milliards d'euros). En 2016, 10 milliards d'euros supplémentaires ont été débloqués pour le troisième volet des PIA qui s'étend sur la période 2016-2020¹¹⁴.

¹¹⁴ Caisse des dépôts, <http://www.caissedesdepots.fr/activite/domaines-daction/investissements-davenir/investissements-davenir.html>, consulté en juillet 2015

D'après le dossier de candidature pour la participation au concours Ecocité, la ville de Grenoble aurait demandé une aide publique de près de 40 millions d'euros [Grenoble Alpes Métropole et Ville de Grenoble, 2011] [Annexe 11 : Les financements demandés pour Ecocité] et obtenu 26,7 millions d'euros dont 22,9 millions d'euros sont alloués par le fond Ville de Demain innovations urbaines et 3,8 millions d'euros par le fond pour les Transports en Collectif en Site Propre [MLETR, 2013]. Ce financement est relatif à la Tranche 1. L'Ecocité grenobloise a également bénéficié de financements de la Tranche 2 à hauteur de 7,9 millions d'euros [MLETR, 2016].

Depuis le premier semestre 2014 et jusqu'en 2019, l'Ecocité grenobloise reçoit également des financements européens¹¹⁵ provenant du projet européen City-Zen¹¹⁶ qui vise à présenter des projets de démonstrations ambitieux à l'échelle du quartier, renforcer les liens entre les collectivités et les acteurs industriels et développer des outils de planification énergétique innovants [Broersma et al, 2015]. Ce projet regroupe deux quartiers européens tests, Nieuw West à Amsterdam et le quartier Presqu'île de Grenoble.

4.2.4. Présentation des acteurs énergétiques présents dans Ecocité

La présentation du rôle des acteurs énergétiques de l'Ecocité grenobloise est basée sur les entretiens effectués lors de l'enquête de terrain en 2015 et les informations complémentaires contenues dans notre base d'information [Annexe 12 : Le jeu d'acteurs pour le projet énergétique de la Presqu'île]. Ce projet a connu plusieurs évolutions majeures depuis son lancement.

A l'origine, le projet GIANT¹¹⁷ développé par le CEA notamment son directeur Jean Therme ambitionnait depuis 1999 de développer un cadre scientifique, économique et industriel propice à l'innovation à Grenoble. En 2007, le cabinet Interland indique que ce projet pourrait avoir un impact positif non seulement au niveau économique et scientifique mais également sur la vie urbaine. Alors dirigée par Michel Destot (PS)¹¹⁸, la Ville de Grenoble, trouve un intérêt au développement de la Presqu'île afin d'insuffler une dimension urbaine tout en renforçant la position de la ville dans la compétition scientifique et universitaire internationale. Ce rapprochement pousse les élus à réfléchir à

¹¹⁵ Ce projet bénéficie d'un financement provenant du septième Programme de recherche, de développement technologique et de démonstration de l'Union Européenne dans le cadre de l'accord de subvention n°608702

¹¹⁶ City-Zen, <http://www.cityzen-smartcity.eu/fr/objectifs/>, consulté en novembre 2016

¹¹⁷ Le projet GIANT (Grenoble Innovation for Advanced New Technologies) est une alliance de 8 partenaires ayant la volonté de tisser des liens entre la recherche, l'industrie et l'enseignement supérieur afin de soutenir les avancées technologiques qui feront les plus-values économiques et sociétales de demain dans une perspective innovante. Ces partenaires se regroupent autour de trois thématiques centrales pour le futur : l'information et la communication, les énergies renouvelables et les questions environnementales et enfin, la santé. Les huit acteurs sont des acteurs du monde de la recherche (CEA, CNRS), de l'enseignement supérieur (Grenoble Ecole de Management, Grenoble INP, Université Grenoble Alpes) et des laboratoires européens de pointe (European Molecular Biology Laboratory, European Synchrotron Radiation Facility, et l'Institut Paul Langevin).

¹¹⁸ Michel Destot fut maire de la ville de Grenoble de 1995 à 2014 et était affilié au Parti socialiste.

l'intégration des activités de GIANT dans la ville. Un projet est alors développé et dessiné par l'architecte Christian de Portzamparc¹¹⁹. Afin de le financer et d'accéder à une certaine visibilité, la ville de Grenoble et l'intercommunalité présentent le projet au concours Ecocité¹²⁰ en 2009. La proposition est retenue en 2011 et sa mise en œuvre commence aussitôt.

Un tournant dans la gestion de l'Ecocité advient suite aux élections municipales du printemps 2014. La ville change de direction politique avec l'arrivée d'une nouvelle équipe portée par Eric Piolle affiliée au parti Europe Ecologie Les Verts (EELV). Elle renonce au projet phare de création d'une boucle locale d'eau tiède pour approvisionner en chaleur le secteur Cambridge pour des raisons économiques. De plus, suite à la loi du 27 janvier 2014 relative à la Modernisation de l'Action Publique territoriale et de l'Affirmation des Métropoles¹²¹, la compétence énergie de la ville de Grenoble passe à la Métropole au 1^{er} janvier 2015 ; ce qui modifie le processus de prise de décision pour les sujets liés à l'énergie.

La société d'économie mixte¹²² Innovia Grenoble Durablement est le partenaire usuel de la ville pour la mise en œuvre sa politique territoriale et notamment les opérations d'aménagement. Elle concilie les impératifs d'intérêt général de la politique publique et la recherche de l'efficacité économique et met en œuvre la concertation avec les citoyens. Innovia s'est révélée être un acteur central du volet énergétique du projet Ecocité et plus particulièrement sur la partie liée à l'approvisionnement en chaleur.

¹¹⁹ Site de Christian de Portzamparc : <http://www.christiandeportzamparc.com/fr/projects/grenoble-esplanade/>

¹²⁰ Les innovations proposées dans le projet initial sont énoncées dans la partie II.A du dossier de candidature [Grenoble Alpes Métropole et Ville de Grenoble, 2011]

¹²¹ Loi n° 2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles clarifie les compétences des collectivités territoriales en établissant plusieurs dispositions comme la création de collectivités chefs de file ou encore du statut du Grand Paris. Le statut des Métropoles est précisé. Ainsi, neuf métropoles sont créées (Bordeaux, Grenoble, Lille, Nantes, Nice, Rennes, Rouen, Strasbourg et Toulouse) en plus de Lyon et de Aix-Marseille. Ces métropoles exerceront des compétences renforcées par rapport aux intercommunalités classiques comme en matière de schéma de cohérence territoriale, d'aménagement des gares présentes sur leur territoire ou en matière de logements. Elles pourront également exercer des compétences allouées normalement aux départements ou aux régions. Les métropoles auront surtout une fonction d'autorité organisatrice d'une compétence qu'elles exercent sur leur territoire. En ce sens, elles définissent les obligations de service public tout en assurant sa bonne gestion ainsi que l'intervention sur les réseaux concernés par l'exercice de leurs compétences [Gerbeau, 2014].

¹²² La Société d'Economie Mixte est une société anonyme dont la majeure partie du capital est détenue par des personnes publiques comme l'Etat ou une collectivité. Le capital dont la propriété appartient à des personnes publiques est plafonné à 85%. Cette structure est issue de la Loi du 7 juillet 1983 relative aux sociétés d'économie mixte.

Deux organisations assurent l'essentiel de l'approvisionnement énergétique à Grenoble comme dans le projet Ecocité. L'entreprise locale de distribution¹²³ (ELD) Gaz et Electricité de Grenoble¹²⁴ (GEG) a pour principale mission de distribuer l'électricité et le gaz sur le territoire grenoblois, elle supervise aussi l'action de monitoring territorial dénommée VivaCité¹²⁵. La Compagnie de Chauffage de Grenoble¹²⁶ (CCIAG) a la charge - par délégation de service public de la ville puis de la Métro - d'assurer l'approvisionnement en chaleur des grenoblois. Dans le cadre du projet Ecocité, cet acteur devait déployer et gérer la boucle locale d'eau tiède. Le renoncement de la municipalité à la boucle tiède ainsi que le fait que la proposition alternative de la CCIAG n'ait pas été retenue (cf. infra) a entraîné son exclusion du projet Ecocité.

4.3. La proposition énergétique du projet Ecocité

Le projet de l'Ecocité grenobloise annonce dans le dossier de candidature une « *gestion coopérative* » de l'énergie afin de répondre aux enjeux liés à l'évolution de la demande et de l'offre énergétique dans les années à venir [Ville de Grenoble ; 2011, p 65]. Cette approche coopérative repose sur une vision systémique basée sur la sobriété énergétique, la production locale d'énergie renouvelable ainsi que la présence de moyens de stockage et une gestion coopérative dans les bâtiments afin d'effacer les pointes.

4.3.1. Le projet initial, présenté dans la candidature Ecocité

Cette sous-partie présente dans un premier temps le projet énergétique tel que proposé lors de la candidature au concours Ecocités puis dans un second temps le projet tel qu'il a été réalisé.

¹²³ Nées au début du vingtième siècle sous la forme de régie ou de société d'intérêt collectif agricole d'électricité, les entreprises locales de distribution ont pour rôle d'assurer la distribution voire la fourniture d'énergie électrique et/ou gazière par les collectivités locales. Dans la grande majorité des cas, elles assurent la fourniture d'énergie et elles peuvent être parfois à l'origine de la production sur la zone. Les collectivités locales ont généralement conservé le statut d'autorité concédante. Sur leur territoire, elles ont toujours le monopole de la distribution et doivent assurer un accès équitable à leurs réseaux pour tous les fournisseurs. En France, elles représentent 5% de la distribution et sont présentes dans 2 500 communes.

¹²⁴ Gaz et Electricité de Grenoble est une société d'Economie Mixte détenue à 50%+1 action par la ville de Grenoble, à 42,53% par Engie et à 7,47% par un ensemble de sociétés privées et publiques. <https://groupe.geg.fr/67-nos-actionnaires-et-dirigeants.htm>, consulté en décembre 2016

¹²⁵ Développé dans la partie 2.3.1.3

¹²⁶ La Compagnie de Chauffage de Grenoble (CCIAG) est une société mixte locale composée d'un actionariat public et privé constitué à 52% par la ville de Grenoble, 42% par Dalkia, 5% Grenoble Alpes Métropole et 1% par la ville d'Echirolles. Elle fournit l'énergie à 95 000 équivalent-logements sur sept communes grâce à un réseau maillé de 168 km. A partir de 2010, la production de la CCIAG est composée à 50% d'énergies vertes. <http://www.cciag.fr/>, consulté en décembre 2016

4.3.1.1. Les ambitions sur le bâti

Le projet reposait d'abord sur la performance énergétique des bâtiments. Certains ouvrages devaient dépasser les normes thermiques en vigueur pour atteindre les caractéristiques des Bâtiments Basse Consommation (BBC) voire des Bâtiments à Energie Positive (BEPos). Il s'agissait notamment des projets d'envergure, comme la tour d'habitation de plus de 100 mètre de hauteur sur le site de l'Esplanade qui devait répondre aux critères BEPos ou encore la construction des bureaux de Schneider Electric qui devaient atteindre un très haut niveau de performance énergétique. Ces constructions devaient être réalisées en minimisant les surcoûts potentiels et en tenant compte des consommations d'énergie imputables à la production, au transport et à l'assemblage des matériaux de construction afin de diminuer le bilan des énergies grises du territoire [Grenoble Alpes Métropole et Ville de Grenoble, 2011]¹²⁷.

4.3.1.2. La proposition initiale d'approvisionnement thermique

Le projet Ecocité privilégie des productions bas carbone avec pour ambition d'atteindre « *l'autonomie complète du quartier pour les besoins thermique* » [Grenoble Alpes Métropole et Ville de Grenoble, 2011, p 66].

En matière de distribution de chaleur, deux systèmes complémentaires étaient proposés. Une extension du réseau de chauffage urbain historique de l'agglomération – eau surchauffée à 180° raccordée – devait être alimentée par une centrale biomasse de trigénération (chaleur, électricité, froid) localisée sur la Presqu'île. Connectée à cette extension, une boucle d'« eau tiède » devait être déployée sur une grande partie de la presqu'île. Contrairement aux boucles de chaleur classiques comportant un point d'entrée et de nombreuses sorties, ce système comportait plusieurs points d'entrées et de sorties. Ce dispositif innovant aurait dû permettre de récupérer et de mutualiser la chaleur de divers effluents (eaux usées, par exemple) et également de fournir du froid, l'ensemble grâce à des pompes à chaleur réversibles raccordées à la boucle et installées en interface avec des bâtiments. Complétés par des apports du réseau de chaleur urbain ou par la géothermie sur la nappe phréatique, cette boucle devait chauffer des bâtiments en hiver et les rafraîchir en été.

Par ces différents dispositifs, la métropole grenobloise visait un bilan neutre en carbone en 2020 pour le projet urbain Ecocité [Grenoble Alpes Métropole et Ville de Grenoble, 2011].

¹²⁷ Il n'existe pas de définition précise de l'énergie grise au niveau européen. Néanmoins il peut être considéré que l'énergie grise d'un bâtiment équivaut à la somme des énergies grises des produits qui le compose. Toutes les étapes d'un produit de construction sont énergivores (extraction des matières, étapes de transformation, condiments, mise en œuvre, recyclage, destruction, les transports utilisés) ; c'est donc en additionnant les énergies primaires consommées à chacune de ces étapes que l'énergie grise d'un produit est déterminée.

4.3.1.3. La proposition d’approvisionnement électrique

Les propositions faites pour la partie électrique étaient basées sur une gestion dite coopérative du réseau électrique et une production décentralisée bas carbone afin d’obtenir une autonomie de 15 à 25% pour l’approvisionnement électrique du site. Il était ainsi prévu d’installer d’une micro-centrale hydroélectrique d’une puissance de 1.4 MW fonctionnant avec les faibles chutes d’eau du Drac pour une production de 7 GWh par an. A cette capacité de production, il convenait d’ajouter une couverture solaire installée sur la toiture du Synchrotron ESRF et une ombrière solaire sur un parking qui devait également accueillir des bornes de recharges de véhicules électriques pour un apport de 2.5 GWh par an [Grenoble Alpes Métropole et Ville de Grenoble, 2011].

La gestion coopérative du réseau électrique devait être effectuée grâce à la réalisation d’un démonstrateur « Smart Grid » réalisé dans le cadre du projet GreenLys¹²⁸ et un éclairage public actif (modulation de l’intensité lumineuse associée à des détecteurs de mouvements), censé rendre l’éclairage plus efficace et donc moins consommateur d’énergie.

4.3.1.4. Le monitoring territorial

Une action de monitoring multi-flux (eau, électricité, chaleur,...) était enfin proposée afin d’affiner la connaissance des opérateurs d’énergie sur les usages et les modes de consommation des différents types de consommateurs (habitants, travailleurs,...). Cette innovation se présentait sous la forme d’un outil collaboratif de gestion de données. L’ensemble des acteurs locaux de l’énergie et de l’eau participaient à ce projet nommé VivaCité¹²⁹ : Gaz et Electricité de Grenoble, Eau de Grenoble, la CCIAG, l’Agence Locale de l’Energie et du Climat (ALEC).

Grâce à des capteurs comme les compteurs Linky ou Gaspard installés dans différents bâtiments (logements résidentiels, collectifs, neufs ou existants), les données de consommation sont récoltées. Une fois agrégées, elles sont diffusées à différents acteurs, bailleurs sociaux ou syndicats de copropriété pour des analyses pouvant conduire à des actions de maîtrise de la demande énergétique.

¹²⁸ Le projet GreenLys est un projet d’expérimentation *smart grids* qui a pour vocation d’envisager le modèle énergétique de demain et qui est réalisé à Lyon et Grenoble. Premier démonstrateur européen à tester le fonctionnement d’un *smart grid* dans une perspective d’intégration des énergies renouvelables et des véhicules électriques [ADEME, 2014]. Il est recherché une meilleure coordination entre tous les acteurs de la chaîne de valeur électrique. Le rôle du consommateur a été mis au cœur de la réflexion dans le projet que ce soit pour la remontée d’information ou l’effacement. Les résultats ont démontré la baisse de la facturation des consommateurs si une offre tarifaire adaptée est appliquée, l’apparition de la fonction d’auto-cicatrisation du réseau, le rôle joué par la tension dans l’intégration des énergies renouvelables à ce niveau du réseau, l’intérêt d’optimiser les usages des véhicules électriques afin de limiter les pics de consommation.

¹²⁹ Site Smart-Grid CRE, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=grenoble-ecocite>, consulté en mai 2017

4.3.2. Le projet énergétique en cours de réalisation

Les entretiens réalisés avec différents acteurs participant au projet ont révélé des évolutions importantes dans la réalisation du projet par rapport à ce qui figurait dans le dossier de candidature au concours Ecocité.

4.3.2.1. L'énergie thermique : abandon de la boucle d'eau tiède

Considérée comme la proposition la plus innovante par une grande partie des acteurs interrogés, la boucle locale d'eau tiède n'a pas été déployée sur la presqu'île.

Elle résultait des études de définition d'approvisionnement énergétique engagées sur le périmètre de la Presqu'île menées par l'aménageur Innovia Grenoble Durablement. Plusieurs propositions techniques avaient été identifiées par l'aménageur. La première consistait à utiliser le réacteur nucléaire présent sur la Presqu'île mais elle avait très vite été abandonnée en raison d'une incertitude à moyen et long terme sur la pérennité de ce réacteur, corolaire à la filière nucléaire. La seconde proposition consistait à utiliser la chaleur fatale produite par l'ensemble des systèmes existants sur la zone, elle n'avait pas non plus été retenue en raison de trop nombreuses incertitudes sur le plan technologique. La troisième consistait à réaliser une boucle d'eau tiède alimenté par le collecteur des eaux usées géré par la Métro et mutualisant les rejets et soutirages d'énergie entre les bâtiments tertiaires et résidentiels. Ainsi quel que soit l'endroit où ils trouvaient, les bâtiments auraient eu la possibilité de soutirer ou injecter des calories dans le réseau d'eau tiède. Le postulat de départ d'Innovia était que les bâtiments construits seraient tous très performants au niveau thermique et qu'ils auraient par conséquent de faibles consommations de chaleur. Outre l'alimentation en chaleur de la zone, l'intérêt du projet était d'utiliser le réseau d'eau tiède pour le refroidissement des bâtiments.

Innovia s'est naturellement tournée vers la Compagnie de Chauffage de Grenoble (CCIAG) pour réaliser la boucle d'eau tiède puisque la société d'économie mixte est le concessionnaire du réseau de distribution de chaleur de l'agglomération. Une étude de la CCIAG a confirmé la pertinence technique du projet mais suggéré - pour réduire les coûts et la complexité de mise en œuvre - d'utiliser un collecteur d'eau appartenant à EDF¹³⁰ plutôt que le collecteur d'eau grise de la Métro. L'utilisation du réseau EDF évitait la construction d'une centrale de traitement des eaux usées et simplifiait l'installation technique. Par ailleurs, du fait de la rénovation récente du réseau de chaleur du CEA (de très loin le principal établissement, employeur et propriétaire foncier de la presqu'île), la CCIAG préconisait de limiter la boucle tiède à un simple démonstrateur technologique et, par conséquent, de réduire le périmètre desservi. Le projet situé sur le secteur Cambridge devait concerner moins de 30 hectares soit à peine plus de 10% de la surface de la ZAC Presqu'île mais près de 40% des 800 000 m² habitables de la zone.

¹³⁰ Le collecteur EDF a pour fonction de gérer le niveau de la nappe phréatique présente sous la surface de la Presqu'île depuis la construction d'un barrage en amont de la ville de Grenoble quelques années plus tôt.

Le changement de municipalité en mars 2014 a remis en cause le projet. Dirigée par Éric Piolle (EELV), la nouvelle municipalité a considéré que le surcoût induit par les nouvelles infrastructures n'était socialement pas acceptable pour les usagers. En raison de l'importance des coûts fixes dans la structure tarifaire de la fourniture de chaleur, la facture énergétique des consommateurs n'aurait pas diminué suffisamment pour justifier économiquement le sur-investissement initial. La nouvelle municipalité a donc pris la décision de refuser le projet de boucle tiède. L'aménageur Innovia et la Compagnie de Chauffage ont été contraints de faire de nouvelles propositions techniques au moment même où les travaux de réalisation de la boucle devaient commencer. Innovia et la CCIAG ne se sont pas accordées, la première élaborant cinq nouvelles propositions alors que la seconde n'envisageait qu'une unique option.

La proposition de la CCIAG consistait à utiliser le réseau de chauffage urbain existant. L'idée était d'abaisser la pression et la température du réseau pour alimenter la presqu'île en eau tiède. Avec cette solution, la CCIAG conservait un concept de boucle locale basse pression mais excluait la possibilité de récupération et mutualisation des apports thermiques in situ.

La société Innovia proposait d'autres solutions. Trois de ces propositions faisaient appel à des techniques de pompes sur nappe : i) installation de doublets (pompage et réinjection) géothermiques dans chaque bâtiment ; ii) réalisation de boucles tièdes internes aux îlots de bâtiments - avec pompage et réinjection - afin de mutualiser les flux non plus au niveau des bâtiments mais à l'échelle des îlots ; iii) pompage géothermique par bâtiment mais réseau d'exhaure vers la rivière. Une quatrième proposition consistait à conserver la boucle d'eau tiède mais sous forme de boucle ouverte avec rejet de l'eau dans l'Isère. Cette proposition prévoyait de pomper l'eau claire provenant du collecteur d'EDF puis de la transporter dans le quartier avant de la rejeter dans l'Isère.

Suite à l'étude des propositions faites par les deux acteurs et des contraintes temporelles dues à l'obligation de livraison des premiers bâtiments sur la Presqu'Île au premier semestre 2016, c'est une cinquième proposition de l'aménageur qui a été choisie ce qui a eu pour conséquence d'exclure la CCIAG de la réalisation technique du projet. La proposition sélectionnée consiste à installer une solution géothermique dans chaque bâtiment résidentiel du secteur Cambridge couplée à un réseau d'exhaure commun [Figure 6 : Schéma du fonctionnement du système qui sera réalisé sur le secteur Cambridge]. Ainsi, des pompes à chaleur « double service » vont puiser de l'eau dans la nappe phréatique du Drac afin d'alimenter les bâtiments en chauffage et de chauffer l'eau chaude sanitaire. L'eau pompée est ensuite évacuée dans l'Isère via un réseau d'exhaure relié aux bâtiments. Ce système évite la création d'un différentiel de température dans la nappe. En été, un rafraîchissement passif dans les bâtiments est réalisé. Cette solution conserve une dimension novatrice combinant mobilisation d'énergie renouvelable (issue de la nappe phréatique) et mutualisation, qui, certes, ne porte plus que sur l'exhaure de l'eau en aval des installations techniques bâtiments.

L'abandon de la boucle d'eau tiède a obligé les acteurs de la construction à modifier les installations techniques initialement prévues.

4.3.2.2. La centrale de cogénération

Les acteurs rencontrés font aussi référence à la construction d'une centrale de cogénération sur le périmètre de la Presqu'Île qui doit être raccordée au réseau de chaleur urbain grenoblois. Le porteur de projet de cette centrale doit être la Métropole de Grenoble. Mais celle-ci n'ayant pas la compétence requise pour réaliser ce projet, elle recherche une entreprise délégataire de service public via un appel d'offre qui prendrait en charge la construction et le fonctionnement de la centrale. A l'époque des entretiens, la CCIAG ne savait pas encore si elle allait se porter candidate pour la réalisation et l'exploitation de cette centrale biomasse d'une puissance de 30 mégawatt. La biomasse proviendra des alentours de la ville de Grenoble afin de développer la filière bois-énergie comme cela avait été évoqué dans le dossier de participation au concours Ecocités [Grenoble Alpes Métropole et Ville de Grenoble, 2011].

4.3.2.3. L'énergie électrique

L'approvisionnement électrique sur le site de la Presqu'Île devait provenir de panneaux photovoltaïques installés sur différentes infrastructures urbaines (le Synchrotron et un parking) et d'une microcentrale hydroélectrique sur le Drac. En réalité, des blocages techniques ont entraîné l'abandon de ces projets. Ainsi, des contraintes techniques spécifiques liées à la structure ont entraîné l'abandon de la centrale photovoltaïque amorphe qui devait être installée sur le toit du synchrotron. Par ailleurs, le coût des installations et leur faible retour sur investissement ont eu raison du développement d'autres capacités électriques sur la zone. L'installation de panneaux photovoltaïques est encore envisageable sur le périmètre de la Presqu'Île mais celle-ci ne dépend pas du projet Ecocité mais du choix éventuel des promoteurs immobiliers. En ce qui concerne le projet de microcentrale hydroélectrique sur le Drac, des difficultés administratives ne permettent pas de déterminer la période de réalisation.

4.3.2.4. Le monitoring territorial¹³¹

Le projet de monitoring territorial ou smart grid multi-énergies a été proposé par Gaz et Electricité de Grenoble (GEG) dès l'annonce du concours Ecocité en 2008. Tout au long du projet, GEG a porté cette thématique en collaboration avec Athos World Grid qui est une entreprise spécialisée dans le développement de logiciels. L'objectif de la démarche est de collecter des données relatives aux consommations d'énergie à différents niveaux (logements, bâtiments, îlots,...) puis de communiquer ces données organisées aux usagers finaux (client résidentiel, gestionnaire de bâtiments, gestionnaire de réseaux, collectivité,...). Le projet de monitoring territorial dans le projet Ecocité est donc

¹³¹ Fait référence au projet VIvaCité - <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=grenoble-ecocite> -

essentiellement basé sur la remontée de l'information, son traitement et la communication des résultats issus de l'analyse de l'information aux usagers. Le périmètre d'action est l'ensemble de la Presqu'Ile.

L'exercice consiste à approfondir la connaissance des consommations d'énergie sur une zone donnée mais également à déterminer quels sont les outils de communication les plus à même d'influer sur les usages énergétiques selon les profils de consommateurs concernés. GEG, qui est porteur de la fiche « monitoring territorial » au sein d'Ecocité, a été moteur dans la volonté de développer ces outils. Cet acteur considère que dans une optique de diffusion des compteurs intelligents à l'horizon 2020, il est nécessaire de déterminer clairement les besoins et le type d'information qui pourraient être pertinents pour les consommateurs.

Le but de GEG ainsi que de tous les acteurs présents dans le projet est d'anticiper l'émergence de nouveaux services ayant pour fonction d'optimiser les flux circulant dans la ville. Le gestionnaire de réseaux de distribution y voit un double avantage. Non seulement il développe ses compétences en passant d'un simple rôle de gestionnaire de réseau à celui d'offreur de services urbains mais il génère également de la valeur avec les données récoltées en approfondissant ses connaissances sur ce qui se passe sur son réseau. On observera que la contrainte imposée aux promoteurs immobiliers de prévoir l'installation d'un nouvel équipement à leur charge a été un point de tension dans la réalisation du projet.

4.4. Conclusion

Le projet Ecocité de Grenoble tel que présenté dans le dossier de candidature au concours montre une volonté de concrétiser une ville de demain bas carbone. Plusieurs thématiques sont traitées comme la mixité sociale, la mixité fonctionnelle, la mobilité ou l'environnement. Une des thématiques centrales du projet est l'énergie. La démarche proposée s'appuie sur une approche systémique dans laquelle les flux sont optimisés pour répondre aux enjeux de transition énergétique.

En ce qui concerne l'efficacité énergétique celle-ci est traitée sous l'angle de la performance énergétique et de la maîtrise de la demande d'énergie. Les bâtiments neufs répondent aux cahiers des charges imposés par la dernière réglementation thermique. Les consommations énergétiques sont suivies et analysées puis communiquées aux consommateurs sous diverses formes afin de tester les moyens les plus efficaces d'inciter à des comportements plus économes selon le profil d'utilisateurs (collectivité, usagers, acteurs énergétiques). L'approvisionnement énergétique les ressources non carbonées et, en outre, locales que ce soit pour la chaleur ou l'électricité.

L'enquête de terrain montre un décalage entre les ambitions inscrites dans le projet initial et la réalisation de ce dernier, en particulier en ce qui concerne l'approvisionnement énergétique. L'approvisionnement thermique avec la boucle locale d'eau tiède a ainsi été réduit à un seul secteur du projet (secteur Cambridge) et sa nature technique est sensiblement plus modeste. L'approvisionnement électrique reste très classique car les projets de production électrique bas carbone et locaux prévus à l'origine ont pour

l'essentiel été abandonnés. De nombreux freins, techniques, économiques et politiques sont venus les modifier faisant perdre une grande part de l'ambition présente dans le projet initial.

5. Analyse conclusive des études de cas

Les études de cas réalisées donnent un ensemble d'informations sur la genèse, la réalisation et sur l'héritage attendu d'un écoquartier sur le long terme que ce soit d'un point de vue technique, économique ou institutionnel au niveau énergétique. Ces informations éclairent la compréhension du processus d'élaboration dans son ensemble de ce type de projet urbain [Tableau 12 : Tableau récapitulatif des ambitions des différents projets d'éco-quartiers étudiés].

Le portage de projet

La création des éco-quartiers renvoie aux constats réalisés dans le Chapitre 1. Leur élaboration est faite dans des contextes spécifiques qui ne sont pas le cadre habituel de réalisation des projets urbains.

Le quartier Presqu'île dans le projet Ecocité à Grenoble s'intègre à un projet urbain beaucoup plus vaste qui ne se limite pas à cette seule zone. Le projet Ecocité couvre ainsi un large territoire qui prend en compte toute la polarité Nord-Ouest de la ville de Grenoble et plus encore. Le projet a été intégré au concours Ecocité dans le but de bénéficier de financements publics mais sa conception est antérieure au concours français. La décision politique locale pèse dans la conduite du projet comme le montre la programmation puis l'abandon de la boucle d'eau tiède pour l'approvisionnement thermique.

Le quartier GreenCity à Zurich est le plus original en termes d'acteurs car contrairement aux deux autres projets décrits dans ce chapitre, la collectivité semble peu impliquée dans la définition ou la réalisation technique du projet. La municipalité Zurichoise a été présente durant les phases de négociation avec les propriétaires du terrain pour tracer les lignes directrices du projet avec l'obligation de respecter les objectifs de la Société à 2000 Watts. Mais c'est une société privée, Losinger Marazzi, qui a développé l'intégralité du concept technique, a recherché des partenaires pour le réaliser, et finalement, a obtenu la maîtrise d'ouvrage de l'ensemble du projet.

Le projet Queen Elizabeth Olympic Park est le plus emblématique au sens où il a été amorcé dans le cadre des Jeux Olympiques de 2012. Si l'objectif principal était de recevoir les Jeux dans de bonnes conditions, l'enjeu sous-jacent était de rénover un arrondissement qui était en pleine décrépitude. De plus, le fait qu'une grande partie des infrastructures ait été construit pour les Jeux a justifié que le portage du projet se fasse par des institutions qui ne sont pas celles qui interviennent habituellement dans la réalisation des projets urbains. Ce projet fait écho aux projets d'éco-quartiers qui ont été développés dans les années 1990 lors de grands événements internationaux comme le quartier BO01 à Malmö en Suède construit pour une exposition architecturale.

Ces projets urbains diffèrent dans leur genèse. Néanmoins, ils ont tous vocation à revaloriser un territoire urbain resté à l'écart de la dynamique urbaine et de le rendre attractif pour les habitants et la collectivité. Les jeux d'acteurs dans la réalisation du projet ont évidemment un impact sur la réalisation du projet. Le processus de décision peut se révéler complexe et entraîner d'importantes modifications entre le projet initial et le projet réalisé.

Le traitement de l'approvisionnement énergétique sur le projet

La question énergétique tient une place centrale dans ces projets que ce soit en termes d'ambition ou de réalisations techniques puisque ces deux critères ont prévalu à leur sélection.

L'analyse des documents disponibles et les échanges avec les acteurs montrent que ces quartiers ambitionnent un approvisionnement décentralisé et bas carbone. GreenCity propose de réaliser un quartier alimenté à 100% par des sources d'énergies renouvelable pour l'électricité et chaleur avec une production majoritairement locale. Le projet Ecocité vise à satisfaire les mêmes orientations si ce n'est le même seuil. Et le projet londonien est présenté comme le plus grand projet de production décentralisée du Royaume-Uni avec une production de chaleur, de froid et d'électricité sur deux sites entourant le village olympique. Les projets expérimentent donc la notion d'autonomie énergétique en mettant en application la décentralisation technique des moyens de production et de distribution de l'énergie.

Au niveau de l'approvisionnement thermique, les trois projets ont réussi à réaliser des systèmes bas carbone à l'échelle locale. Ainsi, le projet Queen Elizabeth Olympic Park a deux centres énergétiques qui produisent et distribuent de la chaleur et du froid dans le village olympique et les infrastructures sportives. Ces centres sont également dimensionnés pour l'après Jeux olympiques lorsque le parc se transformera en un ensemble de cinq quartiers d'habitations. Le projet Ecocité a fortement évolué par rapport à la vision initiale mais une proportion importante de la demande de chaleur et de froid reste satisfaite par des sources locales d'énergie. Enfin, l'approvisionnement thermique du projet Greencity a également évolué mais il est dans son principe resté comparable au projet initial avec une dominante bas carbone et locale.

Au niveau de l'approvisionnement électrique, le constat est différent. Il est clair qu'aucun des projets n'a réussi à installer des systèmes permettant de réaliser un approvisionnement électrique bas carbone grâce aux seules ressources disponibles sur le territoire. La production électrique via des panneaux photovoltaïques est certes présente sur tous les projets mais celle-ci se révèle insuffisante pour couvrir la consommation du quartier. D'autres technologies ont été proposées comme la micro hydraulique sur le projet de GreenCity ou la cogénération dans le projet Queen Elizabeth Olympic Park mais ces projets d'installation ont été abandonnés par la suite (GreenCity) ou fortement réduits (Ecocité) de telle sorte que leur contribution reste très minoritaire à l'échelle du territoire (Queen Elizabeth Olympic Park).

L’approvisionnement énergétique, qu’il soit issu de sources locales bas carbone ou non, est présenté comme un système innovant dans ces projets. Le rôle de l’innovation est ici double. Il permet de rendre le territoire plus attractif pour les futurs habitants (GreenCity, Queen Elizabeth Olympic Park) voire de débloquer des subventions comme dans le cadre du programme Ecocité ou une notoriété comme les Jeux Olympiques. Néanmoins, l’innovation réside moins dans les technologies installées que dans la manière de les associer et de les gérer. En effet, ces quartiers n’ont pas vocation à constituer des démonstrateurs techniques ; la technologie installée doit donc être viable pour que les utilisateurs n’aient pas à pâtir d’un système technique défaillant.

Ces trois projets montrent bien que la question énergétique peut être traitée au niveau du quartier. L’amélioration de l’efficacité énergétique repose à la fois sur la performance énergétique des bâtiments et sur les attentes portées par les compteurs intelligents pour permettre des comportements vertueux. En revanche pour l’approvisionnement énergétique, l’appréciation est plus nuancée. S’il est possible de réaliser des systèmes d’approvisionnement énergétique bas carbone pour la chaleur, on observe que les coûts d’investissements qu’ils imposent et la structure tarifaire des réseaux ne facilitent pas leur déploiement. En ce qui concerne l’électricité, les systèmes de production locale bas carbone existent mais ils dépendent largement de la disponibilité de certaines sources d’énergie renouvelable sur le territoire (hydraulique par exemple) ou de l’importation de sources extérieures (cogénération, électricité verte) locales (biomasse) mais souvent beaucoup plus lointaines.

Tableau 11 : Tableau récapitulatif des ambitions des différents projets d’éco-quartiers étudiés [Construction de l’auteur]

	Ecocité-Presqu’île	Greencity	Queen Elizabeth Olympic Park
Performance énergétique des bâtiments			
Maitrise de la demande énergétique			
Capacité de production thermique au niveau local			
Dimensionnement des réseaux thermiques			
Capacité de production électrique au niveau local			
Dimensionnement des réseaux électriques			

Au vu des deux premiers chapitres, il apparaît donc que la prise en compte de la thématique énergétique tend à se diffuser dans la réalisation des éco-quartiers grâce à des actions nationales et locales. Néanmoins, le traitement des enjeux énergétiques n'est pas réalisé avec le même niveau d'approfondissement qu'il s'agisse d'efficacité énergétique ou d'approvisionnement énergétique.

Du côté de la demande énergétique, l'efficacité énergétique est recherchée avec le traitement de la performance énergétique et la maîtrise ou la gestion de la demande d'énergie. Ces quartiers souvent réalisés sur d'anciennes friches sont constitués de bâtiments très majoritairement neufs. Peu de projets proposent des solutions de réhabilitation ou de rénovation. Les bâtiments réalisés répondent donc aux dernières réglementations en vigueur. Il arrive également que des réalisations anticipent les futures réglementations. Ces propositions sont toutefois ponctuelles. Dans un même temps, on observe que ces projets urbains intègrent un volet de maîtrise de la demande d'énergie qui se manifeste notamment par l'installation de compteurs intelligents. L'objectif annoncé de ces installations est de mieux comprendre les profils des usagers de façon à élaborer des outils de communication, impactant dans la durée le comportement des consommateurs.

Du côté de l'offre énergétique, les propositions sont en générale moins ambitieuses. La plupart des projets étudiés ne proposent pas une réflexion poussée autour d'un approvisionnement local et bas carbone. Seules quelques installations permettant de produire de la chaleur ou de l'électricité sont présentées localement sans que celles-ci soient suffisantes pour répondre à la demande du quartier [Cf. Chapitre 1]. Néanmoins, les cas étudiés montrent une volonté d'innover dans le traitement de l'approvisionnement énergétique pour explorer de nouvelles options d'approvisionnement énergétique local et bas carbone compatible avec l'objectif de transition énergétique.

L'étude de la base d'information et l'analyse des études de cas montrent néanmoins des décalages selon les flux énergétiques étudiés. En ce qui concerne la chaleur, un approvisionnement bas carbone local est aujourd'hui techniquement envisageable alors que cette perspective reste pour une grande majorité des configurations urbaines hors de portée économique pour l'approvisionnement en électricité. De fait, la production électrique décentralisée est largement insuffisante pour satisfaire aux besoins des bâtiments et équipements du quartier.

Les différents résultats des chapitres 1 et 2 questionnent les conditions technico-économiques à mettre en œuvre pour pouvoir garantir un approvisionnement énergétique bas carbone et local au niveau des éco-quartiers. Ces chapitres ont permis d'apporter un éclairage sur le traitement de l'énergie dans les éco-quartiers et sur les ambitions affichées lors de l'élaboration initiale des projets urbains. Mais elle n'a pas permis de définir les déterminants technico-économiques et institutionnels à prendre en compte pour réaliser un approvisionnement énergétique bas carbone à l'échelle du quartier. Le traitement de ces thématiques sera l'objet des chapitres 3 et 4 de la thèse.

Chapitre 3 : Analyse technico-économique des systèmes sociotechniques de l'énergie

Les deux premiers chapitres de cette thèse ont porté sur la conception des écoquartiers, c'est à dire des opérations urbaines répondant aux objectifs de développement durable. Le premier chapitre a ainsi permis de comprendre que les enjeux de ces projets urbains tournent autour de la mixité sociale et fonctionnelle ainsi qu'autour des thématiques environnementales. L'une de ces thématiques, l'énergie, tend à prendre de plus en plus de poids lors de l'élaboration de ces projets urbains du fait du passage de l'injonction de durabilité à celle de la transition énergétique. Dans ces parties de villes que constituent les quartiers, l'énergie est présente sous différentes formes et sert à différents usages mais la consommation énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires reste le poste de consommation qui reçoit le plus d'attention.

Les chapitres 1 et 2 ont montré que l'accent est d'abord mis sur l'efficacité énergétique. Les bâtiments très majoritairement neufs vont souvent au-delà du cahier des charges des réglementations les plus récentes. Dans un même temps, la maîtrise de la demande d'énergie commence à être intégrée dans les propositions de projets urbains et se traduit par l'installation de compteurs intelligents. Ceux-ci ont pour fonction de mieux intégrer la dimension des usages tout en offrant un moyen d'influer sur les comportements en informant les usagers sur leurs consommations. Du point de vue de l'offre, nous avons observé que les projets d'écoquartiers cherchent de plus en plus à promouvoir des systèmes d'approvisionnement énergétique décentralisés basés en partie sur des sources d'énergie renouvelables locales.

Ce chapitre a pour objectif de comprendre les enjeux de cette décentralisation des systèmes d'approvisionnement énergétique à l'échelle du quartier autant d'un point de vue technico-économique qu'institutionnel. Le choix de se centrer sur l'approvisionnement et non sur les usages de l'énergie ne vise pas à occulter l'importance de la compréhension et de la gestion de la demande d'énergie dans le processus de transition énergétique. Il vise plutôt à améliorer la compréhension de l'intérêt de développer les énergies renouvelables à une échelle qui n'est pas celle habituellement étudiée par les acteurs de l'énergie. En effet, si le bâtiment et la ville sont des échelles largement analysées pour réduire les impacts des émissions carbone au niveau local, le quartier reste un périmètre méconnu. Penser l'approvisionnement énergétique à cette échelle soulève un ensemble de problématiques qu'il faut inventorier.

Il s'agit donc d'éclairer les enjeux technico-économiques de la réalisation d'un approvisionnement énergétique bas carbone au niveau local. Cette réflexion s'inscrit dans le cadre théorique de l'Approche Multi-Niveaux (*Multi-Level Perspective*) qui souligne l'importance des innovations technologiques, des évolutions des structures techniques et institutionnelles pour réaliser toute transition technique. Dans un second temps, nous examinerons la possibilité pour des systèmes techniques configurés à l'échelle du quartier de répondre aux besoins énergétiques du point de vue de la maturité économique et technologique. Enfin, nous identifierons les variables clés entrant en ligne de compte lors de la construction d'un modèle technico-économique servant à réaliser ce type de projet urbain.

1. Les systèmes sociotechniques de l'énergie : cadrage théorique et illustration

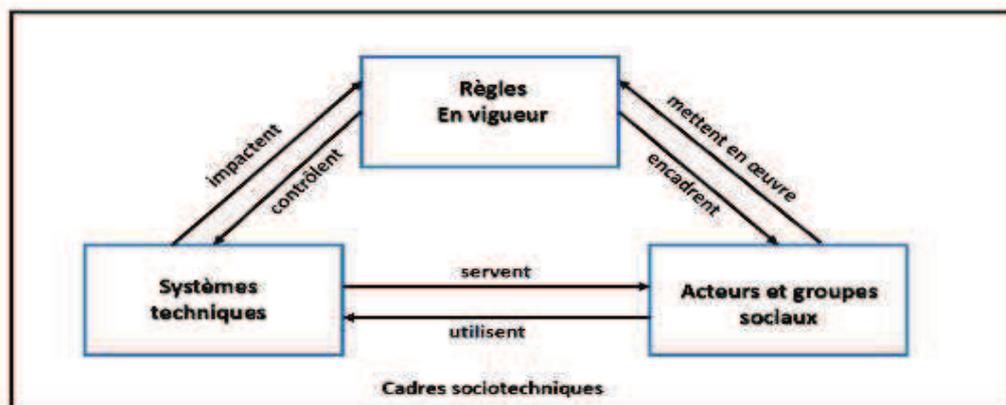
Cette première section a pour but de donner un cadre de lecture aux enjeux rencontrés dans les chapitres 1 et 2 en matière d'approvisionnement énergétique. Elle se décompose en une présentation du cadre théorique des systèmes sociotechniques et une illustration de l'application du concept dans le cas des écoquartiers.

1.1. Cadrage théorique des systèmes sociotechniques de l'énergie

La notion de système sociotechnique caractérise les systèmes techniques dans leurs interactions multiples avec la société, non seulement parce qu'ils satisfont ses besoins mais aussi parce qu'ils résultent d'une construction sociale. Déployés et utilisés par un ensemble d'individus et d'organisations, les infrastructures et les réseaux urbains se prêtent à cette notion. Les systèmes d'approvisionnement énergétique (thermiques et électriques) peuvent donc être étudiés par l'approche sociotechnique.

L'hypothèse retenue pour analyser ces relations est la suivante : les systèmes techniques ne fonctionnent pas de manière autonome au sens où les choix d'infrastructures et leurs modalités de fonctionnement résultent d'un ensemble d'interrelations avec les groupes sociaux (autorités publiques, entreprises privées, utilisateurs uniques) et sont régulés par des règles formelles et informelles. Le fonctionnement des systèmes sociotechniques repose donc sur l'ensemble de ces relations [Figure 16 : Cadre simplifié des relations interdépendantes ayant lieu dans les systèmes sociotechniques].

Figure 16 : Cadre simplifié des relations interdépendantes ayant lieu dans les systèmes sociotechniques [Construction de l'auteur]



1.1.1. Diversité des analyses des liens entre infrastructures et systèmes sociaux

Les systèmes sociotechniques apparaissent dans différents champs d'analyse de l'évolution des techniques (la sociologie, les sciences de l'information et de la communication, l'histoire, l'économie...) et le concept a été progressivement enrichi depuis près de quarante ans. Ces différents courants cherchent à comprendre les liens entre les changements techniques et les changements sociétaux, l'origine des ruptures technologiques ou encore les raisons de la non-acceptation de certaines innovations par la société. L'originalité de cet objet de recherche est la place donnée à la relation entre les acteurs et la technique afin d'expliquer les changements sociotechniques sur le court et le long terme. Dans cette sous-partie, nous évoquons trois cadres théoriques issus des sciences sociales qui apportent des éclairages complémentaires sur la manière d'analyser ces systèmes ainsi que la place donnée à l'innovation dans ces derniers. Cette présentation n'est pas exhaustive mais elle permet de mettre en avant l'intérêt central de certaines approches économiques sur la place des réseaux dans les systèmes sociotechniques.

La Théorie de l'Acteur Réseau (TAR)

En sociologie, l'analyse des systèmes sociotechniques repose principalement sur la Théorie de l'Acteur Réseau (*Actor Network Theory*) développée à l'origine par Michel Callon, Bruno Latour, John Law et Madeleine Akrich dans les années 1980. Cette théorie s'éloigne des approches classiques de la sociologie qui séparent l'humain de la nature ; ce qui en fait un point de rupture majeur dans ce domaine de recherche. Elle trouve son point de départ dans la sociologie de la traduction dont l'objectif est de comprendre comment les connaissances scientifiques circulent. L'idée principale est que c'est au moment de la formulation des problèmes que se dessinent les espaces de circulation. Il en résulte un

processus général (problématisation, intéressement, enrôlement et mobilisation d'alliés) qui démontre l'égle importance des discours des différents acteurs dans la construction de la connaissance scientifique [Callon, 1986].

L'acteur étudié est inséré dans un tissu de relations dynamiques liant des entités hétérogènes pouvant être des acteurs humains (individus ou groupes sociaux) ou des acteurs non-humains (voitures, téléphones, mais aussi documents, procédures, règles...) prenant la forme d'un réseau [Callon et al, 2006 ; Law, 2003]. La mise en réseau de ces acteurs donne une approche originale de la notion de pouvoir qui est pour un acteur la somme des faiblesses des autres acteurs. Le rapport de force issu de ce résultat est donc la résultante d'un ensemble d'arrangements, de constructions et de configurations entre les objets. De plus, le réseau s'inscrit dans un sentier de dépendance. L'étude d'évènements fait apparaître des relations évolutives inscrites dans une histoire entre les objets permettant de comprendre l'émergence de verrouillage sociotechnique (*lock-in*) [Callon et al, 2006]. La théorie de l'Acteur-Réseau s'attache donc à démontrer qu'un acteur, qu'il soit humain ou non-humain, s'invente grâce aux relations qu'il va entretenir avec les autres acteurs entraînant ainsi la création d'un réseau.

Cette théorie traduit la volonté de réintégrer l'étude des objets techniques dans les analyses sociologiques. En effet, les théories précédentes écartaient habituellement ces derniers au profit de l'objet social. Elle démontre que les objets techniques entretiennent des relations avec les hommes et leur environnement et qu'ils définissent le cadre et la nature dans lesquels s'intègrent ces relations. Les réseaux sociotechniques sont donc issus non seulement des acteurs sociaux mais également des objets techniques et de la manière dont ils provoquent des relations avec les objets sociaux et les systèmes de régulation. En ce sens, « *les objets techniques peuvent être considérés comme des instruments politiquement forts* » [Akrich, 1987, p 14] car ils construisent l'Histoire et imposent des cadres de pensée dans lesquels les acteurs sociaux évoluent [Akrich, 1987].

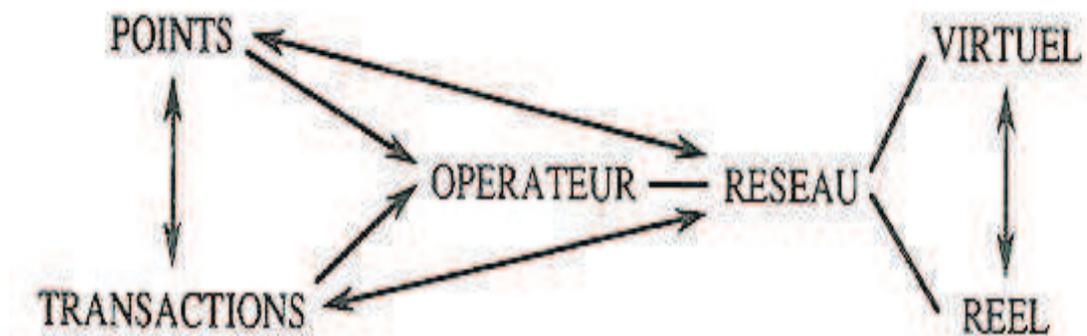
La TAR intègre également une réflexion sur l'innovation qu'elle considère comme une construction aux dimensions à la fois technique et sociale. L'innovation est la résultante de la relation réciproque entre ces deux dimensions. L'intérêt de prendre en compte les objets non-humains pour leur faire jouer un rôle dans le processus d'innovation est de démontrer que l'objet technique n'est pas un fait absolu en soi. L'objet technique en raison de cette spécificité doit également faire face à des confrontations avec les objets humains, que ce soit des inventeurs, des concepteurs ou des utilisateurs, pour parvenir à exister et être intégré dans le système sociotechnique. C'est à cette condition que l'innovation apparaîtra [Latour, 1992 ; Akrich, 1998].

Le Réseau de Projets Transactionnels (RPT)

En urbanisme, la Théorie de l'Acteur-Réseau a été intégrée à l'approche des Réseaux de Projets Transactionnels développée par Claude Raffestin et par Gabriel Dupuy. Cette approche estime que les réseaux techniques sont la résultante d'un jeu de pouvoir entre acteurs [Raffestin, 1980 ; Dupuy, 1987 ; Dupuy, 1991]. En rupture avec les urbanistes classiques attachés au concept de zone urbaine et de ville aréolaire, les urbanismes modernes analysent le réseau comme un ensemble de lignes mettant en contact des « *points* » positionnés à différentes places et échelles dans l'espace. Ces points ne sont pas considérés comme de pures abstractions géométriques mais sont vus comme « *l'expression de tout ego individuel ou collectif* » [Raffestin, 1980]. Ils traduisent ainsi des « *nodosités territoriales, lieux de pouvoir et de référence* » [Raffestin, 1980] des différents acteurs constituant le réseau. Le point est alors le lieu d'origine de l'expression de la volonté de l'acteur. Chaque acteur émet le vœu d'être relié à d'autres acteurs pour réaliser un échange de volonté créant ainsi un territoire d'action. L'ensemble des vœux d'un acteur constitue un réseau de projets de transaction appelé le *Réseau de Projets Transactionnels* (RPT) [Dupuy, 1987]. La somme des projets transactionnels de l'ensemble des points présents dans l'espace forme le *Réseau Maximal*.

Plusieurs limites apparaissent lors de la construction du *Réseau Maximal*. Premièrement, chaque point n'a pas le même poids dans le réseau ainsi l'expression de la volonté d'un point est limitée par son degré d'influence, c'est-à-dire par sa capacité à imposer ses choix aux autres points. Le RPT des acteurs les plus influents a donc plus de chance de s'imposer et de structurer le territoire. Deuxièmement, outre leurs différents niveaux de pouvoir, les points n'ont pas des moyens illimités. Ils peuvent donc imposer leur volonté aux autres acteurs que de manière limitée. Afin qu'un maximum d'acteurs puisse accéder au réseau et ce quels que soit leurs pouvoirs et moyens, il est nécessaire de trouver un acteur capable de former un réseau réel en optimisant les moyens tout en étant considéré comme légitime par l'ensemble des points pour exercer son action. Ce rôle est attribué à l'opérateur de réseaux qui doit se charger de rassembler un maximum de RPT dans la mesure de ces capacités afin de réaliser un réseau technique qui s'approche au plus près du réseau maximal [Figure 17 : Définition évolutive d'un réseau par Gabriel Dupuy].

Figure 17 : Définition évolutive d'un réseau par Gabriel Dupuy –source : Dupuy, 1991-



Les Macrosystèmes Techniques (MST)

L'analyse historique de Thomas P. Hughes sur le développement des réseaux électriques dans trois villes occidentales (Berlin, Chicago et Londres) entre le milieu du XIX et le début du XX siècles pointe l'importance d'un contexte social, politique et économique favorable à l'émergence de nouveaux systèmes techniques [Hughes, 1983]. C'est d'ailleurs ce que révèle le titre de son ouvrage « *Networks of Powers* » qui fait autant référence aux réseaux d'infrastructures électriques qu'aux réseaux de pouvoirs organisant le système technique électrique : « *Technological affairs contain a rich texture of technical matters, scientific laws, economic principles, political forces, and social concerns.* » [Hughes, 1983, p1]. Hughes détermine ainsi les conditions nécessaires à l'émergence de systèmes techniques ainsi que les raisons de leur structuration sous la forme d'un réseau généralement régulé par un système centralisé et hiérarchisé à l'échelle nationale [Hughes, 1983 ; Offner, 1996 ; Joerges, 1999].

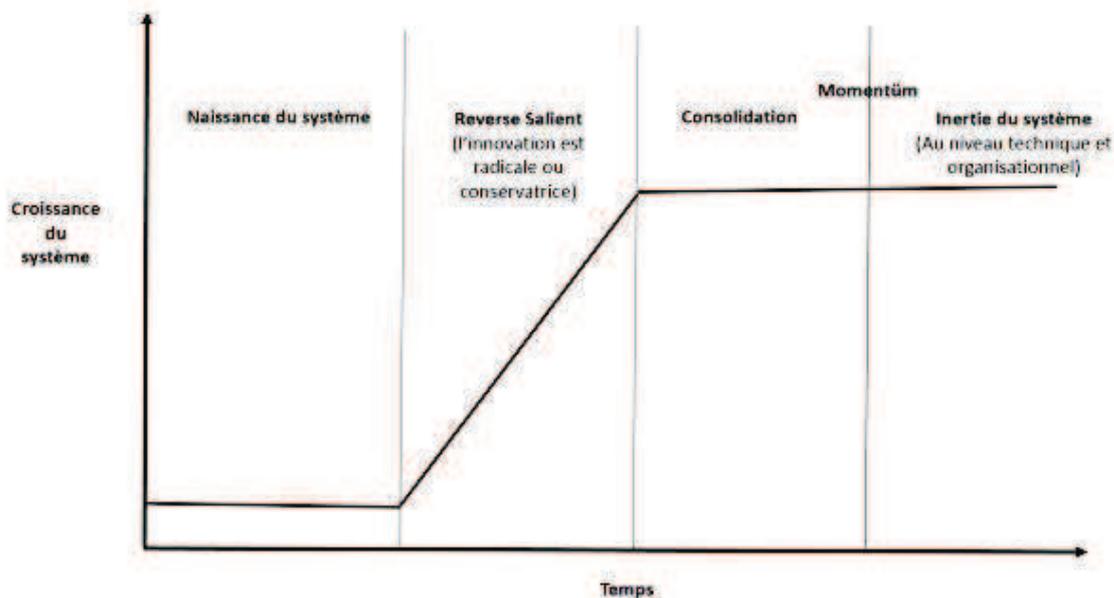
Hughes se concentre sur la contribution d'inventeurs/entrepreneurs (*System Builders*) tels que Thomas Edison et Samuel Insull dans le développement des réseaux techniques pour analyser les processus d'innovation. Pour que l'invention devienne une innovation, il est nécessaire que différents acteurs la développent car les systèmes techniques sont « *socialement construits* » [Hughes, 1983 ; Hughes, 1987, p 32 ; Joerges, 1988]. Tout au long du développement du système technique, différents acteurs vont jouer un rôle crucial pour permettre au système de s'installer durablement dans la société. L'inventeur imagine une invention mais pour que celle-ci devienne une innovation, un nouveau profil d'acteur est nécessaire. Il s'agit de l'inventeur-entrepreneur qui va miser sur l'invention et la développer jusqu'à la rendre viable pour le marché. A ce stade un nouvel acteur émerge. Il s'agit de l'entrepreneur-manager dont le rôle est de vendre l'innovation sur le marché afin que celle-ci se diffuse et touche le plus grand nombre [Hughes, 1983].

Son analyse du processus de croissance des systèmes techniques prend la forme d'une courbe en S qui fait écho à la théorie de l'innovation de Vernon¹³². Il intègre à la courbe de diffusion de l'innovation deux événements nouveaux qui apparaissent au cours de la vie du système. Une innovation apparaît lorsque certains éléments composant le système voient leur fonctionnement qui jusque-là ne posait pas problème être bloqué menaçant le développement du système. Une innovation incrémentale ou radicale va alors résoudre le problème grâce à un processus de Saillant Inversé (*Reverse Salient*)¹³³ [Hughes, 1983 ; Hughes, 2004 ; Gras, 1997]. Le problème ainsi résolu, le système va pouvoir continuer à croître jusqu'à l'apparition d'un nouveau problème ou jusqu'à atteindre la phase de Momentüm. Ce terme décrit la période dans laquelle rentre le système sociotechnique quand les différents éléments hétérogènes (techniques et sociaux) le constituant s'équilibrent et se consolident. Cette phase est caractérisée par une incertitude pour l'innovation qui peut alors soit se développer, soit évoluer ou soit disparaître [Figure 18 : Croissance des systèmes sociotechniques inspirée par la réflexion de T.P. Hughes] [Hughes, 1983 ; Hughes, 2004, Gras, 1997].

¹³² Raymond Vernon est un économiste américain qui a développé une théorie sur le cycle de vie du produit (1966). L'objet d'étude de sa théorie est la nature des innovations aux Etats-Unis ainsi que la stratégie des firmes durant toute la durée de vie du produit. Il définit quatre étapes d'insertion et de diffusion d'un produit dans le commerce international : naissance, croissance, maturité et déclin.

¹³³ Hughes emprunte le terme de Saillant Renversé (*Reverse Salient*) au langage militaire où un saillant désigne une zone de front en saillie dans les lignes ennemies.

Figure 18 : Croissance des systèmes sociotechniques inspirée par la réflexion de T.P.Hughes [Construction de l'auteur]



Analyse comparée des différents apports théoriques présentés

Les systèmes sociotechniques sont des systèmes complexes qui font l'objet d'un grand nombre d'analyses dans le domaine des sciences sociales. La Théorie de l'Acteur Réseau montre que l'objet social n'est pas le seul objet permettant d'expliquer la technique et son évolution. L'objet technique a ainsi un poids identique à l'objet social dans ce processus. C'est d'ailleurs l'interdépendance de ces objets qui va permettre de créer des systèmes sociotechniques. L'analyse par le concept des « Projets de Réseaux Transactionnels » montre que chaque acteur de la société (individu ou groupes sociaux) développe un ensemble de relations avec les autres acteurs prenant la forme d'un réseau. Le rapport de force qui est également défini dans la Théorie de l'Acteur-Réseau va impacter le territoire et l'objet technique qui subiront la volonté des acteurs les plus puissants.

Les acteurs n'ayant pas le même degré de pouvoir délèguent une part de ce dernier à un acteur qui régulera les volontés individuelles contrairement à la TAR qui définit un ensemble de règles permettant la bonne relation entre ces derniers. L'apport des MST démontre comment les grands systèmes techniques sont autant la résultante d'innovations techniques que d'une organisation socio-politique. Les MST ont besoin pour exister d'avoir des acteurs inscrits dans un contexte socio-politique favorable afin de voir les innovations techniques à la base de ces systèmes émerger et se diffuser. Toutes, ces théories montrent que les systèmes sociotechniques sont des systèmes où le social et la technique interagissent. Néanmoins, elles se distinguent sur le poids et le rôle à attribuer à la technique et au social ainsi que sur la formation de l'innovation technique.

L'approche par les systèmes sociotechniques permet d'analyser des systèmes complexes où il existe des influences réciproques entre les infrastructures techniques, les acteurs sociaux et les systèmes de règles. Les acteurs sociaux utilisent les systèmes techniques pour répondre à leurs besoins. Ce service rendu à la société par les infrastructures va impacter les relations des acteurs entre eux et avec le système technique. Ils vont alors chercher à l'améliorer afin que l'utilisation de l'infrastructure soit optimisée et qu'elle corresponde au mieux à leurs besoins. Pour permettre une bonne utilisation du système technique sans que les acteurs se sentent lésés dans leur utilisation, un ensemble de règles va être défini par les acteurs sociaux. Les règles vont alors encadrer l'action des acteurs et contrôler le fonctionnement des systèmes techniques [Figure 16 : Cadre simplifié des relations interdépendantes ayant lieu dans les systèmes sociotechniques].

1.1.2. L'apport de l'approche Multi-Niveaux dans l'analyse des systèmes sociotechniques

Afin d'examiner les multiples possibilités d'évolutions des systèmes sociotechniques, il a été décidé de s'intéresser à l'Approche Multi-Niveaux (*Multi-Level Perspective –MLP-*) développée par Frank Geels¹³⁴. Ce cadre d'analyse a pour ambition d'offrir un outil permettant d'appréhender la complexité des changements sociotechniques sur le long terme par le biais du rôle des innovations techniques [Geels, 2002]. L'originalité de l'approche développée par Geels tient à son caractère multidisciplinaire. Il intègre ainsi des apports théoriques issus de l'économie évolutionniste et néo-institutionnelle, des études sur les sciences et les technologies, de l'histoire, ainsi que de la sociologie. L'approche par les MLP analyse l'évolution des systèmes sociotechniques en prenant en compte différents facteurs endogènes et exogènes à travers le temps.

L'Approche Multi-Niveaux

Le régime sociotechnique (niveau intermédiaire : *sociotechnological regime*) évolue dans un paysage exogène (niveau supérieur : *landscape developments*) qui instaure le cadre dans lequel se situe le régime sociotechnique au niveau intermédiaire (*sociotechnological regime*). Ce paysage est généralement illustré par une volonté politique de long terme dont les objectifs vont faire pression sur les systèmes sociotechniques afin que ces derniers répondent à leurs impératifs. En faisant pression, ils vont entraîner la création de fenêtres d'opportunité (*windows of opportunity*) dans lesquelles les innovations techniques provenant du niveau inférieur (*technological niches*) vont s'engouffrer afin de faire correspondre les systèmes techniques et les régimes sociaux pour qu'ils répondent aux orientations du niveau supérieur. Cette analyse prend également en compte une double temporalité car les systèmes sont caractérisés par

¹³⁴ Frank Geels est professeur en système d'innovations et développement durable à l'Institut de la consommation durable à l'Université de Manchester. Il est l'un des chercheurs de renommée internationale spécialisé sur les transitions sociotechniques qui impliquent des interactions entre la technologie, les pratiques de la consommation, les entreprises, les marchés, la politique, la signification structurelle et les infrastructures.

une inertie dynamique. L'inertie est observée dans le court terme car les systèmes ne changent pas radicalement du jour au lendemain. Le dynamisme est quant à lui observé sur le long terme car les systèmes doivent s'adapter aux changements induits par les besoins de la société [Geels, 2004] [Figure 19 : L'approche multi-niveaux des transitions sociotechniques].

Figure 19 : L'approche multi-niveaux des transitions sociotechniques [Geels, 2004]

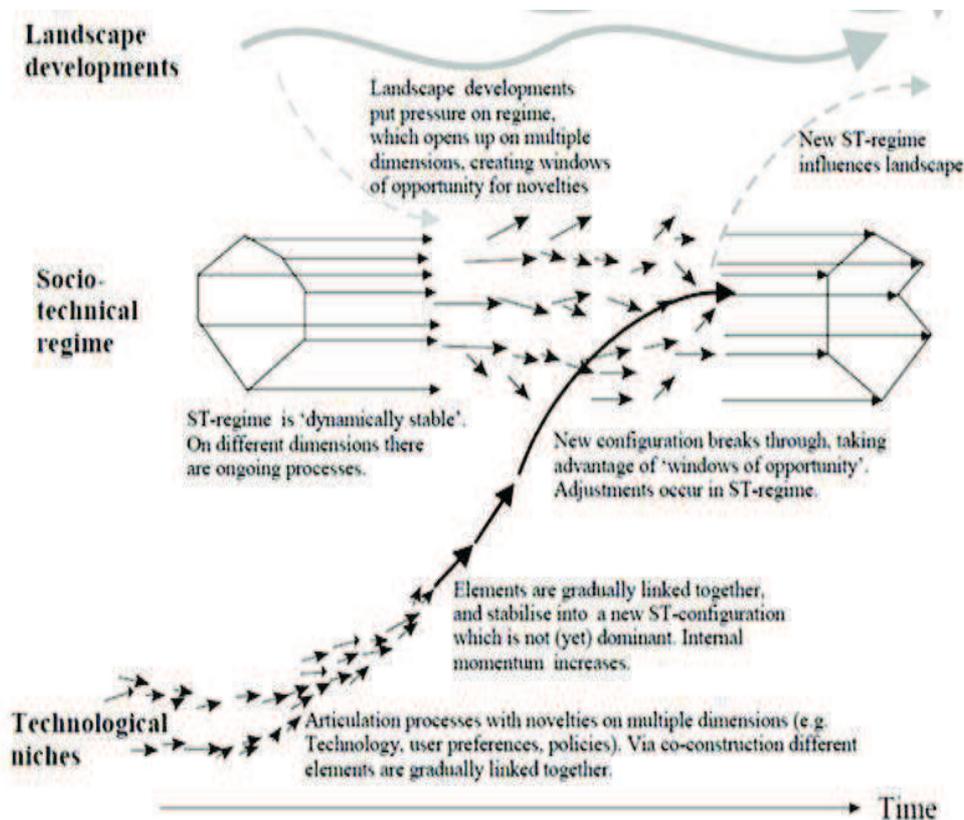


Fig. 4. A dynamic multi-level perspective on system innovations ([12], p. 1263).

L'évolution du *régime* sociotechnique est précédée par une multitude d'innovations qui émergent impulsées par des changements au niveau du *paysage*. Deux types d'innovation orientent le processus d'évolution du système sociotechnique. Les innovations incrémentales feront évoluer le système sociotechnique lentement grâce à des mécanismes de reproduction ou de transformation. Les innovations disruptives quant à elles vont provoquer un changement radical du *régime* entraînant une transition dans le système sociotechnique. Quel que soit le type d'innovation, seule une minorité d'entre elles aura la capacité de s'insérer durablement dans le système sociotechnique. La sélection de ces innovations dépendra de leur capacité à répondre aux exigences techniques, économiques, institutionnelles et sociales constituant le régime du système pour le faire évoluer ou le changer en profondeur [Geels et al, 2007a].

Les régimes sociotechniques se stabilisent grâce aux règles régissant l'infrastructure et les acteurs en contact avec l'infrastructure. Les acteurs, quel que soit leur forme (individu, entreprise, organisation) utilisent les systèmes techniques pour répondre à leurs besoins. Leur usage des systèmes techniques doit être régulé afin de pouvoir assurer le bon fonctionnement de ce dernier. La coordination entre les acteurs et la technique repose ainsi sur trois types de règles. La première forme de régulation est réalisée par des règles formelles et explicites qui permettent de contrôler les actions des systèmes sociaux grâce à des réglementations ayant un pouvoir coercitif (ex : loi, droit de propriété, contrat...). La seconde forme de régulation regroupe l'ensemble des normes sociales formelles ou informelles telles que les règlements ou les codes de conduites. Enfin, la troisième forme de régulation est constituée des règles dites cognitives essentiellement informelles qui reposent sur les valeurs structurant les groupes sociaux [Geels et al, 2007a].

La Transition Technique par l'approche Multi-Niveaux

Initialement, l'approche multi-niveaux offre un cadre conceptuel pour comprendre l'impact des transitions techniques sur les systèmes sociotechniques [Geels, 2002]. Les transitions techniques (*technical transition*) sont comprises ici comme les « *grandes transformations technologiques* » affectant les fonctions essentielles comme les transports ou les communications [Geels, 2002, p 1257]. La transition technique ne va pas seulement impliquer des changements technologiques ; elle prend également en compte des changements dans les régimes sociaux que ce soit dans le comportement des usagers des infrastructures mais également au niveau de la définition et de l'application des règles. Elle entraîne donc non seulement une modification du cadre sociotechnique mais en outre un changement complet de sa trajectoire. Des exemples peuvent illustrer ces changements comme le passage des carrioles aux voitures ou le passage du bateau à voile vers le bateau à vapeur [Geels, 2002 ; Geels et al, 2007a].

Généralement, la transition technique est impulsée par des impératifs exogènes au système sociotechnique (le *paysage*) qui vont exercer une pression sur ce dernier l'obligeant à modifier sa structure pour répondre aux injonctions. Dans le même temps, les innovations qui se développent et tentent de s'insérer dans le régime sociotechnique en permanence sans y parvenir vont bénéficier de fenêtres d'opportunités pour l'intégrer. Pour se diffuser, elles doivent atteindre une certaine maturité grâce à des effets d'apprentissage mais également trouver un modèle d'affaire garantissant leur survie. L'effet combiné entre les pressions exogènes exercées par le niveau supérieur qui vont déstabiliser le régime sociotechnique et la création des fenêtres d'opportunités dans lesquelles des innovations vont s'engouffrer oblige les régimes sociotechniques à se modifier, ce qui est la caractéristique de la transition technique [Geels, 2002 ; Geels et al, 2007a].

Outre l'importance de la temporalité pour qu'une transition technique puisse être réalisée, la nature des interactions est aussi essentielle pour comprendre les enjeux de la transition. Les réactions du régime vont impacter d'une manière différente les régimes sociotechniques selon le type de pression exercée. Dans un même temps, les innovations développées dans les niches vont se mettre en compétition avec le régime sociotechnique afin d'assurer leur survie quand elles ont pour but de le remplacer. La réunion de ces deux critères va permettre de distinguer différents types de transitions techniques. Elles différeront essentiellement selon la nature de la combinaison des niveaux micro et macro [Geels et al, 2007a].

Cinq types de transition peuvent ainsi être définis [Geels et al, 2007a] :

- La « *voie de la transformation* » apparaît quand une pression modérée sur le régime a lieu et que les innovations de niche ne sont pas encore suffisamment matures pour réaliser une disruption dans le régime. Afin de répondre aux pressions, les acteurs du régime vont tenter de changer de stratégie de développement en se basant sur leur capacité d'adaptation, ce qui passe par la réorientation de leur stratégie interne d'innovation. Des mutations techniques vont paraître transformant le régime de l'intérieur et permettant à un nouveau régime d'émerger.
- Le « *processus de désalignement et réalignement* » apparaît quand des changements soudain et divergeant sont imposés par le *paysage* sociotechnique entraînant une baisse de confiance des acteurs dans le régime. Le régime en place s'érode si les acteurs n'arrivent pas à développer eux-mêmes des innovations répondant aux injonctions du *paysage*. En effet, la pression exercée par le paysage sociotechnique perturbe les règles du régime créant de l'incertitude sur la manière dont les innovations devront être menées ainsi que les domaines dans lesquels elles devront apparaître. Ces incertitudes sont renforcées avec l'absence de cohérence dans les innovations de niche due à un manque de développement et de stabilisation ainsi qu'un manque de substitut immédiat au niveau du régime. Cette situation favorise l'émergence de multiples innovations de niche et conduit à l'exploration de différentes trajectoires technologiques (coexistence, concurrence, expérimentation). Progressivement un changement s'opère ce qui permet de mobiliser l'attention des ressources. Le réalignement intervient quand un faisceau cohérent d'innovations intègre le régime pour en former un nouveau.
- La « *substitution technologique* » apparaît lorsque des pressions fortes du *paysage* apparaissent. Contrairement au processus précédant, les innovations de niches sont suffisamment matures pour créer une rupture technologique et remplacer le régime existant.
- La « *reconfiguration* » apparaît quand les innovations développées dans les niches sont adoptées par le régime afin de résoudre des problèmes locaux améliorant ainsi la performance technique. Leur utilisation occasionne une succession d'ajustements entraînant un changement progressif du régime avec des changements de techniques ou de pratiques. L'architecture du régime est alors profondément modifiée.

- Si la pression du paysage prend la forme d'un changement disruptif, il est possible que le changement de régime prenne la forme d'un processus commençant par une transformation conduisant à une reconfiguration avant d'être suivie éventuellement par un mécanisme de désalignement et réalignement.

A la suite de ses premiers travaux, Geels va définir deux autres types d'évolution des systèmes sociotechniques en dehors de la transition technique qu'il a intégrée dans son cadre théorique de l'approche multi-niveaux.

La première adaptation appelée « *transformation* » se caractérise par un changement de relation entre les régimes sociotechniques et le paysage dans lequel évoluent les régimes. Les impératifs exogènes du paysage vont entraîner une modification du cadre de fonctionnement du régime en modifiant sur les relations entre acteurs et les règles permettant de faire fonctionner le système. La transformation ne fait pas véritablement appel à une modification du système technique donc les innovations présentes dans la niche n'ont qu'un faible impact dans le processus de transformation.

La deuxième adaptation appelée « *reproduction* » n'est réalisée qu'au niveau des régimes sociotechniques. Elle ne résulte pas de modifications structurelles du paysage ou de transformations liées aux innovations techniques disruptives. La reproduction est un changement structurel caractérisé par une inertie dynamique où les règles et les acteurs sociaux vont évoluer afin d'optimiser leur relation avec le système technique. Ces deux modèles sont utiles pour comprendre l'évolution des régimes sociotechniques malgré l'absence de transition technique [Geels et al, 2007b].

Parmi les différentes théories de la transition technique, l'approche multi-niveaux développée par Geels fait l'objet de nombreuses publications. Néanmoins, il est reconnu plusieurs limites à ce cadre théorique. Le flou persiste quant à la qualification du point de départ et de la fin de la transition ; car, elles dépendent d'un ensemble de facteurs (temps, lieu, technologie, contexte socio-économique, politique...) dont la sélection est la résultante d'une interprétation du sujet d'analyse. Enfin, l'analyse se positionne sur des technologies existantes et néglige en ce sens les transitions ayant des aspects culturels et sociaux importants. Ceux-ci pourraient être mieux pris en compte dans une approche qui prétend analyser les relations d'interdépendances entre la société et la technique [Genus et al, 2007 ; Geels et al, 2007b].

Les systèmes sociotechniques constituent un cadre d'analyse largement utilisé par différentes disciplines de sciences sociales dont le but est d'analyser l'évolution de systèmes complexes. L'approche Multi-Niveaux présente pour nous l'intérêt d'utiliser différentes disciplines dont l'économie pour expliquer les évolutions technologiques et leurs impacts sur la société. La contextualisation apportée par le cadrage théorique va nous permettre de comprendre quels sont les enjeux de la décentralisation technique des systèmes énergétiques envisagés dans les écoquartiers sur le fonctionnement des systèmes d'approvisionnement énergétique actuels.

1.2. La reterritorialisation de l’approvisionnement comme transition technique dans les systèmes sociotechniques de l’énergie

Pour s’inscrire dans la trajectoire que tracent les objectifs de la transition énergétique, les systèmes techniques doivent évoluer pour mieux intégrer les spécificités des nouveaux mix énergétiques bas carbone. L’étude des écoquartiers offre la possibilité de s’interroger sur la pertinence de la décentralisation des systèmes techniques de l’énergie entraînant un changement de paradigme dans la manière d’envisager l’approvisionnement énergétique. Elle impliquerait un basculement des modes de production et de distribution de l’énergie passant de structures centralisées au niveau national, régional ou urbain à des structures plus décentralisées à l’échelle régionale et locale, et au niveau infra-urbain en particulier. Cette proposition fait écho aux études de cas présentées dans le Chapitre 2.

1.2.1. L’approvisionnement énergétique au niveau local : typologie et échelle

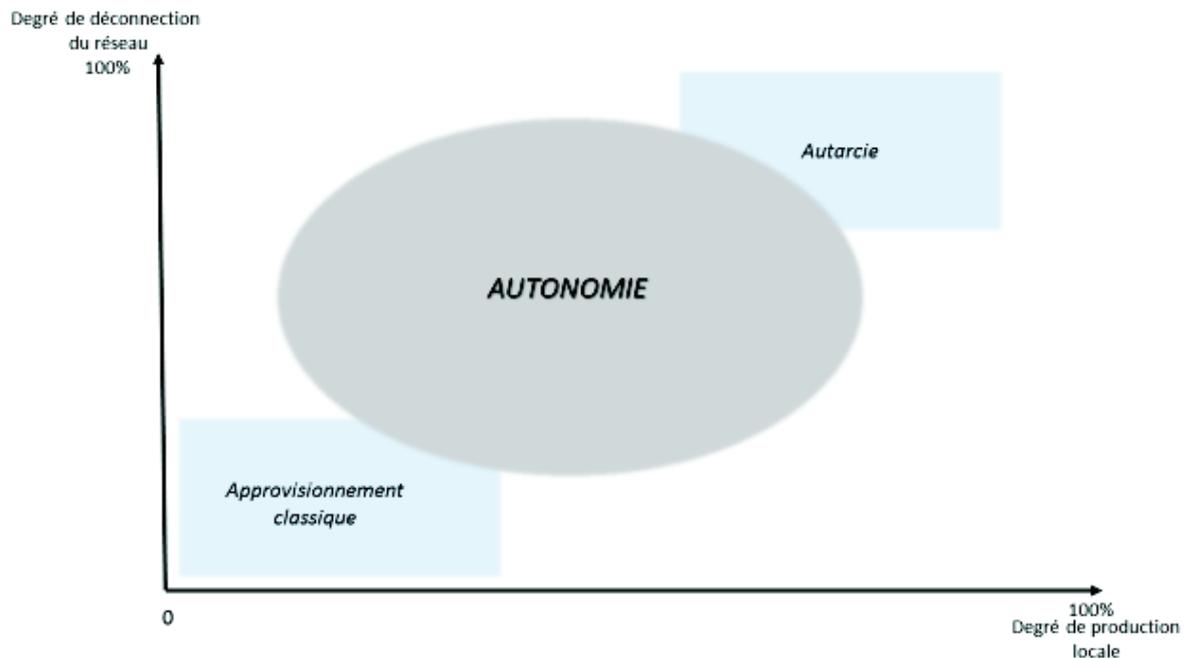
L’approvisionnement énergétique local peut prendre des formes très différentes et plus ou moins complexes selon l’échelle spatiale à laquelle il est conçu.

Les différentes formes de l’approvisionnement énergétique

Dans les premiers chapitres de cette thèse, nous avons observé que la prise en compte de la question énergétique varie d’un écoquartier à l’autre : de l’absence de réflexion à un approvisionnement énergétique complexe combinant des ressources hétérogènes. L’analyse de la base d’information et les études de cas ont montré une diversité d’ambitions « bas carbone » quel que soit le flux étudié (chaleur ou électricité).

Il paraît alors pertinent d’élaborer une typologie des différentes formes que peut prendre la production et la distribution de l’énergie au niveau local [Figure 20 : Typologie de l’approvisionnement énergétique au niveau local].

Figure 20 : Typologie de l'approvisionnement énergétique au niveau local [Construction de l'auteur]



L'axe horizontal représente la part de la consommation énergétique du territoire dont la production est réalisée localement. À droite, le territoire importe la totalité de l'énergie qu'il consomme ; à gauche, il produit la totalité de sa consommation d'énergie. L'axe vertical représente l'intensité des échanges avec les grands réseaux existants : les deux axes ne sont pas strictement confondus car une production locale peut dans certains cas être systématiquement injectée sur les réseaux. Trois profils d'approvisionnement énergétique apparaissent : l'approvisionnement classique, l'autonomie et l'autarcie.

L'approvisionnement classique concerne des territoires dont l'énergie consommée est exogène. Ces territoires sont connectés aux réseaux de distribution déjà existants. Cette proposition correspond au « système énergétique classique » tel qu'il est majoritairement mis en œuvre à l'heure actuelle dans les territoires urbains que ce soit pour la chaleur ou l'électricité.

L'autarcie fait référence à des territoires où les systèmes de production ont été construits exclusivement pour alimenter les usagers présents dans le périmètre et qui sont déconnectés des réseaux extérieurs. Ce type d'approvisionnement sous-entend que les besoins des usagers du territoire peuvent être satisfaits par les ressources et capacités de production installées à l'intérieur du périmètre.

L'autonomie fait référence à des quartiers pour lesquels les systèmes de production sont construits principalement pour le territoire. Cette production doit alimenter ce dernier mais peut également alimenter des territoires extérieurs ou être complétée par des productions provenant de l'extérieur. Les capacités de production installées sont connectées aux réseaux historiques comme le réseau de chaleur urbain ou d'électricité. La connexion est assurée pour assurer la sécurité de la fourniture sur le territoire et/ou pour permettre aux capacités de production installées dans le périmètre de devenir une source d'approvisionnement pour des territoires extérieurs. Ainsi, le réseau de chauffage urbain construit dans

le quartier Queen Elizabeth Olympic Park à Londres Etait initialement destiné à alimenter les habitants du quartier, mais il pourra également approvisionner de futurs quartiers situés dans sa périphérie [Cf. Chapitre 2].

Il est à noter qu'un territoire peut s'inscrire dans différents modèles, selon que l'analyse porte sur l'approvisionnement en chaleur ou en électricité. Ainsi, un territoire peut être autonome pour la chaleur tout en ayant recours à un approvisionnement classique pour l'électricité. En outre, l'autonomie tel que présentée dans ce schéma regroupe des réalités très diverses qui peuvent prendre différentes formes selon les ressources disponibles et les capacités de production installées localement.

Les échelles de la décentralisation technique au niveau local : le choix de l'écoquartier

Que ce soit au niveau du bâtiment, de l'îlot, du quartier, voire de la ville, l'approvisionnement énergétique apparaît aujourd'hui comme un axe de réflexion des projets urbains qui visent à explorer la possibilité d'une ville durable bas carbone. Ces différentes échelles répondent à des besoins urbains à la fois différents et complémentaires. Leur diversité confère également une difficulté quant au choix de la maille la plus pertinente pour analyser la transition énergétique au niveau local. C'est pourquoi, il est nécessaire de rappeler leurs apports et limites [Figure 21 : Les degrés de complexités des systèmes techniques décentralisés].

De manière dominante aujourd'hui, les bâtiments sont de simples lieux de consommation de l'énergie, mais dans la transition énergétique ils peuvent devenir progressivement des lieux de production. Les réglementations européennes ont d'ailleurs l'ambition de développer à partir de 2020 des bâtiments dont l'approvisionnement énergétique externe devra être quasi nul¹³⁵, c'est-à-dire qu'une grande partie de leur consommation devra être assurée par des énergies renouvelables locales. De nouveaux comportements énergétiques apparaissent avec cet impératif au sein des bâtiments comme l'autoconsommation, l'autoproduction ou l'effacement. Ces derniers posent la question de la valorisation économique des productions issues des bâtiments si celles-ci ne peuvent pas à être consommées sur place.

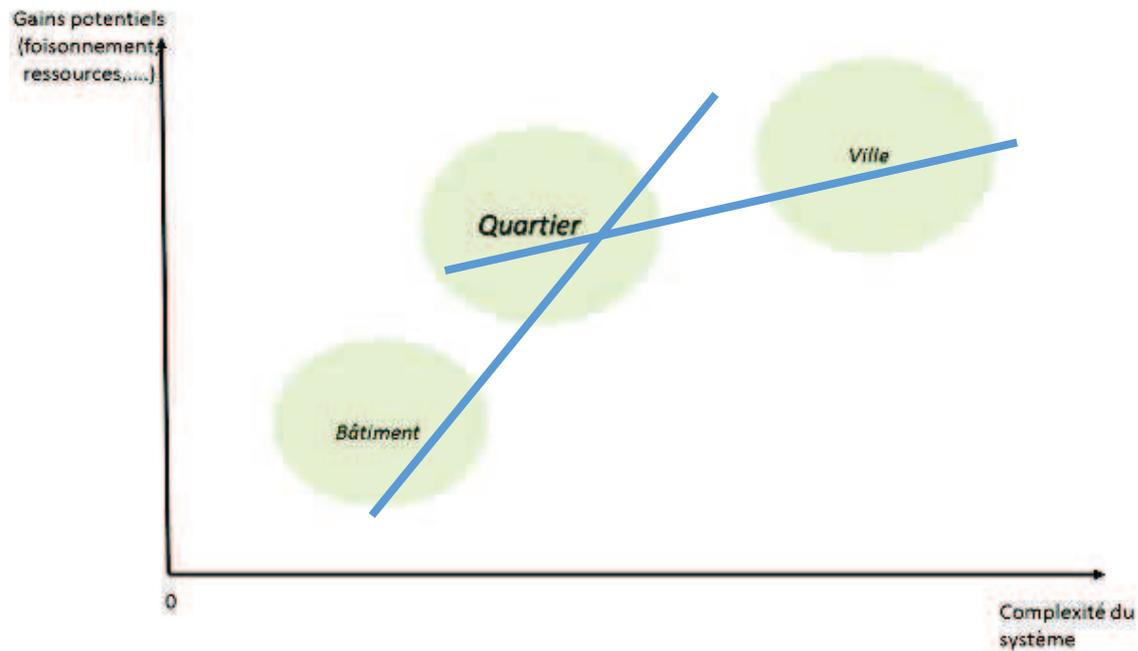
¹³⁵ Article 2 de la directive n° 2010/31/UE du 19/05/10 sur la performance énergétique des bâtiments définit : «bâtiment dont la consommation d'énergie est quasi nulle», un bâtiment qui a des performances énergétiques très élevées déterminées conformément à l'annexe I. La quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à proximité »

La ville est également regardée comme un échelon possible pour la décentralisation notamment en ce qui concerne l'électricité. L'échelle étant plus large que celle du bâtiment, elle intègre outre les capacités de production les infrastructures de distribution. Les arguments pour la promotion de la décentralisation technique à l'échelle de la ville reposent en partie sur la volonté des collectivités d'avoir un rôle politique, social ou économique plus important en matière énergétique [Moss et al, 2015 ; Coutard et al, 2010 ; Geels, 2013]. Le courant de l'urbanisme post-réseaux a ainsi envisagé que les villes puissent être une échelle pertinente de la décentralisation des systèmes énergétiques en raison d'impératifs techniques et sociaux. Leur réflexion prend ainsi appui sur la volonté de certaines villes de gérer de façon plus indépendante leurs réseaux techniques en expérimentant des modes d'organisation en rupture avec les schémas classiques (hors-réseau, au-delà du réseau) ou en évolution par rapport à ces derniers (l'injection dans le réseau, boucler la boucle)¹³⁶ [Coutard et al, 2011].

L'échelle du quartier permet de se détacher de l'échelle du bâtiment considérée comme trop étroite pour envisager l'approvisionnement bas carbone tout en évitant la complexité apportée par l'échelle urbaine [Figure 21 : Les degrés de complexités des systèmes décentralisés]. Par ailleurs, la problématique de l'offre locale apparaît de plus en plus dans les projets d'aménagement énergétique à l'échelle des quartiers depuis qu'a émergé la notion de ville durable. Pendant longtemps, une grande partie de ces projets s'est focalisée sur l'efficacité énergétique, i.e. la performance énergétique des bâtiments puis la maîtrise de la demande énergétique [Cf. Chapitre 1]. Depuis quelques années, les projets urbains de quartier traitent aussi de l'approvisionnement énergétique dans une perspective de transition vers les systèmes bas carbone et les plus ambitieux visent la production locale d'énergies renouvelables [Cf. Chapitre 1 et 2].

¹³⁶ La typologie des villes post-réseaux proposée par O. Coutard et J. Rutherford repose sur un système matriciel basée sur une logique organisationnelle et territoriale de l'approvisionnement énergétique (décision collective ou individuelle/autarcie ou autonomie locale). La première proposition « Hors-Réseau » est basée sur une « stratégie de contournement des réseaux centralisés traditionnels » au profit de proposition locale cherchant à atteindre une certaine autarcie. Ils illustrent leur proposition par l'expérience Woking au Royaume-Uni. Leur seconde proposition « Boucler la boucle » est celle du métabolisme circulaire qui est basée sur la contestation des grands réseaux centralisés pour aboutir à l'autarcie technique ; la réflexion s'intègre dans une réflexion écologique. Leur proposition est illustrée par le cas Hammarby Sjöstad en Suède. Leur troisième proposition « Au-delà ou avant l'infrastructure collective » reprend l'exemple des pays du nord où pour des questions de coûts, des difficultés techniques et d'une faible densité oblige à une certaine autonomie. La quatrième proposition « Injection dans le réseau » propose une relation entre les systèmes décentralisés et les systèmes centralisés. Les limites entre consommateurs et producteurs sont considérées comme de plus en plus « floues » à cause de l'émergence du *prosumer* [Coutard et al, 2011].

Figure 21 : Les degrés de complexités des systèmes techniques décentralisés [Construction de l'auteur]



1.2.2. Lecture de la décentralisation comme Transition sociotechnique

La Transition sociotechnique désigne une profonde transformation technologique qui affecte le fonctionnement des systèmes sociotechniques sur lesquels reposent les fonctions essentielles de la société. Les changements sociotechniques provoquent une transformation du régime sociotechnique en modifiant les relations entre la technologie et les acteurs ainsi que le système de régulation [Geels, 2002]. Il apparaît alors pertinent de chercher à déterminer à quel type de transition peut faire référence la reterritorialisation de l’approvisionnement énergétique.

L’approche Multi-Niveaux décrit plusieurs types de Transitions sociotechniques possibles. Trois d’entre eux peuvent s’appliquer au domaine électrique : la transformation, la reconfiguration et le processus de *désalignement-realignement* [Cf. Chapitre 3 Section 1.2]. Le dernier pourrait s’appliquer au processus de décentralisation à l’œuvre dans les écoquartiers. Ce processus nécessite un changement culturel et un investissement substantiel des pouvoirs publics [Verbong et al, 2010]. L’incertitude issue de la pression du “paysage” entraîne l’émergence d’une multitude d’innovations aux échelles locales dont le quartier. Dans un premier temps, aucune de ces innovations ne supplante les autres : elles sont en compétition avec des propositions différentes. Puis dans un second temps, quelques innovations s’imposent et deviennent la norme correspondant la fin de la transition [Geels et al, 2007b].

Des mix énergétiques bas carbone ont été inscrits dans les législations internationales et nationales par un ensemble de textes et de lois. L'Union Européenne a par ailleurs instauré le Paquet Climat-Energie afin d'impulser le processus de transition énergétique en énonçant des objectifs à atteindre dans une temporalité définie [Cf. Chapitre 1]. Ces engagements qui prévoient un développement des énergies renouvelables remettent en cause le fonctionnement des infrastructures classiques de production énergétique. L'inadaptation du réseau, en particulier électrique, qui résulte du développement de l'offre locale est en outre accrue par l'intermittence des énergies renouvelables : la variabilité accrue des flux limite les recettes sans réduire les coûts de fonctionnement des réseaux.

Les différentes technologies de production d'énergie renouvelable et de stockage d'électricité et de chaleur peuvent donc être perçues comme des innovations techniques permettant de répondre aux injonctions des politiques énergétiques actuelles. Une des questions qui se posent alors est de savoir quelles innovations (de produits, de procédés...) ont et auront la maturité nécessaire pour s'imposer sur le marché. Ces innovations peuvent être étudiées dans le cadre d'une analyse de filières (photovoltaïque, centrale thermique à biomasse, éolien...) afin de déterminer quelles sont pour chaque secteur les technologies les plus en mesure de s'imposer et d'assurer la décentralisation technique ou elles peuvent être étudiées sous l'angle d'une somme d'innovations agrégées et convergentes évoluant vers un nouveau régime énergétique cohérent.

2. Analyse technico-économique des technologies pouvant être installées dans les écoquartiers

La première partie de ce chapitre a montré que ces réflexions se traduisent par des propositions allant dans le sens d'une production énergétique bas carbone locale rendant le quartier plus autonome. Elle a également montré une diversité de propositions en matière de production et de raccordement aux réseaux. Même si les propositions de stockage sont encore peu répandues, il nous a semblé pertinent de montrer les possibilités techniques offertes par ce type de technologie dans l'approvisionnement énergétique des quartiers. Dans cette partie, nous présentons donc une analyse technico-économique des technologies de production d'origine renouvelable, des réseaux de distribution et du stockage de l'électricité ou de la chaleur pour un approvisionnement énergétique bas carbone à l'échelle du quartier.

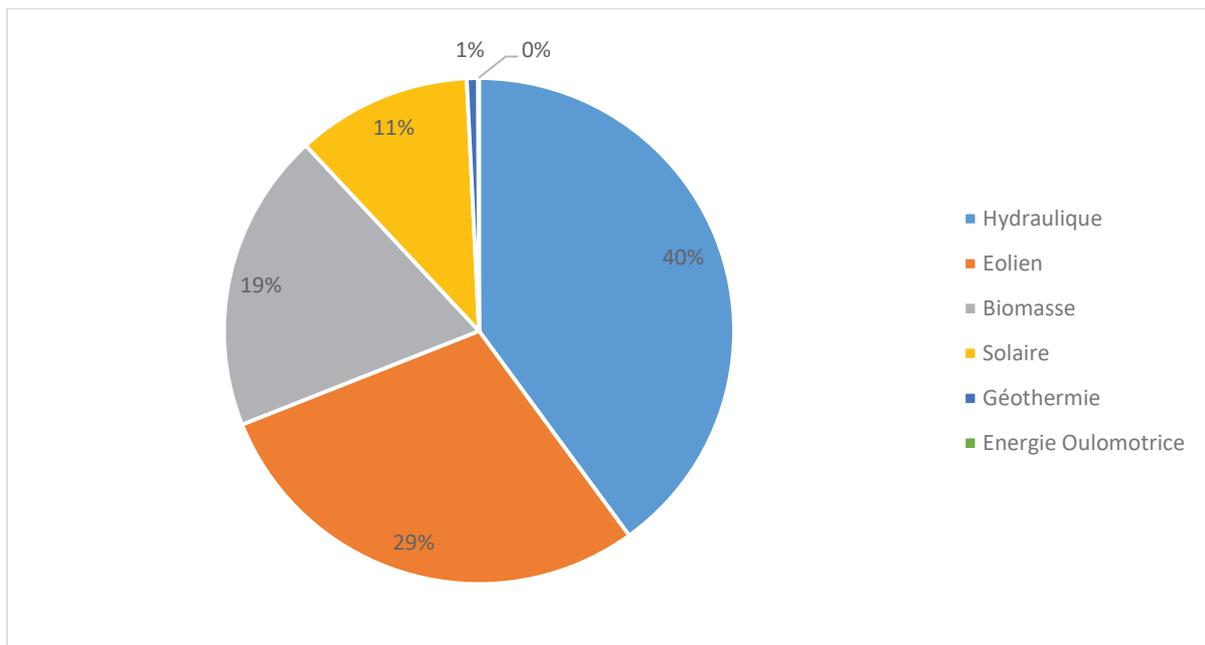
2.1. La production d'énergie renouvelable

Le Paquet Climat Energie de 2008 fixe un objectif de 20% du mix énergétique en provenance des énergies renouvelables pour l'Union Européen en 2020. Cet objectif a été actualisé en 2014 en prévision de la COP 21 pour atteindre 27% à l'horizon 2030. L'essor des énergies renouvelables est donc une priorité fondamentale pour l'Europe dans la perspective d'une transition énergétique bas carbone. Dans la partie qui suit, nous présentons une analyse des différentes filières d'énergies renouvelable (thermique et électrique) qui pourraient contribuer de façon significative aux objectifs du PCE et participer à la transition énergétique, leur compétitivité économique et les freins à leur développement.

*Etat des énergies renouvelables en Europe par secteur*¹³⁷

En 2014, la production d'électricité d'origine renouvelable en Europe a atteint de près de 895 TWh soit 28% de la production totale d'électricité. La part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale était de 16%. En 2014, la production électrique renouvelable se répartissait entre 42% d'hydraulique, 28% d'éolien, 19% de biomasse, 11% de solaire et 1% de géothermie et aqua thermie [Figure 22 : Production d'énergie renouvelables en Europe] [EurObserv'Er, 2015].

Figure 22 : Production d'énergie renouvelable en Europe –source : EurObserv'Er 2015-



¹³⁷ Cette partie est basée sur le rapport « Etat des énergies renouvelables en Europe » publié par EurObserv'Er en 2015. Ce rapport présente le baromètre des énergies renouvelables réalisé par Observ'ER dans le cadre du projet "EurObserv'ER 2013-2016" regroupant Observ'ER (FR), Renac (DE), Institute for Renewable Energy (IEO/EC BREC, PL), Jozef Stefan Institute (SI), ECN (NL), Frankfurt School of Finance & Management (DE). Depuis 1998, le baromètre mesure le progrès réalisé par les énergies renouvelables et dans chaque pays de l'Union Européenne chaque année [EurObserv'ER, 2015].

En 2014, le parc éolien européen atteignait une capacité installée de 129 GW dont 11,3 GW de capacités installées au cours de l'année. La production a atteint 251,6 TWh la même année, ce qui équivaut à une augmentation de 6,3% par rapport à 2013. Bien que la filière éolienne se soit largement développée ces dernières années, on observe un ralentissement de la croissance de l'installation de nouvelles capacités depuis 2012. Les installations varient entre 11 et 12 GW par an masquant des différences importantes entre les pays. En 2014, la croissance de l'éolien reste forte en Allemagne avec près de 4 922 MW installées dont 529 MW en offshore. Le marché britannique est quant à lui en recul en raison de la baisse des projets éoliens terrestres. Dans le même temps, les pays de l'Europe centrale, l'Espagne et l'Italie sont des marchés en fort ralentissement. L'Allemagne (57,4 TWh), l'Espagne (57,4 TWh) et le Royaume-Uni (32 TWh) sont les trois premiers pays producteurs d'électricité d'origine éolienne en Europe. A eux trois, ils représentent près de 56,2% de la production électrique éolienne de l'Union Européenne.

Le photovoltaïque constitue une autre source d'énergie renouvelable largement développée en Europe avec un parc installé avoisinant de 87,2 GWc pour une production brute d'électricité de 91,02 TWh en 2014. Bien que le secteur soit toujours en progression, la tendance est là aussi au ralentissement. Depuis 2011 où le niveau record de capacité installée avait été atteint avec 22 GWc, les capacités annuelles installées sont en baisse, avec un recul de 34% entre 2013 et 2014. Les raisons du ralentissement sont liées à des politiques nationales moins favorables depuis quelques années pour tenter de limiter l'explosion du coût des politiques de soutien [EurObserv'Er, 2015]. L'essentiel de la production photovoltaïque se situe en Allemagne, Italie et Espagne qui représentent 72,1% de la production électrique photovoltaïque européenne. Ce ralentissement dans le marché européen contraste d'ailleurs avec la bonne santé du marché du photovoltaïque à l'échelle mondiale [IRENA, 2014].

En 2014, la production totale d'électricité issue de la petite hydraulique était de 50 125 TWh pour une puissance installée de 13,6 GW dans l'Union Européenne. Les trois premiers pays en termes de puissance installée sont l'Italie, la France et l'Espagne qui représentent 52,9% de la production totale de l'année 2014. La petite hydraulique qui regroupe les installations dont la puissance est inférieure à 10 MWC est une énergie renouvelable compétitive contribuant à la bonne stabilité du réseau grâce à ses capacités de réponses immédiates. Malgré un potentiel de développement important (17 GW de capacités supplémentaires attendues pour 2020), on observe un ralentissement de la croissance de la puissance installée depuis une dizaine d'années sur le territoire de l'Union Européenne qui s'explique par le durcissement de la réglementation environnementale (Directive Cadre sur l'Eau, Directive Natura 2000¹³⁸).

¹³⁸ La Directive Natura 2000 permet de rassembler des sites naturels ayant une grande valeur patrimoniale au niveau de la faune et de la flore afin de maintenir la diversité biologique.

La géothermie est une énergie qui peut être valorisée sous forme de chaleur ou d'électricité. La chaleur géothermique peut alimenter des réseaux de chaleur, des services urbains (ex : piscine), l'agriculture (aquaculture) ou l'industrie. En Europe, la puissance des applications liées aux usages directs de la chaleur est estimée à 3 308 MWth pour une production de 800 Ktep en 2014. Ces chiffres peuvent être considérés comme minorés car certains pays ne comptabilisent pas encore ce type d'énergie. L'usage de la géothermie est particulièrement étudié pour les réseaux de chaleur. Ainsi, huit réseaux de chaleur géothermique ont ainsi été mis en service durant la même année en France, en Allemagne, en Hongrie et en Italie pour une puissance cumulée de 76,2 MWth. Malgré ces nouvelles installations, la trajectoire de l'usage de la chaleur géothermie semble ne pas refléter le potentiel qu'elle peut offrir. L'Union Européenne cherche à développer des incitations politiques et réglementaires pour encourager cette filière notamment avec la Directive sur l'efficacité énergétique qui demandait une évaluation du potentiel dans chaque Etat.

La puissance électrique géothermique installée en Europe est de 952,1 MWe en 2014 ; elle est restée stable par rapport à 2013. La production brute a quant à elle augmenté de 277 GWh passant de 6026 à 6303 GWh sur la même période. L'Italie reste leader dans la géothermie avec 875,5 MWe de puissance installée, les autres pays se situant loin derrière (25 MW au Portugal, 24 MW en Allemagne, 16,2 MW en France et 1,4 MW en Autriche). S'il est prévu que la production augmente dans les prochaines années avec l'objectif d'atteindre 11 TWh en 2020, de nombreuses contraintes limitent le développement de la filière, en particulier, l'absence de mécanismes d'assurance pour pallier les risques géologiques pouvant survenir lors de l'exploitation.

Les Pompes à Chaleur (PAC) regroupent un ensemble de technologies qui se différencient selon la source d'énergie utilisée (air, eau, sol), selon les émetteurs de chauffages utilisés (ventilo-convecteur, planché chauffant, radiateur basse ou haute température) et selon leurs usages (chauffage, rafraîchissement, production d'eau chaude sanitaire). En 2014, la production d'énergie grâce aux PAC était de l'ordre de 7,9 Mtep (énergie renouvelable provenant des PAC). En 2030, l'objectif est d'atteindre 61 millions de PAC installées en Europe, ce qui paraît réalisable grâce à la relance du marché de la construction et à l'instauration de réglementations thermiques favorables. Néanmoins, le coût de ces technologies constitue encore un frein à leur essor si des incitations financières ou le développement de réglementation en faveur des énergies renouvelables ne sont pas mises en place.

Le biogaz provient d'unités de méthanisation de déchets ménagers, d'effluents d'industries agro-alimentaires, ou de déchets d'élevage (lisier). En 2014, la production de biogaz de l'Union Européenne était de 14,9 Mtep. La production d'électricité, dans des unités de cogénération ou non, est encore le principal vecteur de valorisation du biogaz en Europe avec une production d'électricité de l'ordre de 57 TWh. Le biogaz permet également de produire de la chaleur. En 2014, la chaleur vendue dans les réseaux de chaleur était de 555,9 Ktep et la chaleur non vendue, c'est-à-dire produite et consommée sur le lieu

de production, était de l'ordre de 2 429 Ktep. Le biogaz peut être intégralement utilisé pour la production de chaleur si les capacités de production sont placées à proximité des lieux de consommation.

Les déchets urbains peuvent également être valorisés sous forme de chaleur ou d'électricité. Dans l'Union Européenne, la production d'énergie issue de la partie renouvelable¹³⁹ des déchets urbains dans les unités d'incinération d'ordures ménagères a atteint 9 Mtep en 2014 qui ont produit 19,8 TWh d'électricité et 2,5 Mtep de chaleur. La tendance est à l'augmentation grâce à la législation européenne qui pousse les exploitants à optimiser l'efficacité énergétique de leurs centrales et qui indique que les incinérateurs peuvent être considérés comme des unités de valorisation énergétique des déchets¹⁴⁰.

La superficie du parc solaire thermique était de 47 millions de mètres carrés soit 33 TWh en 2014. Le marché du solaire thermique est en baisse pour la sixième année consécutive en Europe, avec moins de 3 millions de mètre carré ont été installés en 2014, ce qui équivaut à ce qui avait été installé en 2007. Les raisons de cette baisse sont à imputer en premier lieu à une réduction des ventes dans les maisons individuelles liée notamment à la diminution des prix du pétrole et du gaz en 2014 et 2015. Par ailleurs, ce secteur souffre de la concurrence avec des technologies alternatives telles que les chauffe-eaux thermodynamiques et les chaudières à gaz à condensation ou encore le solaire photovoltaïque. Bien que la politique de promotion de cette filière se soit affaiblie ces dernières années, le lancement d'une politique d'incitation sur la chaleur de la part de l'Union Européenne pourrait permettre un regain de cette dernière dans les prochaines années [CE, 2016b].

Enfin, la biomasse solide rassemble l'ensemble des composants solides d'origine biologique utilisés comme combustibles. La biomasse désigne donc le bois, les déchets de bois (copeaux, sciures), les granulés de bois, les liqueurs noires de l'industrie papetière, la paille, la bagasse, les déchets animaux et les résidus de végétaux. Comme pour les déchets ménagers, la biomasse peut être valorisée sous forme de chaleur ou d'électricité. En 2014, la production de chaleur issue de la biomasse vendue par les réseaux de chaleur était de 9,1 Mtep tandis que la production de chaleur utilisée directement par le consommateur atteignait 61,2 Mtep. La production d'électricité est en forte évolution depuis plusieurs années et a atteint 84,8 TWh en 2014. La production d'énergie issue de la biomasse tend à diminuer au cours des dernières années en raison d'hivers plutôt doux en Europe, des prix bas du charbon et de la concurrence avec les autres filières de production d'énergie renouvelable pour la chaleur et du fait de la surcapacité des autres moyens de production électrique pour ce qui concerne l'électricité.

¹³⁹ On considère de manière conventionnelle que la part biodégradable des déchets urbains est renouvelable. Il est pris en compte dans la comptabilité seulement la part des énergies biodégradables des ordures ménagères. La valorisation des déchets urbains non renouvelables (emballages plastiques,...) n'est donc pas prise en compte.

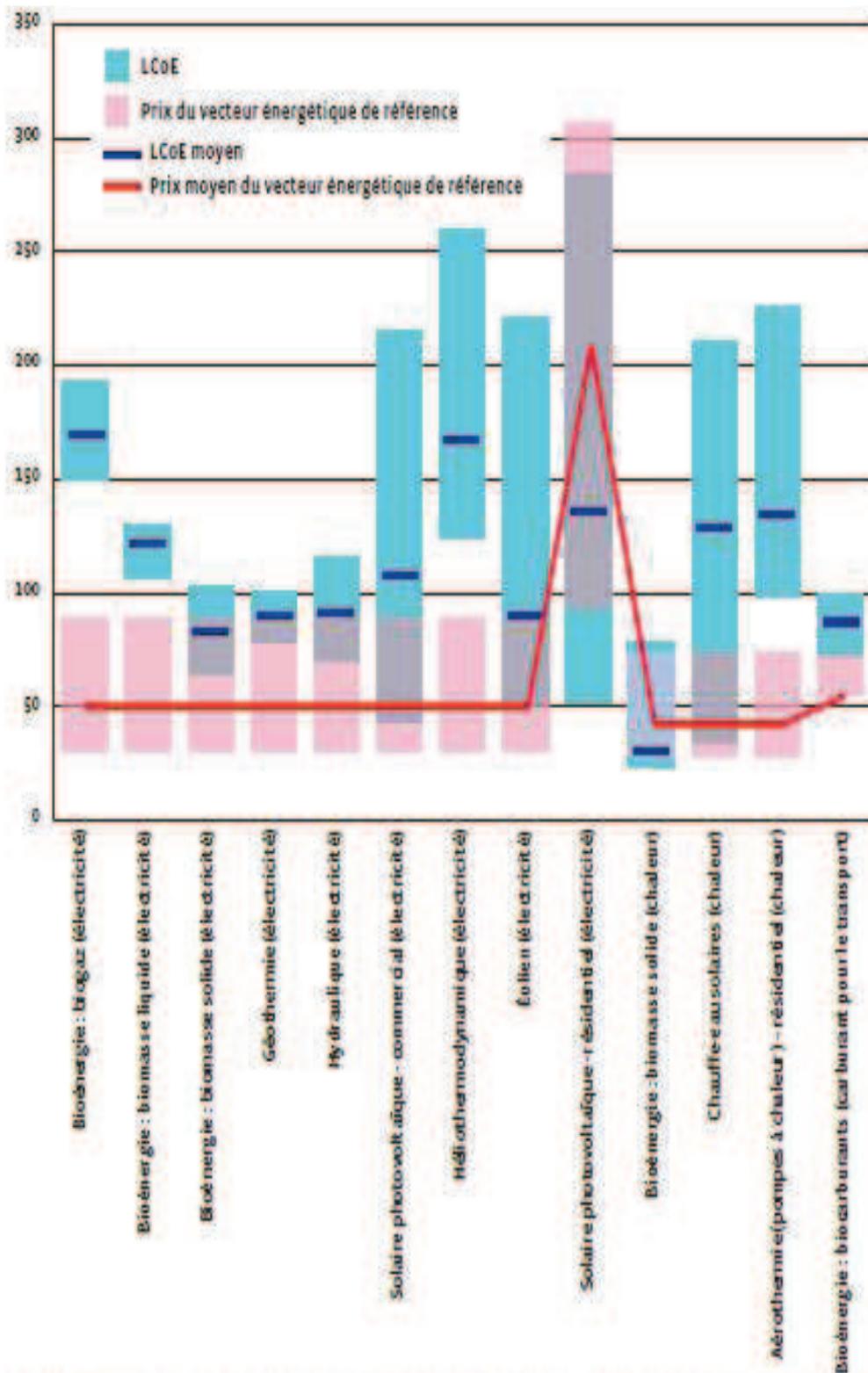
¹⁴⁰ Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives

La compétitivité des énergies renouvelables en Europe

Outre leur apport à la réduction du bilan carbone, certaines filières d'énergie renouvelables sont en passe de devenir plus compétitives que les sources d'énergies fossiles. L'étude de leur compétitivité est néanmoins sous-tendue par le constat qu'il n'existe pas un coût unique par technologie. De nombreux facteurs influent sur ces coûts tels que la localisation, la technologie employée et son fonctionnement, la qualité des ressources renouvelables et le coût du capital. Tous ces facteurs varient selon le pays. L'étude réalisée par EurObserver sur la compétitivité des énergies renouvelables présente des fourchettes de coûts pour chaque technologie qui correspondent aux écarts de coûts entre les différents pays européens [Figure 8 : LCoE et prix des vecteurs énergétiques de référence (€/MWh)] [EurObserv'ER, 2016].

La figure 23 montre les coûts actualisés de production d'énergie (LCoE) pour un ensemble de technologies étudiées à l'échelle de l'Union Européenne. En ce qui concerne, l'électricité, les résultats montrent que les coûts de production des énergies renouvelables sont encore supérieurs aux prix moyens de l'électricité. Le photovoltaïque résidentiel est un cas particulier car les prix de référence pris en compte sont les prix pour le consommateur final ; la technologie est donc déjà compétitive dans plusieurs Etats membres. En ce qui concerne la production de chaleur, la biomasse solide est compétitive dans de nombreux pays européens. Pour le reste de la production de chaleur renouvelable (solaire, PAC), les coûts moyens sont encore très supérieurs aux prix de référence sauf de façon exceptionnelle pour le solaire basse-température dans certains pays [Figure 23 : LCOE et prix des vecteurs énergétiques de référence (€/MWh)] [EurObserv'Er, 2016].

Figure 23 : LCoE et prix des vecteurs énergétiques de référence (€/MWh) –source ; EurObserver, 2016, p193-



Remarque : aperçu de l'évaluation des coûts actualisés au niveau de l'Union européenne. Ces fourchettes découlent des différences entre États membres. Le graphique présente aussi les fourchettes des prix de référence de l'électricité, de la chaleur et des carburants, en excluant taxes et prélèvements, à l'exception du solaire photovoltaïque (électricité domestique) dont le prix de référence inclut ces taxes. Les données se rapportent à 2015.

Source : EurObserver 2016

L'*Energy Roadmap 2050* de la Commission Européenne analyse les trajectoires possibles pour permettre une réduction des émissions de gaz à effet de serre d'au moins 80 % en 2050 par rapport à 1990¹⁴¹. L'étude identifie quatre options techniques censées garantir un système énergétique compétitif et sécurisé (l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables, l'énergie nucléaire ainsi que la capture du carbone et le stockage) qui sont ensuite combinées en scénarii. Les principales conclusions sont que la décarbonation du système énergétique européen est techniquement et économiquement faisable en particulier si la part des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique augmentent. À long terme, tous les scénarii qui permettent d'atteindre l'objectif visé de réduction des émissions sont moins coûteux que la poursuite des politiques actuelles. Il est donc important d'investir dès aujourd'hui et de manière massive dans les nouvelles technologies bas carbone, les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et les systèmes d'infrastructures de réseaux [CE, 2014b].

Les freins au développement des énergies renouvelables

Le rapport *Re-Powering Market* de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) publié en 2016 indique que les marchés de l'énergie ne permettent pas encore une rentabilité suffisante des projets d'énergie renouvelable pour stimuler suffisamment les investissements et atteindre le rythme de déploiement que nécessite la transition énergétique. En effet, les prix de gros de l'électricité en Europe, entre 30 et 50 USD par mégawattheure, sont jugés trop bas pour rentabiliser les nouveaux investissements. L'AIE estime par ailleurs que les perspectives de maintien de prix bas de l'électricité au cours des prochaines années pourraient avoir un impact sur les investissements dans les capacités de production renouvelable. L'AIE appelle donc à la mise en œuvre de politiques publiques pour soutenir le développement des technologies bas carbone [AIE, 2016a].

Pour certaines technologies, la rentabilité est atteinte à l'échelle du consommateur final. On parle de parité réseau qui désigne le fait que le coût de production de l'énergie devient inférieur au prix vendu de cette même énergie vendue au consommateur. La parité réseau est atteinte pour le photovoltaïque dans certains pays comme l'Allemagne en raison des prix élevés de l'électricité. Les subventions publiques ne sont alors plus nécessaires. Cette situation ne se rencontre toutefois pas encore dans tous les pays et elle ne concerne que les technologies à l'échelle du consommateur final. Par ailleurs, la rentabilité suppose alors un taux d'autoconsommation élevé qui peut être difficile à atteindre lorsque la courbe de charge et la courbe de production sont largement déconnectées [AIE, 2016a].

¹⁴¹ Cette étude est une version actualisée et enrichie de *l'Energy Roadmap European* pour 2030 publiée en 2003. Publiée en 2013 par la Commission Européenne, cette nouvelle version a pour but de présenter les scénarios de référence à l'horizon 2050. Sept scénarii ont été réalisés. Ils se focalisent sur l'énergie, le transport et les politiques climatiques dans l'Europe des 28.

La prise en compte d'une valeur du carbone progressivement croissante pourrait également faciliter une transition progressive vers un système énergétique bas carbone. Avec le développement des moyens de flexibilisation de la demande (*demande-response*) et la baisse des coûts du stockage, l'accroissement des prix du carbone contribuerait à l'amélioration de la compétitivité relative des moyens de production décarbonés et pourrait ainsi faciliter une transition vers un système énergétique intégrant une plus grande proportion d'énergie renouvelable. Néanmoins, la mise en place d'un prix pour le carbone risque de prendre du temps au vue de la difficulté des gouvernements pour se mettre d'accord sur cette thématique [AIE, 2016a].

2.2. Les réseaux électriques de distribution

La Commission Européenne a publié en novembre 2010 le Schéma Directeur pour un Réseau Énergétique Intégré qui stipule que des « mesures immédiates » de modernisation des infrastructures énergétiques doivent être prises pour relever les défis que pose la transition énergétique. Plusieurs raisons sont ainsi évoquées comme l'augmentation prévue de la demande électrique dans les prochaines années, l'évolution de la chaîne de valeur énergétique, le changement des mix énergétiques, le développement des nouveaux usages de l'énergie, la nécessité de sécuriser les systèmes, la volonté de favoriser les marchés et d'assurer l'équilibre des réseaux affectés par l'augmentation de la pénétration des énergies renouvelables intermittentes [CE, 2010a]. Si une grande partie de la réflexion est tournée vers les réseaux de transport d'électricité dans le cadre de la réalisation d'une Europe de l'Énergie, les réseaux de distribution font aussi l'objet d'un intérêt croissant¹⁴². Le mouvement de décentralisation des systèmes d'approvisionnement énergétique qui accompagne la transition énergétique soulève un ensemble de problématiques techniques et économiques qu'il est important de souligner.

La production distribuée

La décentralisation technique des systèmes électriques fait écho au concept de production distribuée apparu au début des années 2000 avec le développement des énergies renouvelables dans la production électrique. Plusieurs terminologies étaient alors employées pour caractériser des systèmes de production d'électricité de faible capacité issus ou non des énergies renouvelables et situés à proximité des consommateurs (*embedded generation, dispersed generation, decentralised generation*). Ackerman a proposé le concept de production distribuée (*Distributed Generation*) qui s'est ensuite imposé. Il s'agit d'« une source d'énergie électrique connectée directement au réseau de distribution ou sur le côté client du compteur. »¹⁴³ [Ackerman et al, 2001]. Ackerman caractérise des systèmes de tailles différentes allant

¹⁴² Directive 2009/72/CE du Parlement Européen et du Conseil du 13 juillet 2009 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité (considérant 27)

¹⁴³ Ackerman précise par ailleurs dans son article trois notions supplémentaires associées à la production distribuée. Il s'agit des ressources distribuées, des capacités distribuées et les utilités distribuées. En faisant référence à la définition de Moskovitz [Moskovitz et al, 2000, p10] qui définit **les ressources distribuées** comme « les ressources provenant du côté de la demande et du côté de l'offre pouvant être déployées à travers

de quelques kilowatts à plusieurs centaines de mégawatts ainsi que les technologies correspondant aux différentes échelles [Tableau 12 : Type de production distribuée en fonction de la capacité installée] [Tableau 13 : Technologies pour la production distribuées] [Ackerman et al, 2001].

*un système de distribution électrique (par opposition au système de transport) afin de répondre aux besoins énergétiques et aux besoins de fiabilité attendus par les clients. Les ressources distribuées peuvent être installées du côté client ou du côté de la fourniture de l'appareil ». Ackerman insiste sur le fait que les ressources distribuées consistent en une production distribuée pouvant être installée sur les deux côtés du réseau mais également au niveau du côté client du compteur avec la présence d'un système de gestion de la demande pouvant déplacer celle-ci voir la réduire. Il définit ensuite **les capacités distribuées** comme étant les ressources distribuées associées aux besoins des capacités de transport et de distribution électrique. En ce sens, les capacités distribuées prennent en compte la production décentralisée et des ressources distribuées ainsi que la capacité de réserve afin de minimiser les exigences de surdimensionnement du réseau de transport ou de distribution. Enfin, les **utilités distribuées** regroupent l'ensemble des productions distribuées, des ressources distribuées et des capacités distribuées dans une architecture future du réseau électrique [Ackerman et al, 2001].*

Tableau 12 : Type de production distribuée en fonction de la capacité installée [Ackerman et al, 2001]

Type	Capacité de production
Micro Distributed Generation	1 Watt – 5 kW
Small Distributed Generation	5 kW- 5 MW
Medium Distributed Generation	5 MW- 50 MW
Large Distributed Generation	50 MW – 300 MW

Tableau 13 : Technologies pour la production distribuées [Ackerman et al, 2001]

Technologies	Taille classique des modules
Turbine à Gaz à cycle combiné	35 MW - 4000 MW
Moteur à Combustion interne	5 kW - 10 MW
Turbine à Combustion	1 MW - 250 MW
Micro-Turbines	35 kW – 1 MW
Petite Hydraulique	1 MW – 100 MW
Turbines Eoliennes	200 Watt -3 MW
Modules photovoltaïques	20 Watt – 100 kW
Solaire Thermique, récepteurs centraux	1 – 10 MW
Solaire Thermique, lutz system	10 – 80 MW
Biomasse Gazéifiée	100 kW – 20 MW
Pile à combustible	250 kW – 5 MW
Géothermie	5 MW – 100 MW
Energie marine	100 kW – 1 MW
Engin à moteur (stirling engine)	2 kW – 10 kW
Stockage par batterie	500 kW – 5 MW

Historiquement, les réseaux de distribution ont été conçus pour approvisionner les consommateurs situés au bout de la chaîne électrique après que celle-ci ait été produite de façon centralisée et transportée dans les réseaux de transport. Les réseaux de distribution sont donc généralement maillés et ne présentent qu'un faible potentiel de redondance contrairement aux réseaux de transport qui prennent une forme aréolaire afin de supporter des flux d'énergie à double sens [Ackerman et al, 2002]. L'essor de la production distribuée sur les réseaux induit un ensemble de problématiques techniques nouvelles associées à l'injection de la production renouvelable intermittente dans les réseaux de distribution.

Les problèmes que soulève le développement de la production distribuée sont de deux ordres : des difficultés opérationnelles qui doivent être traitées afin d'éviter les aléas techniques sur les réseaux de distribution et des difficultés liées à la fonction originelle des réseaux de distribution [Ackerman et al, 2001 ; Ackerman et al, 2002 ; De Joode et al, 2009]. Ainsi, les réseaux de distribution ne sont généralement pas connectés à des systèmes d'acquisition et de contrôle de données ce qui engendre des difficultés dans la maîtrise des flux et menace leur fiabilité [Ackerman et al, 2001 ; Ackerman et al, 2002 ; Ackerman, 2013]. Les capacités de production raccordées au réseau de distribution sont par ailleurs différentes de celles raccordées aux réseaux de transport. Les petites et moyennes capacités de production utilisent des générateurs asynchrones moins coûteux qui ne présentent pas les mêmes caractéristiques opérationnelles que les générateurs synchrones¹⁴⁴. Ceci peut engendrer un certain nombre de problèmes techniques comme l'apparition de fluctuations de puissance ou d'oscillations qui menacent le bon fonctionnement des réseaux de distribution [Ackerman et al, 2001].

Le développement des capacités de production distribuée présente toutefois également des aspects positifs pour le réseau. Ackerman montre ainsi que la production distribuée, en localisant des moyens de production à proximité des consommateurs, peut limiter les distances de transit et donc les pertes en lignes dans les réseaux de distribution et à certaines conditions dans les réseaux de transport [Ackerman et al, 2002].

Smart Grids

L'essor de la production distribuée suppose que la décentralisation technique est en marche. Toutefois, leur développement nécessite l'intégration de l'intelligence dans les réseaux de distribution en raison d'une évolution du fonctionnement et de l'usage de ce réseau. L'Union Européenne dans la Directive Electricité¹⁴⁵ de 2009 indique que « *Les États membres devraient encourager la modernisation des réseaux de distribution, par exemple en introduisant des réseaux intelligents qui devraient être mis en place de façon à encourager la production décentralisée et l'efficacité énergétique* ». Le développement

¹⁴⁴ Les générateurs asynchrones directement raccordés au réseau n'ont pas la capacité de fournir de la puissance réactive sur le réseau. Ils ont besoin de puissance réactive issue du réseau pour les phases de démarrage et de fonctionnement.

¹⁴⁵ Considérant 27 de la Directive 2009/72/CE du Parlement Européen et du Conseil du 13 juillet 2009 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité et abrogeant la directive 2003/54/CE

des smart grids est nécessaire pour garantir le bon fonctionnement de la décentralisation technique attendue dans le processus de transition énergétique [Bouffard et al, 2008].

Les réseaux de distribution n'ont pas été conçus à l'origine pour intégrer un double flux d'énergie. Pour permettre le développement des systèmes énergétiques décentralisés, il est nécessaire d'introduire des dispositifs de gestion et de contrôle, par le biais de la gestion active du réseau (*Active Network Management*) [McDonald, 2008 ; Wolfe, 2008]. La gestion active du réseau permettrait d'apporter une plus grande fiabilité dans l'approvisionnement, de développer les ressources distribuées et enfin de faciliter le contrôle de la part des opérateurs de réseaux de distribution [De Joode et al, 2009]. Ces acteurs pourraient également mieux anticiper les investissements de maintenance et le renforcement des infrastructures permettant ainsi une meilleure insertion des ressources énergétiques distribuées sur le moyen et long terme [Wolfe, 2008 ; McDonald, 2008].

L'essor des smart grids est souvent présenté comme conditionné au développement des compteurs intelligents (*smart meters*). Ces compteurs se distinguent notamment par leur capacité à communiquer et à transmettre des relevés de consommation sur des intervalles de temps courts (entre 15 minutes à moins d'une minute). Les informations collectées peuvent ainsi être exploitées par les consommateurs finaux en améliorant leur niveau d'information sur les consommations instantanées et donc leur maîtrise de la demande d'énergie [D'Oca et al, 2014]. Elles peuvent être exploitées par un ensemble d'acteurs comme les opérateurs de réseau, les agrégateurs, les collectivités afin d'assurer un contrôle plus efficace du réseau. Elles leur permettent également d'offrir une facturation de l'énergie au plus près de la consommation réelle du consommateur [Gulbinas et al, 2014].

A titre d'illustration, une étude publiée par Bio Intelligence en 2008 estime que les réseaux intelligents permettraient de diminuer la consommation annuelle d'énergie primaire de l'Union Européenne dans le secteur énergétique de près de 9 % d'ici à 2020 [Bio Intelligence Service; 2008]. Cette réduction équivaut à un gain de 148 TWh d'électricité. Ces économies d'énergie représenteraient près de 7,5 milliards d'euros par an d'économies (sur la base des prix moyens constatés en 2010).

Avec l'adoption du troisième paquet relatif au marché intérieur de l'énergie, l'Union Européenne a imposé aux Etats Membres de généraliser l'installation des compteurs intelligents d'ici à 2020¹⁴⁶ (80% des consommateurs doivent être équipés en 2020¹⁴⁷) ce qui a entraîné un rapide développement du marché des systèmes de comptage intelligent. Ces dispositifs sont présentés comme un moyen d'améliorer l'efficacité énergétique dans les usages finaux et les services énergétiques. Ils sont également un des outils clé pour favoriser l'intégration de volumes croissants d'énergie renouvelable

¹⁴⁶ Directive 2009/72/CE du Parlement Européen et du Conseil du 13 juillet 2009 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité (considérant 27 et article 3 al 11)

¹⁴⁷ Annexe 1 Directive 2009/72/CE du Parlement Européen et du Conseil du 13 juillet 2009 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité

variables dans les réseaux¹⁴⁸. Pour cette raison, l'Union Européenne souhaite la mise en place d'un cadre politique et juridique incitatif au déploiement des réseaux intelligents [CE, 2010b].

*Microgrids*¹⁴⁹

Dans son rapport de 2007 annonçant l'agenda de recherche sur les réseaux électriques du futur, la Commission Européenne annonce l'étude des microgrids présentés comme « *des réseaux basse et moyenne tension avec des ressources distribuées, ainsi que des dispositifs de stockage locaux et des charges contrôlables. Ils ont une capacité totale installée dans la plage de quelques kilowatts à une ou deux mégawatts.* ». Plus spécifiquement, les microgrids « *... fonctionnent la plupart du temps connectés au réseau de distribution, [mais] ils peuvent être automatiquement déconnectés pour fonctionner en mode îlotage, en cas de panne dans le réseau en amont et peuvent être resynchronisés après la restauration de la tension du réseau en amont.* ». En raison de ces particularités, les microgrids peuvent être exploités comme une charge unique agrégée ou un générateur et ils peuvent être rémunérés en tant que fournisseurs d'énergie ou de services auxiliaires soutenant le réseau principal de distribution [CE, 2007, p39].

Selon la Commission de Régulation de l'Énergie, les microgrids répondent à différents usages qui peuvent être répartis en cinq grandes catégories¹⁵⁰. La première catégorie regroupe les zones commerciales, artisanales ou industrielles. L'enjeu de ces zones où la consommation énergétique est forte et variable selon les acteurs présents est d'optimiser la gestion de l'énergie afin qu'elle soit le plus neutre possible pour les réseaux de distribution. La seconde catégorie regroupe les écoquartiers dont le profil d'usage de l'énergie est relativement équivalent à celui de la première catégorie. La troisième catégorie intègre les campus universitaires dans le but de répondre à leurs impératifs de baisse de la consommation. La quatrième catégorie regroupe les microgrids qui alimentent des zones isolées ou provisoirement isolées des réseaux électriques en raison d'intempéries par exemple. L'avantage apporté par les microgrids est alors de limiter les coupures d'électricité et d'exploiter des ressources énergétiques locales en minimisant le recours aux groupes diesels. Enfin, la cinquième catégorie prend en compte les systèmes de « base de vie » comme les camps militaires ou les hôpitaux qui ont leurs propres moyens de production, de stockage et de distribution afin de pouvoir réaliser leur mission en totale autonomie énergétique lorsque cela est nécessaire.

¹⁴⁸ Directive 2009/28/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE (article 16)

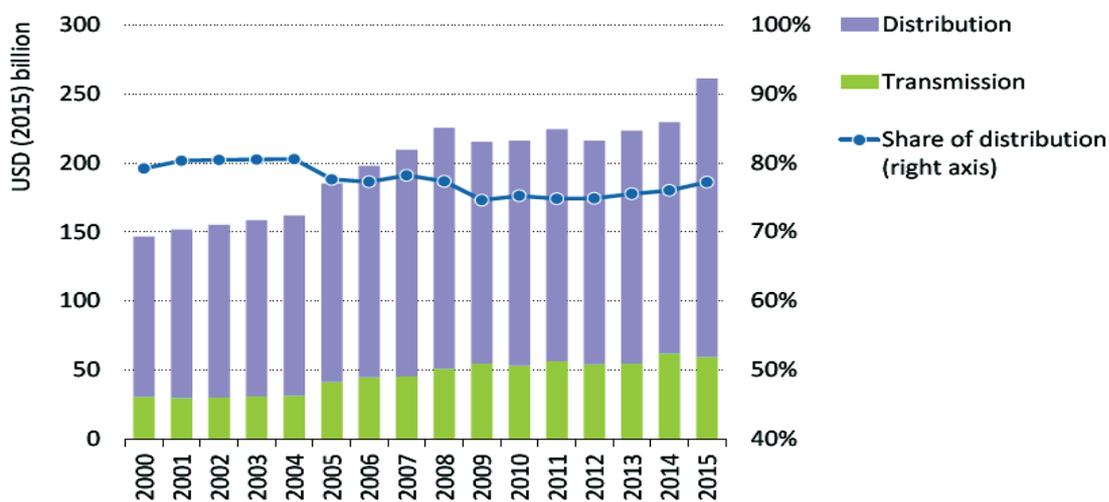
¹⁴⁹ L'émergence de la notion de microgrids est à associer à la production distribuée dans les réseaux électriques. Néanmoins, la notion de microgrids inclue de plus en plus l'énergie thermique et les systèmes multifluides dans sa définition.

¹⁵⁰ Site de la Commission de Régulation de l'Énergie, dossier sur les Microgrids, consulté en décembre 2015, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=microgrids>

L'investissement dans les réseaux de distribution

L'investissement dans les réseaux électriques de transport et de distribution est en plein essor au niveau mondial depuis une dizaine d'année. En 2015, 40% des investissements du secteur électrique ont été alloués aux réseaux électriques et aux capacités de stockage pour près de 260 milliards de dollars américains. Plus spécifiquement, 55% des dépenses dans les réseaux ont eu pour objectif de satisfaire l'augmentation de la demande, 35% ont été attribuées à la modernisation des actifs vieillissant et 10% restant ont permis d'intégrer les énergies renouvelables intermittentes. Bien que les coûts d'investissement unitaires (coût moyen par kilomètre) soient plus élevés dans les lignes de transport ; les investissements en volume ont été plus importants dans les réseaux de distribution. Ils représentent près des trois quarts des investissements dans les réseaux depuis 2006 [Figure 24 : Investissements mondiaux dans les réseaux de transport et de distribution électrique] [AIE, 2016b].

Figure 24 : Investissements mondiaux dans les réseaux de transport et de distribution électrique –source : AIE, 2016b, p148-



En Europe, les investissements dans les réseaux de transport et de distribution se montaient à 39 milliards de dollars en 2015 dont près de 90 % ont été alloués aux réseaux de distribution¹⁵¹ [AIE, 2016a&b]. Cette forte proportion en faveur de la distribution correspond à la feuille de route de l'Union Européenne qui estime que les réseaux électriques européens requièrent plus de 600 milliards d'euros d'investissement d'ici 2020 dont deux-tiers devront être alloués au réseau de distribution [Eurelectric, 2014]. L'investissement dans ces réseaux est principalement motivé par la modernisation des actifs obsolètes, la volonté d'intégrer les énergies renouvelables et le développement des smart grids afin d'augmenter la gestion intelligente à l'échelle locale [Figure 25 : Les drivers de l'investissement dans les réseaux de distribution] [Eurelectric, 2012a ; 2014].

¹⁵¹La répartition des investissements dans les réseaux est la suivante : 34 milliards d'euros pour la distribution et 5 milliards d'euros pour les réseaux de transport. Les calculs de l'IEA intègrent les réseaux électriques et le stockage de batterie distribuée [IEA, 2016, p 109].

Figure 25 : Les drivers de l'investissement dans les réseaux de distribution –Eurelectric, 2014, p5-



2.3. Les réseaux de chaleur urbains

La base d'information sur les écoquartiers présentée dans le Chapitre 1 a fait apparaître un intérêt croissant pour le vecteur chaleur avec l'essor des réseaux de chaleur dans les projets de quartiers durables. Cette tendance correspond à la reconnaissance du potentiel que représente la chaleur dans la transition énergétique [CE, 2016a&b]. Il existe en effet d'importants gisements d'amélioration de l'efficacité énergétique et de décarbonation du vecteur chaleur encore inexploités tels que la réduction des pertes dans les réseaux, le recyclage de la chaleur fatale ou encore l'utilisation des énergies renouvelables pour la production thermique.

L'intérêt croissant pour les réseaux de chaleur urbains est toutefois contraint par la maturité encore insuffisante de certaines technologies et également par la structure des modèles d'affaires à mettre en œuvre pour rendre ces systèmes rentables. Malgré tout sur le plan technique, les évolutions dans les réseaux de chaleur sont perçus comme importants avec notamment le développement de la mutualisation des capacités de production (thermique, électrique, refroidissement) et l'intégration de nouveaux profils d'utilisateurs nécessitant une gestion plus dynamique des réseaux [CE, 2013 ; CE, 2014b].

L'étude européenne *Energy Roadmap* projette une baisse de la demande de chaleur grâce au développement de l'efficacité énergétique du bâti dans les secteurs résidentiel et tertiaire. Pour le secteur résidentiel, la demande d'énergie finale pour les usages de chauffage et de froid devrait baisser de 12% en 2030 et 17% en 2050 par rapport à 2005. Cette baisse de la demande dans le secteur résidentiel s'explique par un accroissement de l'efficacité énergétique de l'ordre de 28% par rapport à 2005 [Figure 26 : Consommation d'énergie finale dans le secteur résidentiel]. La demande de chaleur dans le secteur tertiaire devrait également diminuer fortement entre 2020 et 2030 mais la baisse attendue serait beaucoup plus modérée entre 2030 et 2050 en comparaison avec le secteur résidentiel [Figure 27 : Consommation d'énergie finale dans le secteur tertiaire] [CE, 2014b].

Figure 26 : Consommation d'énergie finale dans le secteur résidentiel –source ; CE, 2014a, p37-

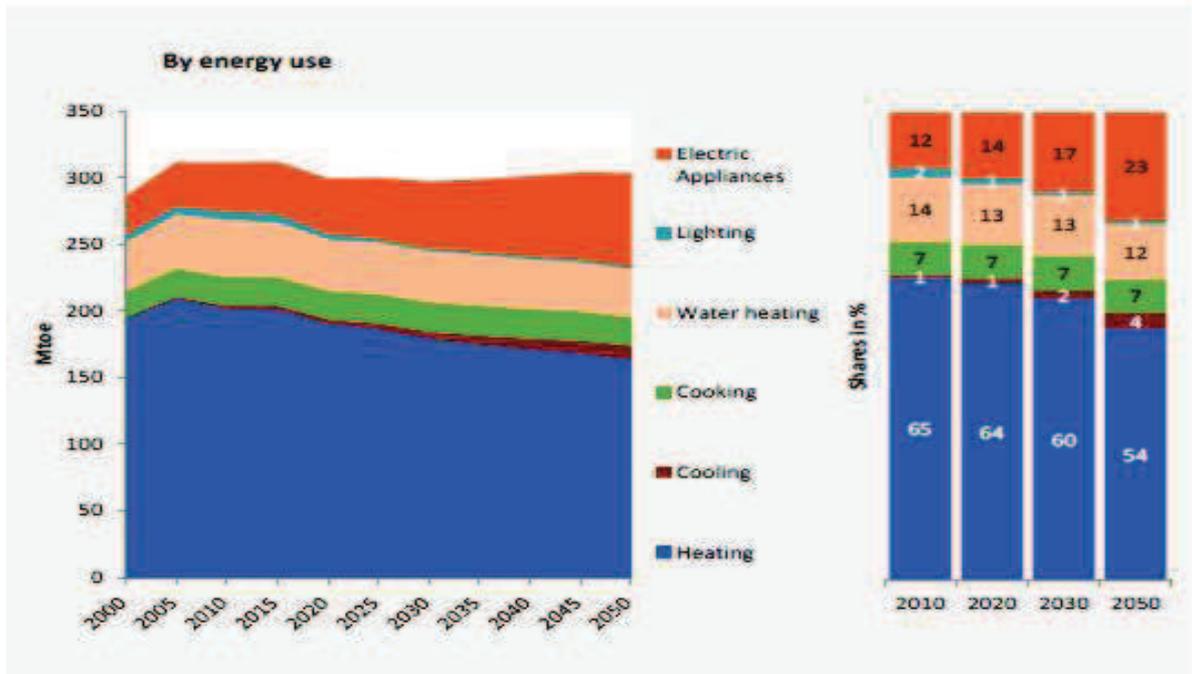
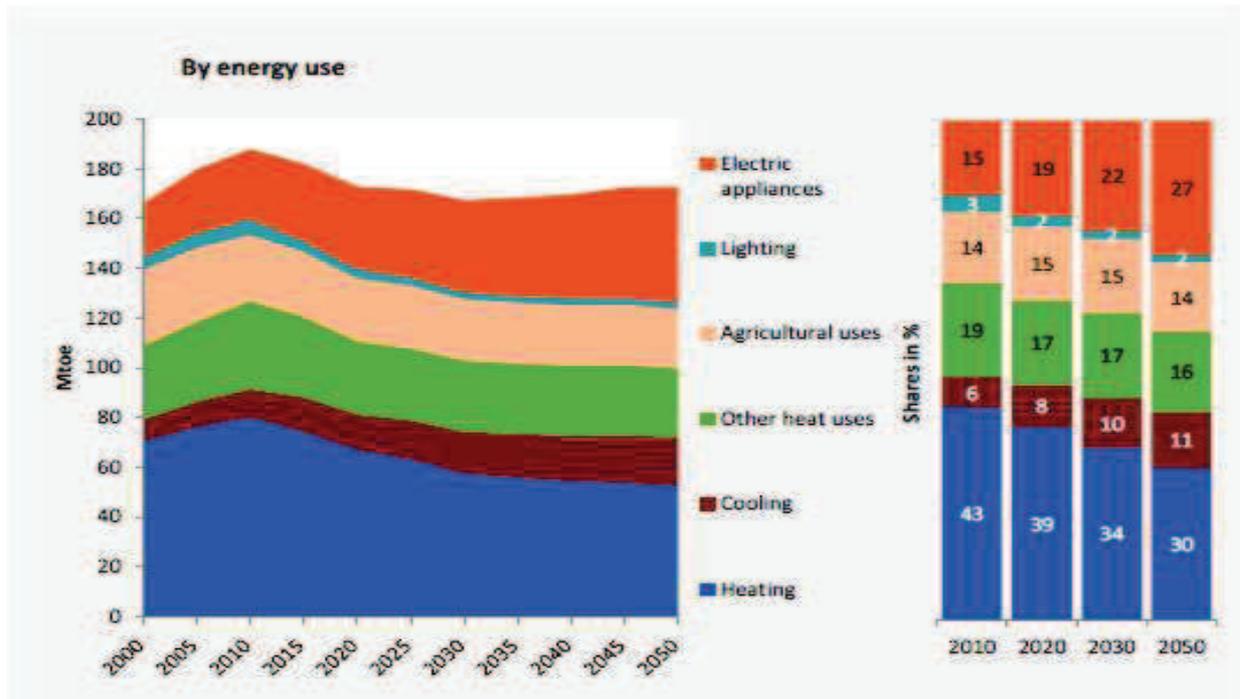


Figure 27 : Consommation d'énergie finale dans le secteur tertiaire –source ; CE, 2014, p38-



Ces résultats prennent en compte la politique européenne en matière de chauffage qui repose sur les directives relatives au développement des énergies renouvelables¹⁵² et à la performance énergétique des bâtiments¹⁵³. Cette dernière insiste en premier lieu sur la rénovation des bâtiments existants car ils représenteront encore 70% du parc bâti en 2050 et, dans une moindre mesure, sur le développement de bâtiments à énergie positive à partir de 2020.

A l'échelle du bâtiment, l'amélioration de la performance énergétique des parcs existants et neufs se traduit notamment par des efforts réalisés sur l'étanchéité à l'air des bâtiments, la maîtrise de la ventilation ou encore les approches bioclimatiques. Une approche plus systémique à l'échelle des quartiers permet d'appréhender l'approvisionnement thermique de manière plus globale avec la mise en place de systèmes théoriquement plus performants, plus respectueux de l'environnement et prenant en compte plus facilement les énergies renouvelables locales.

L'intérêt du réseau de chaleur urbain

Les premiers résultats de l'étude européenne *Heat Roadmap Europe* (HRE) réalisée dans le cadre de l'appel à projets Horizon 2020¹⁵⁴ montrent que malgré une tendance à la baisse des consommations de chaleur, le chauffage et le refroidissement pourraient être des vecteurs de réduction des émissions de GES ainsi qu'un moyen d'améliorer l'efficacité énergétique dans les années à venir. L'étude présente un ensemble de résultats en faveur du développement des réseaux de chaleur urbains et du développement d'une politique thermique à l'échelle européenne [Connolly et al, 2012]. Ils confirment les résultats de l'étude réalisée par l'Association Amorce¹⁵⁵ en 2011 qui se limitait au cas de la France¹⁵⁶ [AMORCE, 2011].

¹⁵² Directive 2009/28/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables

¹⁵³ Directive 2010/31/UE du Parlement Européen et du Conseil du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments (article 2)

¹⁵⁴ Le projet Horizon 2020 est un programme de financement de la recherche et de l'innovation de l'Union Européenne doté de 79 milliards d'euros pour la période 2014-2020 qui se structure autour de trois pôles : l'excellence scientifique, la primauté industrielle et les défis sociétaux.

¹⁵⁵ Créée en 1987, l'association française AMORCE rassemble plus de 842 adhérents institutionnels. C'est le premier réseau de France pour l'information, le partage d'expérience, l'accompagnement des collectivités et des autres acteurs locaux en matière de politique énergétique et climatique ainsi qu'en termes de gestion des déchets.

¹⁵⁶ L'étude réalisée par l'association AMORCE en 2011 interroge la capacité des réseaux de chaleur à être des solutions pertinentes d'un point de vue économique dans le cadre de projets d'aménagement urbains et en particulier s'ils sont couplés avec des bâtiments basse consommation. L'étude rappelle que les paramètres essentiels à prendre en compte pour déterminer cette pertinence sont la densité énergétique, le prix des unités de production, le prix du mètre de réseau ainsi que les pertes énergétiques. Les conclusions sont que les solutions individuelles seront toujours plus coûteuses que des solutions collectives si l'équation est posée en termes de coût global. Le réseau de chaleur est donc intéressant même avec des bâtiments performants. Le propos est toutefois nuancé en soulignant le fait que les décisions d'installer des réseaux de chaleur doivent se faire au cas par cas en surveillant les évolutions techniques et l'augmentation des prix de l'énergie [AMORCE, 2011].

La première phase de l'étude HRE s'intéresse aux réseaux de chaleur urbains en tant que vecteurs de décarbonisation du mix énergétique européen¹⁵⁷. Les résultats valident le fait qu'avec les réseaux de chaleur urbains, le système énergétique européen pourrait réduire sa consommation d'énergie primaire et ses émissions de GES. Les résultats montrent que la part de marché des réseaux de chaleur urbain pour les bâtiments devrait augmenter de 30% en 2030 et de 50% en 2050. A la condition de favoriser le recyclage de chaleur et la substitution des énergies fossiles par des énergies renouvelables les avantages apportés par les réseaux de chaleur pourraient représenter une économie de 14 milliards d'euros par an en 2050 par rapport aux moyens classiques d'approvisionnement en chaleur [Figure 28 : Coût annuel du chauffage dans les bâtiments dans l'Europe des 27 de 2010 à 2050] [Connolly et al, 2012].

Figure 28 : Coûts annuels du chauffage dans les bâtiments dans l'Europe des 27 de 2010 à 2050 –source : Connolly et al, 2012, 2012, p 55-

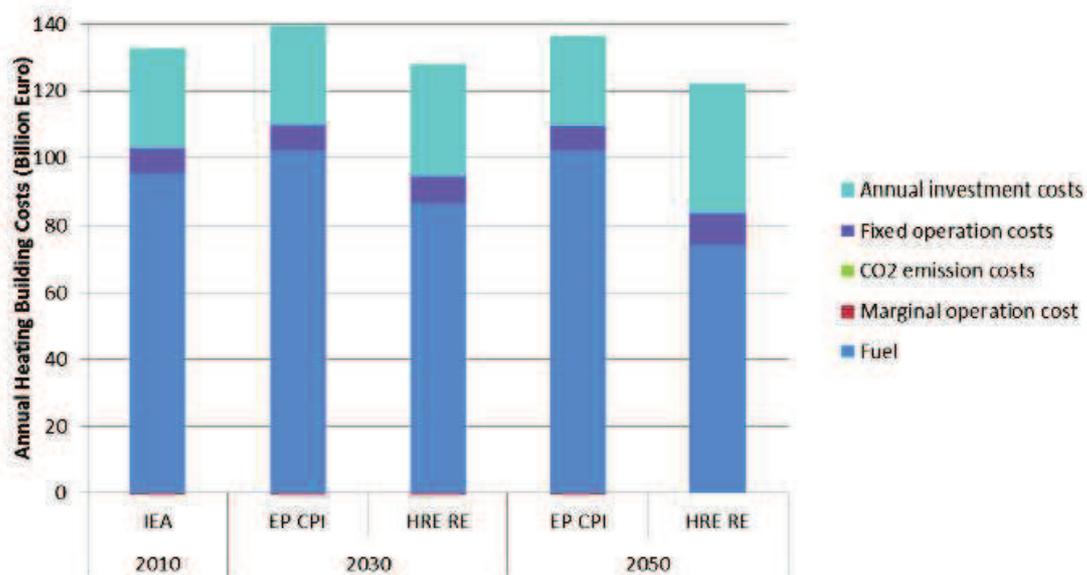


Figure 8: Socio-economic costs for the entire EU27 energy system in 2010, 2030, and 2050 under a business-as-usual scenario and if district heating and CHP were expanded to 30% in 2030 and 50% in 2050, in combination with the expansion of industrial waste heat, waste incineration, geothermal, and solar thermal heat for district heating.

La seconde phase de l'étude compare les coûts du scénario HRE avec ceux du scénario *Energy Efficiency* issu de l'Energy Roadmap 2050 [CE, 2014a]¹⁵⁸ pour un même objectif de réduction des émissions de GES. La comparaison montre qu'une combinaison d'économies sur les usages de chaleur, de développement de chauffage urbain et l'installation de pompes à chaleur individuelles dans les zones

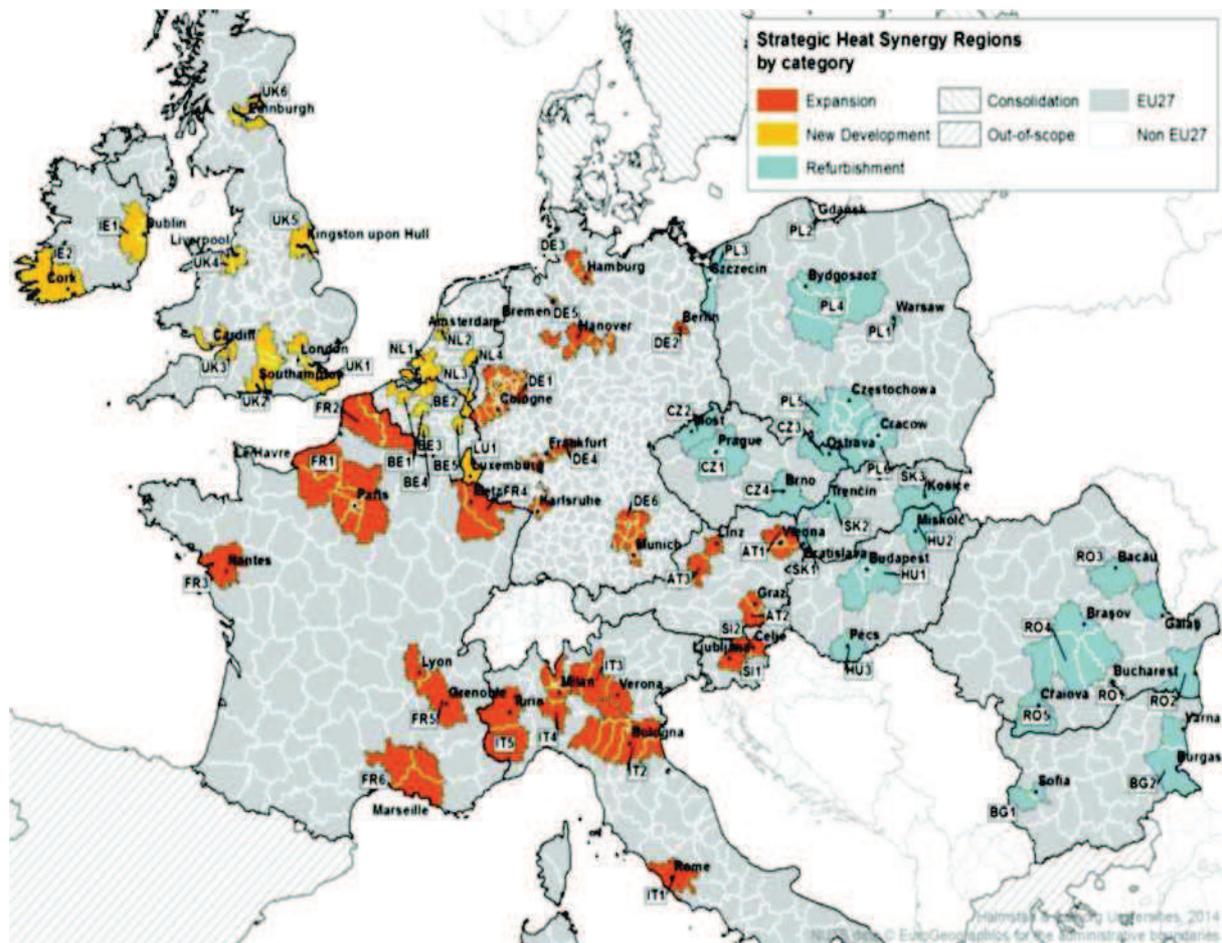
¹⁵⁷ Cette étude basée sur la cartographie locale combinant la demande de chaleur avec la planification de l'énergie au niveau national cherche à estimer la possibilité de créer une stratégie globale de la chaleur pour un Etat Membre.

¹⁵⁸ L'étude de la Commission Européenne intitulé *Energy Roadmap 2050* repose sur six scénarii permettant d'envisager le futur énergétique de l'Europe. Parmi ces six scénarii, le scénario *Energy Efficiency* repose sur une ambition de réaliser un grand nombre d'économie d'énergie. Le scénario prend en compte notamment des exigences minimales en termes de rénovation énergétique (2%/an), des maisons passives à compter de 2020, une obligation des services publics de réaliser des économies d'énergies (1,5%/an), la prise en compte du chauffage urbain comme moyen de recycler la chaleur (liste non exhaustive) [CE, 2014a].

rurales permet à l'UE d'atteindre ses objectifs d'émissions de GES pour 2050. Qui plus est, le développement du chauffage urbain permettrait de réduire les coûts énergétiques globaux de l'Union Européenne de 7 à 8%. De la même façon, une étude réalisée à Aarhus au Danemark montre que dans certains cas le coût global d'installation du chauffage urbain peut être, en zone urbaine, inférieur à celui de pompes à chaleur individuelles [Connolly et al, 2013].

L'étude HRE propose également une représentation cartographique des potentiels de demande et d'offre pour la chaleur et le refroidissement, les réseaux existants et les zones dans lesquelles un déploiement serait envisageable dans des conditions économiques favorables. Ce travail réalisé sur cinq pays (République Tchèque, Croatie, Italie, Roumanie et Royaume-Uni) conforte les résultats de la seconde phase d'étude. Il permet de déterminer les régions les plus appropriées pour mettre en œuvre à grande échelle le chauffage urbain en déterminant les potentiels inexploités de chaleur des Etats Membres au niveau local. Il montre qu'il existe des potentiels importants pour l'extension des réseaux de chaleur existants, en France et en Allemagne, et des possibilités de développement de nouveaux réseaux en Angleterre, aux Pays-Bas ou en Belgique. Pour les pays de l'Est européen, les perspectives sont liées à la rénovation des réseaux existants [Carte 10 : 63 régions stratégiques pour les réseaux de chauffage dans 16 Etats européens] [Persson et al, 2014].

Carte 10 : 63 régions stratégiques pour les réseaux de chauffage dans 16 Etats Européens – in Persson et al, 2014-



La cogénération

Les systèmes de cogénération qui permettent la production simultanée d'énergie thermique et électrique¹⁵⁹ sont considérés comme des systèmes efficaces de production énergétique. Contrairement aux centrales thermiques classiques qui ont un rendement maximum de l'ordre de 36%, les systèmes de cogénération ont un rendement qui peut atteindre 85% pour la production d'électricité et de chaleur. Les réseaux de chaleur européens sont alimentés à 80% par de la chaleur issue de la cogénération ou de récupération de chaleur fatale ou d'énergie renouvelable¹⁶⁰.

La technologie est considérée comme mature mais de nombreux freins empêchent son déploiement dans les systèmes énergétiques, et en particulier dans les systèmes énergétiques européens. Le rapport de l'Agence Internationale de l'Energie intitulé *Linking Heat and Electricity Systems* publié en 2014 montre que les freins au développement de la cogénération et des systèmes de chauffage et de refroidissement urbain sont essentiellement de nature économique et politique [AIE, 2014a].

Les réseaux de chaleur intelligents

Comme indiqué par la Commission Européenne en avril 2016, les réseaux urbains de chaleur répondent aux besoins de chaleur et de froid à l'échelle des villes ou des quartiers. En mutualisant les besoins de chaleur et de froid, ils offrent l'opportunité de valoriser des énergies fatales ou de développer des moyens de production bas carbone comme la cogénération ou des énergies renouvelables. Le développement d'une gestion dynamique de la chaleur comme c'est le cas pour l'électricité apparaît donc comme un enjeu important pour les prochaines années.

Dans cette perspective, les « prosumers » auraient besoin d'outils pour devenir acteurs de leur consommation et de leur production de chaleur [Brand et al, 2014]. Leur développement oblige à repenser la gestion des capacités de production connectées au réseau de chaleur. Une gestion dynamique – en temps réels – est indispensable pour gérer plusieurs sources d'énergie suivant plusieurs paramètres variables dans le temps (ensoleillement, vent, prix de l'énergie,...). Cette mission est encore très peu abordée dans la littérature [Degefa et al, 2014] notamment le développement de méthodes de contrôle dynamique issues des technologies *smart-grids*¹⁶¹.

¹⁵⁹ Directive 2004/8/CE du Parlement Européen et du Conseil du 11 février 2004 concernant la promotion de la cogénération sur la base de la demande de chaleur utile dans le marché intérieur de l'énergie et Directive 2012/27/UE du Parlement Européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique.

¹⁶⁰ ¹⁶⁰ Site de la Commission de Régulation de l'Energie, dossier sur Les réseaux de chaleur et de froid dans la transition énergétique, consulté en décembre 2015, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=reseaux-chaleur-froid-intelligents>

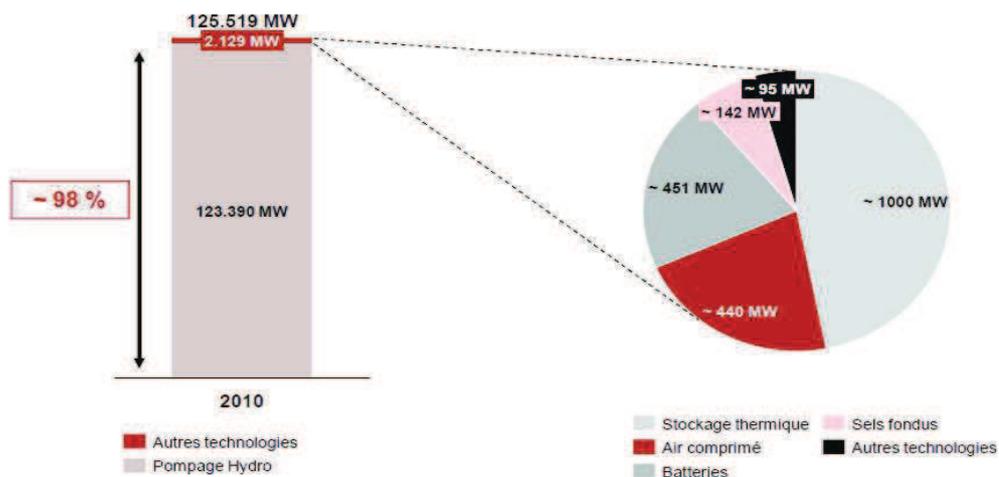
¹⁶¹ Directive 2012/27/UE du Parlement Européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique, modifiant les directives 2009/125/CE et 2010/30/UE et abrogeant les directives 2004/8/CE et 2006/32/CE

2.4. Le stockage décentralisé d'énergie

Dès 2010, la Commission Européenne s'est intéressée aux capacités de stockage d'énergie pour favoriser les mix bas carbone [CE, 2010a]. Une étude sur l'évolution des infrastructures à l'horizon 2020-2030 indique que le stockage électrique de grande et de petite capacité est un vecteur de la transition énergétique [CE, 2010a]. L'intérêt porté par l'Union Européenne sur le stockage thermique dans la transition énergétique, est plus récent mais tout aussi important [CE, 2016a&b]. Le stockage d'énergie est donc aujourd'hui jugé comme un moyen de participer au processus de décarbonation des mix énergétiques.

Il existe de nombreuses technologies permettant le stockage d'électricité dont la principale, est le stockage dans les barrages hydrauliques avec réservoir. Toutefois, si on ne s'intéresse qu'aux stockages réversibles, la technologie la plus largement répandue à travers le monde est constituée des stations de transfert par pompage (STEP) qui représentaient en 2010, 98% des capacités de stockage réversibles installées dans le monde. Elles représentaient 123 390 MW sur les 125 519 MW de capacités installées. Les 2% restant se répartissaient entre 1000 MW de stockage thermique, 440 MW de stockage à air comprimé, 451 MW de batteries, 142 MW de sels fondus et 95 MW de capacités qui recouvraient un ensemble de technologies disparates [E-Cube, 2012] [Figure 29 : Estimation des capacités de stockage d'énergie installées dans le monde]. Les capacités de stockage électrique réversibles devraient fortement augmenter dans les prochaines années [AIE, 2010].

Figure 29 : Estimation des capacités de stockage d'énergie installées dans le monde (avril 2010) –source : DOE & Electricity Advisory Committee : « Energy Storage Activities in the US Electricity Grid » May 2011- E-Cube, 2012



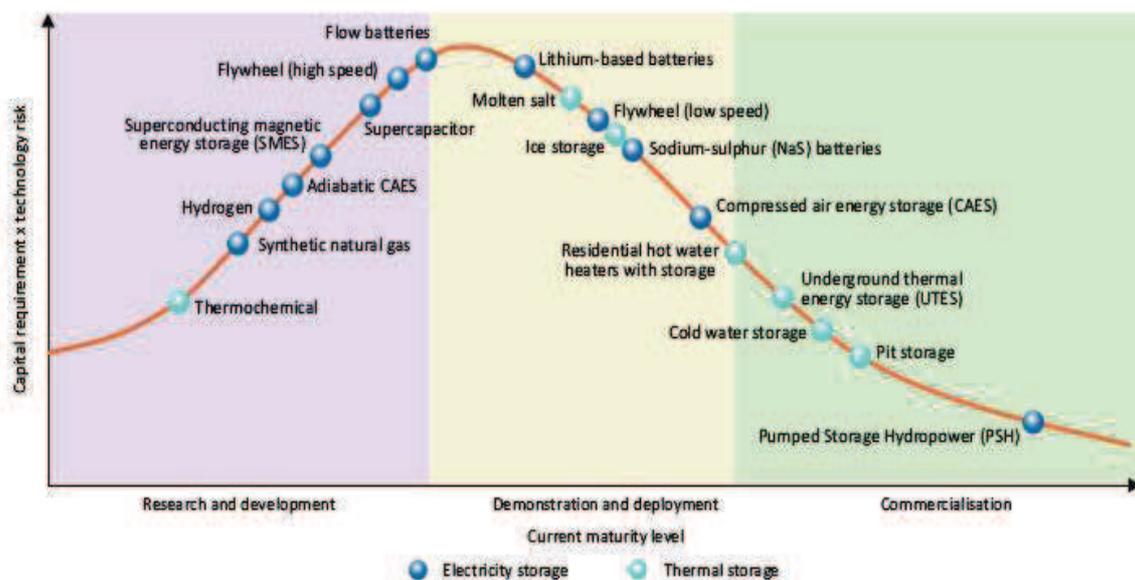
Source: DOE & Electricity Advisory Committee – « Energy Storage Activities in the US Electricity Grid » May 2011

| 10

Malgré la suprématie du stockage mécanique hydraulique, de nombreuses technologies sont en cours de développement pour stocker l'énergie thermique et électrique¹⁶². Cependant, la maturité nécessaire à la mise sur le marché de nombre de ces technologies est encore à démontrer. La maturité dont il est question ici intègre à la fois les performances techniques des technologies mais également les débouchés possibles sur le marché [ENEA Consulting, 2012 ; AIE, 2014b] [Figure 30 : Maturité des technologies de stockage énergétique]. L'amélioration technique passe par un investissement important en recherche-développement pour améliorer entre autre les procédés de fabrication et de fonctionnement. La valorisation économique des capacités de stockage dépend quant à elle des usages faits de chaque technologie. Ces usages associés à un ensemble de critères dont la capacité énergétique, la puissance maximale, le rendement, le nombre de cycle maximal, les coûts et la densité énergétique vont déterminer le modèle économique adéquat pour la mise sur le marché de chaque technologie [ENEA Consulting, 2012, ADEME, 2013b, AIE, 2014b].

Les besoins de stockage associés à la décentralisation des systèmes de production et au développement de la production diffuse et intermittente correspondent pour l'électricité à des petites capacités sur des cycles horaire ou journalier et importante pour le cycle saisonnier. La présentation qui suit analyse les enjeux technico-économiques du stockage décentralisé en distinguant le stockage électrique – réversible - et le stockage thermique.

Figure 30 : Maturité des technologies de stockage énergétique –source : AIE, 2014, p16-



Source: Decourt, B. and R. Debarre (2013), "Electricity storage", *Factbook*, Schlumberger Business Consulting Energy Institute, Paris, France and Paksoy, H. (2013), "Thermal Energy Storage Today" presented at the IEA Energy Storage Technology Roadmap Stakeholder Engagement Workshop, Paris, France, 14 February.

¹⁶² Il peut d'ailleurs être distingué cinq grandes filières : mécanique, électrochimique, chimique, électrostatique et électromagnétique et thermique. Chacune de ces filières a des caractéristiques propres permettant de répondre à des besoins spécifiques.

Le développement prévu des offres de stockage en termes de capacité mais également en termes d'usages permet de définir un ensemble de bénéfices que les réseaux et les acteurs économiques peuvent retirer [Tableau 14 : Liste des avantages technologiques et économiques de l'utilisation des systèmes de stockage].

Tableau 14 : Liste des avantages technologiques et économiques de l'utilisation des systèmes de stockage [Construction de l'auteur]

Avantage techniques	Avantages économiques
Services systèmes (régulation de tension, fréquence)	Augmentation de la valeur des énergies renouvelables (optimisation technico-économique + coût d'intégration)
Réserve tertiaire	Arbitrage temporel (marché spot, day-ahead)
Gestion des congestions	Ecrêtage
Optimisation des flux	Favorise l'autoconsommation
Amélioration de la qualité de l'énergie	
Alimentation sans interruption	
Ilotage	
Fourniture énergétique	

2.4.1. Le stockage électrique¹⁶³

Nous entendons par stockage électrique, des formes de stockage depuis et vers l'électricité dont les rendements de conversion sont élevés à très élevés quel que soit le sens. Le stockage thermique n'entre pas dans cette catégorie puisque le rendement de conversion chaleur-électricité plafonne à 40%.

Généralités

En 2009, l'Agence Internationale de l'Energie a estimé que les besoins en stockage électrique pour l'Europe pourraient se situer entre 0 et 90 GW à l'horizon 2050¹⁶⁴, selon l'ampleur du développement des réseaux intelligents et dans une moindre mesure des techniques de prévisions météorologiques [AIE, 2009].

¹⁶³ L'électricité est une énergie secondaire et un vecteur d'énergie puisqu'elle résulte d'une transformation d'énergie primaire. Une fois produite, l'électricité doit être immédiatement consommée sous peine d'être perdue car elle n'est pas directement stockable. Pour être stockée, elle doit être convertie en une autre forme d'énergie. Cette conversion va avoir un niveau d'efficacité différent selon les technologies employées et le temps de stockage désiré. Lorsque le besoin de libérer les capacités de stockage arrive, l'énergie stockée est reconverte en électricité dans un processus de conversion qui occasionne des pertes.

¹⁶⁴ Ces estimations sont fondées sur l'hypothèse d'une production électrique composée de 30% d'énergies renouvelables en Europe. Elles ont été réalisées dans le cadre du Blue Map Scenario 2050 de l'IEA [AIE, 2009].

La particularité de l'énergie électrique est de nécessiter un équilibrage de l'offre et de la demande en temps réel sur le réseau car c'est une forme d'énergie difficilement stockable. Auparavant, les besoins de stockage sur les réseaux électriques étaient limités car les déséquilibres entre la consommation et la production étaient gérables ; mais les réseaux électriques doivent aujourd'hui intégrer un nouveau type d'aléa lié à l'intermittence de la production des énergies renouvelables. La variabilité de la production entraîne au niveau technique l'accroissement des situations de saturation du réseau ou de coupure de courant. Au niveau des marchés énergétiques, elle provoque l'apparition de prix négatifs comme en Allemagne en 2009 où le pays a connu un épisode où les prix ont atteint - 500€ par mégawattheure en raison de surplus de production éolienne en 2010¹⁶⁵.

Le développement du stockage électrique permet d'améliorer l'efficacité des systèmes énergétiques en captant les productions intermittentes non consommées et en relâchant l'énergie lorsqu'il y a une forte demande. Surtout, il peut devenir un outil de flexibilité économique.

Investir dans les capacités de stockage électrique

Les investissements dans les capacités de stockage électrique se sont fortement accrus ces dernières années. En 2015, l'investissement mondial dans ce secteur s'élevait à un total de 10 milliards de dollars américains, en augmentation par rapport à la moyenne de 8,5 milliards de dollars par an sur la période de 2010 à 2014. En 2015, près de 4 GW de capacité de stockage supplémentaire ont été installées à l'échelle mondiale permettant d'atteindre 150 GW. Ces chiffres tiennent uniquement compte du stockage couplé aux réseaux électriques et n'intègrent pas les capacités de stockage diffuses installées sur le réseau de distribution et/ou en aval des compteurs en raison d'un manque de données sur ce plan [AIE, 2016b].

Plusieurs types de technologies de stockage diffuses peuvent être installées à sur les réseaux de distribution électrique, parmi lesquelles, les batteries au plomb (*lead acid batteries*), les équipements industriels (*stand-by advanced industrial batteries*), les volants d'inerties, les supercondensateurs ou le « *vehicule to grid* ». Ces technologies font l'objet de nombreuses études pour définir l'optimisation économique leur permettant d'accéder au marché. Dans ce cadre, les recherches sur les batteries de faibles capacités sont un champ de recherche extrêmement dynamique [Moussavi et al, 2014]. Toutefois,

¹⁶⁵ Les prix négatifs sont un signal de prix sur le marché de gros de l'électricité qui apparaît quand la production non-flexible, issue notamment des énergies renouvelables, est importante et la demande faible. Ils apparaissent en particulier sur les marchés *Day-ahead* et infra-journalier. Sur les marchés de gros, les prix de l'électricité sont conduits par l'offre et la demande qui à leur tour sont déterminés par plusieurs facteurs comme les conditions climatiques, les facteurs saisonniers, les comportements des consommateurs. Dans certaines conditions, la surproduction soudaine de la production entraîne l'apparition d'un signal prix négatif afin de réduire la production. Les producteurs doivent alors comparer les coûts engendrés par l'arrêt et le redémarrage de leur centrale avec le coût de revente de l'énergie produite. Si la centrale de production est suffisamment flexible, ils arrêteront de produire pendant cette période, ce qui empêchera ou limitera l'apparition de prix négatif sur le marché de gros et réduira la tension du réseau [Epexspot : consulté le 2 septembre 2016].

de nombreuses études démontrent qu'à l'heure actuelle le montant des investissements initiaux à réaliser dans ces technologies ne permet pas d'obtenir un modèle d'affaire viable [Zhuk et al, 2015 ; WEC, 2016 ; ADEME 2013].

Pistes pour l'essor du stockage électrique

Le stockage électrique permettrait de réaliser des gains au niveau environnemental en permettant le déploiement des énergies renouvelables intermittentes, en favorisant le remplacement de centrales thermiques et des énergies fossiles, en aidant les opérateurs de réseaux à être plus flexibles s'il est couplé avec des technologies *smart grids* dans le cadre de la transition énergétique. Néanmoins, plusieurs freins au développement du stockage électrique décentralisé existent actuellement. Le manque de maturité technique des technologies alternatives aux STEPs, la difficulté de trouver des modèles d'affaires viables leur permettant d'être diffusées sur le marché ainsi que des cadres réglementaires trop restrictifs freinent considérablement l'essor du stockage électrique décentralisé [ADEME, 2013b ; AIE, 2014a&b].

Pour développer le stockage électrique, plusieurs recommandations ont été faites et notamment la possibilité d'identifier des mécanismes de valorisation des capacités sur le marché. Il faut pour cela travailler avec les opérateurs de réseaux afin de quantifier et de réaliser les véritables enjeux d'une augmentation des systèmes de flexibilité en considérant le stockage électrique comme une composante dans l'extension ou la modernisation des réseaux. Enfin, il faut encourager les incitations au stockage en établissant notamment des cadres de régulation favorable à leur usage permettant ainsi de développer leur commercialisation¹⁶⁶ [WEC, 2016 ; AIE, 2014a&b].

2.4.2. Le stockage thermique

A l'heure actuelle, la technologie la plus diffusée en matière de capacité de stockage thermique est le ballon d'eau chaude domestique car cette technologie est peu chère et peut stocker de l'énergie sur plusieurs jours à un coût raisonnable [AIE, 2011]. Il est toutefois prévu que le stockage thermique se

¹⁶⁶ En 2013, la Californie annonce sa volonté d'implémenter du stockage électrique dans l'état en se fixant un objectif de 1 325 MW de capacité installée pour 2024 (Loi AB 1524). Cet objectif doit être rempli par les trois distributeurs présents sur le territoire (Pacific Gas & Electric, Southern California Edison et San Diego Gas & Electric) qui devront pouvoir stocker 5% de l'électricité qu'ils produiront. La commission de régulation (FERC) va faire évoluer le marché électrique afin de réduire les barrières à l'entrée et de valoriser économiquement les capacités. La FERC va notamment éliminer les obstacles qui empêchaient les tiers de vendre des services auxiliaires aux distributeurs, exiger que les services publics prennent en considération les enjeux de fréquence et de régulation technique des réserves, revoir sa comptabilité des installations électriques ainsi que les coûts de fonctionnement des dispositifs de stockage pour rendre compte de l'utilisation du stockage électrique [FERC Order 755 -2011- et FERC Order 784 -2013-]. La commission de régulation va également encourager l'interconnexion des moyennes et petites capacités de stockage (inférieur à 20 et 2 MW) [FERC Order 792 -2013]. Les systèmes de tarifications doivent également être revus afin de soutenir la valorisation du flux de stockage ainsi que l'investissement dans les capacités et d'anticiper leur remplacement et limiter les risques dans son investissement [Hinds et al, 2014].

développe encore en raison de nouvelles propositions technologiques prévues pour les années à venir. L'intégration de *smart meters* dans les réseaux thermiques permettrait ainsi de faciliter l'intégration des sources de chaleur diffuses et de renforcer la synergie entre les systèmes électriques et thermiques [AIE, 2010 ; AIE, 2011 ; CE, 2016a&b].

Outre son très faible coût comparativement au stockage électrique, l'intérêt du stockage thermique au niveau technique est d'augmenter l'efficacité des systèmes dans lesquels il est installé comme les bâtiments ou les réseaux de chaleur. Il permet de réduire les appels de charge sur le réseau de chaleur comme sur les réseaux de gaz et d'électricité, d'optimiser le fonctionnement des systèmes, d'encourager le recyclage d'énergie, de réduire les charges de pointe en aidant à améliorer l'efficacité globale du système énergétique. Le stockage thermique peut également permettre de mieux intégrer les énergies renouvelables intermittentes en stockant la production quand cette dernière ne coïncide pas avec la demande. Ainsi, des arbitrages peuvent être réalisés avec l'énergie électrique afin de stocker l'énergie et la délivrer par la suite selon les besoins thermiques voire électriques [AIE, 2011].

Il existe trois principaux types de stockage d'énergie thermique qui présentent des maturités technologiques différentes. Le premier est le stockage de chaleur sensible par augmentation de la température du matériau, qui présente une faible densité et est souvent utilisé sous forme de grandes capacités (stockage souterrain ou stockage d'eau chaude). Il existe également le stockage de chaleur latente qui utilise le changement de phase d'une substance pour stocker et libérer de l'énergie sans changement de température. Ce type de stockage offre des densités de 5 à 15 fois plus grandes que le stockage de chaleur sensible. Enfin, le stockage thermochimique utilise des réactions chimiques réversibles pour stocker la chaleur. Ces technologies peuvent atteindre des densités de 5 à 12 fois plus élevées que les autres techniques tout en permettant de délivrer une énergie thermique à des températures de décharges différentes. Les technologies de stockage de chaleur sensible et une partie des technologies de stockage de chaleur latente sont des technologies matures. Les autres technologies telles que celles employant des matériaux à changement de phase doivent encore faire l'objet de recherche-développement malgré l'identification d'un fort potentiel [AIE, 2011 ; EASE/EERA, 2013].

Valorisation des technologies de stockage thermique

Selon les scénarios de l'AIE, les capacités de stockage thermique devraient voir leur coût diminuer de 50 à 75% à l'horizon 2030 et de 65 à 85% à l'horizon 2050. La variation dépendra du type de technologie installée et de son usage [AIE, 2011]. Contrairement aux technologies de stockage électrique, les technologies de stockage thermique sont relativement matures et disposent de modèles d'affaire viables [AIE, 2011 ; EASE/EERA, 2013 ; AIE, 2014b] [Tableau 15 : Energy capacities, power efficiency and storage time of thermal energy storage technologies]. Le stockage thermique peut également être un outil pour réduire les investissements dans les infrastructures énergétiques et ainsi réduire les coûts pour l'utilisateur [EASE/EERA, 2013].

Tableau 15 : Energy capacities, power efficiency and storage time of thermal energy storage technologies – source : IEA, 2011, p 20-

TES technology	Capacity kWh/t	Power kW	Efficiency (%)	Storage time	Cost (USD/kWh)
Hot water tank	20-80	1-10 000	50-90	day-year	0.1-0.13
Chilled water tank	10-20	1-2 000	70-90	hour-week	0.1-0.13
ATES low temp.	5-10	500-10 000	50-90	day-year	Varies
BTES low temp.	5-30	100-5 000	50-90	day-year	Varies
PCM-general	50-150	1-1 000	75-90	hour-week	13-65
Ice storage tank	100	100-1 000	80-90	hour-week	6-20
Thermal-chemical	120-150	10-1 000	75-100	hour-day	10-52

Source: ECES and Roth, K. Zogg, R. and Brodrick, J. (2006).

Note: ATES stands for aquifer thermal energy storage and BTES stands for borehole thermal energy storage.

2.4.3. Le couplage stockage thermique et réseau électrique

Un grand potentiel de développement du stockage thermique est attendu avec l'utilisation des pompes à chaleur et de la cogénération. Les pompes à chaleur permettent de réduire la charge électrique lors d'opération de chauffage ou de refroidissement en utilisant de l'énergie thermique stockée dans l'air ou dans le sol. Le pilotage intelligent des capacités thermiques joue alors un rôle déterminant dans la gestion des demandes de pointe. De même, la cogénération peut répondre aux besoins de pointe du système électrique, la production de chaleur en excès étant stockée pour être valorisée ultérieurement lors d'un pic de demande [AIE, 2010].

Pistes pour l'essor du stockage thermique

Malgré une reconnaissance certaine de son utilité, l'essor du stockage thermique est encore fortement limité par un ensemble de barrières technico-économiques et institutionnelles. L'intégration de capacité de stockage thermique et son optimisation doivent encore être améliorées. L'optimisation passera à la fois par le fonctionnement technique mais également par la facilitation des opérations de valorisation et de contrôle sur l'ensemble du système que ce soit à l'échelle d'un bâtiment ou d'un quartier. Il faudra également faire évoluer les mécanismes de marché et de soutien à l'électricité issus des énergies renouvelables afin d'assurer le développement des filières électriques renouvelables [AIE, 2011 ; EASE/EEA, 2013].

Les technologies de stockage sont nombreuses que ce soit pour le stockage électrique ou le stockage thermique. Leurs maturités varient de la phase de recherche et développement à la phase de commercialisation. Toutefois, une recherche au niveau technique est encore nécessaire dans ce secteur en particulier pour les capacités de stockage décentralisées qui ne sont pas encore matures. L'innovation dans les différentes technologies est donc essentiellement incrémentale. Un second enjeu se porte sur la valorisation des capacités décentralisées sur les marchés énergétiques. Le marché du stockage doit lever un certain nombre de barrières réglementaires et institutionnelles afin qu'une valorisation soit possible.

L'étude de chacun des secteurs (énergies renouvelables, stockage, réseaux de distribution...) a montré qu'il existe une multitude de technologies permettant de produire et de distribuer l'énergie dans un écoquartier. Néanmoins, toutes les technologies n'ont pas la même maturité technique et leur compétitivité dépend fortement des pays et conditions dans lesquelles elles sont installées. Prises séparément aucune des technologies présentées ne peut être considérée comme une innovation disruptive permettant de réaliser la décentralisation des systèmes énergétiques. Ce n'est donc pas la technologie en elle-même qui est l'innovation de rupture mais leur articulation à l'échelle du quartier qui caractérise la transition sociotechnique.

3. L'éco-quartier comme système énergétique: réflexion autour d'un modèle technico-économique

Nous avons souligné dans la section 1.2 du présent chapitre que l'autonomie pouvait être entendue comme la capacité d'un territoire à disposer de ses propres moyens de production afin de réduire le recours à des approvisionnements exogènes.

Contrairement à la section précédente où nous nous sommes intéressés aux technologies qui peuvent potentiellement être installées dans le quartier par une approche en filière, nous allons nous concentrer sur une approche plus systémique où le quartier est envisagé comme un ensemble mêlant les capacités de production et les réseaux de distribution que ce soit pour la chaleur ou l'électricité. Cette approche est originale car cette échelle était jusqu'à récemment peu prise en compte techniquement et économiquement par les acteurs de l'énergie qui lui préfèrent des échelles plus larges comme la ville ou la région¹⁶⁷ [Souami, 2009b ; Coutard et al, 2013].

¹⁶⁷ « Le quartier n'est pas le périmètre pris en compte par les grands opérateurs énergétiques pour appréhender le territoire. Les logiques techniques, les cadres juridiques, les modèles économiques et plus simplement les rentabilités de ces opérateurs se construisent à un autre niveau de l'échelle. Pour les collectivités, également, si le quartier peut être une échelle pertinente pour les actions d'aménagement urbain, il ne l'est pas pour concevoir une économie locale de la gestion de l'énergie. Celle-ci se conçoit techniquement à l'échelle de la ville, et se traite financièrement, juridiquement et contractuellement à l'échelle des cadans urbains entiers ». [Souami, 2009b].

3.1. Les enjeux de la reterritorialisation de l'offre au niveau du quartier : réflexion systémique

La reterritorialisation de l'approvisionnement énergétique conduit à développer des moyens de production à l'échelle du quartier, et donc à accroître son degré d'autonomie par rapport aux systèmes techniques existants. Ce mouvement de décentralisation se heurte toutefois à deux contraintes fortes, celle des ressources (nécessairement renouvelables) disponibles pour répondre aux besoins des usagers du territoire et celle du modèle économique, notamment en termes de fiabilité et de compétitivité.

La recherche de l'autonomie qui peut aller jusqu'au « *rêve d'une déconnexion* »¹⁶⁸ est une idée récurrente dans l'histoire des réseaux¹⁶⁹ [Lopez, 2014]. Toutefois, cet idéal a été supplanté par la réalité des grands réseaux techniques qui se sont progressivement imposés dans les économies occidentales durant le XIX^{ème} et le XX^{ème} siècle. Ces systèmes complexes d'infrastructures ont d'ailleurs été perçus comme un symbole de modernité en permettant l'accès du plus grand nombre aux facilités essentielles (information, alimentation, transport, énergie). Cet accès a été rendu possible grâce à un élargissement du réseau qui est passé de la maille locale à des échelles urbaines, régionales, nationales voire internationales selon les flux transportés¹⁷⁰ [Hughes, 1983, 1987 ; Curien, 2005].

La décentralisation des systèmes de production et de distribution de l'énergie à l'échelle du quartier interroge le paradigme classique des infrastructures d'approvisionnement associé aux grands réseaux techniques. La circulation bidirectionnelle des flux énergétiques à un niveau local s'établit comme une nouvelle norme en comparaison à la circulation linéaire offerte par les grands réseaux techniques [Lebris et al, 2008]. Cette nouvelle approche remet en cause l'idéal d'universalité porté par les grands réseaux techniques, soutenu par un modèle économique éprouvé, et laisse la place à un nouvel idéal. Le but serait de préserver l'environnement en favorisant le développement des ressources renouvelables locales

¹⁶⁸ L'expression utilisée ici fait référence à l'ouvrage de Fanny Lopez sur le bâtiment autonome intitulé « le rêve d'une déconnexion ».

¹⁶⁹ Que ce soit au niveau du bâtiment, de l'îlot, du quartier voire au niveau de la commune, l'autonomie énergétique apparaît actuellement comme un idéal. Souvent présentée comme une innovation empreinte de modernisme, cette tendance reflète en réalité une ambition ancienne remontant à la fin du XIX^{ème} siècle. Fanny Lopez énonce dans son analyse sur les systèmes autonomes qu' « *Au moment même où le rêve de la connexion se profile, transformant en un laps de temps très court chaque citoyen en abonné de la modernité, se profile une nouvelle utopie technicienne ; la déconnexion.* » [Lopez, 2014]. Cette tentative d'émancipation imposera à ces prédicateurs de trouver les ressources nécessaires à la survie des systèmes et le moyen de les exploiter sans aide extérieur. De nombreux projets tenteront de relever ce défi, comme par exemple la maison autonome d'Alexander Pike ou la Cité énergétique de Georges Alexandroff, sans réussir à dépasser le stade démonstrateur. L'échec de ce rêve prouvé par l'absence de diffusion à grande échelle de ces inventions est dû aux barrières techniques mais également à la difficulté de trouver un modèle économique viable [Lopez, 2014].

¹⁷⁰ En ce qui concerne les réseaux énergétiques, il peut être constaté que les réseaux de chaleur et les réseaux électriques ne se sont pas développés de la même manière. Les réseaux électriques ont ainsi émergé à un niveau local avant de passer une maille régionale puis nationale. Les réseaux de chaleur sont quant à eux toujours restés locaux même les plus grands d'entre eux en raison de spécificités techniques. Ils n'ont donc pas dépassé l'échelle urbaine.

mais le modèle économique pouvant soutenir cette ambition est mis à l'épreuve de la réalité [Tableau 16 : Réseau et développement urbain durable : deux paradigmes antagoniques] [Coutard, 2009].

Tableau 16 : Réseau et développement urbain durable : deux paradigmes antagoniques –source : Coutard, 2009-

Réseau	Ecosystème urbain (durable)
Solidarité, solidarisation	Autonomie, autonomisation
Ingénierie, mécanique, systèmes techniques, cybernétique	Ecologie, systèmes organiques, écosystèmes
Étanchéité, écoulement, flux, cinétique : modèle de flux (hydraulique)	Porosité, stase, stocks, lenteur : modèle de stocks (ressources non renouvelables)
Métabolisme linéaire : prélèvement>approvisionnement>évacuation	Métabolisme circulaire : recyclage, rejets minima
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 la construction/satisfaction de la demande	Logique de maîtrise de la demande
Gestion structurelle et séquentielle	Gestion intersectorielle et intégrée
Modèle technico-économique d'expansion de grands systèmes : économie d'échelle, d'envergure, de variété ; effet de club, moindres coûts de transaction	Modèle écologique de conservation ou de préservation des ressources et des milieux
Equipements de grandes tailles 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

L'essor des territoires urbains développant des projets d'infrastructures de production et de distribution d'énergie suffisants pour répondre à leurs besoins énergétique accompagne le développement des projets d'écoquartiers. Ces nouveaux systèmes énergétiques peuvent être envisagés comme des Micro-Systèmes Techniques¹⁷¹ [Lopez et al ; 2015] qui fonctionnent de manière autonome ou bien comme des

¹⁷¹ Théorisés par B. Joerges et I. Braun en utilisant le don d'organe comme illustration, les MST de second rang font référence au processus de mise en réseau des domaines spécifiques à un niveau macrosocial [Joerges et al, 1994]. Ces systèmes peuvent être caractérisés par trois éléments. Premièrement, lorsque des distances sont très longues pour fournir un usager, ils utilisent les réseaux déjà existants. Deuxièmement, leur mise en service opérationnelle est un prérequis pour l'activation d'un grand nombre de petits systèmes. Enfin, les MST de second ordre mettent en relation des organisations et des acteurs qui seraient sinon déconnectés.

assemblages intermédiaires entre bâtiments et grands réseaux [Tabourdeau et al ; 2017]. Avant d'explorer la problématique du modèle économique, il est nécessaire de revenir sur les spécificités économiques des industries de réseaux.

3.2. Les spécificités des infrastructures de réseau

Les investissements de construction des infrastructures de réseau sont généralement considérés comme des coûts irrécupérables (*sunk cost*) : ils constituent la part fixe des coûts d'accès à l'infrastructure, ces derniers comprennent en outre les coûts variables qui correspondent aux charges d'exploitation et aux pertes. L'importance relative des coûts fixes et des coûts variables est déterminante dans l'élaboration de la facturation aux usagers de l'infrastructure [Curien, 2005].

En raison des particularités dans la structuration des coûts, le développement des réseaux techniques est conditionné par l'atteinte d'une masse critique d'usagers afin de rentabiliser les investissements réalisés dans les infrastructures. L'atteinte de cette dernière est la condition sine qua none pour que le réseau technique puisse survivre voire croître. Sans celle-ci, le réseau ne peut être rentable et ne peut donc pas se développer. Les acteurs de réseaux doivent viser ce seuil critique sachant que plus la base installée du réseau est large, plus la satisfaction est élevée chez les usagers et plus la survie du réseau est assurée [Katz et Shapiro, 1985].

La structuration particulière des coûts de production et l'obligation d'atteindre une masse critique pour assurer la rentabilité des infrastructures de réseaux sont des éléments essentiels à prendre en compte lorsqu'il s'agit d'envisager la création de systèmes d'approvisionnement énergétique bas carbone à l'échelle d'un quartier.

3.3. Modèle technico-économique d'un système énergétique à l'échelle de l'écoquartier

Les écoquartiers peuvent être considérés comme des espaces de déploiement de systèmes à cet échelle assemblant reliant des grands réseaux à des ressources renouvelables in situ [Debizet ; 2016] visant ou pas l'autonomie énergétique du territoire [Lopez et al; 2015]. Réciproquement, la visée de l'autonomie énergétique d'un territoire conduit à la réalisation de systèmes d'approvisionnement énergétique des capacités de production présentes sur le territoire.

Les études technico-économiques permettant de définir le périmètre optimal d'une technologie dans un système décentralisé donné n'apportent qu'un éclairage partiel car elles ne prennent pas en compte l'impact des ressources exogènes qui contribuent à l'approvisionnement énergétique du territoire. Il s'agit ici de déterminer les variables technico-économique qui influent sur le dimensionnement des

systèmes d'infrastructure des écoquartiers en ne se limitant pas à une analyse économique normée d'une technologie isolée mais en proposant une vision intégrant l'ensemble du système technique à l'échelle du territoire.

L'élaboration de modèles multi-énergies pour analyser les variables clés à prendre en compte dans un système décentralisé tend à se développer depuis quelques années. Ces modèles mathématiques sont essentiellement déterministes malgré que les systèmes multi fluides bas carbone installés au niveau d'un bâtiment [Akbari et al, 2014] ou à un échelon plus important [Good et al, 2016 ; Yang et al, 2015] soient affectés par l'incertitude. Les analyses technico-économiques classiques sont particulièrement complexes en raison des multiples variables à prendre en compte. Nous présentons ci-après les principaux paramètres qui influent sur la viabilité des modèles d'affaires proposés pour les systèmes d'approvisionnement énergétique à l'échelle des écoquartiers [Figure 31 : Critères pour un modèle technico-économique des systèmes énergétiques installés dans un écoquartier].

Les paramètres urbains clés

Les constats effectués à partir de la base d'information et des études de cas montrent que chaque écoquartier est unique dans sa réalisation [Cf. Partie 1]. Toutefois, bien que chaque écoquartier ait ses caractéristiques propres, il existe certaines variables communes à tous les projets urbains.

La performance énergétique des bâtiments¹⁷² induit la consommation attendue des bâtiments. Des variables constructives comme l'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment, l'isolation thermique ou l'éclairage naturel sont prises en compte pour définir les besoins en énergie des cinq usages les plus dépendants de la qualité du bâtiment que sont le chauffage, le refroidissement, l'eau chaude sanitaire, les auxiliaires et l'éclairage. Définie par la réglementation thermique nationale, la méthode de calcul donne un résultat en énergie primaire (kwh/m²).

La finalité des bâtiments est une variable déterminante dans l'optimisation technico-économique. En effet, les quartiers sont rarement alloués au seul usage résidentiel ou au seul usage tertiaire [Partie 1]. Or, les profils de consommation diffèrent selon la finalité d'un bâtiment. La répartition des surfaces de plancher entre résidentiel et tertiaire influe sur les volumes et les temporalités des consommations électriques et thermiques. Ainsi les besoins en énergie d'un quartier dépendent de la nature des bâtiments auxquels il convient d'ajouter d'autres équipements fortement consommateurs d'énergie.

La densité est aussi une variable importante à prendre en compte. Elle est ici entendue comme la mesure du nombre d'occupants (habitants, travailleurs...) sur l'aire de l'écoquartier. Compte tenu du fait que les infrastructures de distribution d'énergie requièrent de très lourds investissements¹⁷³, leur seuil de rentabilité correspond à une densité critique pour un périmètre donné. L'importance de la densité a

¹⁷² Directive 2012/27/UE du Parlement et du Conseil relative à l'efficacité énergétique

¹⁷³ Cf. Chapitre 2-Partie 3.1

notamment été soulignée dans les études sur la viabilité du développement des réseaux de chaleur avec des bâtiments basse consommation au niveau local [AMORCE, 2011 ; CEDIS, 2012 ; Dind et al, 2007].

Les paramètres clés de l'optimisation technico-économique

La définition de l'environnement dans lequel se trouve le quartier est primordial pour choisir le type de technologie qui sera la plus appropriée. Ce terme regroupe les variables liées au climat et celles liées aux ressources naturelles disponibles dans l'aire du projet urbain. Elles prennent en compte l'ensoleillement, la pluviométrie, la température, le vent ou encore l'état des nappes phréatiques. La disponibilité de ces ressources va orienter le choix dans les technologies pouvant être installées sur le territoire. Par exemple, la présence d'un cours d'eau oriente ou d'une nappe phréatique dynamique oriente vers l'installation d'une centrale hydroélectrique, respectivement la géothermie [Chapitre 2].

Le second élément à prendre en compte est le dimensionnement des capacités de production et des réseaux de distribution présents dans le quartier. Les écoquartiers sont généralement constitués de constructions neuves réalisées sur d'anciennes friches où les systèmes d'infrastructures n'existent pas ou doivent être modernisés. Il faut alors dimensionner les réseaux thermiques et électriques selon la demande énergétique (les finalités des bâtiments et leur performance) et sa densité spatiale. L'enjeu du dimensionnement s'est accru pour les réseaux de chaleur avec l'essor de bâtiments très performants sur le plan thermique car ils rendent plus difficile l'amortissement de lourdes infrastructures de distribution. Pour les réseaux électriques, il s'agit également de définir le bon dimensionnement dans la perspective de l'augmentation de la consommation dans les années à venir dû au développement des usages électriques (appareils électriques, véhicules électriques...) et de l'autoproduction [CE, 2014a&b ; Eurelectric, 2012b ; AMORCE, 2011].

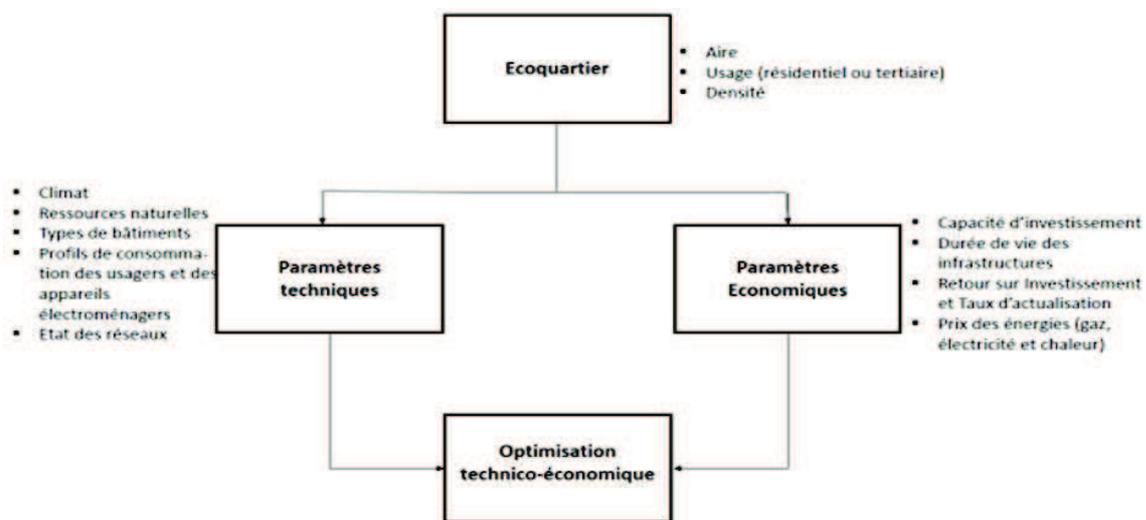
Les coûts de fonctionnement doivent aussi être pris en compte. Ils sont constitués d'une part, des coûts de fonctionnement des systèmes énergétiques mobilisant l'énergie renouvelable dans le quartier et, d'autre part, des prix de l'énergie exogène. Ce prix va jouer un rôle déterminant sur la compétitivité des équipements mobilisant les énergies renouvelables sur place et du ou des réseaux correspondant. En effet, même si l'objectif est de développer les énergies renouvelables locales, une attention doit être portée au montant relatif de la facture énergétique : la facture pour l'utilisateur final d'un système basée sur les énergies mobilisables sur place ne peut être sensiblement plus importante que celle d'un approvisionnement exogène.

Une des questions clés du dimensionnement est celle de la gestion des systèmes énergétiques : les incertitudes sont en effet très grandes non seulement sur la périodicité des ressources renouvelables mais aussi sur les prix des énergies exogènes.

Les acteurs qui vont investir dans ces systèmes doivent avoir la capacité de financement et de développement. Pour ce faire, ils vont prendre en compte des variables essentielles comme la durée de vie des infrastructures, le temps de fonctionnement annuel des technologies à installer. Ces différentes variables vont impacter la décision au regard des retours sur investissements¹⁷⁴ réalisables par rapport à la période d'amortissement du projet et du taux d'actualisation¹⁷⁵ attendus. Ces différents facteurs vont faire varier les coûts de production des énergies renouvelables et l'intérêt d'investir ou non dans des nouveaux réseaux.

Nous avons donc tenté de classer les variables essentielles à prendre en compte pour décrire le modèle technico-économique d'un système énergétique dans un projet d'écoquartier. Cette démonstration est une vision simplifiée de la réalité qui exclut plusieurs facteurs déterminant. Premièrement, la prise de décision des acteurs urbains joue un rôle essentiel en déterminant quel sera le système installé dans le périmètre voulu selon le choix de la solution la moins chère ou la plus efficace techniquement. Ces éléments vont également avoir un impact dans la structuration des tarifs que le consommateur final devra payer pour l'usage du réseau et des capacités de production sur le site alors même qu'il est nécessaire de les optimiser afin que l'investissement puisse être rentabilisé.

Figure 31 : Critères pour un modèle technico-économique des systèmes énergétiques installés dans un écoquartier [Construction de l'auteur]



¹⁷⁴ Le retour sur investissement est un indicateur financier qui permet de définir le rendement d'un investissement. La durée de l'investissement est le temps pour que la mise de départ soit récupérée.

¹⁷⁵ Le taux d'actualisation est le coût d'opportunité du capital investi. En d'autre terme, il s'agit du rendement possible qu'il serait envisageable d'obtenir en investissant ailleurs ce capital. Ce taux intègre également une prime de risque dans le projet qui traduit sa probabilité d'échec.

4. Conclusion

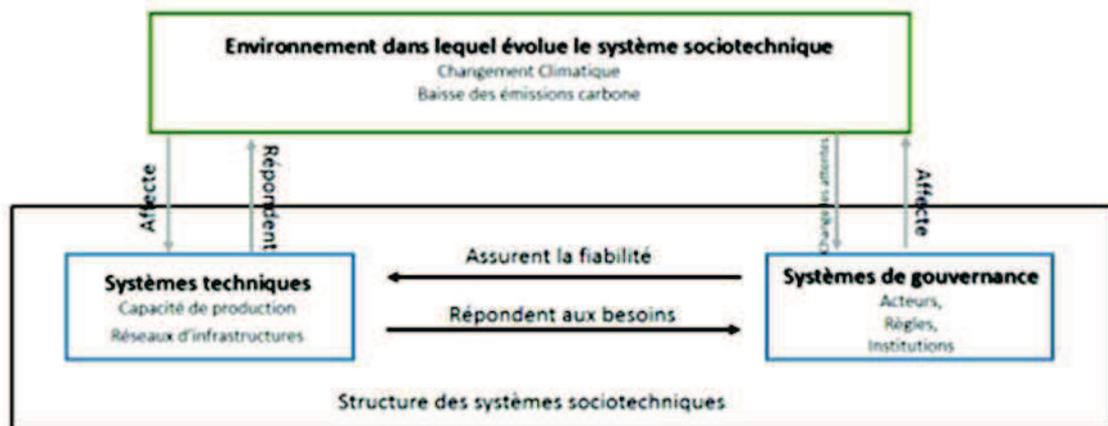
L'Union Européenne dans la ligne des accords internationaux sur le climat promeut une évolution vers des systèmes énergétiques moins carbonés. De nombreux textes législatifs et réglementaires faisant échos aux grandes annonces internationales préconisent l'amélioration de l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables. L'efficacité énergétique au travers de l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments et de la maîtrise de la demande énergétique est déjà en cours [Chapitre 1 et 2]. En revanche, la décentralisation de l'approvisionnement énergétique qui s'appuie sur les ressources (renouvelables ou bas carbone) disponibles localement, dans le but d'étendre l'autonomie énergétique des écoquartiers, fait l'objet de réalisations expérimentales mais les modèles économiques restent à trouver.

Si aujourd'hui, l'approvisionnement énergétique des bâtiments est réalisé jusqu'au logement par des réseaux nationaux pour les usages électriques et, dans certaines villes, aussi par des réseaux publics locaux, un ensemble de facteurs encouragent l'émergence d'une nouvelle échelle dans le fonctionnement du système énergétique. Élément du projet urbain depuis longtemps, le quartier soulève depuis peu un réel intérêt pour envisager le futur énergétique. Les acteurs développant cette approche promeuvent une reterritorialisation de l'approvisionnement et une plus grande autonomie énergétique, avec corrélativement un recours plus limité aux grands réseaux.

Le panorama des technologies pouvant être installées dans un écoquartier montre que si la plupart d'entre elles sont matures sur le plan technico-économique, aucune n'a encore acquis une dynamique suffisante pour entraîner la transition sociotechnique. Alors qu'ils présentent des avantages technico-économiques majeurs, les systèmes de quartier multi-énergie s'avèrent complexes et difficiles à mettre en œuvre : leur analyse technico-économique nécessite la prise en compte d'un nombre important de variables qui prises dans leur ensemble sont encore difficilement modélisables.

Si cette approche doit se développer, la question de l'optimisation technico-économique n'est pas la seule problématique à envisager. En effet, le système technique étant en lien permanent avec des systèmes de gouvernance impliquant de multiples acteurs et plusieurs cadres de régulation (règles formelles et informelles), il faut envisager les liens entre la décentralisation technique et le système institutionnel [Figure 32 : Système sociotechnique de l'énergie au regard de la transition énergétique inspiré par Chappin et al, 2014]. Il convient donc de s'interroger sur les impacts du passage d'un système institutionnel centralisé à un système institutionnel décentralisé.

Figure 32 : Système sociotechnique de l'énergie au regard de la transition énergétique inspiré par Chappin et al, 2014
[Construction de l'auteur]



Chapitre 4 : La régulation des systèmes sociotechniques de l'énergie : analyse Néo Institutionnelle

Les impératifs de lutte contre le changement climatique imposent une transformation radicale des systèmes sociotechniques de l'énergie à l'horizon du milieu du siècle. Or, les transformations de ces systèmes techniques, en raison de leur structure et des inerties qui les caractérisent, s'inscrivent habituellement dans un temps long. Plusieurs types de solutions doivent être combinés pour répondre à ces nouvelles contraintes. Dans le domaine de l'énergie, ces solutions articulent des changements dans les techniques, les comportements et les institutions ; elles devront de plus se déployer dans une perspective multi-échelle, de l'émergence de supergrids internationaux à celle d'une offre énergétique territoriale. C'est cette dernière proposition qui est ici étudiée à travers les projets d'écoquartiers dans lesquels l'énergie est devenue une dimension structurante [Chapitre 1 et 2].

L'émergence de cette nouvelle échelle pour l'offre énergétique suppose un changement de paradigme dans la manière de concevoir et de mettre en œuvre de nouveaux systèmes sociotechniques. Ainsi, alors que les systèmes techniques de l'énergie étaient pensés de manière globale au niveau national, régional ou urbain, émerge aujourd'hui l'idée d'une approche plus intégrée à l'échelle locale du projet. La décentralisation de l'approvisionnement énergétique oblige à s'interroger sur les impératifs techniques et économiques à respecter pour garantir la viabilité des systèmes. Il faut ainsi prendre en compte les spécificités du projet (extension, densité...), les possibilités techniques (maturité des technologies, profil d'usages, ressources naturelles, climat...) et les possibilités économiques (compétitivité des énergies renouvelables, capacité d'investissement, retour sur investissement...).

Les études des innovations technologiques mises en œuvre pour l'approvisionnement énergétique à l'échelle du quartier portent le plus souvent sur des innovations incrémentales, souvent considérées de manière isolée. Aucune technologie ne semble constituer un maillon indispensable par rapport aux autres. Or l'émergence d'options crédibles pour l'approvisionnement local ne pourra découler que des effets systémiques et des synergies découlant de la combinaison de plusieurs innovations techniques intégrées à l'échelle locale. La dynamique enclenchée par la décentralisation technique des systèmes énergétiques à l'échelle du quartier peut être considérée comme l'innovation de rupture nécessaire pour réaliser la transition énergétique à l'échelle locale. Mais il apparaît que la décentralisation technique est complexe à mettre en œuvre et recouvre un ensemble de possibilités techniques offrant des degrés d'autonomie variable selon les territoires [Chapitre 3].

L'analyse des systèmes sociotechniques à l'échelle locale soulève également un ensemble de questions autres que celle de l'optimisation technico-économique. Dans le cadre d'une approche en termes de système sociotechnique, si la transition impacte en premier lieu le système technique, elle entraîne

également des évolutions dans la relation que les acteurs entretiennent avec les infrastructures et les institutions existantes. Ces modifications peuvent provoquer un « désalignement » qui a pour conséquence de perturber l'équilibre relationnel entre les infrastructures et les usagers [Chapitre 3, section 1]. La régulation de ces relations doit être revue afin de permettre un rééquilibrage permettant le bon fonctionnement du système. Il est alors essentiel de pointer les types de relations impactées ainsi que le cadre institutionnel dans lequel elles évoluent afin d'envisager comment adapter le système sociotechnique à la décentralisation.

Cet aspect des interactions technologies-infrastructures-institutions-acteurs, bien qu'évoqué et défini dans l'approche multiniveaux traite toutefois peu de la relation entre institutions et acteurs car elle se concentre sur le rôle de l'innovation. Pour remédier à cette limite, nous avons donc décidé de recourir à la théorie économique néo-institutionnelle. Deux raisons justifient ce choix. Premièrement, ce courant économique est un des supports théoriques constituant le cadrage conceptuel de l'approche multiniveaux [Geels et al, 2004]. Son emploi peut donc être perçu comme un approfondissement de cette approche. Deuxièmement, l'analyse économique classique ne permet pas d'apporter l'ensemble des réponses nécessaires à la compréhension de la régulation des interactions entre acteurs et systèmes techniques dans les industries de réseaux.

L'objet de ce chapitre sera donc de préciser quels sont les systèmes de régulation qui sont remis en cause lors de la décentralisation des systèmes d'approvisionnement énergétique au niveau du quartier. Dans un premier temps, on analysera les raisons du changement de paradigme qui émerge dans les industries de réseaux énergétique, en présentant de manière générale les apports et limites de la théorie néoclassique sur cette question. Dans un second temps, ce changement sera replacé dans la perspective historique de la théorie néo-institutionnelle afin de comprendre les liens entre l'évolution technique et les systèmes de régulation, en insistant sur le concept de sentier de dépendance. Enfin, dans un dernier temps, l'analyse portera sur la lecture en termes d'économie des coûts de transaction du changement de paradigme dans les industries de réseaux énergétiques, ce qui permettra d'identifier quatre types de droits de propriété pour une redéfinition des relations contractuelles.

1. Les spécificités de l'approvisionnement énergétique : le réseau et ses enjeux

Les écoquartiers peuvent être envisagés comme des microsystèmes techniques où les enjeux de l'approvisionnement énergétique peuvent se définir en interface avec les grands réseaux techniques, que ce soit au niveau technique, économique et institutionnel. Or, les grands réseaux énergétiques présentent un ensemble de spécificités qui en font des biens économiques particuliers, alors que leur rôle est reconnu d'intérêt général. Ces caractéristiques ont été théorisées par différents courants de l'économie. Afin d'assurer le bon fonctionnement des réseaux, ils ont défini un mode de régulation particulier, il s'agit du monopole. Cette première partie a donc pour objectif de réexaminer les caractéristiques

économiques des industries de réseaux, afin de comprendre les enjeux soulevés par la décentralisation des systèmes d’approvisionnement.

1.1. Caractérisation de l’approvisionnement énergétique comme une ressource essentielle

La caractérisation de l’approvisionnement énergétique comme ressource essentielle est la résultante d’une longue réflexion sur la nature des biens économiques.

Une première distinction entre les biens peut être réalisée selon les catégories proposées par Samuelson. Il distingue deux types de biens : les biens privés et les biens publics. Les biens privés sont des biens exclusifs et rivaux ; la consommation d’un tel bien par un agent économique est déterminée par sa capacité à payer et la consommation de ce bien empêche sa consommation par d’autres agents économiques. Les biens publics sont des biens non-exclusifs et non-rivaux ; il n’est techniquement pas possible d’empêcher un agent économique d’en profiter, même s’il n’a pas payé pour cela, et l’utilisation par un agent économique de ce bien ne prive pas les autres agents de sa consommation [Samuelson, 1954]. Un exemple classique de bien public est l’éclairage public qui éclaire les individus dans une rue sans réaliser une distinction entre ceux qui ont les capacités de payer pour ce service et ceux qui ne l’ont pas.

Une seconde distinction apparaît avec les ressources considérées comme des biens communs : il s’agit des biens non-excludables mais rivaux. La rivalité s’entend comme l’incapacité pour plusieurs agents d’utiliser simultanément le même bien sans entraîner sa dégradation tandis que le caractère non-excludable s’entend comme le fait que l’usage du bien par un agent économique ne peut être empêché. L’enjeu de la gestion des biens communs est exprimé dans l’article *La tragédie des communs* du biologiste Garrett Hardin [Hardin, 1968]. La tragédie des communs est illustrée par l’exemple d’un champ commun à tout un village dans lequel chaque éleveur vient faire paître son troupeau. La tragédie se produit quand une situation de compétition entre les éleveurs apparaît pour l’accès à une ressource limitée, avec pour aboutissement des comportements non coordonnés à la fin de la ressource.

Par la suite, la problématique des ressources communes (Common Pool Resource) désignées comme « un système de ressources suffisamment important pour qu’il soit coûteux d’exclure ses bénéficiaires potentiels de l’accès aux bénéfices liés à son utilisation » [Ostrom, 2010, p 44] émergent. Les ressources naturelles telles que les nappes phréatiques, les lacs ou les forêts en constituent un bon exemple. Néanmoins, Ostrom élargit la perspective et énonce que les ressources communes peuvent être également des ressources créées par l’homme comme des « ponts », des « garages de stationnement », « des ordinateurs » [Ostrom, 2010, p 44].

En ce sens, les infrastructures énergétiques de réseau peuvent être perçues comme des ressources communes puisqu’elles sont le fruit d’investissements dans un capital existant sur le long terme et qui

permet de faire circuler des flux. Les systèmes d'infrastructures énergétiques sont par ailleurs caractérisés par des nœuds reliés entre eux grâce à des liens. La bonne marche de l'ensemble du réseau technique est sous-tendue par la capacité des nœuds à s'interconnecter. L'enjeu de l'interconnexion est la complémentarité des systèmes techniques permettant la coordination des différentes activités de réseau [Economides, 1995]. C'est cette nécessité de la complémentarité qui va caractériser les systèmes d'infrastructures comme des ressources communes car il existe de fortes relations mutuelles entre les différents acteurs du réseau [Künneke et al, 2009].

Les infrastructures énergétiques de réseau peuvent être ainsi considérées comme des biens communs. Elles ont un caractère non-excludable pour au moins trois raisons. Premièrement, les infrastructures ont tendance à se répandre sur de large territoire géographique entraînant une difficulté de surveillance et donc de contrôle des points d'accès. Deuxièmement, les infrastructures en tant que ressources communes peuvent rendre des services essentiels nécessitant d'être administrés pour répondre aux obligations de services universels. Enfin, une fois que les usagers disposent du réseau d'infrastructure, il peut être difficile de déterminer l'ensemble des services rendus par ce dernier aux usagers. Les infrastructures ont également un caractère rival au sens où il est nécessaire de bien définir les droits de propriétés et les droits de décisions des acteurs du réseau afin d'avoir la meilleure allocation des ressources et des services possibles [Künneke et al, 2009].

La transformation des systèmes d'approvisionnement énergétique pour répondre aux enjeux de la transition énergétique englobe à la fois des problématiques de stocks (infrastructures) et des problématiques de flux (énergie) qui implique un mouvement de décentralisation des systèmes techniques de production énergétique et remet en question la capacité des institutions classiques à gérer cette décentralisation pour préserver les avantages collectifs que les infrastructures réalisent.

1.2. Les industries de réseaux et les obligations de service universel

Les industries de réseaux sont reconnues comme jouant un rôle déterminant dans nos sociétés car elles assurent la fourniture des services essentiels. Le développement économique et social des pays industrialisés aurait été beaucoup plus lent et moins dynamique sans l'apparition de ces industries qui regroupent des domaines aussi divers que le transport, les télécommunications ou encore l'énergie. Elles sont donc considérées comme rendant des services particuliers nécessaires au bon développement économique et social. C'est pourquoi, les infrastructures correspondantes font l'objet de statuts particuliers dans les réglementations afin de les distinguer des autres biens économiques.

L'Union Européenne reconnaît l'intérêt général et ses missions associées grâce aux décisions de la Cour de Justice de l'Union Européenne (CJUE) qui se réfère à l'article 90 du Traité de Rome établissant que *« Les entreprises chargées de la gestion de services d'intérêt économique général ou présentant le caractère d'un monopole fiscal sont soumises aux règles du présent traité, notamment aux règles de*

concurrence, dans les limites où l'application de ces règles ne fait pas échec à l'accomplissement en droit ou en fait de la mission particulière qui leur a été impartie. Le développement des échanges ne doit pas être affecté dans une mesure contraire à l'intérêt de la Communauté. »¹⁷⁶. Les institutions européennes ont dû mettre en place une jurisprudence permettant la prise en compte de l'intérêt général et d'en définir le périmètre d'action. Il faut néanmoins noter que bien que les particularités nationales soient de plus en plus influencées par le droit européen, la mise en place des services d'intérêt général ont pris des formes différentes selon les traditions historiques et culturelles de chaque nation (France : service public, Royaume-Uni : utilities, Allemagne : ÖVU) [Lamort, 1994].

Actuellement, l'Union Européenne reconnaît deux notions relatives à l'intérêt général. Il s'agit du Service d'Intérêt Général (SIG) et du Service d'Intérêt Economique Général (SIEG) admis dès la fondation de la communauté européenne. La CJCE entend par SIG pur l'ensemble des activités ne pouvant être assurées par le seul marché. Il s'agit des services de police ou de sécurité, de l'éducation, des services sociaux financés par la solidarité nationale ou encore de certaines réglementations techniques. La CJCE reconnaît en tant que SIEG les services qui sont soumis au Traité de Rome et peuvent faire l'objet de dérogation aux règles de la concurrence et à la libre prestation de service. Il s'agit des transports, de l'audiovisuel, de l'énergie, des télécommunications, de la distribution de l'eau ou des services portuaires [Vannini, 2007].

La législation européenne a également fait émerger le concept de Service Universel (SU), qui peut être compris comme le contenu minimal d'un service public que doit garantir un Etat membre sur son territoire. En ce sens, la mission que doit rendre un SU est à dissocier de la simple mission d'un SIG. Ainsi, le SU doit répondre à une double exigence d'abordabilité tarifaire¹⁷⁷ et de tarification sociale¹⁷⁸. Il s'agit donc, ici, d'organiser un système de redistribution permettant des prix modérés plutôt qu'un droit fondamental du citoyen à être servi [Curien, 2005]. Ainsi, des exceptions existent aux SIEG dans les directives relatives à l'électricité et au gaz. Elles imposent aux Etats membres, par exemple, de garantir le service universel aux clients résidentiels et aux PME¹⁷⁹.

Les missions de service public rendues par les industries de réseaux (énergie, eau,...) et surtout les obligations de service universel imposent la mise en œuvre de systèmes de régulation particuliers afin que ces industries assurent le bon raccordement de l'ensemble des agents économiques. Dans cette

¹⁷⁶ Article 90 du Traité de Rome signé le 25 mars 1957

¹⁷⁷ L'abordabilité dans la législation européenne se présente comme une facette de l'accessibilité financière et traduit les ressources disponibles pour un achat. La non-accessibilité aux SIEG n'est pas obligatoirement due au caractère non-abordable et peut dépendre de d'autres aspects. L'abordabilité est traitée notamment dans l'article 3 de la Directive 2009/72 relative aux règles communes pour le marché intérieur de l'électricité.

¹⁷⁸ Tarification à l'intention des personnes à faibles revenus.

¹⁷⁹ Considérant 24 de la DIRECTIVE 2003/54/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 26 juin 2003 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité et abrogeant la directive 96/92/CE

perspective, le marché pur peut être considéré comme défaillant pour atteindre l'optimum social. L'analyse théorique conduit alors à préconiser une régulation des activités de réseau par des monopoles.

1.3. Le paradigme traditionnel de l'approvisionnement des industries de réseau énergétique

Les industries de réseau sont caractérisées par des éléments techniques, économiques et sociaux justifiant la mise en place de systèmes de régulation allant à l'encontre des principes gouvernant les secteurs économiques plus conventionnels. Tous ces secteurs se caractérisent par la présence d'un ensemble de caractéristiques communes telles qu'une dépendance réciproque entre l'offre et la demande, un empilement de différentes strates (infrastructure, « infostructure » et service final), des externalités positives nombreuses et une dynamique de développement non-linéaire. Ces éléments vont être mis en exergue afin de comprendre les limites d'une régulation par le marché de ces activités.

1.3.1. Emergence de la notion d'industrie de réseaux

D'un point de vue technique, le réseau peut être considéré comme un simple artefact représentant une interconnexion spatiale entre des équipements compatibles (nœuds) grâce à des systèmes de coordination (liens) qui peuvent prendre la forme de systèmes maillés (route, téléphone) ou aréolaires (eau potable). Une première caractéristique fondamentale du réseau, quelle que soit sa forme, est la nécessaire complémentarité entre les différents liens et nœuds, afin que les différents artefacts puissent fonctionner efficacement ensemble. Une seconde caractéristique est l'ubiquité, c'est-à-dire la mise en relation immédiate d'un offreur et d'un demandeur, pour satisfaire un besoin grâce à la mobilité des flux. Cette ubiquité est renforcée par l'instantanéité de la circulation des flux qui permet de répondre à l'immédiateté des besoins. Le réseau doit en effet s'adapter en permanence aux besoins des acteurs de réseaux tout en offrant le meilleur service possible [Economides, 1995].

D'un point de vue organisationnel, les industries de réseaux sont caractérisées par trois strates pouvant faire l'objet d'analyses spécifiques. La première strate est celle de l'infrastructure des artefacts techniques qui permettent la circulation des biens et services offerts par le réseau. A l'image du réseau électrique, le réseau technique est généralement maillé au niveau national et arborescent au niveau local. La seconde strate est l'infostructure qui a pour objectif d'optimiser l'utilisation des réseaux techniques et leur fonctionnement afin de réaliser l'intermédiation. Le caractère stratégique de cette strate dépend essentiellement de la possibilité de stocker ou non les biens et services échangés par le réseau. Enfin, la troisième strate fait référence à l'offre de services finals rendus par les réseaux dont le but est la fourniture de prestations différenciées en nature, en qualité et en prix aux différents segments d'utilisateurs [Curien, 2005].

En ce qui concerne la fourniture d'électricité, l'interconnexion des infrastructures va être assurée par les opérateurs de transport et de distribution. Ils représentent la première strate. Les activités de dispatching, c'est-à-dire le service qui commande l'interconnexion et la production sont assurées traditionnellement par l'opérateur de réseau de transport. La décentralisation des capacités de production transfère les enjeux de dispatching du niveau national au niveau local ce qui entraîne une possible montée en puissance des opérateurs de réseau de distribution. Enfin, les services finals traditionnellement alloués aux fournisseurs sont aujourd'hui en pleine évolution dans le secteur électrique avec notamment le développement des réseaux intelligents qui modifient la relation avec les consommateurs.

En ce qui concerne la fourniture de chaleur, l'interconnexion des infrastructures ainsi que les activités de dispatching sont assurées par l'opérateur de réseau qui représente la première strate. En effet, ces réseaux se caractérisent par une forte décentralisation territoriale du système technique, avec pour conséquence la mise en interaction locale des acteurs des activités de production et de distribution. Enfin, tout comme pour le secteur électrique, les services finals pour la chaleur sont en plein essor avec le développement d'outils identiques à ceux élaborés pour les réseaux électriques. Néanmoins, leur diffusion n'est pas encore aussi poussée dans le secteur de la chaleur que dans le secteur électrique [Cf. Chapitre 1 et 3].

1.3.2. Les externalités des industries de réseaux

Les industries de réseau se caractérisent par la présence de nombreuses externalités non prises en compte par le marché. Conceptualisées par Alfred Marshall, puis par Pigou pour les externalités environnementales, les externalités sont considérées traditionnellement comme les actions d'un agent économique ayant un impact positif ou négatif sur le bien-être des autres agents économiques sans que cet impact soit pris en compte dans les calculs de l'agent économique réalisant l'action. Le facteur déterminant la présence d'externalités dans les réseaux est la complémentarité des différentes composantes du réseau. On définit généralement pour les industries de réseau quatre types d'externalités : les effets de club, les économies d'échelle, les économies d'envergures et la contribution à la croissance économique.

Du côté de la demande, la croissance du nombre d'utilisateurs ayant accès au réseau fait apparaître des effets de clubs. Les effets de clubs, visibles notamment dans les réseaux de communication, donnent la mesure de la satisfaction des usagers du réseau ; celle-ci croissant en proportion de l'augmentation du nombre d'usagers, sans qu'il y ait une incidence sur les premiers usagers en matière de coût [Buchanan, 1965]. Les effets de club justifient ainsi la croissance du réseau en permettant aux usagers potentiels de se raccorder et de bénéficier de ces avantages. Pour permettre aux effets de club de croître, il faut s'assurer que le réseau ne souffre pas de congestions techniques. Elles limiteraient l'accès au réseau et entraîneraient une baisse de la qualité d'utilisation de ce dernier. Les économies d'envergure réalisées par l'utilisateur lors du développement du réseau sont une autre forme d'externalités positives induites par

les réseaux. Celles-ci proviennent d'une augmentation et d'une diversification des offres de services associées au réseau afin de satisfaire davantage les usagers sans que ces derniers aient à payer plus cher en proportion de l'accroissement des services proposés.

Du côté de l'offre, les industries de réseaux se caractérisent par l'existence d'économies d'échelle importantes ; c'est-à-dire la baisse des coûts unitaires de production lorsque la production augmente. Elles sont primordiales dans les industries de réseaux qui nécessitent des investissements très importants pour la construction des infrastructures. Ces investissements sont considérés comme des coûts non récupérables (*sunk cost*). Ces derniers ne peuvent être dédiés à d'autres activités ; ce qui a pour conséquence de peser d'une manière importante dans le prix final payé par l'utilisateur. La présence d'économies d'échelle va permettre de réduire les coûts. Néanmoins, leur présence va dépendre d'un ensemble de paramètres selon qu'elle est de nature monopolistique ou concurrentielle.

Les réseaux techniques se caractérisent également par leur universalité. Ils contribuent ainsi à la croissance économique en créant des conditions favorables pour améliorer la productivité grâce notamment à la présence d'externalités positives. Ainsi, le développement des réseaux de transport durant le XIX^{ième} siècle a constitué une des conditions des révolutions industrielles. En ce sens, les réseaux d'infrastructures seraient un moteur de croissance endogène pour la société à au moins deux niveaux : d'une part grâce à l'innovation technique qui dépend de la recherche-développement et permet d'optimiser les réseaux [Romer, 1986, 1990] ; d'autre part les réseaux financés grâce aux dépenses publiques permettront d'améliorer la performance de la croissance économique [Barro, 1990].

Les industries de réseaux apportent un ensemble d'externalités positives à la société, ce qui rend leur développement indispensable [OCDE, 2009]. L'universalisation des réseaux semble mettre à mal l'idée d'un avantage à la décentralisation technique et institutionnelle de l'approvisionnement énergétique. De plus, la structuration particulière des coûts et l'obligation d'atteindre une masse critique pour assurer la rentabilité des infrastructures de réseaux sont des éléments essentiels à prendre en compte lorsqu'il s'agit d'envisager la création de réseaux énergétiques [Chapitre 3].

1.3.3. Le monopole dans les industries de réseau

Les externalités apportées par les industries de réseaux justifient la préférence d'une régulation par monopole ; ce qui renvoie aux grands réseaux techniques énergétiques (gaz, électricité) mais également aux réseaux locaux comme les réseaux de chaleur urbains. Le mode de régulation adapté à ce type d'infrastructure a été théorisé dans le cadre d'analyse de l'économie néo-classique.

1.3.3.1. Apports de la théorie néoclassique

Les industries de réseaux remettent en cause la logique d'efficacité inscrite dans l'hypothèse de concurrence pure et parfaite¹⁸⁰ de la théorie économique classique. Si les hypothèses de concurrence pure et parfaite sont respectées, aucun agent économique ne peut influencer le marché. Les prix résultant de la seule confrontation entre l'offre et la demande, les agents économiques ne peuvent jouer que sur les quantités offertes ou demandées. Les offres sont alors proposées au coût marginal de la dernière unité produite ce qui équivaut au prix de marché. Le consommateur quant à lui recherchera à atteindre une quantité demandée telle que l'utilité marginale du dernier bien qu'il souhaite consommer équivaut au prix proposé par le marché. L'équilibre qui résulte de la confrontation de l'offre et de la demande en concurrence pure et parfaite aboutit à une situation¹⁸¹ de stabilité où le surplus est maximisé dans le long terme. Dans ce cadre, tout équilibre différent de l'optimum d'efficacité ou optimum de Pareto va dégrader la situation des autres agents économiques [Curien, 2005].

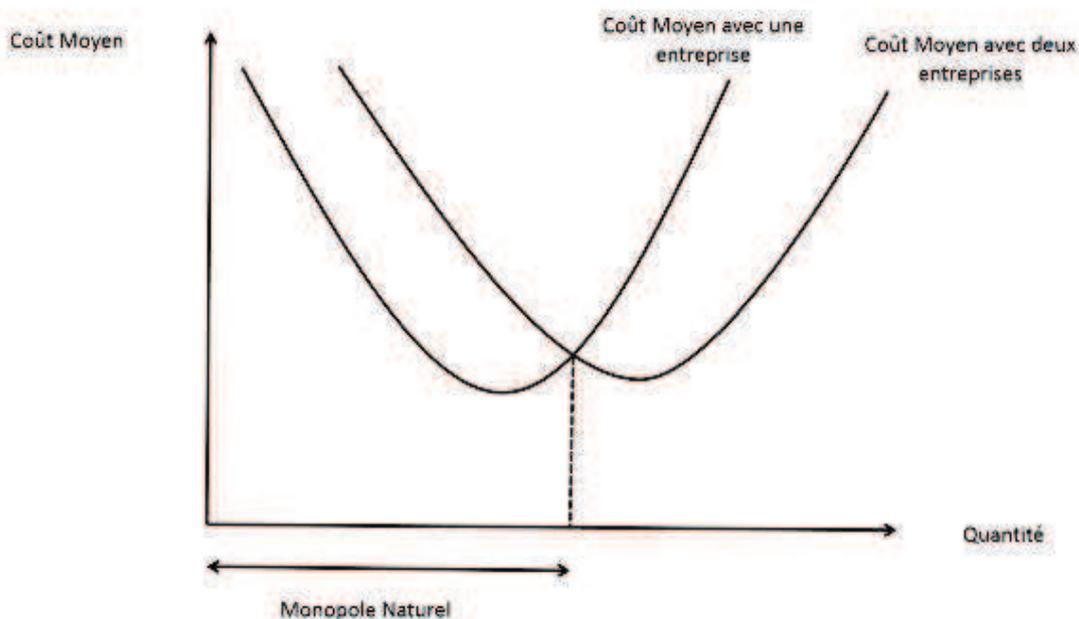
Or en raison de la lourdeur des investissements nécessaire pour les infrastructures, de la longue période de récupération de ces investissements et des dynamiques non-linéaires du développement des industries de réseau, l'atteinte de la masse critique n'est pas assurée. Cela alors même que les coûts marginaux décroissent avec l'extension du réseau. Il faut donc trouver un type de régulation alternatif au schéma de concurrence généralisée afin d'assurer les services spécifiques rendus par les réseaux. Les industries de réseaux ont donc été le plus souvent développées dans le cadre de la constitution de monopole, privés ou publics.

Il est traditionnellement associé à la présence d'un monopole naturel la présence d'un mécanisme de rétroaction positive renforçant la tendance à la concentration [Shapiro et al, 1998]. Ce mécanisme se présente sous la forme suivante : si plusieurs réseaux sont en concurrence, le réseau le plus important va offrir à ses usagers le prix le plus bas et la plus grande satisfaction ; ce qui va attirer d'autres usagers et renforcer la supériorité de ce dernier sur les plus petits réseaux. Ainsi, le coût moyen de production est moindre pour une technologie donnée ayant une forte spécificité d'actifs quand il y a qu'un seul producteur. Les réseaux les plus petits, quel que soit leur supériorité technique, disparaissent au profit du réseau le plus fort. Ils laissent donc à terme la place à un monopole [Figure 33 : Présence d'un monopole naturel].

¹⁸⁰ La concurrence pure et parfaite repose sur cinq conditions : l'atomicité, l'homogénéité du produit, l'information parfaite et l'absence de barrière à l'entrée et à la sortie du marché.

¹⁸¹ Situation dans laquelle on ne peut pas améliorer le bien-être d'un individu sans détériorer celui d'un autre individu. L'équilibre général en situation de concurrence pure et parfaite peut être considéré comme un optimum de Pareto.

Figure 33 : Présence d'un monopole naturel [Construction de l'auteur]

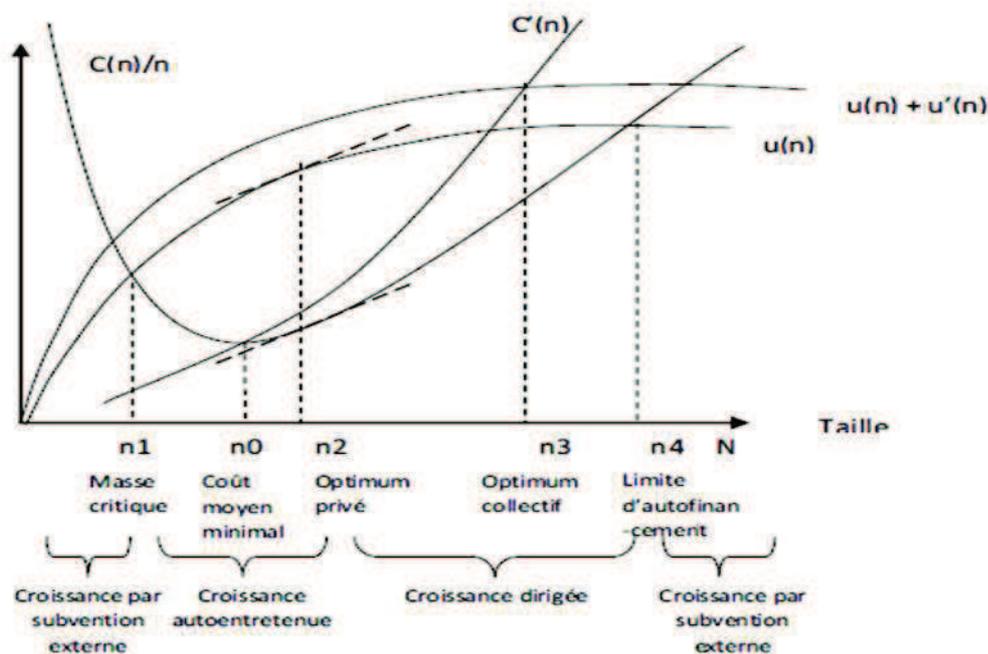


Par ailleurs, les industries de réseaux, une fois organisées sous des formes monopolistiques, constituent des marchés non-contestables ; c'est-à-dire que l'entrée et la sortie du marché ne peut se faire sans coûts supplémentaires [Baumol, 1982]. Ces obstacles au marché entraînent un accès difficile à un concurrent. Dans le cadre des réseaux, la présence de coûts irrécupérables importants représentent une barrière à l'entrée et à la sortie importante. En effet, un marché contestable doit avoir une entrée et une sortie libre. L'entrée libre sur le marché signifie que les nouveaux arrivants n'ont pas de désavantage en termes de technologie de production et de qualité de produits. La sortie libre du marché fait référence quant à elle au fait que le concurrent peut quitter le marché sans barrières ; c'est-à-dire qu'il peut récupérer tous les coûts encourus lors de l'entrée sur le marché en vendant les actifs utilisés permettant de ne pas avoir de frais. La hauteur de la barrière dépend donc de la quantité des coûts irrécupérables [Baumol, 1982].

Enfin, le fait que l'approvisionnement énergétique soit une ressource essentielle peut théoriquement justifier le développement d'un monopole public pour gérer les infrastructures même si cette gestion peut aussi être réalisée par des acteurs privés en monopole régulé. Le développement des réseaux par un monopole privé se heurte à la volonté de l'acteur de maximiser son profit en offrant une quantité telle que le coût marginal équivaut aux recettes marginales. Or, le monopole privé ne cherche pas à maximiser le surplus collectif. Les acteurs privés sont ainsi incités à se concentrer sur les zones les plus rentables. Ainsi, lorsque les réseaux sont construits par des agents privés, l'enjeu n'est pas le développement du réseau sur les zones où la densité d'utilisateurs permet la rentabilité de l'investissement ; mais la coordination et l'interconnexion des différents réseaux [Economides, 1995].

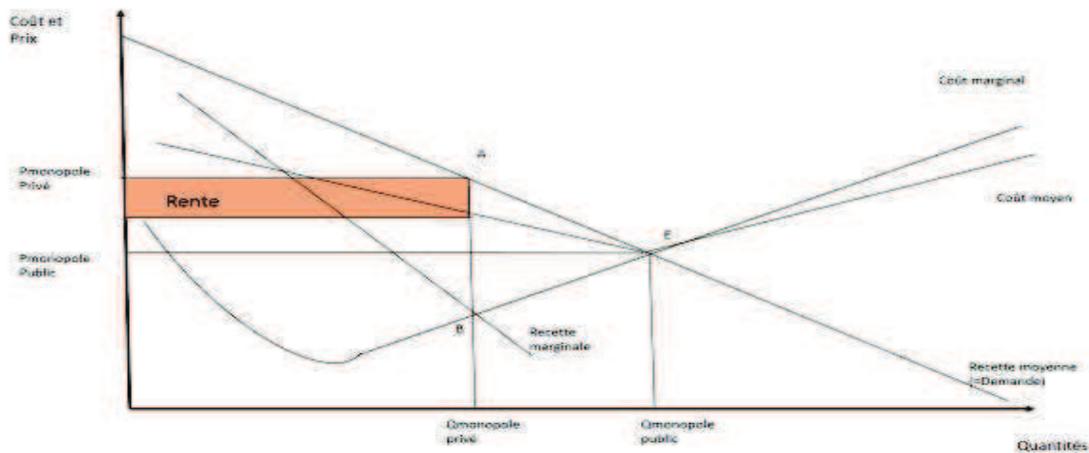
Noam a abordé cette problématique à partir de l'histoire du développement des réseaux téléphoniques. Il affirme qu'au-delà d'un seuil critique correspondant à l'optimum privé obtenu grâce à une croissance auto-entretenu avec présence d'effets de club et d'économie d'échelles, les acteurs privés n'ont plus intérêt à investir pour développer le réseau. Il est alors nécessaire d'encourager un investissement supplémentaire de ces acteurs privés par des aides d'Etat qui peuvent être directes ou indirectes afin d'atteindre l'optimum collectif. La limite de la participation de l'acteur privé au développement du réseau s'arrêtera au moment où le coût moyen ne sera plus couvert par les prix [Figure 34 : Modèle de Noam] [Noam, 1992].

Figure 34 : Modèle de Noam [Noam, 1992, p 32-traduit par Bento, 2012]



La présence d'un monopole public se justifie donc en raison de la spécificité des biens fournis par les réseaux. L'apport du monopole public est d'offrir des quantités de biens et services plus importantes à un prix moindre que celui du monopole privé améliorant ainsi l'efficacité collective. L'efficacité productive est ainsi améliorée car le coût moyen de production est plus bas. Le monopole public permet également une meilleure efficacité allocative en satisfaisant mieux la demande, notamment en permettant de répondre aux demandes des consommateurs ayant peu de moyens ou se situant dans des zones difficiles d'accès. Enfin, il y a également une plus grande efficacité redistributive en raison de l'absence de rente [Figure 35 : Equilibre de long terme du monopole public et du monopole privé] [Curien, 2005].

Figure 35 : Equilibre de long terme du monopole public et du monopole privé [Construction de l'auteur]



1.3.3.2. Limites de l'apport de l'analyse néoclassique

Les apports théoriques de l'analyse néoclassique des industries de réseaux présentent cependant certaines limites que des théories plus hétérodoxes se proposent d'étudier.

La théorie des systèmes sociotechniques employée dans le chapitre 3 démontre que le changement technique entraîne une évolution des systèmes institutionnels avec lesquels les systèmes techniques interagissent. En ce sens, elle va à l'encontre d'une certaine orthodoxie de l'analyse économique, soutenue principalement par la théorie néo-classique et qui prend mal en compte les processus d'émergence du changement technologique. L'innovation technique y est supposée être adoptée de façon instantanée et s'intégrer ainsi à la structure économique. Peu de place est faite à l'origine et aux processus d'élaboration du changement technique en tant qu'innovation. Enfin, la théorie néoclassique ne prend pas en compte l'environnement économique et institutionnel dans lequel se développe le changement technique. L'économie évolutionniste a tenté de lever ces limites en proposant des cadres d'analyse dans lesquels l'innovation tient un rôle important¹⁸² [Dosi, 1982 ; Nelson et al, 1982].

¹⁸² La théorie évolutionniste émerge dans les années 1980 suite à l'ouvrage « An evolutionary theory of Economic Change » de R.R. Nelson et S.G. Winter. Selon cette théorie, la firme n'est pas caractérisée par la recherche maximisation de ces profits mais par la volonté de survivre comme dans le processus de l'évolution décrit dans la théorie darwinienne lui permettant de survivre. Par conséquent, l'attention est portée sur les processus d'innovations et d'adaptation des firmes. La firme se définit, ici, comme un ensemble dynamique évolutif de compétences. La différence entre une firme et une autre est donc la nature du savoir-faire qu'elle a su accumuler. Selon les évolutionnistes, c'est la nature des compétences accumulées dans la firme comme sa capacité à développer les apprentissages nécessaires pour continuer d'évoluer dans un contexte évolutif qui va déterminer la trajectoire dans laquelle elle va s'engager et donc assurer ou non sa survie.

Le changement de paradigme qui correspond dans les écoquartiers à la décentralisation des infrastructures d’approvisionnement énergétique impose une évolution des arrangements institutionnels et organisationnels des acteurs de l’énergie. L’enjeu est alors de déterminer comment la décentralisation technique impacte les acteurs classiques de l’approvisionnement énergétique, en termes de systèmes de gouvernance et de transaction. Certains acteurs voient leur rôle évoluer et notamment : l’opérateur des réseaux de distribution, le consommateur final, la collectivité locale et les acteurs privés ou publics évoluant autour de ces trois acteurs. L’analyse de ces nouvelles configurations sera menée dans la partie suivante de ce chapitre en se centrant sur l’évolution de l’opérateur de distribution et de ses relations avec le consommateur final.

L’approche de la Nouvelle Economie Institutionnelle (NEI) permet quant à elle de rompre avec le déterminisme des formes d’organisation industrielle perçue à travers les seuls coûts de production. Cette rupture est menée en privilégiant une analyse par les coûts de transaction des transformations organisationnelles et institutionnelles des industries de réseau [Glachant, 2002]. Cette approche développée, dans la seconde moitié du vingtième siècle à partir des travaux de Ronald Coase, a été construite afin de répondre aux insuffisances de la théorie économique néoclassique en matière d’analyse des défaillances de marché. L’étude de la décentralisation technique des systèmes d’infrastructures énergétiques et de son impact sur les institutions et les organisations par l’utilisation de la Nouvelle Economie Institutionnelle (NEI) est alors fondée, afin notamment d’analyser les options permettant de relever les défis environnementaux [Ménard, 2011].

L’approvisionnement énergétique est une industrie de réseau qui est considérée comme essentielle au bon développement socioéconomique de la société. On l’a vu, cette spécificité a été étudiée et théorisée par différents courants économiques. Ces différents courants ont également étudié les modes de régulation nécessaires pour assurer le bon fonctionnement des réseaux techniques, avec notamment une préférence pour le monopole. Or, l’essor des écoquartiers dans un contexte de transition énergétique ouvre une réflexion sur le mode de régulation des systèmes d’approvisionnement énergétique à l’échelle locale. Ainsi, après l’analyse de la décentralisation de l’approvisionnement énergétique comme une transition technique nécessaire pour la transition énergétique, il convient de s’interroger sur l’évolution des systèmes de régulation permettant d’assurer une bonne qualité de relation entre les infrastructures et les usagers. C’est pourquoi, il est nécessaire de réfléchir à la nature des évolutions institutionnelles tout en prenant acte de la dynamique historique des réseaux.

2. L'évolution des institutions dans les industries de réseaux énergétiques

L'émergence des systèmes techniques de l'énergie puis leur diffusion a été accompagnée par l'évolution des modes de régulation qui a permis leur ancrage dans la société. La perspective de la décentralisation des infrastructures de réseaux à l'échelle du quartier questionne la pertinence de ces modèles à l'aune des nouveaux usages de l'énergie. L'approche historique de la théorie néo-institutionnelle va permettre d'étudier l'évolution des institutions à l'œuvre dans les industries de réseaux énergétiques à travers le temps. Son utilisation offrira un éclairage pertinent des changements institutionnels passés dans les industries de réseaux énergétiques afin de mieux envisager les évolutions qui pourraient survenir suite à la décentralisation des systèmes énergétiques à l'échelle du quartier tout en montrant l'importance des sentiers de dépendance dans l'émergence de nouveau mode de régulation.

2.1. Le courant historique de la nouvelle économie institutionnelle

L'approche par les coûts de transaction permet de comprendre le choix de systèmes de gouvernance selon leur mode de gestion des transactions à partir de l'analyse des contrats liant les agents économiques. Néanmoins, cette approche analyse les coordinations entre acteurs au niveau local ; c'est-à-dire au niveau de l'organisation¹⁸³. Elle ne prend pas en compte l'environnement dans lequel les systèmes de gouvernance évoluent ; c'est-à-dire l'ensemble des règles du jeu qui délimitent et soutiennent les activités transactionnelles des acteurs [Ménard, 2003]. C'est pourquoi, il est pertinent de recourir aussi à l'analyse macrosociale afin de comprendre le poids de l'environnement institutionnel sur les systèmes de gouvernance des organisations. L'apport de Douglass North¹⁸⁴ pour l'analyse du poids des institutions sur les organisations à travers l'histoire se révèle alors primordiale.

L'approche de Douglass North est originale car elle réinterroge les fondamentaux de la théorie néo-classique. Si North conserve un certain nombre de postulats tels que la présence de la rareté entraînant la concurrence entre les acteurs, ainsi que l'apport de la microéconomie sur l'analyse de la structure des prix et l'influence des prix relatifs. Il considère toutefois que cette théorie ne prend pas suffisamment en compte le rôle du temps et des dynamiques institutionnelles dans l'évolution des systèmes économiques [North, 1994]. En ce sens, il se rapproche de l'analyse néo-institutionnelle car il reconnaît les postulats suivants : l'importance des coûts de transaction, le rôle des idées et des idéologies, des processus

¹⁸³ Une organisation est une unité économique de coordination ayant des frontières identifiables et fonctionnant de façon relativement continue, en vue d'atteindre un objectif ou un ensemble d'objectifs partagés par les membres participants [Ménard, 1997].

¹⁸⁴ Douglass North est un économiste américain ayant reçu le prix Nobel en 1993. Auteur significatif de la Nouvelle Economie Institutionnelle, il apporte un regard novateur en tant qu'historien de l'économie. Il effectue une critique de l'approche néoclassique qui selon lui ne prend pas assez en compte le poids du temps et des institutions dans le processus économique.

politiques et la rationalité limitée des individus. Il se distingue néanmoins des auteurs de l'économie institutionnelle en distinguant clairement les institutions et les organisations.

Institution versus Organisation

North énonce ainsi que « *Les institutions sont les contraintes établies par les hommes qui structurent les interactions humaines. Elles se composent de contraintes formelles (comme les règles, les lois, les constitutions), de contraintes informelles (comme les normes de comportements, des conventions, des codes de conduites auto-imposées), et des caractéristiques de leur application.* » [North, 1994, p 360]. L'objectif des règles est de maintenir l'ordre et de réduire l'incertitude lors des échanges entre acteurs, en garantissant une stabilité à long terme des relations. Ainsi, les institutions sont la résultante de processus de négociations dont résultent des compromis reflétant les rapports de force entre les acteurs.

Sa vision peut se résumer en énonçant que si les institutions sont les règles du jeu, les organisations et leurs entrepreneurs sont les joueurs [North, 1989]. Les institutions en tant que règles définissent comment le jeu doit être joué. Les organisations et les entrepreneurs en tant que joueurs vont tenter de gagner, selon le cadre établi par les règles du jeu. Pour ce faire, les joueurs vont pouvoir utiliser plusieurs stratégies comme des collaborations ou d'autres moyens, qu'ils soient honnêtes et conformes aux règles ou non. L'interaction bilatérale entre les institutions et les organisations est donc essentielle. Le cadre institutionnel encadre les organisations créées et leurs évolutions et, en même temps, les organisations vont être à l'origine d'un changement institutionnel. Il y a donc un processus d'apprentissage entre ces deux formes en raison de l'existence d'échanges relationnels.

Processus de changement institutionnel

Le changement institutionnel est un processus délibéré issu de la participation des acteurs et des conséquences de leurs actions. North établit des étapes dans l'évolution des cadres institutionnels dans une économie concurrentielle. Selon lui, dans un premier temps, les interactions continues entre organisations et institutions dans une économie de pénurie et de concurrence vont entraîner un changement institutionnel. Si à court terme, chaque organisation a des objectifs différents selon son type (entreprises, partis politiques,...), toutes partagent l'objectif de la survie à long terme.

Dans un deuxième temps, la compétition contraint les organisations, afin de survivre, à investir en continu dans de nouvelles compétences et de nouvelles connaissances. Les choix d'investir dans de nouvelles compétences et de nouvelles connaissances spécifiques à chaque organisation entraînent une évolution des institutions. Ces choix vont modifier le rapport des organisations avec les institutions. Néanmoins, il faut constater que le cadre institutionnel va orienter les organisations dans leurs choix de nouvelles compétences et de nouvelles connaissances à acquérir puisque le but est de leur permettre de retirer un maximum de bénéfices de l'environnement dans lequel elles évoluent.

Enfin, le contexte économique et le réseau extérieur influent sur la création institutionnelle. Ainsi, le changement institutionnel est incrémental et dépendant de la trajectoire suivie. L'incertitude persiste parce que le champ dans lequel les humains sont en interaction est continuellement éprouvé par le changement induit d'une part par des actions non-humaines (catastrophes naturelles, changement climatique) mais également, voire principalement, par les acteurs eux-mêmes, via leurs interactions.

Les dotations institutionnelles et les sentiers de dépendances

North fait référence au concept de dotation institutionnelle (*Institutional Endowment*) pour désigner les institutions générales d'un pays produisant des arrangements institutionnels et organisationnels dans une logique d'efficacité transactionnelle et de recherche d'engagements crédibles [North, 1989]. L'apport de North réside dans l'élaboration du sentier de dépendance (*Path Dependence*) institutionnel qui encadre la dotation institutionnelle d'un pays. Cette dépendance au passé doit permettre d'analyser les différenciations dans les réformes réalisées par différents pays dans un même domaine [North, 1991].

Le postulat de départ qui pose la cohérence macrosociale comme primordiale est particulièrement pertinente dans le cadre de l'étude des industries de réseaux d'infrastructures car il existe plusieurs modes d'accapement des surplus ou de la quasi-rente¹⁸⁵. Ainsi, des acteurs économiques peuvent – à travers des pratiques tarifaires propres aux monopoles, des sur- ou sous-investissement – accaparer le surplus collectif entraînant ainsi un éloignement de l'efficacité allocative des réseaux. Le partage de la quasi-rente repose sur des compromis sociaux qui jouent un rôle déterminant dans la définition et la consolidation des institutions et des arrangements organisationnels qui lient entreprises, syndicats, groupes de consommateurs, collectivités et pouvoirs publics [Finon et al, 1996].

2.2. Les institutions comme vecteur de la dynamique de réseau énergétique

Nous présenterons plus bas [Cf. Chapitre 4, section 3] l'approche micro-analytique développée par Williamson. Malgré son intérêt, sa limite est de se concentrer sur les seuls modes de coordination au sein des organisations et entre les organisations. L'analyse est donc essentiellement basée sur les coûts de transaction et les institutions externes comme les lois ou les réglementations influençant directement les transactions. Cette approche ignore l'influence des arrangements de départ, déterminés historiquement et à l'échelle macrosociale, ainsi que le poids des arrangements dans les dynamiques d'évolution. Il est alors nécessaire de trouver un autre éclairage théorique permettant d'enrichir la vision micro-sociale. Le recours à l'approche développée par North se justifie car elle attribue aux institutions un rôle actif tout en réintégrant le poids de l'histoire dans la réalisation des échanges. Elle démontre

¹⁸⁵ La quasi-rente est le montant qu'une des parties peut exiger au cours des négociations sans qu'il soit profitable pour l'autre partie de rompre la relation et de chercher un nouveau partenaire.

ainsi que la recherche de la performance économique n'est pas le seul déterminant de l'évolution contractuelle [Cf. Chapitre 4, section 3].

L'intérêt d'analyser les évolutions des industries de réseaux par l'approche institutionnelle découle de la volonté d'améliorer non seulement la compréhension de l'efficacité transactionnelle mais aussi celle des nouveaux arrangements en termes de cohérence macrosociale de ces industries. En effet, North élargit le concept de coût de transaction à un contexte plus large d'évolutions sociales, en le définissant comme l'ensemble des coûts impliqués par l'interaction humaine dans le temps [North, 1994]. L'intérêt est alors de réfléchir à l'évolution des arrangements sectoriels en les considérant comme la conséquence de compromis sociaux stabilisés autour de l'appropriation de la rente.

North réalise une distinction entre les deux catégories d'institutions. L'environnement institutionnel est caractérisé comme « *l'ensemble des règles politiques, sociales et juridiques fondamentales qui régissent l'activité économique et politique* ». Les règles électorales, les droits de propriété et les droits des contrats sont des exemples de ces règles de base. Ce concept peut être rapproché des « structures de gouvernance », telle qu'envisagée dans la lignée de Coase et Williamson. L'arrangement institutionnel est caractérisé quant à lui comme « *un arrangement entre unités économiques qui gouverne la façon dont les unités peuvent coopérer ou se concurrencer* » [North, 1994].

Les « dotations institutionnelles » et macro-institutions

Les macro-institutions sont les institutions caractérisées par une stabilité d'une nature séculaire [North, 1989 ; Ménard, 2003]. Ces institutions vont influencer l'environnement transactionnel ainsi que la stabilité des règles sectorielles et les possibilités de limitation de l'intervention de certains acteurs dans la régulation ainsi que la possibilité de changer les règles sectorielles. Ce type d'institutions peut faire référence aux mécanismes de définition des lois et des règlements, des mécanismes administratifs formels, des mécanismes judiciaires formels, mais aussi des conventions informelles qui contraignent l'action des individus et des organisations. Ces dotations institutionnelles ont la possibilité de changer dans le temps. Néanmoins, leur évolution s'inscrivant dans un temps long, on considérera dans un souci de simplification méthodologique que celles-ci sont stables.

Les institutions sectorielles

Les institutions sectorielles dans les industries électriques et de la chaleur peuvent être séparées entre les institutions qui influent sur les coûts de transaction et les institutions qui découlent de compromis sociaux [Finon et al, 1996].

Les dispositifs institutionnels qui influencent les coûts de transaction englobent les règles spécifiant les degrés de monopolisation territoriale, le degré d'intégration verticale ainsi que les règles de coordination entre niveaux hiérarchiques. Ces derniers intègrent également le droit d'usage de l'infrastructure qui détermine les formes de concurrence. Les droits de propriété sont également des institutions importantes car ils déterminent la forme de mobilisation des capitaux. Ainsi, la propriété publique bénéficie de mécanismes privilégiés de financement par rapport aux propriétés privées.

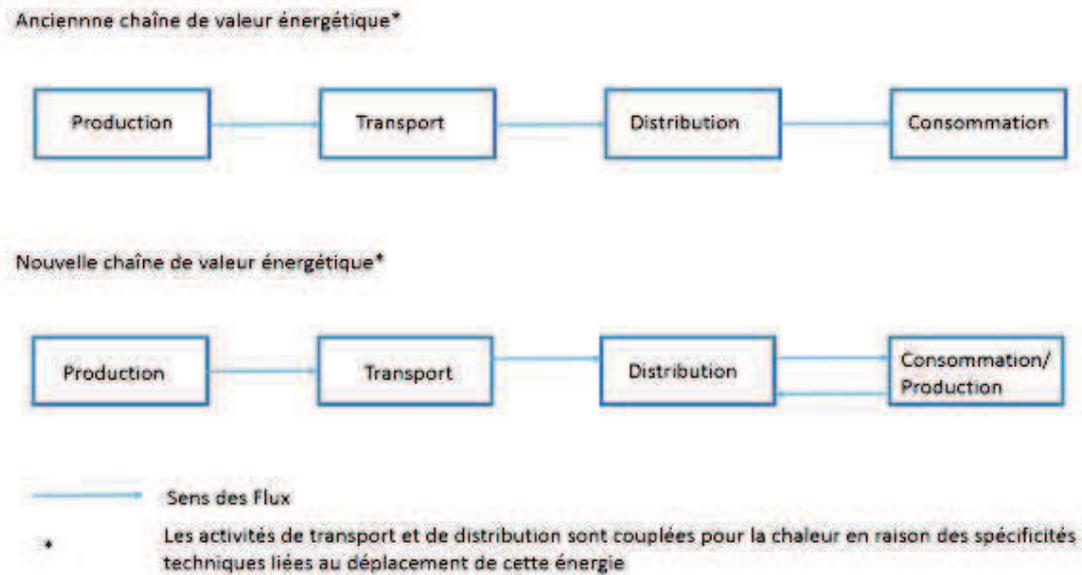
Les cultures internes

L'impact des profils des acteurs de l'industrie sur les modes de régulation ainsi que sur les choix d'infrastructures et leur évolution est aussi essentielle [Hughes, 1983 ; Bouneau et al, 2007]. L'essor des traditions monopolistes a favorisé l'installation d'une culture d'ingénieur ayant le goût de la performance technique et une forte aversion au risque. Cette tendance a favorisé le développement de structures monopolistiques hiérarchiques durant le vingtième siècle dont la justification repose sur la spécificité des actifs énergétiques. Dans le domaine de l'énergie, la déréglementation et la dérégulation apportées par les politiques de libéralisation dans les pays anglo-saxons puis par les politiques européennes ainsi que la baisse des spécificités d'actifs et la meilleure appréhension des risques dans le domaine ont entraîné un délitement des structures très hiérarchisées au profit de structures moins hiérarchisées et plus compétitives.

2.3. Le rôle des institutions externes aux industries énergétiques

Les systèmes d'approvisionnement électriques et thermiques sont basés sur le même modèle de chaîne de valeur démarrant avec la production puis passant par le transport et la distribution et enfin arrivant à la fourniture d'énergie. Dans le modèle établi de manière assez générale après la seconde guerre mondiale en Europe, la gestion énergétique prenait traditionnellement le même chemin que la chaîne de valeur où l'énergie était produite puis transportée et distribuée pour être enfin consommée par les utilisateurs finals [Figure 36 : Evolution des chaînes de valeur électrique et de chaleur], cela au sein de modèles d'organisation très hiérarchisés et centralisés. La décentralisation de la production énergétique devrait entraîner un changement de paradigme basé sur un changement technique au niveau des flux ce qui entraînera une modification des systèmes de régulation de la chaîne de valeur énergétique. Cette modification semble apparaître lorsque la technique et les systèmes organisationnels ne sont plus alignés [Cf. Chapitre 3].

Figure 36 : Evolution des chaînes de valeur électrique et de chaleur [Construction de l'auteur]



Dans la sous-partie suivante, nous rappellerons le développement historique de l'industrie électrique en Europe afin de montrer que les choix de systèmes de régulation dépendent d'un contexte politique, historique et économique encadrant les systèmes techniques et leurs utilisations. Si l'approvisionnement électrique a fait l'objet de nombreuses études historiques, sociales et économiques, l'approvisionnement thermique semble par contre avoir peu fait l'objet d'études socioéconomiques et historiques sur la structuration de ses organisations au niveau européen à travers le temps. C'est pourquoi, cette partie se concentrera sur l'approvisionnement électrique en Europe et non sur l'approvisionnement thermique.

2.3.1. Première période 1880-1910 : les balbutiements d'une nouvelle industrie

L'industrie électrique émerge aux Etats-Unis au début du dix-neuvième siècle avec l'apparition de grandes innovations techniques dans l'espace public comme l'éclairage et le transport publics fonctionnant grâce avec des moteurs électriques.

Pour ce qui est de l'éclairage public, les innovations techniques se diffusent progressivement dans différentes villes américaines et européennes au cours de la première moitié du siècle. A la fin des années 1870, trois grandes villes occidentales deviennent le fer de lance de l'éclairage public électrique. Il s'agit de Londres, New York et Paris. Ces villes sont tout d'abord éclairées à partir du système de la lampe à arc développée par Humphrey Davy en 1810. Les lampes sont alors alimentées par des câbles électriques aériens circulant entre les bâtiments et reliés à des générateurs électromagnétiques. Par la suite, c'est la lampe électrique à incandescence développée en 1879 par l'anglais Joseph Swan pour le compte de l'entreprise Edison Electric Light Co qui va s'imposer. Cette technologie a l'intérêt par rapport à la lampe à arc de pouvoir être utilisée à l'intérieur des bâtiments car sa luminosité est moins forte.

A cette époque, les réseaux électriques sont principalement développés à une échelle locale et généralement dans les centres urbains. Cette échelle se justifie au niveau technique en raison de l'impossibilité de transporter l'énergie électrique sur de longues distances. Le courant continu popularisé par Edison est à l'époque la norme technique qui prévaut. Le système de distribution à courant continu était constitué de centrales électriques qui alimentaient des câbles de distribution ainsi que les appareils des usagers branchés sur ces derniers. Ce système ne fonctionnait que sur de petites distances car le courant continu entraînerait trop de perte pour être transportée sur de longues distances ¹⁸⁶[Bouttes, 1990]. De plus, les réseaux sont majoritairement concentrés dans les centres urbains car la densité de population est suffisante pour permettre la rentabilité des infrastructures [Gardey, 1993 ; Beltran et al, 2000]. L'installation des infrastructures ayant un coût élevé, les zones de fortes demandes sont privilégiées afin d'assurer l'amortissement des investissements le plus tôt possible [Noam, 1992 ; Curien, 2005].

Durant cette période, l'organisation des compagnies électriques est variable d'un pays à l'autre. Deux trajectoires principales se dessinent en Europe selon la spécificité des institutions de chaque pays. Le premier type de trajectoire est caractérisé par des pouvoirs locaux forts. Des pays comme le Royaume-Uni, l'Allemagne ou la Belgique ont des municipalités qui veulent prendre le contrôle de ce nouveau service urbain. Les municipalités entrent en concurrence avec les entreprises privées, limitant leurs possibilités d'actions et donc par conséquent l'émergence de grands monopoles privés. Le second type de trajectoire est pris dans les pays où les pouvoirs locaux sont faibles. C'est le cas notamment en France. Le développement des nouveaux réseaux d'infrastructures est alors laissé aux firmes privées. Ces nouvelles compagnies se concurrencent dans les zones urbaines afin d'accroître leur territoire d'action. Cette situation débouche sur des formes juridiques très concurrentielles où n'il y a pas de monopoles locaux et où les prix ne sont pas encadrés [Finon et al, 1996].

A cette période, l'électricité peut donc être considérée comme une innovation disruptive entraînant un changement tant technique qu'organisationnel : *« Par ses multiples applications, par les bouleversements qu'elle impliquait dans l'organisation de la consommation et de la production, l'énergie électrique est apparue à la fin du XIXème siècle comme l'élément centrale d'un nouveau système technologique et d'une nouvelle logique organisationnelle. »*[Bouneau et al, 2007, p18].

¹⁸⁶ L'intérêt du courant alternatif sur le courant continu est de pouvoir élever la tension pour transporter l'électricité sur de longues distances sans avoir de pertes réductrices et la ramener à basse tension aux points de consommation. Cet avantage entraîna la naissance de l'architecture centralisée des réseaux électriques. Le retour du continu depuis une vingtaine d'années s'explique par des innovations technologiques majeures et l'essor de l'utilisation du courant continu dans la production photovoltaïque, éolienne, l'utilisation des batteries, le transport électrique de très haute puissance. L'essor du courant continu permet des gains grâce à la disparition des coûts des conversions et de la simplification des schémas de distribution. L'utilisation du courant continu permet également une amélioration de l'équilibre du réseau.

2.3.2. Seconde période 1910-1930 : l'essor de l'électricité

Un premier tournant dans l'évolution de l'industrie électrique est amorcé lors de l'entre-deux guerres. Cette période est caractérisée par un décollage de l'usage de l'électricité rendu possible grâce au progrès technique dans les systèmes de production et de transport de cette énergie.

La « guerre des courants »¹⁸⁷ qui s'est achevée quelques années plus tôt a vu le courant alternatif s'imposer grâce à ses avantages techniques et économiques. L'électricité peut dorénavant être transportée sur de longues distances à moindre coût. Les réseaux électriques s'étendent alors en passant d'une maille locale à une maille régionale grâce au développement des interconnexions [Bouttes, 1990 ; Salsbury, 1995]. Cette avancée technique va permettre à l'électricité de s'insérer progressivement dans la consommation courante et de devenir incontournable dans l'industrie. Elle devient également un enjeu politique comme par exemple en France où l'Etat porté par un idéal politique de modernisation et de volonté d'enrayer l'exode rural va inciter à électrifier les zones rurales [Coutard, 2001 ; Bouneau, 2006].

Durant cette période, on constate une institutionnalisation des monopoles qui sous-tend une volonté de limiter les coûts de transaction. Cette institutionnalisation du monopole est justifiée par une vision de plus en plus répandue, selon laquelle l'électricité est un vecteur de modernité et de progrès social dont chacun peut et doit pouvoir profiter. La reconnaissance de la distribution comme service public avec l'instauration de régime de concession ou d'autorisation en France est un exemple de cette nouvelle façon de percevoir l'énergie électrique. En Allemagne, les municipalités participent à la création d'entreprises régionales de propriété mixte en échange de la promesse de redevances pour les communes. Les régions comme la Bavière, la Prusse et la Saxe ainsi que l'Etat central se sont fortement impliquées dans le développement de ces entreprises régionales afin que l'électricité soit présente dans le pays [Finon et al, 1996 ; Bento, 2012].

D'autres évolutions institutionnelles apparaissent. Elles sont liées à la nécessité de corriger certains dysfonctionnements issus d'arrangements antérieurs entre les acteurs et basés sur le partage de la rente ou sur la constitution des actifs spécifiques. Celles-ci apparaissent dans les deux types de trajectoires décrites auparavant. Ainsi, en raison des défaillances des entreprises privées et sous l'impulsion du socialisme municipal, il est décidé de légiférer en France afin de permettre aux municipalités qui le souhaitent de prendre la main sur les réseaux locaux en 1906. Aux Etats-Unis, il y a une demande forte de la part d'entreprises et de groupes de citoyens pour mettre en place une réglementation au niveau des

¹⁸⁷ La guerre des courants est une controverse technique et industrielle qui s'est déroulée aux Etats-Unis dans les années 1880. Elle oppose Thomas Edison, promoteur du courant continu pour le transport et la distribution d'électricité à George Westinghouse et Nikola Tesla, investigateurs du courant alternatif. Cette guerre se terminera après l'épisode des installations des chutes du Niagara (1896) qui constituera une étape clé dans l'acceptation du courant alternatif par le public.

Etats en raison du constat des déficiences de contrôle par les municipalités, qui s'expliquent par la corruption et les surenchères électorales [Finon et al, 1996].

Il est également généralisé une réglementation tarifaire fondée sur les coûts. L'objectif visé est de limiter les pratiques discriminatoires et ainsi de partager plus efficacement la rente entre les différents acteurs (actionnaires, entreprises, concessionnaires, collectivités locales, consommateurs). Ce type de régulation doit permettre de limiter les pratiques discriminatoires et de partager la rente de façon plus équitable entre les acteurs. Les Etats s'emparent du rôle de contrôleur lorsqu'ils perçoivent l'intérêt en termes de politique économique. La norme d'équité territoriale est alors établie et se développent des cadres institutionnels assurant la diffusion des réseaux en zone rural quand les possibilités internes de subventions croisées¹⁸⁸ sont insuffisantes [Bouttes, 1990 ; Finon et al, 1996].

Ainsi, l'électricité passe au début du vingtième siècle de simple innovation technique illustrant la modernité avec l'éclairage public à un des moteurs de la croissance. Tout comme les chemins de fer, elle devient un moyen de décloisonner les territoires en passant de la maille locale à la maille régionale. Les acteurs de l'électricité y voient dès lors la possibilité de diversifier les usages liés à l'électricité à différents domaines (domestique, industriel, travail agricole,...) et d'étendre la maille du réseau à des échelles plus importante [Gardey, 1993 ; Bouneau 2004 ; Bouneau et al, 2007].

2.3.3. Troisième période 1930-1980 : la consolidation

Un second tournant apparaît avec le développement des industries de réseau nationales qui débute durant l'entre deux guerre puis lors de la sortie de la Seconde Guerre Mondiale. Les pays européens, dans une logique de reconstruction et portés par des gouvernements forts, formulent la volonté d'avoir des réseaux électriques performants en les régionalisant, puis en les nationalisant grâce au développement de l'interconnexion les réseaux techniques.

Cette période est caractérisée par la présence de progrès techniques au niveau des activités de transport et des systèmes de production grâce à des coûts qui se réduisent. L'électricité peut désormais être transportée sur de longues distances dans des conditions économiques intéressantes ce qui permet une expansion géographique des réseaux locaux à un niveau national en développant l'interconnexion [Bouttes, 1990 ; Bento, 2012]. La France développe alors le premier réseau de transport haute tension avec 22,5 km de lignes pour 1 000 km². Elle est suivie par l'Allemagne avec 18 km, le Royaume-Uni avec 15 km et les Etats-Unis avec 5 km [Bouneau et al, 2007]. L'essor des réseaux de transport est à mettre en parallèle avec le développement des capacités de production permettant une augmentation de leur taille unitaire. Il y a aussi l'apparition de nouveaux types de capacité de production comme les

¹⁸⁸ Les subventions croisées apparaissent quand la concurrence sur un marché est faussée en raison de la présence de flux financier extérieur au marché étudié.

turbines ce qui permet de sortir définitivement de l'ère de la machine à vapeur [Bouttes 1990 ; Bento, 2012].

A partir de l'entre-deux guerres, les acteurs de réseaux formulent le souhait de créer un réseau haute-tension à travers l'Europe. Il faudra attendre le début des années 1950 pour sa réalisation en raison des nombreux freins techniques, organisationnels et économiques (réseaux cloisonnés au niveau national, liaisons électriques limitées à certaines régions, harmonisation des normes,...). A la fin des années 1940, seule 2% de l'électricité totale consommées en Europe est transmise par des connexions transnationales. L'échange, d'intermittent et destiné à pallier des situations d'urgence, devient progressivement permanent au cours des décennies suivantes grâce en particulier au développement du réglage de la fréquence-puissance qui constitue une véritable révolution technique dans le domaine¹⁸⁹. Les pays européens sont progressivement interconnectés durant toute cette période¹⁹⁰ [Bouneau et al, 2007].

Ces innovations qui nécessitent de lourds investissements malgré la réduction des coûts provoquent l'émergence de modèles centralisés sur l'ensemble du territoire européen. Les activités de production, de transport, de distribution et de fourniture sont alors intégrées dans une même entreprise et/ou nationalisées. Au Royaume-Uni, l'*Electricity Act* de 1926 annonce la création d'une entreprise publique ayant pour rôle de développer le réseau de transport à travers le pays (*The Grid*). En Espagne, ENDESA (Empresa Nacional de Electricidad S.A) fondée en 1944 par l'Instituto Nacional de Industria, devient entre 1945 et 1982 la principale société espagnole de production et d'électricité. En France, la création d'Electricité De France et Gaz De France fait suite à la promulgation des lois de nationalisation de l'électricité et du gaz en 1946 qui ont été justifiées par la nécessité de reconstruire les infrastructures détruites lors de la Seconde Guerre Mondiale.

Le modèle du monopole public verticalement intégré se diffuse. Il se caractérise par quelques grands principes. La nationalisation du capital de ces industries permet aux entreprises de réseaux de prendre en considération d'autres valeurs que le profit. La valeur défendue est généralement l'universalité conceptualisée en Europe par le service public (France), les utilities (pays Anglo-saxons) ou le Service Intérêt Général (SIG). Ils ne concernent pas que les réseaux électriques mais toutes les industries de réseaux comme les réseaux de télécommunications, de transport ou de gaz. Ces services doivent être perçus avec un certain niveau de qualité pour un niveau de coût abordable par tous les usagers quel que soit leur condition de ressources. De plus, les activités sont verticalement intégrées dans les entreprises

¹⁸⁹ La norme de réglage de fréquence-puissance établit à l'époque est encore en cours actuellement. La fréquence est donc toujours de 50 Hertz.

¹⁹⁰ Les pays européens dont il est fait référence ici sont les membres fondateurs de l'Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité (UCPTE) qui sont l'Autriche, la Belgique, la France, l'Italie, le Luxembourg, les Pays-Bas, la R.F.A et la Suisse). Ce groupe s'agrandit dans les années soixante avec l'arrivée de l'Espagne, de la Grèce, du Portugal et de la Yougoslavie. Ce pool avait pour but de développer la coopération entre les opérateurs de réseaux en prenant exemple sur le modèle américain. Depuis 2008, l'UCPTE s'est fondue dans le Réseau des Gestionnaires de Réseaux de Transport d'Electricité (ENTSO-E) qui regroupe 41 gestionnaires de réseaux de transport de 34 pays européens différents.

afin d'éviter que des goulots d'étranglements ne viennent bloquer le développement de l'infrastructure et de la fourniture. C'est aussi un moyen de lutter contre le gâchis dont résulterait le doublement des réseaux d'infrastructures. Dans une optique de service public, ces activités verticalement intégrées permettent de réaliser des subventions croisées par lesquelles une activité permet de générer une rente qui sera utilisée pour conquérir des parts de marché ou compenser des pertes sur d'autres segments d'activités.

L'essor des réseaux électriques bien que ralenti pendant la seconde guerre mondiale se poursuit durant toute cette phase de consolidation. L'infrastructure technique ne cesse d'être perfectionnée, que ce soit pour ce qui des réseaux de transport et de distribution qui modèle les territoires nationaux mais également au niveau des systèmes de production qui sont de plus en plus importants et centralisés (centrale nucléaire, centrale thermique,...). Au niveau organisationnel, bien que chaque pays garde ses spécificités, la tendance est également à la centralisation et à la hiérarchisation des activités électriques.

2.3.4. Quatrième période 1980-1995 : Les débuts de la dérégulation

A partir des années 1980, une nouvelle étape est franchie dans les choix des modes de régulation des activités énergétiques sur le territoire européen. De manière autonome, des pays vont commencer à engager dès les années 1980 un processus de dérégulation et re-régulation. Il s'agit notamment du Royaume-Uni et de la Norvège. Ils seront suivis dans les années 1990 par la Finlande et la Suède. Ils anticipent et préfigurent, en ce sens, l'application de la volonté de l'Union Européenne d'ouvrir à la concurrence certaines activités de réseaux¹⁹¹.

Les réformes dans ces pays résultent d'un ensemble d'évènements qui vont amener à une remise en question des modèles hiérarchisés et généralement publics. A partir des années 1970, on constate une hausse générale des prix de l'électricité. Cette hausse est due à la fois à une saturation du progrès technique qui a fait baisser les économies d'échelles attendues et aux crises pétrolières de 1973 et de 1979 qui ont témoigné de la dépendance de la production électrique aux combustibles fossiles. De plus, cette période est marquée par le déploiement de l'idéologie néolibérale en économie. Les idées liées à ce courant impactent les industries de réseau, malgré leur statut particulier dans le système économique. Il est alors considéré que les institutions régulant ces activités sont défaillantes et n'encouragent pas à la baisse des prix dans le secteur. Il faut donc réintroduire de la concurrence afin de réduire les coûts et faire baisser les prix [Bouttes, 1990 ; Glachant, 2001].

¹⁹¹ La justification repose principalement sur le Traité de Rome de 1954. Cette réforme s'inspire également de celle initiée quelques années plus tôt dans les télécommunications.

La diversité des cadres technico-économiques, politiques et historiques des différents pays rend très difficile la réalisation d'une typologie des industries électriques au cours de cette période. On distingue néanmoins quatre grandes configurations. La première est celle où le système électrique est largement intégré verticalement dans le pays avec un capital très majoritairement public. C'est le cas de la France, de l'Irlande, de la Grèce et de l'Italie. Un deuxième cas est celui de pays où le système électrique est également verticalement intégré mais dont le capital est privé ; c'est le cas de la Belgique. La troisième situation est celle dans laquelle le système électrique du pays est éclaté ou dé-intégré, à différents niveaux de la chaîne de valeur selon les pays, mais où le capital reste à dominante publique ; c'est le cas de l'Allemagne, de l'Autriche, du Danemark ou encore de l'Espagne. Enfin, un quatrième cas est celui où le système électrique est largement dérégulé. Dans ces pays, la production indépendante est possible et l'accès des tiers au réseau¹⁹² est appliqué. Généralement, la déréglementation s'accompagne d'une privatisation du capital mais ceci n'est pas obligatoire. Les pays concernés sont l'Angleterre, la Finlande, les Pays-Bas, le Portugal et la Suède [Percebois, 1997].

Dans un même temps, la construction d'une Europe interconnectée se poursuit grâce au développement d'un réseau de transport international dense où les échanges s'accroissent d'années en années. En 1991, les échanges régis par les membres de l'UCPTE (*Union for the Co-ordination of Production and Transmission of Electricity*) représentent près de 140 milliards de kilowattheure soit 9% de la consommation totale des pays interconnectés. Ce réseau qui dessert plus de 280 millions de consommateurs est le système synchronisé le plus vaste au monde. Les années 1990 sont également marquées par l'effondrement du bloc soviétique. Cette chute va permettre d'envisager de synchroniser le bloc de l'Ouest européen avec les anciens territoires communistes. Toutefois, la synchronisation ne pourra se faire avant la fin des années 1990 en raison de l'absence de connexion à très haute tension en alternatif entre les deux zones [Bouneau et al, 2007].

Cette période est donc marquée par l'idée qu'une évolution du système organisationnel est nécessaire pour améliorer le fonctionnement et réduire les coûts du système électrique. Le modèle de la hiérarchie complète ne paraît plus aussi pertinent pour réguler la chaîne de valeur électrique. L'introduction de la concurrence dans les industries de réseau devient alors incontournable. Le développement de l'interconnexion internationale marque également la volonté d'avoir des réseaux de plus en plus liés illustrant la volonté de créer un marché unique et une Europe de l'électricité.

¹⁹² L'Accès au Tiers Réseaux est un droit d'accès aux réseaux de transport et de distribution pour l'exécution des contrats d'approvisionnement des usagers sur les marchés de gros et de détails.

2.3.5. Cinquième période 1995-2010 : Ouverture des marchés électriques à la concurrence

La création de l'Union Européenne et son principe fondateur de libre-échange des biens et personnes remet en cause la politique de centralisation des infrastructures à l'échelle nationale. L'article 90 du Traité de Rome de 1957 va être à l'origine de l'ouverture des marchés de l'électricité et du gaz près de quarante ans plus tard. Cette ouverture repose sur le constat selon lequel les missions d'intérêt général des industries de réseau ne sont pas incohérentes avec la mise en place d'activités concurrentielles. L'ouverture de ces marchés va se faire progressivement à partir de 1986 avec une accélération dix ans plus tard lors du vote des premières directives de libéralisation des marchés électriques et gaziers¹⁹³.

Plusieurs raisons vont pousser à la remise en cause des modèles traditionnels d'organisation du secteur électrique à cette époque, cela en privilégiant la dérégulation. Cette dérégulation va être justifiée par un ensemble d'arguments juridiques et économiques. D'un point de vue juridique, les raisons évoquées par la Commission Européenne pour libéraliser se réfèrent à des articles du Traité de Rome de 1954¹⁹⁴. Bruxelles remarque ainsi une discrimination entre les usagers européens en raison de prix de l'électricité très différents d'un Etat à l'autre. Si cette hétérogénéité peut s'expliquer par des dotations en ressources naturelles et des choix de mix énergétiques différents entre les pays, la Commission remarque cependant qu'il y a un manque d'échange entre les Etats, en raison non pas de problèmes techniques mais de limites institutionnelles basés sur la présence de nombreux monopoles [Percebois, 1997 ; Commissariat Général du Plan, 2000 ; Derdevet, 2003].

Au niveau économique, les pratiques monopolistiques sont critiquées ouvertement par Bruxelles dont l'orientation en matière de politique économique est libérale à cette époque. Premièrement, le progrès technique dans le secteur modifie la nature des services publics en multipliant les possibilités de concurrence entre zones. Non seulement, l'électricité peut être transportée sur de longues distances et à très haute tension mais également des petites centrales décentralisées arrivent à produire un kilowattheure aussi compétitif que les grandes centrales. Deuxièmement, les monopoles, en particulier les monopoles publics, sont considérés comme moins efficaces que les organisations relevant du jeu de la concurrence. Ce manque d'efficacité serait dû au non obligation de recherche de l'efficacité maximale et à des lourdeurs organisationnelles. Troisièmement, les autorités concédantes subissent des asymétries d'information ayant pour conséquence une impossibilité d'exercer un contrôle sur le

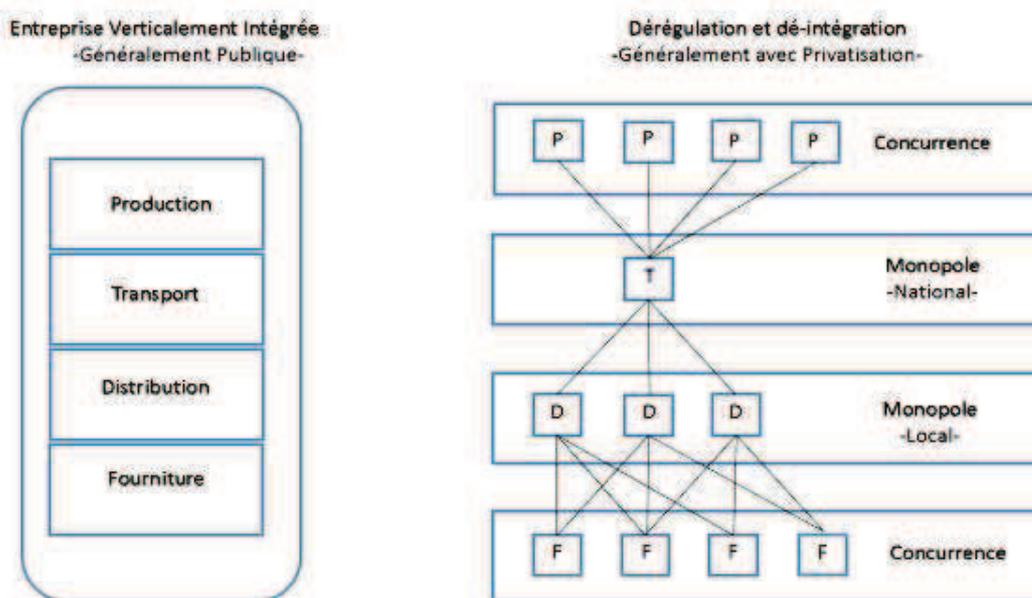
¹⁹³ Directive 96/92/CE du parlement européen et du conseil du 19 décembre 1996 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité

¹⁹⁴ Il peut être référé à trois articles présents dans le Traité de Rome de 1954. Il s'agit de l'article 30 qui est relatif aux restrictions quantitative et qualitative aux importations, de l'article 37 qui est relatif à la limitation des discriminations entre les ressortissants des Etats Membres et enfin de l'article 90 qui relatif à la gestion des services d'intérêt économique général par rapport aux dispositions générales du Traité de Rome.

concessionnaire. Enfin, les monopoles publics ont tendance à réaliser des subventions croisées en favorisant les usagers mobiles par rapports aux usagers captifs [Percebois, 1997].

Les Etats membres sont alors dans l'obligation de transposer plusieurs directives dans leur juridiction nationale durant les années 2000, ce qui entraîne des évolutions importantes dans leur schéma d'approvisionnement énergétique¹⁹⁵. Premièrement, il est demandé une ouverture des marchés avec accès libre aux réseaux pour les clients éligibles¹⁹⁶. Deuxièmement, une scission est imposée entre les différentes activités de réseau avec la distinction entre les activités de réseaux régulées, pour le transport et la distribution, et les activités de réseaux dérégulées, pour la production et la fourniture d'électricité. Cette séparation des activités doit être au minimum comptable voire juridique pour les activités de transports et de distribution [Figure 37 : Impact de la libéralisation sur les industries de réseaux]. Troisièmement, il est demandé la mise en place de gestionnaires de réseaux de transport dans chaque pays ou régions. Ceux-ci sont chargés d'assurer le bon fonctionnement des systèmes électriques ainsi que l'acheminement de l'énergie électrique en toute indépendance par rapport aux producteurs afin d'éviter des situations discriminatoires [Derdevet, 2003].

Figure 37 : Impact de la libéralisation sur les industries de réseaux [Construction de l'auteur]

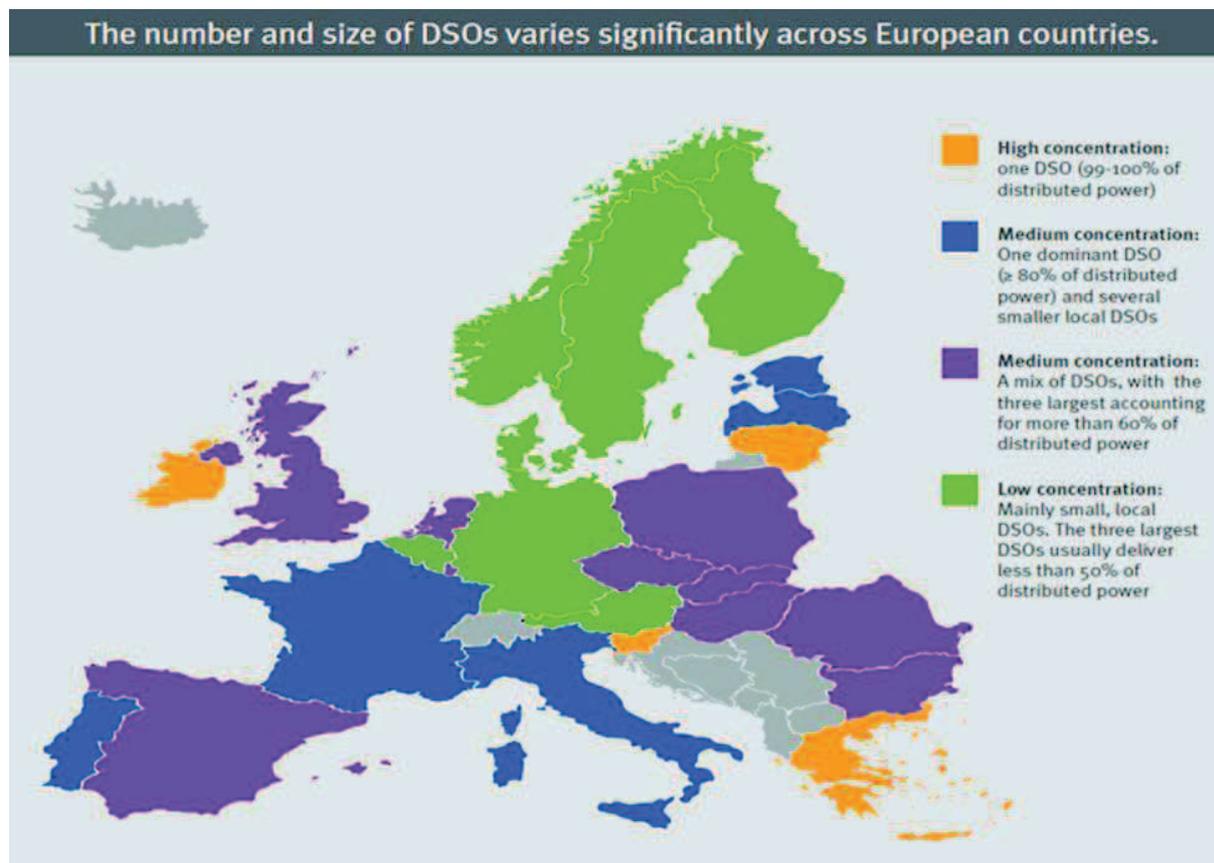


¹⁹⁵ Directive 96/92/CE du parlement européen et du conseil du 19 décembre 1996 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité, Directive 2003/54/CE du Parlement européen et du Conseil, du 26 juin 2003 concernant les règles communes pour le marché intérieur de l'électricité, et Directive 2009/72/CE du Parlement Européen et du Conseil du 13 juillet 2009 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité.

¹⁹⁶ Le degré minimum d'ouverture du marché est réalisé de manière progressive. Ainsi, il est fixé à 30% de la consommation nationale en 2000 et à 35% en 2003.

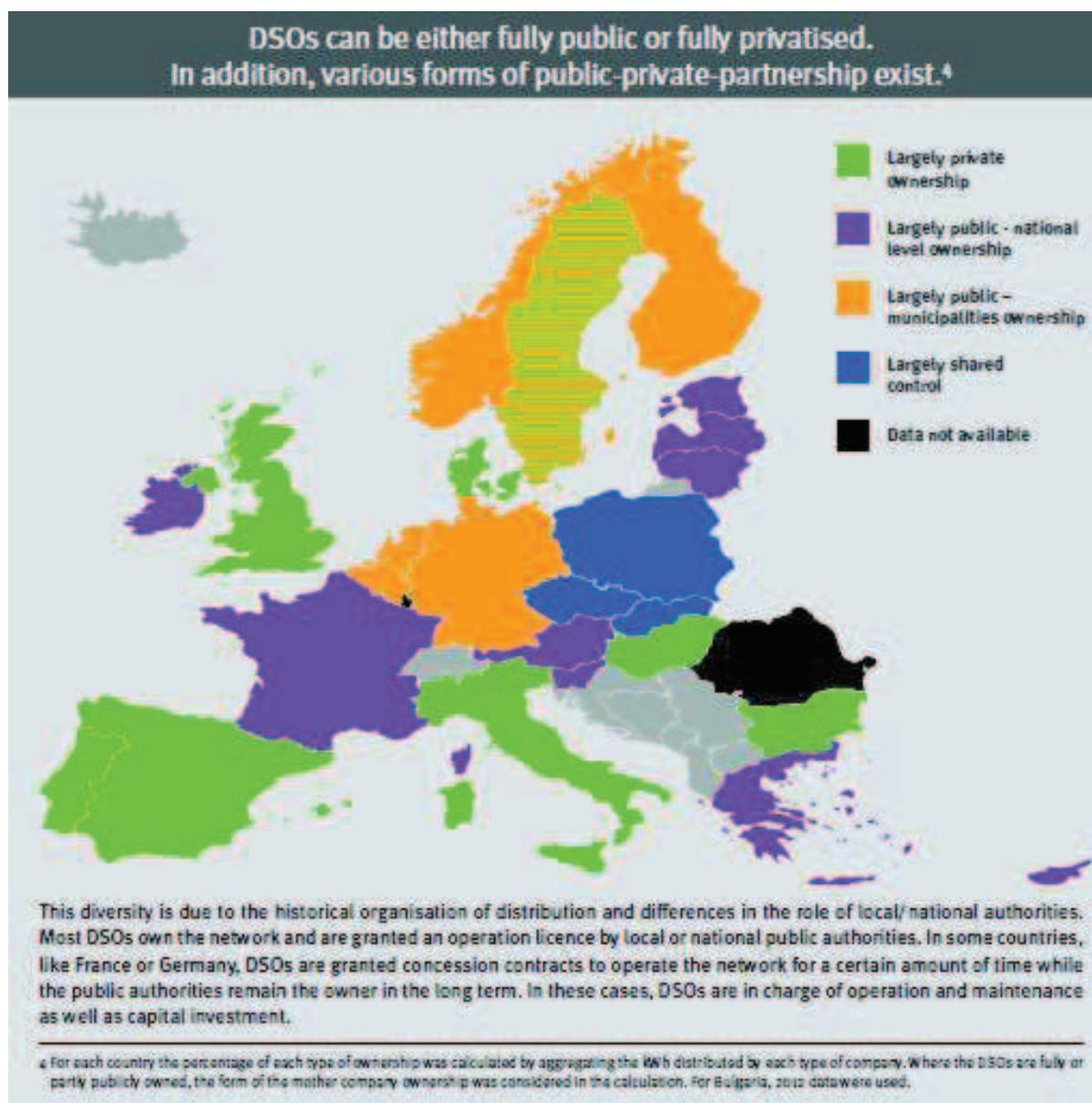
L'ouverture des marchés électriques refonde progressivement la structure des opérateurs de réseaux notamment en ce qui concerne la distribution. La structure des opérateurs de réseaux de distribution reste néanmoins très diversifiée selon les Etats européens. Des opérateurs privés sont présent au Royaume-Uni, en Espagne, au Portugal, en Italie, en Hongrie et en Bulgarie. Tandis que des opérateurs publics sont présents en France, en Allemagne et en Autriche. Aujourd'hui, en Europe, les réseaux de distribution sont gérés de manières très différentes et il est réellement difficile de trouver un modèle commun dans ce qui peut être considéré comme un « patchwork » organisationnel [Carte 11 : Nombre et taille des opérateurs de système de distribution en Europe] [Eurelectric, 2012a].

Carte 11 : Nombre et taille des opérateurs de système de distribution en Europe –source : Eurelectric, 2012, "Power Distribution in Europe : Facts and Figures", 26 slides, slide 7-



Toutefois, une majorité d'Etats membres possède un système avec une forte concentration de l'industrie de distribution. Ainsi, en Irlande, en Slovénie, en Grèce et en Lituanie un seul gestionnaire de distribution est présent. La France, le Portugal, l'Italie, l'Estonie et la Lettonie ont quant à eux un gestionnaire de réseaux dominant faisant ressembler le marché à un quasi-monopole. A l'opposé, l'Allemagne, la Belgique, l'Autriche, le Danemark, la Norvège, la Suède et la Finlande ont des modèles où les trois plus grands gestionnaires de réseaux de distribution représentent moins de 50% de l'électricité distribuée. Cette variété de mode de gestion des industries de réseaux de distribution d'électricité et leur difficulté à s'ouvrir au changement s'explique par l'histoire [Carte 12 : Types d'opérateur de systèmes de distribution] [Eurelectric, 2012a].

Carte 12 : Type d'opérateur de système de distribution -Eurelectric, 2012,"Power Distribution in Europe : Facts and Figures", 26 slides, slide 8-



Les années 2000 marquent donc un changement organisationnel profond dans la gestion de l’approvisionnement énergétique. Dans le même temps, la prise en compte des problématiques liées au changement climatique pousse les institutions européennes à prendre des mesures sans précédent pour limiter les émissions de gaz à effet de serre des Etats membres. Ainsi, le Paquet Energie-Climat adopté par le Parlement Européen en 2008 fixe des objectifs chiffrés pour réaliser la transition énergétique à l’horizon 2020 : une réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990, une croissance de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique pour atteindre 20% en 2020 et une amélioration de l’efficacité énergétique de 20%. La production issue des énergies renouvelables devient alors incontournable pour chaque Etat et elle est encouragée notamment par la Directive de 2009 relative à la promotion de l’utilisation de l’énergie produite à partir de sources renouvelables.

2.3.6. Sixième période depuis 2010 : Interconnexion et décentralisation

Les enjeux de la transition énergétique ont été progressivement intégrés dans les politiques européennes au fil des ans. Le Paquet Energie Climat de 2008 qui annonce des objectifs de promotion des énergies renouvelables, de réduction des émissions carbone et de maîtrise de la demande énergétique à l'horizon 2020 s'accompagne d'un double mouvement d'interconnexion internationale et de décentralisation de l'approvisionnement énergétique.

L'Interconnexion : Une Europe de l'énergie à construire

L'interconnexion des réseaux électriques à l'échelle européenne est donc devenue une réalité vers la fin du vingtième siècle, poussée par le souhait d'avoir un marché européen intérieur concurrentiel, intégré et fluide permettant d'encourager la circulation des flux vers les territoires de l'Union où cela était nécessaire. Actuellement, l'extension des réseaux de transport et leur interconnexion se poursuit et permet d'intégrer les régions limitrophes comme les pays de l'ex-bloc soviétique ou la zone Méditerranéenne [Bouneau et al, 2007].

C'est pourquoi, en 2010 la Commission Européenne annonce dans le Schéma Directeur sur l'Energie établi pour 2020 sa volonté de moderniser les réseaux électriques de transport afin de satisfaire une demande en hausse. Cette croissance de la demande est due au développement des usages électriques (TIC, domotique), à la nécessité de maintenir un bon niveau de sécurité énergétique à l'échelle européenne ainsi qu'au besoin d'assurer le transport et l'équilibre de la production électrique d'origine renouvelable localisée loin des centres de consommation [CE, 2010a, 2012].

Afin de réaliser ces ambitions, il est prévu à l'horizon 2020, un investissement de plus de 1 000 milliards d'euros dans les réseaux énergétiques pour préparer ces derniers à répondre aux objectifs de 2050 (décarbonation, nouvelles technologies de transport et stockage, transport d'énergies produites en Europe et ailleurs). Plus de 200 milliards d'euros d'investissements sont attendus pour les réseaux électriques de transport entre 2011 et 2050 ainsi que 13,04 milliards d'euros pour développer les réseaux transfrontaliers [CE, 2010a ; Von Hirschhausen et al, 2014]. Ces investissements serviront à financer les futures « autoroutes électriques », les réseaux de raccordements des installations de production en mer, le renforcement du raccordement au niveau de l'axe sud-ouest (Espagne-France), de l'axe sud-est (Europe centrale et orientale) et l'intégration du marché Balte [CE, 2010a].

La décentralisation : Evolution de la relation entre l'opérateur de réseau et le client final

Si les réseaux de transport tendent à être renforcés dans les prochaines années, les réseaux de distribution ne sont pas en reste. En effet, ils jouent un rôle de plus en plus important dans l'atteinte des objectifs de transition énergétique. Une large part de l'essor des énergies renouvelables se fait à un niveau décentralisé à partir des réseaux basse ou moyenne tension. C'est pourquoi, l'Union Européenne souhaite développer les réseaux de distribution qui assurent la connexion des sources décentralisées et sont supposés absorber la plus grande part des investissements prévus dans les réseaux dans les prochaines années. Il est ainsi prévu qu'ils captent plus des deux tiers des investissements de 1 000 milliards d'euros prévus d'ici 2050 [CE, 2010a ; Eurelectric, 2012a ; Von Hirschhausen, 2014].

De plus, le développement des systèmes locaux d'approvisionnement énergétique avec la présence de Ressources Energétiques Distribuées (*Distributed Energy Resources*) comprenant les capacités de production renouvelables, le stockage local, et les véhicules électriques nécessite des changements dans la gestion techniques des infrastructures électriques. Les enjeux résultent en partie d'une montée des incertitudes liées à la variabilité de la demande et au caractère intermittent de la production renouvelable. La gestion des infrastructures de réseaux doit donc évoluer avec une mutation des systèmes de gouvernance des organisations et l'évolution des coûts de transaction pour s'adapter aux nouvelles conditions [Eurelectric, 2012a ; Derdevet, 2015 ; Derdevet, 2016].

2.4. Vers un nouveau dispositif institutionnel dans les industries énergétiques : infrastructures techniques et institutions dans la transition

Les objectifs de la transition énergétique impliquent une nouvelle structuration des schémas d'approvisionnement énergétique à l'échelon local. La mise en œuvre d'une nouvelle structuration peut être comparée aux « crises qui ébranlent la structure dominante apparaissant dans le système jusqu'à un point de rupture entraînant l'émergence d'une nouvelle structure » [Loorbach et al, 2010]. Ces défis entraînent une remise en question des activités des opérateurs de réseaux de transport et de distribution électrique. Les interrogations soulevées pour le système de régulation par la décentralisation technique peuvent également s'appliquer à l'approvisionnement en chaleur [Chapitre 3, Partie 3].

Transition technique et transition institutionnelle

L'étude historique du développement des réseaux électriques en Europe nous a permis d'identifier le lien qu'entretiennent les infrastructures et les institutions. L'évolution des systèmes de régulation à travers l'histoire a souvent été étudiée sans prendre en compte les infrastructures et leur évolution. Pourtant, les infrastructures et les systèmes de gouvernance entretiennent des relations qui les impactent mutuellement et qui peut être caractérisée comme de la coévolution [Von Tunzelmann, 2003].

L'enjeu de la coévolution est de garantir la performance des systèmes techniques et organisationnels dans un contexte de transformation institutionnelles grâce à la complémentarité de ces deux systèmes et à leur coordination. Pour ce faire, il est primordial de s'intéresser aux fonctions critiques des infrastructures et des organisations, fonctions qui évoluent aujourd'hui avec la décentralisation de l'approvisionnement énergétique. Il faut donc étudier l'évolution des transactions critiques des infrastructures assurant le bon fonctionnement du système, quelle que soit l'évolution technologique et le mode de régulation employé [Künneke et al, 2010].

L'accomplissement de la transition technique sera réalisé si l'alignement des fonctions critiques avec les modes d'organisation est atteint. Or, la spécificité de chaque système technique se traduit par des transactions critiques spécifiques. C'est pourquoi, le succès de la restructuration des infrastructures et de l'intégration des innovations techniques dépend également des arrangements institutionnels existants [Künneke et al, 2010].

Processus institutionnel pour un nouveau mode de régulation de l'approvisionnement énergétique local

La réflexion autour de la mise en place d'un nouveau mode de gestion des infrastructures de réseau devient obligatoire avec la décentralisation des systèmes de production au niveau local. Le problème soulevé est alors de déterminer comment cette évolution technique va impacter les structures des organisations existantes.

Afin d'envisager un mode d'organisation qui permettrait d'augmenter l'efficacité dans la gestion du réseau, un processus de destruction/reconstruction des industries de réseaux peut être employé comme cadre de lecture pour montrer le cheminement nécessaire à son émergence [North, 1994 ; Finon et al, 1996]. La première étape correspond à une « phase de gestation » dans laquelle des dysfonctionnements, qu'ils soient réels ou non, sont identifiés comme amenant des remises en question du fonctionnement du système en place. C'est le cas par exemple lorsque la gestion des opérateurs de système de distribution apparaît comme trop passive pour permettre un bon fonctionnement du réseau en situation de raccordement des énergies renouvelables au réseau. Les acteurs en place vont faire face à un ensemble de difficultés techniques et organisationnelles qu'ils vont chercher à résoudre.

La phase deux du processus correspond à la « reconstruction ». Durant cette phase, les changements de règles vont se faire de manière séquentielle. Ces changements institutionnels vont impacter les structures des organisations en les modifiant ou en créant de nouvelles formes organisationnelles ou de nouvelles relations organisationnelles [North 1994 ; Finon et al, 1996]. Cette phase correspond à une période d'expérimentation au cours de laquelle les anciens modes d'organisation et les nouvelles propositions peuvent se faire concurrence. Aucun modèle n'est alors figé. Progressivement, un modèle va apparaître comme étant le mieux susceptible de répondre aux attentes dans le système institutionnel donné. Indépendamment du constat de la nécessité d'une évolution des organisations, l'impact du sentier de dépendance (*path dependance*) sur ces dernières ne doit pas être négligé [North, 1994].

La décentralisation des systèmes techniques de l'énergie vise en particulier un développement de la production des énergies renouvelables à l'échelle locale. Il a été vu dans les chapitres précédents que ces capacités de production étaient dans la plupart des cas raccordées aux réseaux classiques de distribution. Par conséquent, le mode de régulation des réseaux présents dans les écoquartiers, que ce soit pour la chaleur ou pour l'électricité, semble actuellement inchangé en ce que les capacités de production sont raccordées aux réseaux classiques et où ce sont les acteurs historiques qui gèrent les flux. Néanmoins, la décentralisation des systèmes techniques de l'énergie fait émerger le concept d'autonomie énergétique, qui peut sous-entendre une moindre dépendance aux réseaux historiques. La possibilité d'envisager de nouvelles organisations pour assurer la régulation du réseau sera proposée dans la Partie 3. La question d'une nouvelle régulation des transactions entre les acteurs de la chaîne énergétique devient alors centrale.

3. La dynamique de décentralisation technique vue en termes d'analyse des coûts de transaction

Outre les modes de régulation, les relations contractuelles entre les acteurs présents sur la chaîne de valeur vont être impactées par la décentralisation des systèmes d'approvisionnement énergétique. Celle-ci modifie les relations entre acteurs de la chaîne énergétique ce qui entraîne un désalignement entre les fonctions critiques qu'entretiennent les acteurs avec les infrastructures [Künneke et al, 2010]. L'utilisation de la théorie des coûts de transaction va apporter des clés de lecture afin de comprendre quelles sont les évolutions à envisager dans les relations entre les acteurs, tout en garantissant les fonctions critiques nécessaires au bon fonctionnement des systèmes d'approvisionnement énergétiques à l'échelle du quartier [Williamson, 2007].

3.1. La théorie des coûts de transaction

Le point de départ de l'analyse néo-institutionnelle est le constat réalisé par Ronald Coase dans *La Nature de la Firme* lorsqu'il remarque qu'à côté du marché, il existe des « îlots de pouvoir conscient dans un océan de coopération inconsciente ».¹⁹⁷ Ces îlots ne sont pas autres choses que des firmes considérées comme des boîtes noires dans l'analyse économique classique. Leur existence serait due à une incapacité du seul mécanisme des prix à coordonner les agents économiques. Cette défaillance du marché s'explique par l'existence de coûts surgissant lors de l'utilisation du mécanisme des prix (coût de recherche du prix adéquat, coût de négociation et coût de conclusion du contrat). Il existe donc des coûts associés à l'utilisation du système des prix et ces coûts sont définis comme les coûts de transaction. L'existence de ces coûts peut rendre le marché non efficient, il est alors préférable d'avoir des firmes.

¹⁹⁷ Citation de Ronald Coase empruntée à Sir Denis Holmes Robertson, économiste anglais, issue de l'ouvrage *Money* (1922).

A l'inverse, en l'absence de coûts de transaction, Coase considère que le marché est le mode de coordination le plus efficient [Coase, 1937].

Dans le cadre de l'analyse néo-institutionnelle, Williamson reprend et approfondit les travaux de Coase en considérant que « *...la transaction est l'unité de base* » permettant d'effectuer un arbitrage entre la firme et le marché [Williamson, 1985, p.37 et p.349]. Il y a ainsi transaction lorsqu'un bien ou un service est transféré à travers une interface technologiquement séparable [Williamson, 1985, p.1]. Williamson identifie par la suite déterminer des variables qui conduisent à l'émergence des coûts de transaction spécifiés par des composantes comportementales (rationalité limitée et opportunisme) et des variables qui définissent le contexte dans lequel se manifestent les coûts de transactions (spécificités des actifs, incertitude et fréquence).

Les composantes comportementales

Williamson définit deux caractéristiques comportementales des agents économiques qui lui permettent de remettre en cause le schéma de la rationalité pure de *l'homo-economicus*. Premièrement, les agents économiques sont caractérisés par leur rationalité limitée. Dans un environnement incertain, les agents économiques ne sont pas capables de composer des contrats spécifiant toutes les éventualités. Les contrats sont ainsi toujours imparfaits et incomplets. Contrairement à l'hypothèse de la théorie classique selon laquelle les agents économiques sont supposés être rationnels, ils sont *ici* « *intentionnellement rationnels, mais limités dans leur capacité à le faire* » [Simon, 1961, p. XXIV]. Cette « rationalité limitée » ne remet pas en cause le principe du calcul rationnel permettant la minimisation des coûts de transaction. Le terme de limite souligne essentiellement le manque d'information dont dispose l'agent économique en raison des difficultés de collecte, d'interprétation et de stockage de celle-ci par ce dernier.

L'incomplétude des contrats trouve également son origine dans le comportement opportuniste des agents économiques. « *L'opportunisme renvoie au présupposé conventionnel selon lequel les agents économiques sont guidés par des considérations d'ordre personnel dans le cadre d'un comportement stratégique* » [Williamson 1975, p. 26]. Cette hypothèse va plus loin que le simple comportement égoïste de *l'homo-economicus* de la théorie classique qui se limite à la recherche de l'intérêt personnel de l'agent. Outre l'égoïsme, l'opportunisme introduit la stratégie dans le comportement de l'agent économique. Il recherche son propre intérêt, éventuellement au détriment des autres agents. Ce comportement apparaît notamment dans un contexte d'asymétrie d'information qui caractérise les contrats incomplets. Il peut se manifester, par exemple, par la ruse ou la tricherie.

Les conditions de manifestation des coûts de transaction

Le cadre de l'analyse des coûts de transactions est caractérisé par trois dimensions dont deux sont caractéristiques de la nature de la transaction (spécificité et fréquence) tandis que la troisième est caractéristique de son environnement (incertitude).

Un actif est considéré comme spécifique s'il nécessite la mise en œuvre d'un investissement durable effectué pour une transaction particulière. Le coût d'opportunité de tels investissements est beaucoup plus bas dans l'alternative la plus profitable, ou avec des utilisateurs alternatifs avec le risque de perdre de la valeur en cas d'interruption ou d'achèvement prématuré des contrats [Williamson, 1994, p 77]. La spécificité de l'actif rend donc nécessaire une pérennité de la relation contractuelle. Plusieurs catégories de spécificités d'actifs ont été mentionnées dans l'ensemble des travaux de Williamson : la spécificité de site, la spécificité des actifs matériels et physiques, la spécificité des actifs humains, la spécificité des actifs dévoués, la spécificité dans la réputation et la spécificité temporelle [Lavastre, 2001].

Les transactions peuvent être uniques, occasionnelles ou récurrentes, donc avec des fréquences de transaction variables. La fréquence interviendra dès que la transaction va nécessiter un investissement spécifique et agira sur la forme d'organisation choisie. Ainsi une entreprise ne sera prête à réaliser des investissements spécifiques que si la transaction n'est pas unique. Une transaction doit être d'autant plus fréquente qu'elle requiert un investissement spécifique. De manière concordante, si une transaction se répète, il peut être avantageux d'engager des investissements spécifiques. Les coûts de transaction sont également caractérisés par le degré d'incertitude qui porte sur le niveau d'opportunisme des agents.

L'incertitude a pour conséquence d'affecter la prise de décision. La conceptualisation de Williamson a pour origine les travaux de Koopmans¹⁹⁸ qui distinguait l'incertitude primaire et secondaire [Rothe, 2012]. Williamson s'attache à partir de ces définitions à distinguer l'incertitude de type non stratégique, qui se rapproche de l'incertitude primaire, de l'incertitude comportementale. L'incertitude environnementale fait référence à un type d'incertitude relative à l'environnement concurrentiel au sein duquel les institutions évoluent. L'incertitude comportementale est une conséquence de l'opposition des acteurs sur l'exécution des transactions. Elle peut être interprétée comme un déficit de connaissance.

Les différents types de coûts de transaction

Les coûts de transaction tels que définis peuvent être séparés en deux catégories : les coûts ex-ante et les coûts ex-post [Williamson, 1985].

Les coûts ex-ante sont relatifs à la rédaction, à la négociation et à la garantie d'un accord. Ces coûts correspondent à la phase de recherche d'information, d'établissement des cahiers des charges, à la recherche de nouveaux partenaires ou encore à l'élaboration de contrat avec les fournisseurs. Ce sont donc les coûts liés uniquement au contrat. Pour déterminer la hauteur de ces coûts, il faut alors distinguer la nature du contrat. Le contrat peut faire l'objet de rigidité avec une quantité d'information la plus exhaustive possible permettant d'anticiper les modifications à réaliser, la manière de résoudre les

¹⁹⁸ T.C. Koopmans 1957 dans *Three Essays on the State of Economic Science* distinguait deux types d'incertitudes : l'incertitude primaire et l'incertitude secondaire. L'incertitude primaire se réfère à un manque d'information quant aux états de la nature (état des produits, innovations techniques, réglementation). Le second type d'incertitude fait référence au manque d'informations sur les autres agents économiques.

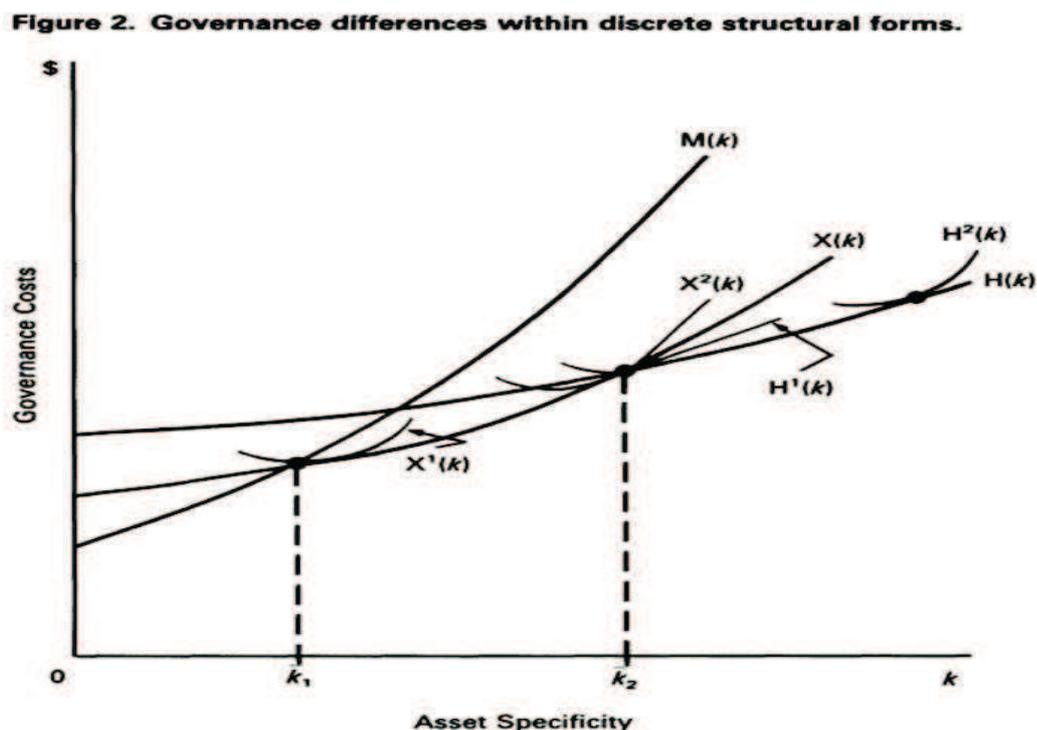
conflits, les garanties exigées par les cocontractants et les arrangements possibles en cas de difficulté ou de conflit. A l'inverse le contrat peut également être évolutif ; c'est-à-dire qu'il est très peu détaillé ce qui laisse aux parties une grande liberté pour s'organiser lors de la survenance d'évènement [Lavastre, 2001].

Les coûts ex-post sont relatifs aux coûts survenant après la réalisation du contrat. Plusieurs types de coûts ex-post peuvent être identifiés (coût de mauvaise adaptation, coût de marchandage, coût d'organisation,...). Les coûts ex-post sont très sensibles à l'incertitude sur l'état des relations entre cocontractant à la suite de l'élaboration du contrat. Ils sont également sensibles à la fréquence des échanges dans la relation contractuelle car elle détermine la probabilité de survenance des problèmes. Enfin, les coûts ex-post sont influencés par la standardisation et la simplicité des échanges. En effet plus l'échange est complexe, plus la probabilité de la survenance de coûts ex-post est élevée [Lavastre, 2001].

Les modes de gouvernance des transactions

Une fois la structure conceptuelle des coûts de transaction posée, Williamson a cherché à définir quels étaient les modes de gouvernance possibles selon les caractéristiques des coûts de transaction et la nature du contrat. L'analyse du système de gouvernance cherche à expliquer quels sont les déterminants du choix entre la hiérarchie et le marché [Figure 38 : Olivier Williamson, « *Comparative Economic Organization : The Analysis of Discrete Structural Alternatives* »]. Ce choix va révéler un positionnement entre faire ou faire-faire qui se résume par la célèbre formule « *make or pay* ».

Figure 38 : Oliver Williamson, "Comparative Economic Organization: the Analysis of Discrete Structural Alternatives", *Administrative Science Quaterlev*, vol.36, n°2, 1991, p 284



Williamson va distinguer plusieurs types de contrats qui vont définir les structures de gouvernance. Les contrats sont de trois types : le contrat classique, le contrat néoclassique et le contrat de subordination. Les deux éléments qui déterminent le type de contrat conditionnant la structure de gouvernance sont les coûts de transaction et la spécificité des actifs [Tableau 17 : La gouvernance efficace selon Williamson] [Williamson, 1991].

Le contrat classique correspond à un échange marchand classique où la transaction porte sur des produits ne nécessitant pas d'investissement spécifiques. L'objectif principal de ce type de contrat est de faciliter l'échange. C'est en général un contrat de court terme qui correspond aux échanges de marché.

Toutefois, il apparaît que toutes les transactions ne s'insèrent pas aisément dans le cadre du contrat classique notamment quand des transactions nécessitent des investissements spécifiques, que l'incertitude est forte ou quand le risque d'opportunisme est élevé. C'est particulièrement le cas des contrats de long terme. Dans ce type de contrat, il est difficilement envisageable de définir au début de celui-ci toutes les éventualités possibles. C'est pourquoi pour prendre en compte d'éventuels problèmes dans le contrat classique, plusieurs alternatives sont possibles. Une première possibilité est de renoncer complètement à de telles circonstances. Une seconde possibilité est de retirer toutes les transactions du marché pour les organiser en interne (solution de l'intégration).

Enfin, une troisième solution est d'envisager une relation contractuelle préservant l'échange grâce à une structure de gouvernance supplémentaire. Ces trois variantes pour répondre aux limites du droit classique des contrats permet de caractériser quatre modes de gouvernance : la gouvernance de marché, trilatérale, bilatérale et unifiée [Williamson, 1994].

Tableau 17 : La gouvernance efficace selon Williamson-source : Williamson O, 1994, " Les institutions de l'économie", p 106

		Caractéristiques de l'investissement		
		Non spécifique	Mixte	Idiosyncrasique
Fréquence	Occasionnelle	Gouvernance de marché (contractualisation classique)	Gouvernance trilatérale (contractualisation néoclassique)	
	Récurrente		Gouvernance bilatérale (contractualisation évolutive)	Gouvernance unifiée (Hiérarchie)

La gouvernance de marché est la structure appliquée aux transactions non spécifiques que la contractualisation soit occasionnelle ou récurrente. Lorsque les transactions sont récurrentes les structures de marché sont particulièrement pertinentes car les deux parties à l'échange n'ont besoin de se référer qu'à leur propre expérience pour décider ou non de poursuivre la relation d'échange. A l'opposé, les transactions occasionnelles sont celles pour lesquelles les acteurs sont les moins capables de se référer à leur expérience afin de se prémunir contre l'opportunisme. Il est peut être possible de consulter des agences de rating ou d'analyser les expériences des autres acteurs du marché pour le même type de bien. Cette analyse par des moyens formels ou informels permettra aux agents de prendre des décisions de la manière la plus responsable possible.

Lorsque le marché sert de mode de gouvernance, la contractualisation discrète est satisfaisante. En ce sens, l'identité particulière des contractants n'a que peu d'importance. C'est le contenu du contrat qui est important et ce sont les règles juridiques applicables. La protection des agents économiques face à l'opportunisme est réalisée par les alternatives qu'offre le marché. Lors de la survenance de litige, le recours aux règles formelles inscrites dans le contrat permet la résolution simple des aléas. Les relations contractuelles n'ont pas besoin de faire l'objet d'efforts spécifiques pour être maintenues car la relation entre les acteurs n'a pas de valeur intrinsèque [Williamson, 1991, 1994].

La gouvernance trilatérale fait référence aux systèmes de gouvernance hybrides. En terme contractuel, cette gouvernance apparaît pour les transitions occasionnelles mixtes et hautement spécifiques. Il peut s'agir de l'achat d'équipement sur commande (mixte) ou de la construction d'une usine (idiosyncrasique). Lorsque que les parties au contrat ont constitué celui-ci, il existe de fortes incitations pour réaliser et arriver à la fin de celui-ci. En effet, la forte spécificité des actifs poserait des difficultés importantes dans leur évaluation s'il y avait un transfert d'actifs. Les parties au contrat ont donc intérêt à avoir une relation stable. Le recours au marché n'est donc pas pertinent et pour soutenir les transactions il faut mettre en place une forme institutionnelle intermédiaire qualifiée d'hybride [Williamson, 1991, 1994].

Le troisième type de gouvernance est la gouvernance bilatérale qui apparaît lorsque des transactions récurrentes ont besoin d'investissements mixtes ou hautement spécifiques. Cette gouvernance apparaît en raison de la nature non standardisée des transactions et est basée sur une contractualisation évolutive. La contractualisation évolutive apparaît avec l'augmentation de la durée et de la complexité des contrats. Elle remplace alors les processus d'ajustement néoclassique par des processus particulier comme le cas d'achat de matériaux sur commande. Le contrat évolutif valorise la continuité de la relation [Williamson 1991, 1994].

Enfin, la gouvernance unifiée apparaît quand les incitations à l'échange s'affaiblissent ce qui est principalement le cas quand les transactions deviennent idiosyncrasiques. Les actifs humains ou physiques devenant plus spécialisés pour un usage unique. Il est alors plus difficile de le transférer vers d'autres usagers. Les économies d'échelle seront alors réalisables soient par l'acheteur ou soit par le vendeur. L'intégration verticale apparaît généralement dans ces circonstances.

Dans le schéma de Williamson, la contractualisation du marché cède donc progressivement la place à une contractualisation bilatérale qui, à son tour, est supplantée par une contractualisation unifiée (organisation interne) au fur et à mesure que la spécificité des actifs s'accroît [Williamson 1991,1994]. L'apport de Williamson à la nouvelle économie institutionnelle est considérable. Il présente toutefois des limites, en particulier, dans l'analyse de l'environnement des coûts de transaction. Mais ces limites ont été surmontées par l'analyse macrosociale développée par North et présentée plus haut dans ce chapitre (section 2) qui nous a permis de montrer que les infrastructures énergétiques, électriques et thermiques, sont caractérisées comme des facilités essentielles subissant un fort conditionnement de leur environnement institutionnel.

3.2. Les hypothèses méthodologiques pour l'analyse des systèmes énergétiques décentralisés

Les hypothèses méthodologiques qui vont soutenir l'analyse en termes de coûts de transaction des systèmes énergétiques décentralisés sont de deux ordres. En premier lieu, il y a les hypothèses regroupant l'évolution du degré de spécificité des actifs correspondant aux évolutions technologiques apparues ces dernières années (les énergies renouvelables et les capacités de stockage décentralisées). En second lieu, il y a l'évolution du cadre institutionnel dans lequel les transactions prennent place. Cet environnement va prendre en compte à la fois les changements institutionnels mais également les évolutions technologiques.

3.2.1. Le poids des technologies sur l'évolution des transactions

On peut établir trois conditions configurant les transactions au sein des industries de réseaux énergétiques. Celles-ci ont pour vocation de caractériser la spécificité des actifs liée aux activités de réseaux, sans toutefois conduire à un choix d'arrangement institutionnel figé puisque des évolutions peuvent être constatées dans le long terme.

Premièrement, il n'y a pas de déterminisme organisationnel absolu de la technologie. L'existence d'un modèle organisationnel pour une industrie de réseau dans un pays donné est le résultat du choix collectif des agents économiques employant cette dernière. Ils ne peuvent juger de l'efficacité économique de ce choix que sur le long terme, car ils ne peuvent que l'anticiper [Brousseau, 1993]. Par exemple, au niveau européen, le système organisationnel des opérateurs de réseaux de distribution électrique est pluriel et peut être considéré comme un véritable « patchwork » comme il a été démontré dans la partie 2 du présent chapitre [Eurelectric, 2012a].

Deuxièmement, la spécificité des actifs dans l'approche transactionnelle n'est pas un concept désignant des propriétés physiques absolues [Williamson, 1991]. Le concept désigne plutôt une relation transactionnelle et idiosyncrasique¹⁹⁹ plus ou moins importante des actifs techniques ou humains. Le degré de spécificité est alors vu comme rendant possible le choix de certaines formes d'organisation ou au contraire comme un moyen d'en exclure d'autres selon les possibilités. Ainsi selon le niveau de spécificité de l'actif, il sera plus pertinent de se tourner vers des organisations prenant la forme de marché, de hiérarchie ou de forme hybride [Williamson, 1991].

Troisièmement, les adaptations institutionnelles d'un secteur peuvent relever d'un processus d'essais et d'erreurs laissant aux agents la possibilité de procéder au départ à des innovations organisationnelles qui ne sont pas spontanément adaptées aux spécificités des actifs ou à leurs environnements. L'environnement institutionnel d'un pays ou d'une organisation n'est ainsi pas forcément le même que celui des autres pays ou organisations. Ainsi, si des règles fonctionnent dans un cas, il n'est pas obligatoire que ces dernières répondent point par point aux besoins d'un autre cas. Il faudra donc du temps pour que les organisations et les règles s'alignent permettant une stabilité dans l'échange. Ce processus requiert donc du temps [Williamson 1991 ; North, 1994].

Les arrangements institutionnels des industries de réseaux anciens et nouveaux ne sont pas en principe des formes pures de coordination (marché, contrat, hiérarchie). Ils doivent être appréhendés comme des édifices mixtes organisés autour de la domination de l'une d'entre elles. C'est ce que nous étudierons en analysant l'évolution de la forme organisationnelle des opérateurs de réseaux de distribution dans le contexte de la décentralisation technique.

¹⁹⁹ L'idiosyncrasie consiste en un comportement particulier face à l'influence d'événements extérieurs.

3.2.2. L'influence de l'environnement des transactions

Les transactions évoluent dans un environnement particulier qui est l'ensemble des règles du jeu qui délimitent et soutiennent l'activité transactionnelle des acteurs [Ménard, 2003]. Ces règles du jeu peuvent être formelles comme les réglementations ou informelles comme les coutumes. Elles encadrent les transactions. L'environnement, tout comme les transactions, évolue. Il influence d'ailleurs le niveau des coûts de transactions et donc par conséquent leur choix d'encadrement des transactions. L'évolution du paradigme dans l'approvisionnement énergétique caractérise un processus de décentralisation peut être considéré comme une évolution structurelle de l'environnement des transactions régissant les coûts de transaction.

Dans le cadre des industries de réseaux, on peut définir un environnement comme constitué d'institutions sectorielles englobant des règles formelles et des règles informelles. Les règles formelles sont constituées des droits de propriété qui désignent non seulement la propriété en tant que telle mais également la capacité d'utiliser un bien et également le droit de percevoir des rémunérations pour l'usage de celui-ci. Les règles informelles vont être quant à elles être constituées par la culture sectorielle [Alchian et al, 1973 ; Finon et al, 1996]. Ces différentes règles permettent d'apporter une cohérence et une structure aux relations entre les acteurs économiques. Dans le domaine des industries de réseaux, on peut distinguer plusieurs types de droits de propriété (sur les informations, infrastructures, flux, sols,...).

La réglementation intervient alors pour encadrer l'usage de ces droits et il faut prendre en compte différents niveaux de structures d'incitations. Il y a dans un premier temps des structures d'incitation qui font partie de l'organisation industrielle. Dans un second temps le système de gouvernance réglementaire a pour rôle de veiller à l'ajustement des règles de contrôle et des règles concurrentielles afin de limiter les conflits. Les formes d'intervention peuvent prendre différentes formes selon le niveau d'intervention et la nature des décisions comme c'est le cas avec le règlement économique qui peut porter sur les prix, les subventions croisées dans le cadre d'un monopole, la qualité du produit ou encore avec l'ajustement des règles de contrôles ou l'intervention du pouvoir politique [Finon et al, 1996].

3.3. Evolution des échanges transactionnels dans l'approvisionnement énergétique

Comme on l'a vu, le modèle hiérarchique a longtemps été le modèle dominant en Europe en matière de structuration des industries de réseaux énergétiques. Les différenciations se font essentiellement sur le modèle hiérarchique avec des formes publiques ou privées et des schémas de hiérarchie complète ou incomplète. Cet intérêt pour la forme hiérarchique était justifié par la présence de monopole considéré comme naturel et dont la justification reposait sur la forte spécificité des actifs d'infrastructure ainsi que sur les spécificités liées à l'incertitude dans les échanges physiques. Ces caractéristiques ont peu évolué

jusqu'au milieu du XXème siècle avant le tournant de la libéralisation, du développement des énergies renouvelables et de l'intégration des nouvelles technologies de l'information et de la communication.

3.3.1. Les caractéristiques transactionnelles de l'électricité et de la chaleur

Les spécificités techniques des deux vecteurs énergétiques étant différentes, il est nécessaire de les analyser séparément, afin de définir leurs caractéristiques propres puis de déterminer leurs caractéristiques communes.

Les caractéristiques transactionnelles de l'électricité

L'énergie électrique est particularisée par la nécessité d'assurer une sécurité d'approvisionnement en continue en raison des difficultés de stockage ce qui nécessite un ajustement en temps réel de la production par rapport à la consommation afin d'assurer la continuité de service. Cette spécificité technique entraîne une fréquence transactionnelle très élevée. Elle entraîne également de nombreuses incertitudes à court terme. Il faut par exemple s'assurer la fiabilité des équipements, anticiper les variations horaires, journalières et saisonnières de la consommation afin d'avoir la meilleure livraison possible. En effet, l'électricité en tant que flux énergétique est considérée comme un bien essentiel auquel chaque consommateur doit pouvoir avoir accès quelles que soient ses ressources et sa localisation [Hansen et al, 2010].

La rigidité des infrastructures crée une forte interdépendance des activités électriques (production, transport, distribution et consommation) en l'absence d'infrastructures redéployables. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre des systèmes de coordination de très court terme afin d'éviter des aléas techniques. Cette obligation peut être mise en place grâce à l'instauration de normes et à la standardisation du produit (niveau de tension, de fréquence, coefficient de réactivité,...). Elles permettent d'améliorer la coordination technique des actifs dans un processus allant de la production à la consommation, en passant par le transport et la distribution électrique [Künneke et al, 2010].

Les systèmes de transport et de distribution ont été pendant longtemps les seuls moyens pour les producteurs de donner de la valeur à leur produit. Il était donc indispensable d'avoir une coordination de très court terme entre les acteurs afin de garantir la valorisation des capacités de production. Aujourd'hui, le développement de capacité de production au niveau local ainsi que la possible progression des capacités de stockage électrique de petite taille entraîne une nouvelle forme de valorisation des capacités de production grâce à l'autoconsommation. Cette nouveauté provoque une nouvelle relation entre les opérateurs de réseaux de distribution et les consommateurs finaux [Künneke et al, 2010].

Le transport et la distribution d'électricité présentent des externalités. En tant qu'externalités négatives, la possible défaillance des capacités de production peut entraîner des perturbations de fourniture sur le réseau. Dans le même temps, l'agrégation des capacités de production par rapport à la demande crée des externalités positives telles que des économies sur la coordination technique des flux transportés, des économies sur la coordination économique de l'exploitation des unités de production. L'enjeu a pendant longtemps été de définir les arrangements efficaces pour partager les quasi-rentes issues de la coordination technique centralisée tout en limitant les comportements opportunistes et les coûts de transaction [Finon et al, 1996].

Le fonctionnement du marché électrique par des transactions bilatérales entre le producteur et le consommateur se heurte à des limites technologiques importantes, entraînant des problèmes de coordination et de transaction entre ces acteurs. De plus, l'essor de la production distribuée pose la question de l'impact de la décentralisation des capacités de production sur les systèmes de coordination et de transaction entre les acteurs classiques du système électrique, l'opérateur de réseau de distribution et le consommateur final.

Les caractéristiques transactionnelles de la chaleur²⁰⁰

Les réseaux de chaleur sont caractérisés par un ensemble de particularités techniques qui ne leur permettent pas de s'étendre sur de longues distances, contrairement aux réseaux électriques. En effet, la chaleur ne peut être transportée sur de grandes distances en raison d'importantes pertes en lignes. Toutefois et contrairement à l'électricité, la chaleur peut être facilement stockée. Il n'est donc pas nécessaire d'assurer un équilibre en temps réel de la production pour satisfaire la consommation.

Par contre, comme pour l'électricité, les activités de production, de transport et de distribution de chaleur sont très interdépendantes et difficilement redéployables à une autre échelle. Le système organisationnel hiérarchique du réseau de chaleur a donc été le seul moyen pour les producteurs de donner de la valeur à leur produit. Il était donc indispensable d'avoir une coordination forte entre les acteurs afin de garantir la valorisation des capacités de production. De plus, le transport et la distribution présentent des externalités, négatives et positives, identiques à celles des réseaux électriques (possible défaillance des capacités de production, économies de coordination technique des flux transportés, économie des coordinations économique de l'exploitation des unités de production) [Wissner, 2014].

²⁰⁰ CRE, 2015, Dossier sur les réseaux de chaleur et de froid intelligent, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=reseaux-chaleur-froid-intelligents>

3.3.2. La spécificité des actifs électriques et thermiques

Les différents maillons de la chaîne électrique et de la chaîne thermique sont dotés de spécificités d'actifs propres. Les spécificités des actifs regroupent l'ensemble des investissements durables effectués pour une transaction particulière. Les systèmes d'approvisionnement énergétiques se caractérisent par un ensemble de spécificités d'actifs particulières.

Premièrement, la spécificité temporelle définit l'importance de la synchronisation des actions et des acteurs pour la coordination technique des systèmes énergétiques avec la recherche du meilleur équilibre offre-demande et de la gestion des aléas. Elle est due au fait qu'il faut coordonner de manière extrêmement rapide l'offre et la demande. Pour l'électricité, il faut pouvoir assurer la coordination en temps réel des systèmes électriques tout en gérant les aléas des réseaux. Le développement sur le long terme des capacités de stockage décentralisé et diffus va permettre d'atténuer cette spécificité (stockage mobile et stationnaire) [Lavastre, 2001]. Pour la chaleur, la spécificité temporelle est moins prégnante à l'heure actuelle car la chaleur ne nécessite pas un équilibrage en temps réel de la production et de la consommation. Néanmoins, le développement des systèmes mutualisés comme la cogénération va renforcer l'importance de cette spécificité au niveau local.

Deuxièmement, la spécificité croissante des sites, qui découle du choix de la localisation des unités de production et plus particulièrement des unités les plus capitalistiques. Avec l'avènement des énergies renouvelables, les capacités de production sont fortement déterminées par les contraintes naturelles et sont généralement de taille beaucoup plus petite que les anciennes capacités de production. Si l'importance de la spécificité des sites a pu diminuer avec le développement de l'interconnexion au niveau régional puis national et la présence de capacités de production moins dépendantes des conditions géographiques (ex : le nucléaire) ; on assiste à un regain de cette spécificité avec le développement de la décentralisation des capacités de production que ce soit pour l'énergie thermique ou électrique au niveau local et plus spécifiquement à l'échelle d'un quartier [Lavastre, 2001].

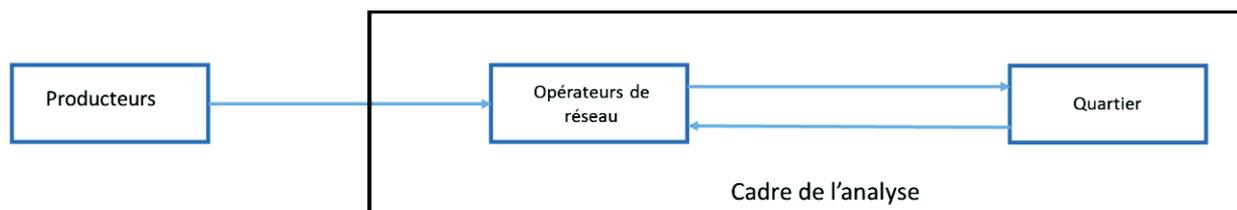
Troisièmement, la spécificité des débouchés d'actifs de production tend à redevenir une question incontournable dans le contexte de la décentralisation [Lavastre, 2001]. Celle-ci a été atténuée, pour l'électricité, lors du développement des grands réseaux techniques au niveau et de l'interconnexion grâce auxquels les capacités de production n'étaient plus dédiées à une zone particulière du territoire. L'achat obligé des productions par les différents réseaux a permis d'amortir l'investissement de capacités de production de grande puissance. Les grandes capacités de production sont des actifs non redéployables, long à mettre en place, lourds en capitaux et à longue durée de vie. Les débouchés des actifs étaient donc nécessairement le fruit du rachat de la production par le réseau interconnecté. Cet aspect ne s'est pas retrouvé avec les réseaux locaux de chaleur où la spécificité d'actifs de production est toujours restée importante.

3.3.3. Evolution des relations contractuelles liées à la décentralisation

L'étude du processus de réalisation des écoquartiers dans les deux premiers chapitres a montré que ces projets urbains s'appuient sur une réflexion autour de la décentralisation de l'approvisionnement énergétique, en intégrant une production bas carbone locale dans une optique de transition énergétique. Ces capacités de production doivent répondre aux besoins des bâtiments résidentiels et tertiaires et donc se concentrent autour des usages en chaleur et en électricité. Il a été montré dans les chapitres précédents que malgré divers modèles de décentralisation, les formes prises pour l'approvisionnement énergétique restent conventionnelles en raison des nombreux freins technico-économiques à l'échelle du quartier (Cf. Chapitre 3). La décentralisation des infrastructures techniques soulève également des questions autour de la nature des relations contractuelles qu'entretiennent les usagers car les évolutions techniques impactent également les régimes sociotechniques.

Nous concentrerons donc l'analyse sur la relation qu'entretiennent les opérateurs de réseaux avec l'écoquartier. Les opérateurs de réseaux considérés seront les opérateurs gérant les réseaux de chaleur et d'électricité. L'écoquartier sera considéré comme le client final ; c'est-à-dire qu'il ne sera pas un simple agent économique mais comme l'ensemble des agents économiques résidant du quartier. Cette relation sera envisagée comme bilatérale en raison de la possibilité donnée au quartier de produire de l'énergie [Figure 39 : Les relations entre acteurs évoluant lors de la décentralisation de l'approvisionnement énergétique]. Les relations contractuelles entre ces deux types d'acteurs vont être présentées en précisant les évolutions des spécificités des actifs pour les flux et les infrastructures.

Figure 39 : Les relations entre acteurs évoluant lors de la décentralisation de l'approvisionnement énergétique [Construction de l'auteur]



3.3.3.1. La propriété du sol

Les écoquartiers en tant qu'échelle pertinente pour la décentralisation ou la reterritorialisation de l'approvisionnement énergétique définissent un premier type de spécificités d'actifs. Il s'agit de la nature du périmètre dans lequel le quartier est réalisé au sens de son statut juridique. Le statut juridique va déterminer les conditions d'exploitation des infrastructures et des flux au regard des différents types de propriété à l'intérieur du périmètre du quartier. Le droit de propriété comprend, de manière classique, l'usus de l'infrastructure, c'est-à-dire la possibilité d'user d'une chose sans forcément en percevoir les

fruits, le fructus, c'est-à-dire le droit de percevoir les fruits d'une chose sous forme par exemple de revenus et enfin, l'abusus qui est la possibilité de disposer de son bien.

Lors de la réalisation de la base d'information sur les écoquartiers (cf. Chapitre 1), nous avons montré que les projets sont majoritairement réalisés sur des terrains appartenant à des acteurs publics. Les collectivités sont d'ailleurs le plus souvent les initiatrices de ce type de projet d'aménagement urbain. Elles choisissent généralement de le réaliser sur un terrain en friche où peu d'infrastructures sont présentes. Lors de la réalisation de l'écoquartier, plusieurs types d'infrastructures vont être installés, dont le statut juridique va déterminer leur relation aux réseaux [Figure 41 : Impact du statut juridique de l'écoquartier sur les infrastructures intégrées dans son périmètre].

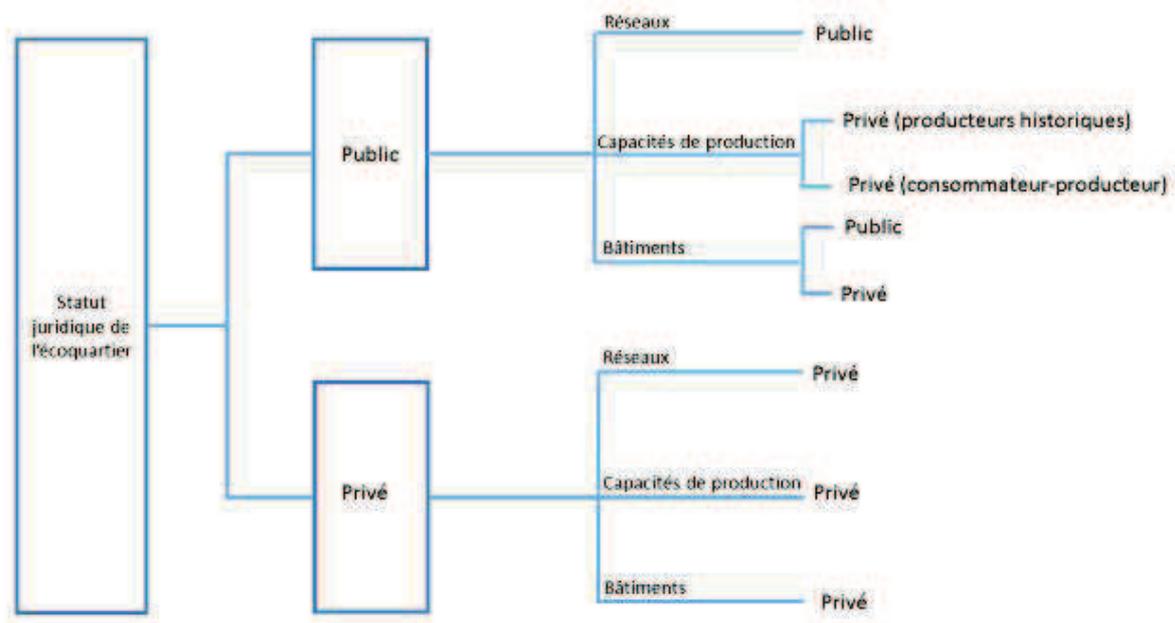
Premièrement, la ville va désigner un certain nombre de zones allouées à la construction de bâtiments (résidentiels ou tertiaires) et dont le sol pourra être vendu à des acteurs privés ou publics. Les propriétaires des terrains auront alors l'usus, le fructus et l'abusus des constructions sur le terrain. Les choix technologiques réalisés à l'intérieur vont être définis par les propriétaires en prenant en compte les impératifs réglementaires et les contraintes du cahier des charges définis par la collectivité ou par l'aménageur gérant l'ensemble du projet [Cf. Partie 1]. Les bâtiments devront ainsi répondre *a minima* aux réglementations thermiques en vigueur. Ils peuvent également tenter de la dépasser afin de démontrer un savoir-faire ou de prouver une performance technique au niveau énergétique avec la possibilité d'avoir des bâtiments à énergie positive.

Deuxièmement, les capacités de production construites à l'intérieur seront la propriété d'acteurs privés. Il y aura les acteurs ayant la propriété de grandes capacités de production de plusieurs mégawatts et ces centrales seront raccordées sur le réseau de distribution. On trouvera également des producteurs détenant des petites capacités de production, inférieur au mégawatt ; ce seront généralement des consommateurs-producteurs.

Ces équipements seront le plus souvent raccordés aux réseaux publics d'infrastructures historiques et ce, que ce soit pour l'électricité ou la chaleur [Chapitre 1]. En effet, bien qu'ils soient plus performants et consomment de manière plus intelligente l'énergie, les écoquartiers ne produisent pas aujourd'hui suffisamment d'énergie pour répondre en temps réel à la consommation des usagers du quartier. C'est pourquoi, ils ont besoin d'avoir recours à des capacités de production autres que celles installées dans leur périmètre. De plus, les capacités de production installées sur le territoire du quartier peuvent avoir besoin de réinjecter leur production sur le réseau public. La relation avec l'opérateur de réseau est donc maintenue.

Certains projets d'aménagement manifestent une volonté de s'extraire des réalisations classiques où l'écoquartier n'est considéré que comme la somme de bâtiments performants gérés de manière classique et raccordés aux réseaux historiques. Ainsi, par exemple, le projet ABC à Grenoble vise créer un îlot autonome en eau, énergie et déchet²⁰¹. Au niveau énergétique l'ambition sous-entend que le recours aux réseaux d'infrastructures publics et aux capacités de production à l'extérieur de la zone doit être réduit au maximum. L'îlot ressemble alors à un quartier avec ses capacités de production et ses capacités de distribution ; mais il fonctionne en dehors du cadre public, c'est-à-dire que les infrastructures réalisées sont la propriété des acteurs ayant investi dans le projet. Cet exemple présenté encore comme un démonstrateur permet d'envisager un nouveau rapport au droit de propriété selon que les constructions s'intègrent dans un projet urbain issu d'une politique publique ou un d'un projet privé [Figure 40 : Impact du statut juridique de l'écoquartier sur les infrastructures intégrées dans son périmètre].

Figure 40 : Impact du statut juridique de l'écoquartier sur les infrastructures intégrées dans son périmètre [Construction de l'auteur]



La nature juridique du périmètre va renforcer la spécificité du site et va donc rendre plus spécifique la transaction qui s'établit entre le quartier et l'extérieur, c'est-à-dire entre les consommateurs et les opérateurs de réseaux. Néanmoins, il semble que peu de travaux se soient penchés sur la nature de la propriété du terrain et son impact sur les relations contractuelles entre les acteurs de l'énergie à cette échelle. Il serait pourtant particulièrement intéressant d'analyser cet élément pour comprendre l'impact de la propriété du terrain sur le choix des technologies installées et les relations contractuelles qu'entretiendraient l'opérateur de réseaux de distribution et les clients finaux. La forme juridique que

²⁰¹ Site Bouygues, <http://www.bouygues-construction.com/innovation/toutes-nos-innovations/le-concept-abc-une-approche-globale-de-lhabitat-durable>, consulté en juin 2017

prendrait la propriété du terrain aboutirait certainement à des attentes différentes en matière d'investissement dans l'infrastructure et la gestion des flux selon le type d'acteur qui serait mis en relation avec l'opérateur de réseaux de distribution.

3.3.3.2. La propriété de l'infrastructure

L'étude de l'émergence de l'échelle du quartier pour réaliser les systèmes d'approvisionnement décentralisé a montré que, pour l'instant, le fonctionnement des réseaux reste similaire identique aux pratiques adoptées pour les autres échelles urbaines. En effet, il s'agit majoritairement de projets d'aménagement urbain résultant d'une concertation entre différents acteurs parties- prenantes (collectivités, opérateurs de réseaux, Etats, aménageurs, constructeurs), selon un modèle de type Zone d'Aménagement Concerté [Cf. Chapitre 1 et 2].

Toutefois, le développement de cette nouvelle échelle soulève la question du développement de réseaux locaux d'énergie. En effet, la décentralisation au niveau du quartier peut être perçue comme la possibilité de créer des systèmes optimisés à des échelles qui ne sont pas celle du simple bâtiment mais qui ne sont pas non plus celle de la ville ; ils deviennent ainsi des microsystèmes techniques [Lopez et al, 2015]. De plus, l'investissement dans les systèmes d'infrastructures est généralement supporté par des entités très hiérarchisées et centralisées en fonction de la structure des coûts de ces systèmes techniques. Le fait que l'énergie soit une facilité essentielle a fait que la gestion de la chaîne de valeur a été réalisée, de manière directe ou de manière indirecte, par des monopoles notamment publics ou en délégation de service publics en raison de la nature spécifique du bien [cf. section 2].

Si l'optimisation technico-économique est envisageable au niveau du quartier, la théorie économique des industries de réseau a démontré qu'en raison de la lourdeur des investissements à réaliser, il n'était pas intéressant de multiplier les systèmes d'infrastructures de réseaux. La possibilité d'avoir des réseaux locaux privés, où les systèmes d'approvisionnement énergétiques sont dimensionnés pour répondre aux besoins des usagers du quartier, soulève la question du modèle de financement. En effet, habituellement les coûts d'investissement dans les infrastructures sont engagés par les grands opérateurs et financés par les différents usagers du réseau à travers la tarification [Hansen et al, 2010].

Le passage de l'échelle du bâtiment à celle du quartier provoque une augmentation de la complexité des variables à prendre en compte pour définir le dimensionnement des systèmes [Cf. Chapitre3]. Il remet en question le mode de régulation à mettre en oeuvre à l'intérieur du site. La réalisation d'un système énergétique à cette échelle interroge la spécificité des débouchés de l'actif au sens où il est nécessaire de trouver un moyen de valoriser la production locale afin notamment d'amortir l'investissement supporté dans la réalisation du système énergétique à l'intérieur du quartier.

3.3.3.3. L'apport des technologies de l'information

Le développement des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC) amène une importante évolution dans l'environnement des systèmes d'échanges de flux et d'usage des stocks dans les industries de réseaux.

Dans le cadre du développement des réseaux énergétiques au niveau local, il est essentiel de se référer au développement des réseaux intelligents (*smart grids*), notamment via l'utilisation de compteurs intelligents (*smart meters*). Ils sont actuellement principalement utilisés dans les réseaux électriques même s'ils pourront être développés pour les réseaux gaziers et thermiques dans les prochaines années²⁰². Ils sont employés pour faciliter la gestion à distance, connaître les profils de consommations des usagers, mais également pour introduire une flexibilisation de la demande. Les informations récoltées par ces compteurs ainsi que le dynamisme apportés par l'usage de ces derniers en termes de gestion des flux impacte les coûts de transactions.

Premièrement, ils apportent une nouvelle gestion de la temporalité entraînant un changement dans les rapports entre les acteurs de l'énergie du fait de l'instantanéité des échanges. En effet, ils permettent de connaître les capacités de production et de consommation au niveau local de façon plus précise dans le temps. Outre le rôle d'information sur les consommations et les capacités de production des acteurs, ces compteurs vont avoir pour mission de gérer l'augmentation de la complexité des échanges physiques de l'énergie [Tuballa et al, 2016]. Les opérateurs de réseaux de distribution vont devoir prendre en compte les flux entrant et sortant des consommateurs finaux. Or, cette fonction n'était pas nécessaire avant le développement de la production décentralisée. Ces opérateurs et les consommateurs finaux doivent ainsi revoir leur relation contractuelle [McDonald, 2008].

Deuxièmement, le développement des nouvelles technologies de l'information permet d'évaluer plus rapidement les décisions à prendre dans un système d'échanges énergétiques. L'amélioration du processus de décision ainsi que la réduction du temps de prise de décision doivent permettre d'améliorer les performances des processus de contrôle des systèmes techniques. Cette possibilité est toutefois conditionnée à la création de transitions critiques permettant de garantir la sécurité du système énergétique ; c'est-à-dire que des procédures de contrôles techniques doivent être mises en place par les organisations afin d'assurer le bon fonctionnement du système technique dans le temps le plus rapide possible [Künneke et al, 2011].

²⁰² Directive 2012/27/UE du Parlement Européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique

Les NTIC vont permettre de renforcer la connaissance du comportement des flux dans les réseaux locaux et de réduire ainsi la survenue d'aléas dans ces derniers. Par conséquent, elles vont avoir l'effet de diminuer les coûts de transaction en abaissant la spécificité des actifs et en entraînant la possibilité de la création de marchés virtuels qui seront dissociés des flux physiques pour permettre une meilleure valorisation économique des flux tout en gardant un haut niveau de contrôle.

3.3.3.4. La gestion des flux

L'installation de capacités de production décentralisées issues des énergies renouvelables provoque une montée des incertitudes sur les réseaux de distribution énergétique en raison des caractères intermittent et aléatoire de ces énergies [McDonald, 2008]. De plus, le changement provoqué par l'apparition d'un nouveau profil de consommateur, le *prosumer*, ayant la possibilité de consommer sa propre production ou de la stocker oblige à un changement de relation entre les acteurs en relation avec les réseaux. Ces évolutions pourraient augmenter les coûts de transaction entre les opérateurs de réseaux de distribution et le consommateur final en raison de l'augmentation de l'incertitude dans la production et la gestion des flux, malgré le développement des nouvelles technologies de l'information.

Les capacités de production électrique de puissance peuvent être valorisées sur différents marchés. Il peut s'agir de marché de gré à gré²⁰³ ou de bourses d'électricité. Sur ces marchés, différents produits sont échangés avec des temporalités différentes selon le type de transactions, à long terme, journalière ou infra journalière. Au niveau des réseaux de transport électrique, les opérateurs de réseaux disposent de réserves de puissance qu'ils peuvent mobiliser afin de maintenir l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie. Il s'agit de capacités de production disponibles quand les centrales ne produisent pas au maximum de leur capacité ou de possibilités d'effacement [Hansen et al, 2010]. Il est à souligner qu'il n'existe pas d'équivalent pour la capacité de production de chaleur en raison de trop grandes spécificités de site de débouchés d'actifs [Lavastre, 2001 ; Wissner, 2014].

Les capacités de production installées dans les écoquartiers pourraient être de deux sortes. Pour l'électricité, il s'agit principalement de capacités de production installées sur les bâtiments et qui ont vocation à répondre aux besoins de ces derniers. Elles sont détenues par les consommateurs qui deviennent ainsi des consommateurs producteurs (*prosumers*). Ils peuvent théoriquement auto-consommer leur production ou la renvoyer sur le réseau s'ils ne disposent pas de capacité de stockage ou s'ils ne souhaitent pas la consommer. Des capacités de production de plus grande puissance peuvent également être présentes sur le périmètre du quartier. Elles seront détenues par des acteurs institutionnels qui vont réinjecter leur production sur le réseau. Ces deux types d'acteurs vont chercher à valoriser économiquement leur capacité grâce à de nouveaux mécanismes de marché et de nouveaux statuts [Van der Schoor et al, 2015 ; Prasad Koirala et al, 2016]. En ce qui concerne la production de la chaleur, ces

²⁰³ Un marché de gré à gré est un marché où la transaction se fait directement entre le vendeur et l'acheteur.

deux types de profils existent. Néanmoins, il n'existe pas de marché de valorisation des capacités de production de chaleur [Wissner, 2014].

La gestion des flux à l'échelle du quartier va donc devenir incontournable car il va falloir assurer le bon fonctionnement du système et nécessite que l'opérateur de réseaux soit capable de gérer les aléas. Une fois posée, elle ouvre la question d'une nouvelle relation contractuelle entre l'opérateur de réseau et les acteurs présents dans l'écoquartier. L'enjeu va être de déterminer s'il est préférable que cette relation soit plutôt gérée par le marché ou par une organisation intégrée ou encore si un système hybride serait préférable pour gérer ce nouveau schéma technique.

4. Conclusion

Ce chapitre a permis d'explorer l'imbrication des organisations et des institutions entraînant l'évolution des systèmes d'approvisionnement énergétique, dans le court ou le long terme et à différentes échelles de territoire. Nous avons ainsi constaté que les systèmes énergétiques ont été pendant longtemps gérés de manière centralisée avec des systèmes organisationnels extrêmement hiérarchisés en raison de la spécificité du bien qu'est l'énergie. Néanmoins, l'étude historique de la régulation des systèmes d'approvisionnement électrique a montré que le poids de l'évolution technique et les choix politiques pouvaient entraîner une décentralisation et une dé-hiérarchisation de la régulation des réseaux énergétiques.

Ce processus au long court est d'autant plus d'actualité avec le développement des capacités de production renouvelables et des capacités de stockage pouvant être installées à des échelles locales, pour l'électricité ou pour la chaleur. En allant plus profondément dans l'étude des interactions infrastructures techniques et institutions, il est apparu que la décentralisation des systèmes d'approvisionnement énergétiques à l'échelle du quartier pouvait modifier les relations entre les opérateurs de réseaux de distribution et les consommateurs. Cela en raison d'une modification des spécificités transactionnelles structurant ces relations (sites, débouchés d'actifs, information...). La décentralisation des systèmes d'approvisionnement énergétique permet d'accroître l'autonomie énergétique locale par la possibilité de moins recourir aux infrastructures centralisées. L'autonomie, qui reste encore relative, nourrit toutefois les nouvelles réflexions sur la gestion locale de l'énergie à travers un certain nombre d'enjeux organisationnels et transactionnels.

Les Chapitres 3 et 4 ont donc permis de montrer que la décentralisation des systèmes énergétiques au niveau local soulève deux questions économiques de première importance. Non seulement, elle interroge les conditions de la conduite d'une optimisation technico-économique des systèmes énergétiques à l'échelle locale. De plus, elle conduit à s'interroger sur la possible émergence de nouveaux statuts d'acteurs à l'échelle du quartier en raison de l'évolution des systèmes transactionnels entre les acteurs. Plus particulièrement, elle doit mener à une redéfinition des relations entre les opérateurs de réseaux de

distribution et les usagers de l'écoquartier. Il est alors nécessaire d'envisager les formes possibles que peuvent prendre les systèmes organisationnels de l'approvisionnement énergétique des quartiers dans les prochaines années ainsi que les moyens de valoriser économiquement les capacités de production présentes à cette échelle. Ces éléments vont être traités dans le dernier chapitre de la thèse.

Chapitre 5 : Trois idéal-types pour la territorialisation de l'énergie

Les deux premiers chapitres ont permis de définir les enjeux de la transition énergétique à l'échelle du quartier. La réalisation d'une base d'information sur les écoquartiers européens a révélé qu'ils se structurent autour de deux points clés : l'efficacité énergétique et l'approvisionnement énergétique. L'efficacité, qui mêle à la fois la performance énergétique des bâtiments et la maîtrise de la demande énergétique, est actuellement le fer de lance des politiques de transition énergétique à l'échelle locale. A l'opposé, les activités d'approvisionnement énergétique qui regroupent des activités de production et de distribution restent encore marginales à l'échelle du quartier [Chapitre 1]. L'analyse des études de cas renforce les constats issus de la base d'information. Notre base de données montre l'intérêt accordé à l'efficacité énergétique dans la réalisation des écoquartiers via, par exemple, des constructions performantes et la présence de dispositifs techniques permettant d'informer les usagers sur leur consommation. Certains écoquartiers peuvent ont fait l'objet d'une réflexion en terme de mobilisation d'énergies renouvelables in situ ou locale. Néanmoins, la majorité des réalisations reste sur un schéma classique de l'approvisionnement énergétique [Chapitre 2].

Les chapitres 3 et 4 pointent les conditions technico-économiques et institutionnelles nécessaires pour que le quartier puisse devenir une échelle pertinente de la transition énergétique. Pour y parvenir, un changement de paradigme dans la façon d'envisager l'approvisionnement énergétique doit s'opérer pour évoluer d'un système entièrement centralisé vers un système décentralisé à l'échelle locale. Ce nouveau paradigme peut accompagner la volonté pour certains acteurs locaux d'accéder à une forme d'autonomie énergétique. Cette évolution est toutefois est conditionnée par la maturité technico-économique et par la possibilité d'identifier un modèle d'affaire viable qui rendrait l'investissement rentable à cette échelle [Chapitre 3]. La décentralisation technique participant à l'autonomie à l'échelle du quartier provoque également une modification des relations entre les acteurs présents sur la chaîne énergétique. Plus spécifiquement, c'est la relation qu'entretiennent les opérateurs de réseau locaux avec les consommateurs qui doit être repensée. Cette relation évolue en raison de l'essor de la production diffuse et des nouveaux usages de l'énergie tels que l'autoconsommation [Chapitre 4].

Dans ce dernier chapitre, nous étudions comment la décentralisation des systèmes de production peut impacter le rôle des acteurs et la chaîne de valeur à l'échelle locale. Les contraintes techniques qu'impose le fonctionnement des réseaux électriques deviennent plus complexes avec le développement de la production sur les réseaux de distribution et l'émergence des systèmes énergétiques multifluides. Ce processus impose une réflexion nouvelle sur la gestion de la stabilité du réseau à l'échelle de la distribution, ce qui inhabituel pour les acteurs historiques. Parallèlement, la valorisation économique des capacités à l'échelle locale pourrait aussi contribuer au maintien de la stabilité du réseau.

Pour tenter d'apporter un éclairage sur les possibles formes que pourraient prendre les relations entre les opérateurs de réseaux et les consommateurs, nous avons choisi de développer une démarche méthodologique reposant sur la construction d'idéal-types. L'idéal-type est ici compris au sens de Max Weber²⁰⁴. Il ne s'agit pas de révéler une forme majoritaire au regard de la statistique mais plutôt d'entrevoir des formes volontairement simplifiées d'un possible. Trois idéal-types vont ainsi être présentés dans ce chapitre afin d'envisager les formes que pourraient prendre l'approvisionnement énergétique bas carbone local d'un quartier et l'impact qu'elles pourraient avoir sur les relations entre les acteurs. Dans un troisième temps, nous examinerons la possibilité d'émergence d'un nouvel acteur dans la chaîne de valeur énergétique au niveau du quartier. Le rôle de cet acteur sur ce territoire sera de valoriser à la fois techniquement et économiquement en optimisant le fonctionnement du système en interne et en valorisant ses capacités à l'extérieur du territoire. Cette valorisation se fera au profit des acteurs de l'écoquartier, regroupés sous un statut juridique particulier pour constituer un interlocuteur unique des autres parties-prenantes de la chaîne de valeur énergétique.

²⁰⁴ Max Weber définit l'idéal-type en affirmant qu' « *On obtient un idéaltype en accentuant unilatéralement un ou plusieurs points de vue et en enchaînant une multitude de phénomènes donnés isolément, diffus et discrets, que l'on trouve tantôt en grand nombre, tantôt en petit nombre et par endroits pas du tout, qu'on ordonne selon les précédents points de vue unilatéralement, pour former un tableau de pensée homogène. On ne trouvera nulle part empiriquement un pareil tableau dans sa pureté conceptuelle : il est une utopie.* » [Weber, 1992, p 181].

Weber M., 1992, « Essais sur la théorie de la science [Un recueil d'article publié entre 1904 et 1917] », Pocket Agora, 478 pages

1. La gestion de la flexibilité à l'échelle du quartier : valorisation économique et jeu d'acteurs

Les chapitres précédents ont fait apparaître la gestion de la flexibilité dans les réseaux comme un enjeu important pour la décentralisation des systèmes énergétiques. Pour ne pas mettre en danger leur bon fonctionnement, les réseaux électriques doivent en effet garantir un équilibre permanent entre l'offre et la demande. Nous décrirons donc dans un premier temps, le fonctionnement technique du système électrique et l'impact du développement des énergies renouvelables au niveau du réseau local, puis dans un second temps, les mécanismes de marché mise en œuvre pour valoriser la flexibilité, et enfin, les apports possibles des systèmes multi-fluides pour améliorer la flexibilité du réseau.

1.1. La gestion de la flexibilité sur le réseau électrique

Le réseau électrique doit être géré en temps réel afin de garantir la qualité de la fourniture aux consommateurs. Cette spécificité s'explique en raison de la difficulté de stockage de cette énergie. Un système technique complexe basé sur la gestion de la demande et de la production a donc été mis en place afin de garantir le bon fonctionnement du système électrique. La gestion de ce système doit aujourd'hui prendre en compte l'insertion massive des énergies renouvelables variables sur les réseaux de distribution.

1.1.1. Les options liées à l'offre d'électricité

Le bon fonctionnement du réseau électrique repose sur différents mécanismes techniques mis en place pour garantir l'équilibre du réseau que nous allons décrire ci-après.

Selon Eurelectric²⁰⁵, les services auxiliaires sont « *l'ensemble des services requis par les opérateurs de système de transport ou de distribution afin qu'ils soient capables de maintenir l'intégrité et la stabilité des systèmes de transmission ou de distribution ainsi que la qualité de l'énergie* » [Eurelectric, 2004, p8]. Ces besoins peuvent être satisfaits techniquement par des générateurs, des charges pouvant être commandées et des dispositifs de réseaux. Ils aident les opérateurs de système à maintenir le niveau de fréquence et de tension dans les limites requises afin d'éviter la survenue d'aléas. Dans le cas de la survenance de perturbations, ils aident à la récupération et au rétablissement du système électrique. Ces services assurent également une bonne qualité de l'énergie électrique circulant dans le réseau grâce à la continuité de service reposant sur le respect des niveaux de tension et de fréquence.

²⁰⁵ Eurelectric est l'association de l'union des industries électriques à l'échelle européenne. Elle a publié un rapport sur les services auxiliaires en 2004 qui fait référence dans le domaine électrique. La définition dont utilisée dans ce chapitre repose sur ce document.

Le contrôle de fréquence

Le contrôle de fréquence²⁰⁶ répond à deux exigences fondamentales. Premièrement, il consiste à assurer la sûreté de fonctionnement du système afin d'éviter les écroulements de fréquence. Son évolution est l'image directe de l'équilibre ou du déséquilibre entre la production et la consommation sur le réseau. Ainsi, la fréquence augmente lorsque le bilan production/consommation est excédentaire et diminue lorsque le bilan production/consommation est déficitaire. Deuxièmement, le maintien de la fréquence à proximité de sa valeur nominale (50 Hz) est nécessaire au bon fonctionnement des matériels électriques utilisés par les consommateurs et par les producteurs.

Face aux évolutions de la consommation électrique et aux divers aléas rencontrés en exploitation (perte de groupe de production ou de charge, montée des énergies intermittentes et aléatoires,...), le maintien de l'équilibre entre la production et la consommation et donc le maintien d'une valeur satisfaisante de la fréquence nécessitent d'adapter en permanence production et consommation. Pour cela, on utilise des réserves de puissance mobilisables rapidement, soit par le biais de systèmes automatiques (réserves primaire et secondaire), soit par le biais d'actions réalisées par des opérateurs (réglage tertiaire).

*La réserve primaire*²⁰⁷ est utilisée pour faire face aux aléas et aux incidents tels que les fluctuations rapides de la consommation (enclenchements tarifaires, déclenchements de charges....) ou les déclenchements de groupe de production. Ce dispositif permet de rétablir en quelques secondes l'équilibre production/consommation de manière automatique en maintenant une fréquence proche de la fréquence de référence. En Europe, la constitution de la réserve primaire est assurée par l'ensemble des producteurs européens de l'Union pour la Coordination du Transport de l'Electricité (UCTE)²⁰⁸. Les groupes décentralisés étant généralement de faibles puissances, ils ne participent habituellement pas au contrôle de la fréquence mais ils doivent toutefois rester connectés au réseau électrique en cas de variation de cette dernière.

²⁰⁶ La fréquence est définie aux alentours de 50 HZ pour l'Europe selon la norme européenne EN 50160. La stabilité de la fréquence représente l'équilibre entre la production et la consommation. Elle est fixée par la vitesse de rotation des alternateurs. La fréquence d'utilisation a un impact sur le dimensionnement des générateurs et des récepteurs.

²⁰⁷ Le réglage primaire de fréquence est mis en œuvre automatiquement par l'action des régulateurs de vitesse des groupes de production. Si la production est inférieure (respectivement supérieure) à la consommation, tous les groupes de production participant à la réserve primaire augmentent (respectivement baissent) leur production entre 15 et 30 secondes après la rupture de l'équilibre.

²⁰⁸ L'Union pour la Coordination du Transport de l'Electricité (UCTE) est l'association des gestionnaires des réseaux électriques de transport interconnectés de l'Europe Continentale (Centre et Ouest). Cette réserve doit pouvoir répondre à la perte simultanée des deux plus gros groupes de production présents sur cette plaque, ce qui représente environ 3 000 MW.

La réserve secondaire est la conséquence de l'action du réglage primaire qui peut laisser subsister un écart par rapport à la fréquence de consigne et provoquer des écarts dans les échanges entre les pays du système interconnecté synchrone²⁰⁹. Le réglage secondaire a donc pour objectif de ramener la fréquence à sa valeur de référence et de rétablir les transits de puissance aux interconnexions en quelques minutes. Le réglage de la réserve secondaire est automatique comme la réserve primaire.

La réserve tertiaire est un mécanisme qui permet de reconstituer les réserves primaires et secondaires à l'issue d'un incident majeur. Afin de les régénérer et d'éviter de nouvel incident, une réserve de disponibilité est constituée la veille. Cette réserve est libérée manuellement et se répartie sur plusieurs centre de production. Elle peut débloquer différents types de réserves qui se différencient selon leurs délais de mobilisation et leurs durées d'utilisation. Cette réserve est contractualisée par le gestionnaire de réseau de transport, les producteurs et des acteurs tiers sur un marché spécifique qui répond au nom de mécanisme d'ajustement.

Le contrôle de la tension

Le contrôle de la tension²¹⁰ est un service essentiel au même titre que la fréquence pour garantir la qualité de la fourniture de l'énergie électrique. Comme pour la fréquence, si la tension est trop élevée, elle peut engendrer la destruction du matériel utilisé. Le contrôle de tension peut être réalisé par des compensateurs synchrones ou des ressources statiques. Il existe trois niveaux de réglages successifs qui peuvent être mobilisés lorsqu'un problème de tension apparaît.

Dans un premier temps, le réglage de la tension primaire consiste en une régulation automatique à un niveau local. Dans un second temps, il peut y avoir recours au réglage de la tension secondaire. Enfin, le réglage de la tension tertiaire est un processus manuel dont les opérations sont ordonnées par le dispatching au niveau national. Ce réglage permet d'assurer le maintien ou le rétablissement d'un plan tension. Il est donc nécessaire d'avoir une très bonne connaissance du réseau, de son état de charge ainsi que des effets dus aux interventions avant de prendre les décisions.

²⁰⁹ Tous les groupes des pays du système interconnecté synchrone participant au réglage primaire réagissent à la variation de fréquence commune, que la perturbation se produise sur le système électrique d'un pays ou à l'extérieur de ce dernier.

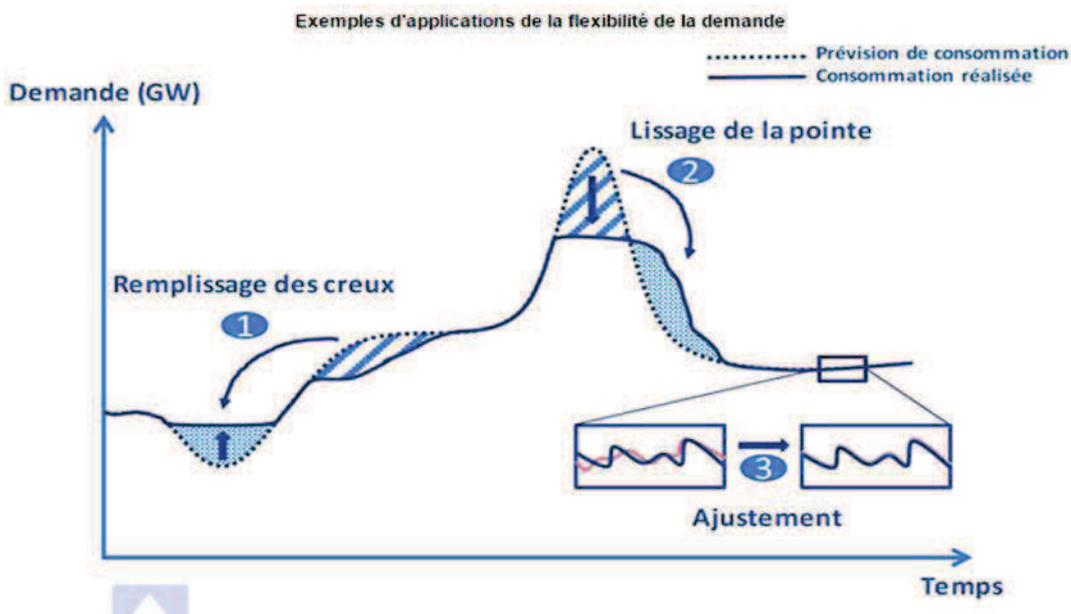
²¹⁰ À l'une de ses extrémités, la tension d'une ligne d'un réseau s'écarte de sa valeur nominale suivant les facteurs de puissance aux points de couplage. La différence de tension entre les extrémités est fonction de la puissance apparente transportée par la ligne. En agissant sur le courant d'excitation d'un alternateur, ce dernier produit ou consomme de la puissance réactive, ce qui modifie la tension au point d'injection. De proche en proche, cet effet se répercute sur l'ensemble des tensions des points voisins.

1.1.2. La flexibilité de la demande

La flexibilité de la demande peut également contribuer à la stabilité du réseau. L'accroissement ou plus souvent l'effacement de la demande qui se traduisent par une modification temporaire de la courbe de charge permettent, au même titre que les options d'offre, de rééquilibrer l'offre et la demande. L'effacement peut être mise en œuvre par différents moyens tels que les signaux tarifaire ou le pilotage direct de l'autoproduction avec le pilotage dynamique, par exemple. Elle peut présenter des caractéristiques techniques différentes selon le profil des consommateurs et des usages concernés (durée de l'effacement, existence et forme du report de consommation, etc.).

Il existe une grande diversité de gisements de flexibilité technique présente chez les consommateurs résidentiels et tertiaires. Il est ainsi possible pour de stocker de l'énergie dans les ballons d'eau chaude ou de façon encore peu répandue dans les systèmes de stockage mobile, voire des réservoirs d'air comprimé lorsque les prix de l'électricité sont élevés. Il est également possible d'interrompre le fonctionnement de certains équipements électriques durant une courte période donnée ou de le décaler lorsque des périodes de pointe surviennent grâce à l'essor des compteurs intelligents [Figure 41 : Exemple d'application de la flexibilité de la demande].

Figure 41 : Exemple d'application de la flexibilité de la demande-source : CRE, 2015²¹¹.



Toutefois, des effets-reports peuvent également surgir lorsqu'un effacement de consommation est temporaire et n'a pas comme vocation première de réduire la consommation globale d'électricité. La consommation effacée sera ainsi reportée à une période ultérieure afin d'assurer un niveau de confort équivalent au consommateur. Elle peut toutefois être anticipée, lorsque l'effacement est réalisé chez un client industriel ou tertiaire qui a besoin de maintenir son niveau d'activité²¹². Par ailleurs, des effets rebonds peuvent apparaître lorsque la consommation en puissance d'un site de soutirage augmente à l'issue d'une période d'effacement sur une courte période. La remise en route de l'appareil effacé peut alors engendrer un appel de puissance électrique supérieur à son niveau initial pendant quelques instants et générer de nouvelles contraintes sur le réseau, notamment lorsqu'un grand nombre d'appareils redémarrent de façon synchrone.

L'accroissement des capacités de production renouvelables sur les réseaux électriques de distribution impose toutefois de développer de nouveaux moyens de garantir la flexibilité à l'échelle locale en raison de leur caractère intermittent et aléatoire.

²¹¹ Dossier CRE, 2015, « L'intégration des énergies renouvelables », <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=integrationnr-nouveau-metier>, consulté en juin 2017

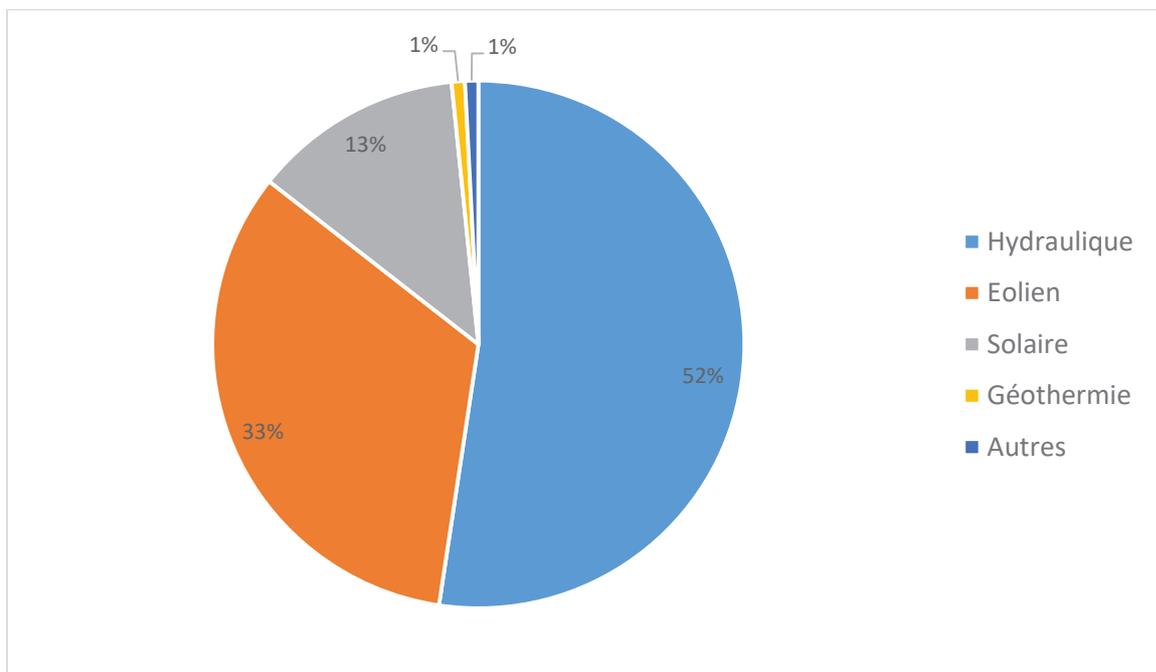
²¹² Idem

1.1.3. L'accroissement des besoins de flexibilité à l'échelle locale dans les années futures

A l'instar des besoins de flexibilité dans les réseaux de transports électrique, des besoins de flexibilité vont apparaître dans les réseaux locaux de distribution dans les prochaines années en raison du développement des énergies renouvelables et des capacités de stockage décentralisées.

La part de la production d'électricité issue des énergies renouvelables en Europe était en 2016 de 25% avec environ 52% d'hydraulique, 33% d'éolien, 12,7% de solaire, 0,8% de géothermie et 0,8% d'autres²¹³ [Figure 42 : Mix des énergies renouvelables constituant les 25% de production d'électricité bas carbone de l'Union Européenne]. Cette part a augmenté de 12 points en 10 ans entre 2004 et 2014 passant d'un peu moins de 15% à 27%, ce qui peut s'expliquer par la promotion des énergies renouvelables depuis le Paquet Climat-Energie de 2008. L'actualisation de ce paquet en 2018 annonce une ambition encore plus importante d'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique européen avec 32% attendus en 2030. Or, une part non négligeable de cette production participera au mix électrique à travers les réseaux de distribution grâce au développement des technologies de production distribuée.

Figure 42 : Mix des énergies renouvelables constituant les 25% de production d'électricité bas carbone de l'Union Européenne –source : Eurostats- [Construction de l'auteur]



²¹³ Eurostats, 2017:

[http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/File:Net_electricity_generation_EU-28_2014_\(%C2%B9\)_\(%25_of_total_based_on_GWh\)_YB16-fr.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/File:Net_electricity_generation_EU-28_2014_(%C2%B9)_(%25_of_total_based_on_GWh)_YB16-fr.png), consulté le 29 mars 2017

Pour répondre à la montée du besoin de flexibilité et préserver la fiabilité des réseaux locaux, les opérateurs de réseaux de distribution vont s'équiper de systèmes d'information intelligents. Ces technologies vont permettre la gestion à distance, notamment des moyens de production distribuée [Tuballa et al, 2016]. Ils permettront également de disposer de systèmes d'information offrant la possibilité d'anticiper les évolutions de consommation et de développer des modèles de prédiction favorisant la gestion des sites tout en préservant un niveau de confort ou de service minimum pour les usagers [Kabalci, 2016].

L'essor des productions décentralisées engendre la probabilité d'une augmentation de la survenance d'aléas techniques qui doivent être le plus rapidement limités afin de maintenir la bonne qualité de fourniture. Mais ils offrent également de nouveaux moyens de flexibilité qui pourraient être un moyen de valoriser économiquement les flux énergétiques. Aujourd'hui, les mécanismes de flexibilité associés au marché électrique sont gérés par les opérateurs de réseau de transport, mais les nouveaux besoins et offres de flexibilité qui émergent pourraient constituer de nouvelles opportunités de valorisation économique à l'échelle locale [McDonald, 2008].

1.2. La valorisation économique de la flexibilité

Actuellement, le marché valorise principalement les capacités de productions raccordées au réseau de transport via le marché de gros ou le mécanisme d'ajustement. Néanmoins, des réflexions autour de systèmes de valorisation économique des capacités décentralisées, tels que le Demand/Response et les Virtual Power Plant, émergent.

1.2.1. Le fonctionnement actuel du marché électrique

Pour bien comprendre l'enjeu de la valorisation économique des systèmes de production décentralisés, il est nécessaire de commencer par présenter le fonctionnement du marché électrique.

Le rôle du marché de gros

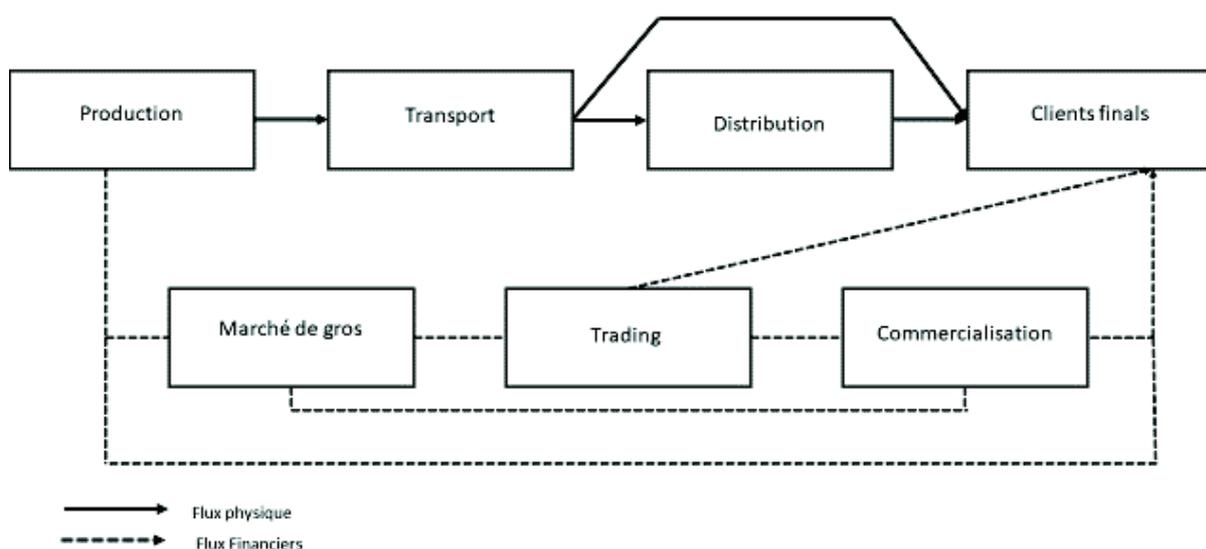
Le marché de gros désigne la place où les capacités de production produisant de gros volume d'électricité sont négociées entre différents acteurs avant d'être émise sur le réseau pour être livrée aux clients finaux. Plusieurs acteurs sont présents sur ce marché : i/ les producteurs qui possèdent des capacités de production de plusieurs mégawatts et vendent l'électricité produite à des revendeurs ou à des gros consommateurs ; ii/ les revendeurs ou les fournisseurs qui achètent l'électricité sur le marché de gros et la revendent sur le marché de détail ; iii/ les traders qui achètent et revendent l'électricité sur le marché de gros et le reste des consommateurs finaux qui achètent leur électricité via des offres de marché ou, mais de façon résiduelle, des offres à prix régulés [Hansen et al, 2010]. Le marché de gros est caractérisé par la présence de plusieurs types de produits échangeables qui sont associés à des temporalités différentes. Ils peuvent s'échanger sur une place boursière, de façon inter médiée via un

courtier ou encore de gré à gré. Les transactions peuvent déboucher sur une livraison physique de flux ou sur être purement financières [Hansen et al, 2010] [Figure 43 : Fonctionnement du marché de gros].

Deux types de produits peuvent être échangés sur le marché de gros : les produits spots et les produits à terme. Les produits spot sont des produits journaliers (*day-ahead*) ou weekend définis en pas semi-horaires, horaires ou en blocs de plusieurs heures. Ils sont livrés soit en «base », c'est-à-dire toute la journée et tous les jours (24h/24 et 7j/7) soit en « pointe », c'est-à-dire à certaines heures de la journée en semaine. Le prix de référence est le prix *day-ahead*. Ce prix reflète l'équilibre offre-demande à court terme avant l'ajustement. Les prix spot sont soumis à une forte volatilité en raison de divers facteurs pouvant influencer l'équilibre offre-demande (événements climatiques tels que canicules, absence de vent, chute de température, centrale tombant en panne, problème d'interconnexion) [Hansen et al, 2010].

Les acteurs du marché de l'électricité signent aussi des contrats de ventes et d'achat d'électricité pour des fournitures allant de quelques semaines à plusieurs années afin de limiter les aléas provenant de la volatilité des produits spot. Les produits à terme portent sur des produits standardisés dont les prix sont négociés au moment de la date d'effet du contrat. Les contrats portant sur des produits standardisés, les échanges sont facilités et limitent la volatilité des prix. Les prix correspondent à une moyenne anticipée des prix spots sur la période considérée ; ce qui a pour effet de rendre les prix des produits à terme moins volatils. Les produits à terme servent à la définition des prix aux clients finals. L'intérêt est que lorsqu'un fournisseur signe un contrat avec un client, il va se couvrir en achetant des produits à terme pour effectuer ses livraisons [Hansen et al, 2010].

Figure 43 : Fonctionnement du marché de gros [Construction de l'auteur]

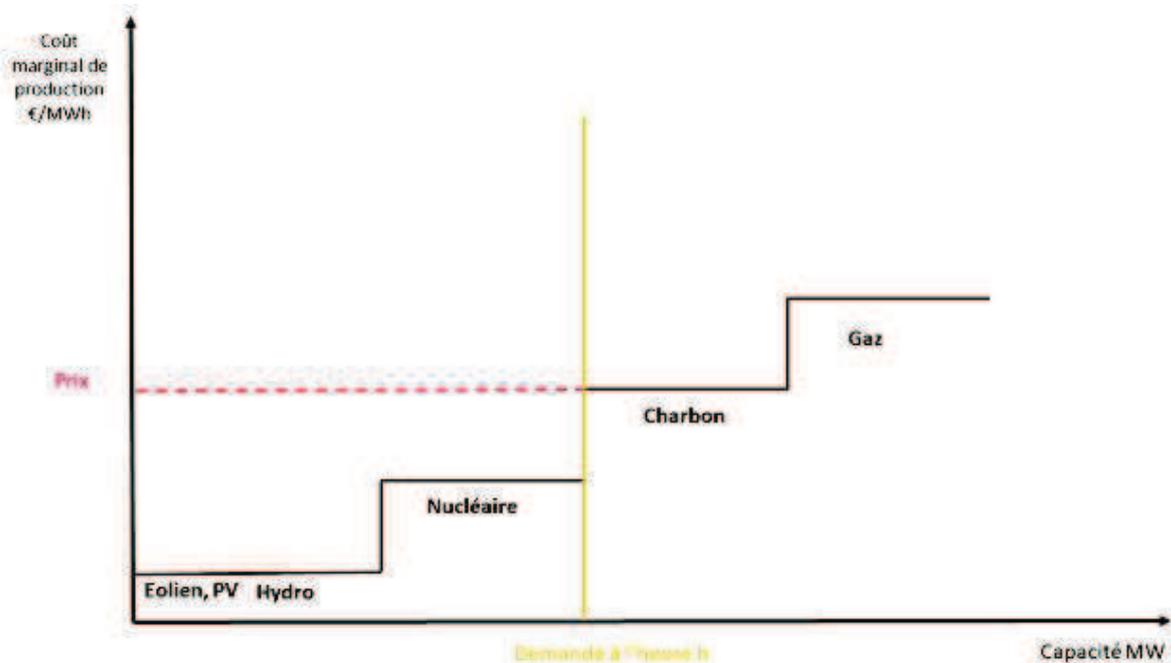


Le prix de l'électricité

Les prix de l'électricité dépendent essentiellement de la demande électrique et de la présence économique des moyens de production. L'électricité est une énergie difficilement stockable soumise à des effets de pointes en raison d'une demande difficile à anticiper qui varie selon des cycles journaliers, hebdomadaires et annuels. Pour éviter les défaillances, il peut être nécessaire de recourir à des moyens exceptionnels (surcharge de groupes thermiques, baisse de tension, effacement de clients, ...) ou de recourir à des délestages (coupures, délestages) [Hansen et al, 2010].

La production est actionnée selon un ordre de préséance économique (*merit order*), c'est-à-dire en appelant les capacités de production électrique selon le coût marginal croissant des équipements de production. Selon cet ordre, il faut d'abord utiliser l'électricité « fatale », c'est-à-dire l'électricité qui serait perdue si elle n'est pas utilisée sur le moment (éolien, au fil de l'eau, solaire). Les centrales nucléaires sont ensuite appelées puis viennent, les centrales thermiques. Enfin, certaines capacités hydrauliques dites capacités de stockage peuvent être appelées lors des pics de consommation [Figure 44 : Illustration de l'ordre de préséance économique]. Le prix est donc déterminé par la confrontation de la consommation et des capacités de production disponibles.

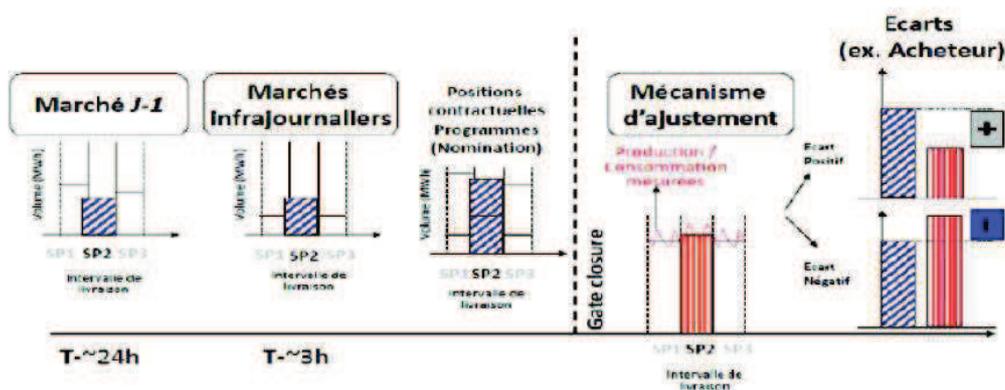
Figure 44 : Illustration de l'ordre de préséance économique Construction de l'auteur]



Le mécanisme d'ajustement

Les défaillances du réseau devant être corrigées le plus rapidement possibles, elles font l'objet d'échanges sur un marché particulier afin de rétablir l'équilibre de ce dernier. Ce processus est appelé en France « mécanisme d'ajustement ». La fermeture du guichet (*gate closure*) est le moment précis où le gestionnaire de réseau de transport responsable de l'équilibre n'accepte plus de modification des plans de production et de consommation, ni des positions contractuelles des différents acteurs de marchés. Avant ce moment, les acteurs du marché électrique peuvent modifier leur position contractuelle pour un période de livraison particulière. Après la fermeture du guichet, tous les programmes et les positions contractuelles communiqués au GRT deviennent définitifs et serviront pour le calcul des écarts, par comparaison avec les mesures réelles d'injection et de soutirage effectuées sur le réseau. Une différence entre l'énergie achetée dans les marchés précédents (*forward*, J-1, infra-journalier) et la consommation réelle (mesurée) est appelée un écart [Figure 45 : Séquence de marché entre le marché infra-journalier et le mécanisme d'ajustement].

Figure 45 : Séquence de marché entre le marché infra-journalier et le mécanisme d'ajustement –source Microeconomix-



Pour maintenir l'équilibre du système, le gestionnaire de réseau de transport fait appel sur le marché d'ajustement aux producteurs et aux consommateurs directement connectés au réseau de transport d'électricité pour qu'ils modifient très rapidement leur programme de fonctionnement. Le mécanisme d'ajustement est un outil fonctionnant selon des règles de marché. Il est destiné à contribuer à la sûreté du système électrique en fournissant une référence de prix au règlement des écarts.

1.2.2. Le développement des mécanismes de marché à l'échelle locale

De nouveaux mécanismes apparaissent pour valoriser les systèmes techniques à l'échelle locale. Ceux-ci peuvent être soit tournés vers une valorisation de la demande ou vers la valorisation des capacités de production de petites tailles.

1.2.2.1. La gestion active de la demande ou *demand/response*

La gestion active de la demande²¹⁴ plus connu sous le terme anglais de *demand/response* (DR) est un mécanisme supplémentaire par rapport aux mécanismes d'optimisation du parc de production pour répondre aux besoins du système électrique.

La gestion active de la demande qualifiée décrit la possibilité offerte aux consommateurs d'adapter leur consommation de façon temporaire et non récurrente, cela afin de répondre aux besoins du système électrique. L'effacement de consommation d'électricité est donc l'action qui consiste pour un ou plusieurs sites, à baisser temporairement, à la demande d'un opérateur d'effacement leur niveau de soutirage effectif sur le réseau.

Sur le court terme (horizons journalier, infra-journalier et temps réel), elle concourt à l'équilibre entre l'offre et la demande grâce aux ajustements et aux services systèmes. Sur le long terme, elle contribue à l'adéquation de l'offre et de la demande en réduisant les besoins en capacités de production de pointe. Elle permet également de réduire les besoins de renforcement des réseaux en améliorant la gestion des flux et réduit ainsi les coûts de gestion des contraintes du réseau. L'ensemble de ces apports participe à l'amélioration de la qualité de l'électricité.

On distingue deux types de mesures de *demand/response*. La DR « volontaire » qui correspond à un contrôle de la demande exercée directement par le consommateur et la DR « automatique » organisée par un tiers. Ce deuxième type fonctionne si et seulement si le consommateur donne son accord à un acteur pour que ce dernier pilote ses charges en fonction de différents critères définis contractuellement. Cette gestion automatique nécessite l'essor des technologies permettant de transmettre des informations (notamment tarifaire) et d'avoir un pilotage de la consommation à distance (*Direct Load Control – DLC* –) [Torriti et al, 2011].

De nombreux pilotes, réalisés aux Etats-Unis et en Europe ces dernières années, ont démontré que les effacements en période de pointe pouvaient produire des effets significatifs sur la chaîne électrique non seulement en aval mais également en amont. Ainsi, des offres de production peuvent être remplacées par des effacements de la demande qui sont valorisées sur des marchés. Cette possibilité offre une amélioration de l'efficacité énergétique grâce à l'effacement des centrales de production les plus coûteuses et/ou les plus émettrices permettant d'améliorer l'efficacité environnementale. Les gains obtenus sont toutefois de moins en moins importants au fur et à mesure que les volumes de demandes effacées augmentent ²¹⁵[Bergaentzlé et al, 2013].

²¹⁴ En français, ce terme peut se traduire par « Gestion active de la demande », « Participation de la demande » et « Réponse de la demande ».

²¹⁵ Bergaentzlé et al, 2014 indique ainsi que de large effacement impactent des centrales moins efficaces et moins coûteuses. Les gains marginaux deviennent alors décroissants.

Ce système expérimenté pour les capacités raccordées au réseau de transport pourrait être utilisée sur les réseaux de distribution en raison du développement des capacités distribuées et du stockage décentralisé. Les enjeux du *demand/response* au niveau des consommateurs présents sur les réseaux de distribution doivent toutefois être étudiés et pris en compte pour qu'ils puissent participer au développement des capacités de production bas carbone au niveau local [Bergaentzlé et al, 2014].

Afin d'assurer la flexibilité des centrales programmables, les unités temporelles vont en effet devoir devenir plus précises. Les marchés d'ajustement et les réserves seront amenés à jouer un rôle de plus en plus important, et leur articulation avec le marché journalier devra être repensée afin d'assurer l'efficacité des opérations. Certains auteurs recommandent en outre la mise en place de rémunérations pour la capacité à produire de l'énergie, en plus de la rémunération de l'énergie produite. De plus, une redéfinition de l'espace est nécessaire afin de faire face à l'émergence de flux très variables dans les réseaux de transport et de distribution. Une fois encore, les unités spatiales de gestion devront être plus précises. Cela pourrait conduire à une évolution majeure du paradigme historique, dans lequel la sécurité du système est à la charge du gestionnaire du réseau de transport (GRT), vers une approche plus décentralisée, avec un rôle majeur des acteurs locaux comme les gestionnaires du réseau de distribution (GRD) ou des agrégateurs commerciaux [Henriot et al, 2014].

1.2.2.2. Les centrales électriques virtuelles (*virtual power plants*)

Outre l'effacement, il existe une autre possibilité de créer de la flexibilité dans les réseaux de distribution électrique grâce aux centrales électriques virtuelles. Le principe consiste à créer une centrale virtuelle constituée d'un ensemble de petites centrales de production et de capacités de stockages décentralisées. Leur fonctionnement est optimisé grâce à un système de gestion de l'énergie qui permet aux centrales virtuelles de s'adapter aux fluctuations des charges grâce à la prévision et d'optimiser en temps réel les ressources énergétiques [Javad Kasei et al, 2017 ; Othman et al, 2017].

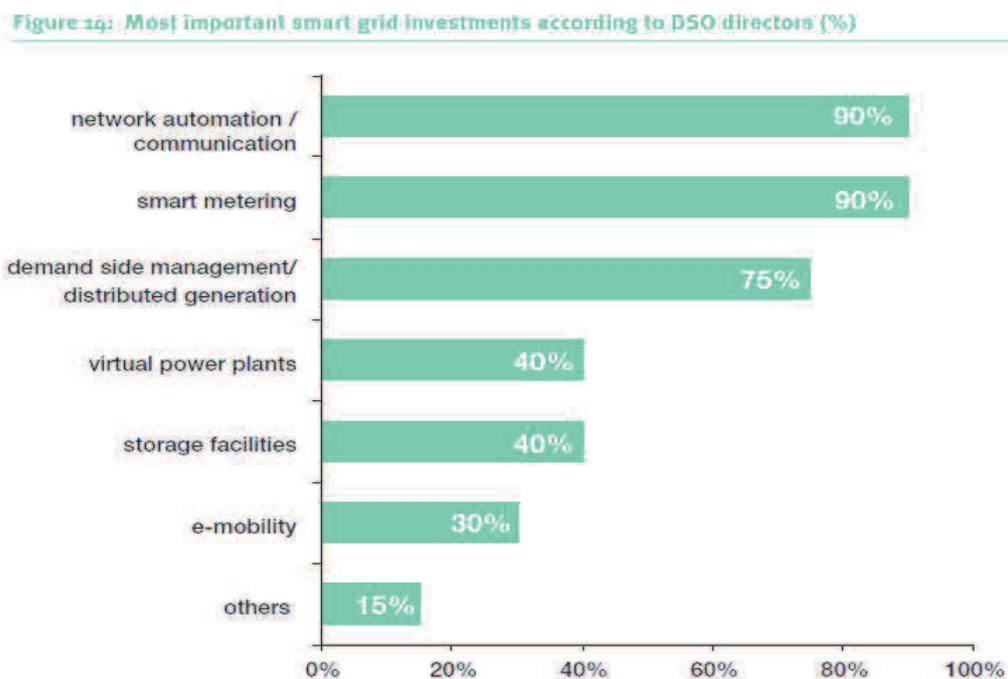
Le projet Power Hub développé dans les îles Féroé par la société danoise DONG Energy constitue un exemple de centrale virtuelle. Ce projet rassemble un ensemble de moyens de production et de charges (parcs éoliens et de véhicules électriques) pour optimiser le système. Il repose sur une plateforme logicielle organisée comme une centrale virtuelle qui permet de renforcer la stabilité de l'approvisionnement local en adaptant intelligemment capacités de production et besoins d'énergie et ainsi de lisser les situations de surproduction et de sous-production. DONG Energy s'est associée à Schneider Electric pour l'élaboration de cette plateforme virtuelle « À compter de novembre 2014, Schneider Electric déploiera sa suite complète de logiciels pour micro-réseaux. Cette plateforme applicative associera notamment les logiciels SCADA, ADMS (Advanced Distribution Management

System), Power Plant Controller et Weather Forecasting Systems et sera intégrée à l'actuel système Power Hub de DONG Energy »²¹⁶.

Les centrales électriques virtuelles pourraient également être un moyen d'optimiser l'investissement dans les réseaux et les capacités de production en limitant les déperditions d'énergies lors du transport et de la distribution de l'énergie. La possibilité de gérer en temps réel l'énergie permettrait de réaliser une gestion visant à mieux répondre aux besoins des consommateurs ou aux aléas liés au climat.

Les VPP laissent entrevoir des retours sur investissement importants, comme en témoigne la société de recherche *Pike Research* qui estimait déjà en 2012 qu'ils généreraient environ 5,3 milliards de dollars à l'horizon 2017. L'entreprise obtient ce résultat en misant sur une augmentation de 65% de la capacité des VPP entre 2011 et 2017, passant de 55,6 GW à 91,7 GW. Les centrales virtuelles pourraient se développer massivement si le cadre de régulation souhaité par Eurelectric pour les réseaux de distribution se met effectivement en place. Cette proposition fait ainsi partie des investissements les plus attendus par les opérateurs de réseaux de distribution interrogés et passe devant le stockage et la mobilité électrique [Figure 46 : Most important smart grid investment according to DSO directors] [Eurelectric, 2014].

Figure 46 : Most important smart grid investments according DSO directors –source : Eurelectric, 2014, p24-



²¹⁶ Euroénergie, 2014, « Schneider Electric fournira une solution intégrée de gestion de l'énergie pour optimiser la production des Iles Féroué », <https://www.euro-energie.com/schneider-electric-fournira-une-solution-integree-de-gestion-de-l-energie-pour-optimiser-la-production-et-le-reseau-electrique-des-iles-feroe-n-4665>, consulté en août 2017

Les ressources distribuées peuvent être des vecteurs de flexibilité par l'effacement de charges résidentielles et tertiaires, ou en mobilisant des moyens de production locaux (micro-grid, cogénération ou panneaux photovoltaïques) ou des dispositifs de stockage. Différents mécanismes de marché sont actuellement utilisés par les grands consommateurs et les gros producteurs. Le développement des capacités distribuées, de nouveaux acteurs et de nouvelles options de valorisation des flux apparaissent ; ce qui nécessite de redéfinir le *market design* actuel [Eid et al, 2016].

1.3. Valorisation des ressources locales via les systèmes multi-fluides

Dans les premiers chapitres de cette thèse, nous avons montré que des propositions de systèmes d'approvisionnement énergétique bas carbone dans les écoquartiers étaient généralement étudiées et réalisées de manière dissociées selon le vecteur électricité et chaleur, c'est-à-dire sans envisager d'interface et d'interconnexion et donc a fortiori de mutualisation. Alors que certaines études ont tenté de démontrer l'intérêt des offres bas carbone ; elles ne prennent généralement pas en compte la possible combinaison des besoins énergétiques et des technologies alternatives d'approvisionnement sur le territoire.

Les écoquartiers pourraient pourtant être considérés comme des systèmes multi-énergies dans lesquels il est possible d'associer des systèmes de production et de stockage spécifiques à certains vecteurs énergétiques ou communs à plusieurs, comme par exemple avec les systèmes de cogénération [Mancarella, 2014 ; Good et al, 2016]. Les écoquartiers sont approvisionnés par différents types de flux issus des capacités de production présentes sur le territoire local ou alentours. Les systèmes énergétiques locaux peuvent les considérer de façon indépendante ou au contraire de façon conjointe afin d'optimiser le système technique et garantir la meilleure fourniture possible aux usagers [Niemi et al, 2012]. Néanmoins, l'interdépendance entraîne une augmentation de la complexité des systèmes énergétiques.

Ces systèmes doivent également trouver un modèle d'affaire les soutenant car ils ne peuvent être fondés sur les externalités positives propres aux grands réseaux. La réalisation de systèmes multi-fluides au niveau du quartier conduit à s'interroger sur l'arbitrage technico-économique à réaliser afin que le système soit efficient et valorisable économiquement. L'évaluation des modèles d'affaires liées à l'installation de systèmes d'approvisionnement multi-énergie bas carbone est stratégique pour les acteurs de l'énergie. Au vue de la complexité de la chaîne de valeur de chaque source d'énergie, l'évaluation économique d'un tel système constitue un véritable défi [Good et al, 2016].

L'enjeu de la flexibilité et l'essor des réflexions autour des systèmes multi-énergies décentralisés nous obligent à nous interroger sur leur traitement à l'échelle du quartier. Nous essayons ci-après d'éclairer l'intérêt à la fois technique et économique de différents futurs possibles des systèmes énergétiques bas carbone à l'échelle des quartiers.

2. L’approvisionnement énergétique bas carbone des quartiers : quelle forme dans le futur ?

Il a été vu qu’historiquement le quartier n’était pas envisagé comme une échelle pertinente de réflexion en matière d’approvisionnement énergétique. Les acteurs raisonnaient à l’échelle nationale ou régionale pour l’électricité et à l’échelle urbaine pour la chaleur. L’essor des énergies renouvelables installées à l’échelle locale ainsi que le développement des projets d’écoquartiers a porté la question de l’intérêt de réaliser un approvisionnement énergétique à cette échelle. Le fait de produire en valorisant les ressources in situ tout en ayant des systèmes a priori plus performants que ce qui pourrait être installés dans un bâtiment semble une idée à explorer. Néanmoins, plusieurs enjeux techniques et économiques doivent être considérés pour que cette échelle devienne centrale dans les prochaines années. En effet, la Partie 1 du travail de thèse, nous a ainsi montré qu’actuellement les projets d’écoquartiers sont essentiellement tournés vers l’efficacité énergétique. L’approvisionnement énergétique local et bas carbone est quant à lui rarement considéré.

Néanmoins, la volonté affichée dans plusieurs de ces projets de prendre en compte la question de l’approvisionnement montre un intérêt croissant des acteurs urbains pour une perspective énergétique large. Dans leur mode de réalisation, il est à remarquer que les écoquartiers ne répondent pas à un cahier des charges unique. Ce constat ouvre le champ des possibles pour l’avenir [Chapitre 1 et 2]. Partant de ce constat, il nous a paru intéressant de proposer une réflexion sur l’approvisionnement énergétique bas carbone des quartiers à un horizon de dix à vingt ans. Cet horizon temporel correspond à la maturation de technologies de production de petites puissances et à la diffusion de nouvelles technologies de l’information et de communication dans le secteur énergétique. Afin d’envisager différents modèles de l’approvisionnement énergétique bas carbone à l’échelle du quartier, nous avons esquissé trois idéaltypes articulés différemment trois problématiques : l’efficacité énergétique, la flexibilité et l’autonomie énergétique.

Le premier idéaltipe se limite à l’efficacité énergétique du territoire et l’approvisionnement bas carbone du quartier est alors assuré par des capacités de production exogènes. Le second idéaltipe combine la mobilisation de ressources renouvelables in situ avec le recours à des capacités exogènes qui demeurent néanmoins dominantes ; la gestion de la flexibilité requiert néanmoins un nouvel acteur de l’énergie coordonnant des ressources in situ. Enfin, le troisième idéaltipe envisage le quartier comme un îlot dont le système énergétique bas carbone a été optimisé techniquement et économiquement afin d’offrir un certain niveau élevé d’autonomie aux consommateurs du quartier [Annexe 12 : Récapitulatif des idéaltypes présentés].

2.1. Idéal-type n°1 : Un approvisionnement bas carbone pour le quartier garanti contractuellement

Le quartier est dans ce cas envisagé comme un projet urbain piloté par une collectivité ayant la volonté de moderniser une partie de son territoire en lui donnant une orientation basée sur le développement durable et la transition énergétique. L'approvisionnement énergétique est réalisé à l'extérieur du quartier mais répond aux exigences environnementales définies dans le cahier des charges du projet urbain et est par conséquent bas carbone.

2.1.1. Cartographie du territoire

Par exemple, la collectivité rénove une friche urbaine pour en faire un nouvel espace de vie respectant les piliers du développement durable. Ce nouveau quartier propose alors de la mixité sociale et intergénérationnelle ; c'est-à-dire qu'il regroupe des populations n'ayant pas le même mode de vie en raison de leurs différences de ressources et d'âges grâce à la construction de lieux de vies pour ces différents types de population (écoles, maison de retraite, HLM,...). De plus, il regroupe un ensemble d'activités tertiaires qui ont pour rôle de répondre aux ambitions de développer l'attractivité économique du territoire. Elle peut prendre la forme de commerces de proximité, de bureaux tertiaires ou encore de services administratifs. Enfin, le quartier présente également une réflexion approfondie sur les problématiques environnementales dont la collectivité a fait le choix de se saisir (eau, déchet, sol...) [Charlot-Valdieu et al, 2009 ; Bouteaud, 2014].

En matière de politique environnementale, outre les autres thématiques prises en compte comme l'eau ou les déchets, un accent particulier est mis sur l'ambition de créer une ville bas carbone afin de répondre aux enjeux de transition énergétique. L'objectif est de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990 tout en étant largement autonome face aux énergies fossiles et en étant en situation de s'adapter à un réchauffement climatique compris entre 2 et 4 degrés supplémentaire à la fin du siècle [ADEME, 2013a]. Ce choix répond à la prise de conscience de la collectivité de l'impact des villes sur le changement climatique, la pollution et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Rappelons que les territoires urbains participent pour plus des deux tiers à la consommation mondiale d'énergie et pour plus de 70% aux émissions de gaz carbonique [Véron, 2007].

Les infrastructures qui sont installées dans le quartier regroupent à la fois des bâtiments et du mobilier urbain. Les bâtiments construits répondent à une fonction résidentielle avec la présence de bâtiment d'habitation et à une fonction tertiaire avec des bâtiments destinés aux petits commerces, aux activités administratives et aux activités sociales (écoles, maison de retraites,...). Les activités industrielles ayant des consommations énergétiques importantes et dont le raccordement électrique se fait sur le réseau de transport ne sont pas intégrées dans le quartier. Le mobilier urbain²¹⁷ comprend l'ensemble des objets installés dans l'espace public pouvant être consommateurs d'énergie comme des panneaux publicitaires dont les supports sont des écrans, des candélabres ou encore des bornes de recharges pour les véhicules électriques²¹⁸.

Le quartier est un territoire public dont une partie a été divisée en plusieurs lots vendus à des promoteurs immobiliers. Ces promoteurs peuvent avoir un statut public ou privé et ont en charge la réalisation des bâtiments. Les bâtiments sont réalisés dans un souci de développer le parc social, d'apporter de nouveaux locaux à l'administration, d'améliorer l'accession à la propriété et d'encourager les activités tertiaires avec la construction de bureaux et/ou de surfaces dédiées à divers types de commerce sur le territoire. Les bâtiments seront réalisés dans le cadre d'un programme d'aménagement urbain sur un territoire donné de la ville. Le mobilier urbain sera quant à lui installé sur le territoire public et sera régit par la collectivité publique.

Dans cet idéal-type, le quartier est une échelle administrative avant d'être une échelle technique. Les réflexions autour de la transition énergétique se traduisent dans le quartier par la volonté d'améliorer l'efficacité énergétique plus que d'assurer un approvisionnement énergétique local bas carbone. Ainsi, le quartier n'est pas le réceptacle de moyens de production décentralisés de la chaleur ou d'électricité.

2.1.2. Traitement de l'efficacité énergétique dans le quartier

Les bâtiments construits dans le quartier sont des bâtiments neufs qui répondent aux réglementations en vigueur en matière de performance énergétique (Directive sur l'efficacité énergétique, Réglementation thermique,...)²¹⁹. Il est attendu que les nouveaux bâtiments soient basse consommation, c'est-à-dire que leur consommation soit nettement en deçà de celle des bâtiments standards encore présents à proximité. Afin d'augmenter l'attractivité de ce nouveau territoire et de donner davantage de visibilité au projet

²¹⁷ Il peut s'agir de mobilier de repos (banc, siège, table), d'objets contribuant à la propreté (poubelles, sanitaires), d'éclairage public (candélabres), de matériels d'information et de communication (kiosques, panneaux d'affichages,...), de jeux pour enfants, d'objets utiles à la circulation des véhicules (horodateurs, bornes de recharges, range-vélo,...), de barrières de police et d'aubettes.

²¹⁸ CRE, Dossier « L'éclairage public et le mobilier urbain intelligents », consulté en juin 2017, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?rubrique=dossiers&srub=eclairage-mobilierintelligents&action=imprimer>

²¹⁹ La réalisation de quartier dans d'anciennes friches obligera dans certains cas à réhabiliter certains bâtiments historiquement présents sur la zone ; c'est-à-dire que sans détruire ou raser la construction, ceux-ci devront être entièrement restructurés afin de répondre aux exigences inscrites dans les réglementations. Cette possibilité restera toutefois marginale

urbain, certaines réalisations vont tenter de dépasser les niveaux réglementaires. Ces réalisations vont alors être sanctionnées par la remise de labels exposant la hauteur de la performance énergétique et leur qualité environnementale [Cf. Chapitre 1, Annexes 1 et 2]. Le mobilier urbain est également neuf et est doté de systèmes peu énergivores²²⁰ permettant de réduire le poids de leur utilisation dans la facture énergétique des collectivités.

La maîtrise de la demande énergétique est également prise en compte dans le quartier. Elle se traduit par la volonté de faire réaliser un maximum d'économie d'énergie aux consommateurs. Outre la performance énergétique des bâtiments, l'installation de compteurs intelligents dans les bâtiments permettant aux usagers de mieux gérer leurs consommations grâce à l'installation de capteurs et de systèmes intelligents. Ces systèmes permettent d'informer les usagers sur leurs profils de consommation grâce à la récolte de l'information, de son traitement et de sa communication par différents canaux de diffusion (mail, courrier,...) [D'Oca et al, 2014 ; Kabalci, 2016]. La maîtrise de la demande énergétique passe également par une modification de la tarification de l'énergie qui impacte les consommations de chacun des consommateurs du quartier. Dans cet idéal type, chaque consommateur du quartier est pris individuellement, c'est-à-dire que chacun des acteurs paye individuellement sa consommation énergétique directement à son fournisseur [Cf. Chapitre 5 Section 2.1.5]. Des services énergétiques seront également proposés à la ville pour gérer le mobilier urbain afin de limiter sa consommation et de réduire sa facture énergétique puisque cette dernière a encore un poids important dans son budget [Covenant of Mayor, 2016].

2.1.3. L'approvisionnement électrique bas carbone du quartier

Dans cet idéal-type, le quartier ne présente pas de réflexion approfondie en matière d'approvisionnement électrique bas carbone à l'échelle locale car le traitement de l'infrastructure reste relativement proche du fonctionnement actuel de la chaîne de valeur électrique.

Mix énergétique et infrastructures de distribution

Le mix énergétique permettant de répondre aux besoins du territoire repose sur des sources d'énergies bas carbone et carbonées présentes sur l'ensemble du territoire national. Le fonctionnement des réseaux de transport et de distribution change peu par rapport à aujourd'hui. Seule une gestion plus dynamique des réseaux et notamment des activités de distribution est rendue possible grâce à la diffusion des technologies *smart grids* [Figure 47 : Schéma de l'approvisionnement électrique au niveau du quartier-Idéal-type n°1-].

²²⁰ CRE, Dossier sur l'éclairage public et l'éclairage urbain, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?rubrique=dossiers&srub=eclairage-mobilier-intelligents&action=imprimer>, consulté le 10 avril 2017

Le mix énergétique

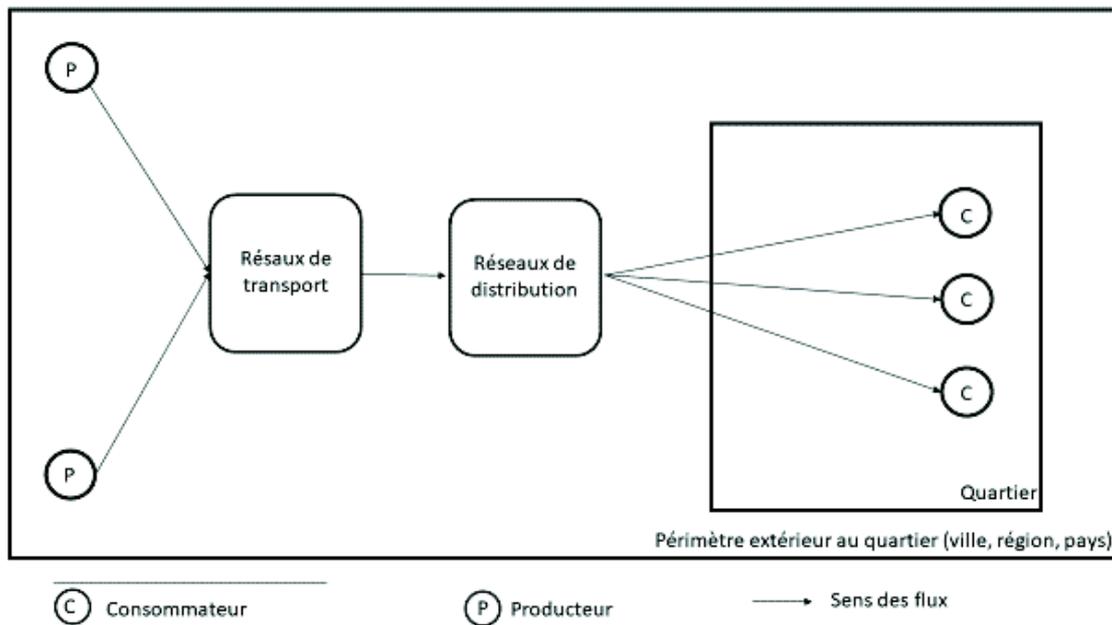
Le choix des capacités de production permettant l’approvisionnement électrique du quartier ne dépend pas des ressources disponibles sur son territoire. La consommation des usagers du quartier est donc satisfaite par un approvisionnement non local provenant de centrales de production extérieures à ce dernier [CE, 2014]. La structuration du mix énergétique et les choix entre systèmes carbonés et systèmes décarbonés dépendent de la politique énergétique mise en œuvre au niveau national. En ce qui concerne les Etats Membres de l’Union Européenne, l’institution européenne continue à avoir un rôle de promotion des énergies renouvelables via les multiples actualisations du Paquet Climat-Energie depuis 2008. Ce dispositif impacte donc toujours les politiques énergétiques nationales.

Le recours à des capacités de production bas carbone comme les centrales hydrauliques, les grandes fermes éoliennes ou solaires se développent et prennent de plus en plus de place dans les mix énergétiques grâce à aux actions politiques et à des investissements conséquents dans ces secteurs [CE, 2014b]. Pour favoriser l’essor des énergies renouvelables, des mécanismes de soutien à ces filières auront toujours cours tels que les certificats vert ou les tarifs de rachat garantie [Hansen et al, 2009]. En ce qui concerne le nucléaire, plusieurs Etats ont fait le choix de se désengager mais des centrales sont toujours en fonctionnement bien que l’investissement dans ce secteur ait été drastiquement réduit au fur et à mesure des années [CE, 2014b].

La distribution d’électricité

On suppose que dans cet idéal-type que les quartiers sont développés sur d’anciennes friches et que le réseau de distribution installé sur le périmètre est neuf. Il est donc dimensionné en prenant en compte les nouveaux paramètres de consommation électrique. On suppose que la consommation augmente du fait de l’essor des nouveaux usages domestiques et tertiaires (ordinateur, portable,...) et de l’essor du véhicule électrique ce qui impacte le dimensionnement des réseaux locaux [CE, 2014b ; Eurelectric, 2012a]. De plus, cette partie du réseau électrique, qui est jusque-là restée la moins bien dotée en système d’information pourrait faire l’objet d’un important programme d’investissement visant à le moderniser et à y intégrer plus d’intelligence [McDonald, 2008].

Figure 47 : Schéma de l’approvisionnement électrique au niveau du quartier –Idéal-type n°1- [Construction de l’auteur]



Les relations entre les acteurs dans la chaîne d’approvisionnement électrique

Les relations entre les acteurs de la chaîne de valeur électrique dans les quartiers durables sont relativement identiques à celles entretenues actuellement dans les zones urbaines.

A l’intérieur du quartier, les consommateurs sont les habitants résidant dans les bâtiments résidentiels, les employés travaillant dans les bâtiments tertiaires ou les usagers de la ville susceptibles de traverser le quartier et d’utiliser le mobilier urbain. Ces consommateurs ne font pas le même usage de l’énergie et par conséquent il existe plusieurs profils de consommation. L’essor des compteurs intelligents dans les bâtiments et le développement des services énergétiques pour gérer les équipements urbains permettent de mieux percevoir et comprendre la diversité des profils de consommation [D’Oca et al, 2014 ; Gulbinas et al, 2014]. Les consommateurs payent leur facture d’électricité à leurs fournisseurs qui ont développés des systèmes de tarification reflétant plus précisément leur profil de consommation et qui garantissent un approvisionnement bas carbone grâce aux contrats de fourniture vert.

La production de l’électricité consommée dans le quartier dépendra d’acteurs institutionnalisés reconnus comme des entreprises de l’énergie dont les capacités de production sont situées en dehors du territoire. Le raccordement de leur capacité est réalisé principalement sur le réseau de transport en raison des spécificités techniques de leurs productions et des enjeux économiques pour rentabiliser de telles centrales. Ces acteurs valorisent leur production électrique sur le marché de gros qui est la place où l’électricité est négociée pour différents paliers temporels avant d’être livrée par les opérateurs de réseaux aux consommateurs [Hansen et al, 2009].

L'opérateur de réseau de transport gère les flux produits par des grandes centrales de production arrivant sur les réseaux haut tension ainsi que les interconnexions avec les pays limitrophes. Leurs connaissances des flux circulant sont renforcées grâce au développement des *technologies de l'information qui permettent* de gérer les capacités de productions renouvelables intermittentes et aléatoires présentes à ce niveau du réseau. Leurs actions étant principalement concentrées sur les réseaux hautes tensions, ces opérateurs n'ont aucun contact direct avec les consommateurs finals qui sont connectés aux réseaux basse tension. Ils auront donc une relation passive avec les usagers du quartier [Bouneau et al, 2007].

Les opérateurs de réseaux de distribution mettent en relation les producteurs et les consommateurs d'électricité se situant sur le quartier en gérant la partie moyenne et basse tension du réseau électrique. Ils doivent donc intégrer à leur gestion les flux injectés au niveau des réseaux basse tension comme ceux issus des capacités de production bas carbone présentes en dehors des villes. L'injection aux consommateurs finaux par l'opérateur de distribution est améliorée grâce aux informations récoltées par les compteurs intelligents. Les réseaux de distribution étant la propriété de différents acteurs en Europe, l'investissement dans ces derniers dans les quartiers durables dépendra des acteurs habilités à le faire [Eurelectric, 2012a].

2.1.4. L'approvisionnement en chaleur du quartier

Dans ce premier idéaltype, il est fait l'hypothèse que la ville dans laquelle est réalisé le quartier est dotée d'un réseau de chaleur urbain. L'approvisionnement en chaleur du quartier durable est alors réalisé par l'extension du réseau de chaleur urbain [Figure 48 : Schéma de l'approvisionnement en chaleur au niveau du quartier –Idéal-type n°1].

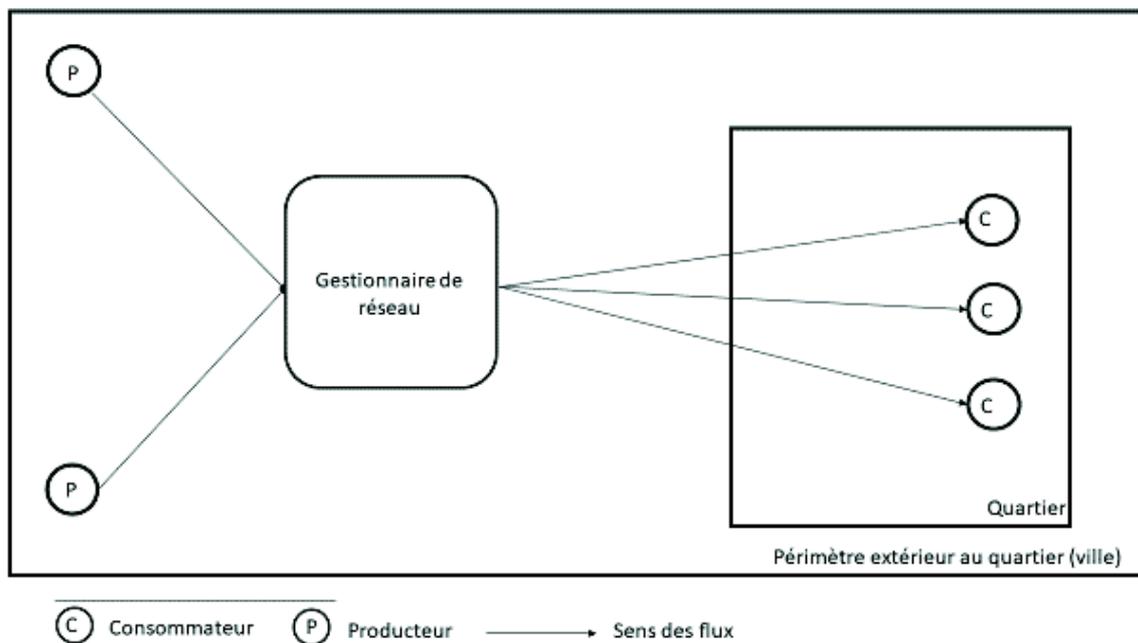
Mix énergétique

Le mix énergétique répondant aux besoins en chaleur du quartier repose sur des sources d'énergie bas carbone présentes dans l'environnement urbain ou importées, qui approvisionnent le réseau de chaleur urbain préexistant. Le choix des moyens de production de chaleur dépend des ressources disponibles sur le territoire (ex : biomasse, solaire, géothermie). Contrairement à l'électricité, les moyens de production de chaleur neutre en carbone sont plus matures techniquement et sont donc diffusés à l'échelle locale depuis longtemps [AIE, 2010] [Cf. Chapitre3]. Les collectivités ont donc massivement développées ce type de production pour alimenter le réseau de chaleur urbain.

Distribution de chaleur

Le transport et la distribution de la chaleur jusqu'au quartier sont réalisés grâce à l'extension du réseau de chaleur urbain déjà existant dans la ville. Le dimensionnement du réseau dans le périmètre est toutefois optimisé pour supporter la baisse de la consommation unitaire de chaleur. En effet, en raison des efforts en matière de performance énergétique des bâtiments et du développement de différents mécanismes de maîtrise de la demande, la consommation en chaleur a drastiquement diminué dans le secteur résidentiel et tertiaire [CE, 2014a]. Pour cela, il est pris en compte des variables comme la densité de la population dans le quartier, le diamètre des tuyaux ou encore la pression pour réduire les coûts d'investissements dans ces réseaux [AMORCE, 2011 ; Pirouti et al, 2013 ; Wissner, 2014].

Figure 48 : Schéma de l'approvisionnement en chaleur au niveau du quartier -Idéal-type n°1- [Construction auteur]



La relation entre l'opérateur de réseau et le consommateur de chaleur

La relation entre les producteurs, l'opérateur de réseau et les consommateurs reste encore très passive. L'acteur de réseau a pour seul rôle de transférer les flux des capacités de production vers les lieux de consommation. La relation qu'il entretient avec les consommateurs est donc principalement unilatérale et contractuelle puisque ces derniers doivent payer pour obtenir le droit d'accéder au service fourni par le réseau. Les activités de réseaux de chaleur sont organisées de façon hiérarchique et centralisée. En effet, le réseau de chaleur est considéré comme l'illustration type du cas de monopole naturel à l'échelle locale. Par conséquent, le consommateur est captif de l'offre puisqu'il n'y a pas de concurrence possible entre différents réseaux. Le contrat de fourniture repose donc sur une part fixe importante en raison de la lourdeur des coûts fixes [Wissner, 2014].

2.1.5. Un approvisionnement « 100% bas carbone » garanti contractuellement

Cet idéal-type est caractérisé par une approche traditionnelle de l'approvisionnement énergétique, que ce soit pour la chaleur ou l'électricité. Ainsi, si l'aménagement du quartier résulte de la volonté de moderniser une partie de la ville ; la question énergétique est essentiellement appréhendée en termes d'efficacité énergétique en ce qui concerne les bâtiments et les équipements urbains. L'efficacité énergétique est également présente sur le périmètre par la maîtrise de la demande énergétique renforcée par l'essor des compteurs intelligents. L'offre énergétique est, quant à elle, assurée par des capacités de production extérieures au quartier mais dont le caractère bas carbone est garanti par contrat.

L'innovation majeure pour l'électricité se situe donc dans cet idéal-type principalement dans l'évolution des contrats de fourniture. La mise en place d'une maîtrise de la demande énergétique dynamique grâce au *home display* permettra de réduire la consommation entre -2% et -7% [Faruqui et al, 2010a]. A cet effort d'efficacité, seront associés différents éléments de tarification dynamique. Cette tarification réalisée grâce à un fournisseur d'énergie devient possible grâce à un échange bidirectionnel d'information entre le réseau et les consommateurs. Il existe plusieurs types de tarification dynamiques qui pourront être mise en place et dont la structure plus ou moins complexes est réalisée pour orienter les modes de consommation à travers des signaux prix diversifiés. Par exemple, ce type de tarification permet de réduire la pointe de 26% à 36% par rapport aux anciennes tarifications [Faruqui et al, 2010a].

Parmi ces nouvelles tarifications, *Time of Use* (ToU) décompose une journée en bloc de temps ayant un prix fixé à l'avance. Ce type de tarification vise à agir sur le montant global de la consommation et ce, quelle que soit la période de consommation. Le *Critical Peak Pricing* repose sur le même base que le ToU mais il va segmenter de manière plus fine les périodes de la journée (ex : base, pointe, extrême pointe). L'*Inclining Block Rate* (IBR) applique un prix unitaire progressif en fonction de blocs ou de tranche de consommation. Le *Peak Time Rebate* (PTR) consiste à rémunérer les réductions de consommation sur les périodes de pointes par rapport à une courbe de charge de référence. Le *Real Time Pricing* (RTP) permet de transmettre heure par heure au consommateur les évolutions du prix de l'électricité sur le marché de gros [Bergaentzlé et al, 2014].

Les systèmes de tarification dynamique permettant la modulation de la demande et la maîtrise de cette dernière auront également un impact sur le mix énergétique. En effet, ils vont impacter l'ordre de mérite d'appel des centrales de production. En limitant les appels de puissance, ils vont limiter le recours aux centrales coûteuses qui sont généralement des centrales fortement émettrices de gaz à effet de serre localement [Bergaentzlé et al, 2014]. La substitution des centrales faiblement émettrices aux autres types de centrales améliorera également l'impact carbone du mix énergétique des quartiers même si la production n'est pas réalisée localement. La tarification dynamique est donc un moyen de favoriser et

d'améliorer la maîtrise de la demande énergétique afin de renforcer l'efficacité énergétique dans le périmètre du quartier [Bergaentzlé et al, 2014].

Afin de garantir une production la plus bas carbone possible dans le quartier, les consommateurs d'électricité auront obligatoirement recours à des contrats de fourniture verts. Ces contrats assurent que les fournisseurs ont pu produire ou investir dans des capacités électriques bas carbone à hauteur de ce qu'ils livrent à leurs clients grâce à des certificats de garantie d'origine. En effet, même si physiquement, il est impossible de déterminer la provenance de l'électricité qui est délivrée aux usagers, le but est de faire souscrire ces derniers à des contrats particuliers garantissant que l'électricité consommée sur place correspond à une production d'énergies renouvelables [Hansen et al, 2009].

Principalement étudiée dans le domaine électrique, la tarification dynamique est devenue progressivement une norme dans le secteur de la chaleur. L'utilisation de ce mécanisme économique est ainsi reconnue comme offrant une meilleure compétitivité des réseaux de chaleur. Il reflète de manière plus pertinente la dynamique des coûts de production en prenant en compte les coûts de l'énergie, le coût du capital les coûts de maintenance et d'exploitation. Il a été reconnu également, que le prix de la chaleur devient plus prédictible et par conséquent plus transparent. De plus, la tarification dynamique motive les consommateurs à réduire leur pic de charge voire à changer leur mode de consommation [Werner, 2017].

Ce premier idéal-type illustre un projet d'aménagement urbain autour d'un quartier dont le projet énergétique est centré sur l'efficacité. Les infrastructures neuves installées sur ce territoire répondent aux dernières réglementations en vigueur en matière de performance énergétique des bâtiments et de mobilier urbain. La maîtrise de la demande énergétique est traitée via le développement des compteurs intelligents et la tarification dynamique. L'approvisionnement énergétique du quartier provient de l'extérieur du territoire. Néanmoins, il est possible de garantir que ce dernier soit bas carbone grâce à un faisceau d'actions réglementaires, techniques, économiques avec pour l'électricité une obligation de souscrire à des contrats de fourniture verte et pour la chaleur des technologies bas carbone techniquement matures qui sont installées à l'extérieur du quartier.

2.2. Idéal-Type n°2 : Le quartier comme territoire de la flexibilité

Dans ce deuxième cas, le quartier est envisagé comme un projet d'aménagement urbain piloté par la collectivité. Tout comme dans le premier idéaltype, l'efficacité énergétique est prise en compte. Mais à l'inverse, l'approvisionnement énergétique ne provient pas exclusivement de l'extérieur du territoire. Ainsi que ce soit pour l'électricité et la chaleur, des capacités de production bas carbone sont installées dans le périmètre du quartier.

2.2.1. Cartographie du territoire

La réalisation du quartier repose soit sur un projet de rénovation d'une friche urbaine comme dans le cas du premier idéaltype, soit sur un projet de rénovation d'un territoire déjà urbanisé où des bâtiments (résidentiels, tertiaires) et des équipements urbains sont déjà installés. On suppose qu'après s'être intéressés aux territoires laissés en friche et qu'elles ont utilisés comme des vitrines de leur savoir-faire en matière de développement durable et énergétique lors de projet de ré-urbanisation, les collectivités se sont tournées vers les territoires déjà urbanisés. Ce choix résulte du constat selon lequel il existe un important gisement d'économie d'énergies dans les espaces déjà urbanisés²²¹. En effet, 70% du parc immobilier de 2050 aura déjà été construit dans les années 2010. En effet, le parc de bâtiment ne se renouvelle que de 1% par an, il existe donc beaucoup de territoires où la rénovation est nécessaire. De plus, le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur en ville. En Europe, les bâtiments résidentiels et tertiaires représentent près de 40% des consommations énergétiques²²².

La propriété des bâtiments construits ou rénovés dans le quartier est un mix entre propriétés privées et publiques. Les zones du territoire qui n'étaient pas construites vont être divisées en plusieurs parcelles qui sont vendues à des promoteurs immobiliers publics ou privés. Ils doivent construire les bâtiments neufs et du mobilier urbain en respectant les normes en vigueur de performance énergétique. Le choix des technologies incorporées dans les bâtiments neufs restent à la charge des promoteurs. En ce qui concerne les zones déjà construites, les promoteurs ont obligation de rénover les bâtiments et le mobilier urbain.

Dans cet idéal-type, le quartier est une échelle institutionnelle au sens où il fait l'objet d'un plan d'aménagement urbain. La prise en compte de l'efficacité énergétique reste importante dans le projet de la collectivité, mais elle n'en constitue pas l'unique dimension puisque l'accent est mis aussi sur l'approvisionnement local. Cet échelon suscite également de l'intérêt pour les acteurs de l'énergie en raison du développement de capacités de production et de stockage à l'échelle locale qui s'accompagne d'un besoin de flexibilité des réseaux. On considère cependant que réflexion autour de l'approvisionnement énergétique reste réalisée de manière dissociée entre l'électricité et la chaleur.

²²¹ Directive 2012/27/UE du Parlement Européen et du Conseil relative à l'efficacité énergétique

²²² Idem

2.2.2. L'efficacité énergétique

Les bâtiments déjà présents sur le territoire sont tous entièrement rénovés afin de garantir des économies d'énergie substantielles aux usagers grâce à différents systèmes d'aides mis à disposition des acteurs (ex : subventions, contrat de performance énergétique,...). Les nouveaux bâtiments ont quant à eux tous une consommation énergétique très faible²²³ afin de respecter des directives européennes sur l'efficacité énergétique qui auront été en se renforçant. La part du mobilier urbain qui est consommatrice d'énergie comme les candélabres, les bornes de recharges électriques ou encore les panneaux publicitaires est construite en respectant les dernières réglementations afin d'être le moins énergivore possible grâce à des choix de technologies peu consommatrices d'énergies²²⁴.

La maîtrise de la demande énergétique repose principalement sur deux outils complémentaires. Le premier outil fait référence à la généralisation du compteur intelligent suite à l'objectif fixé par l'Union Européenne dans la Directive relative à l'efficacité énergétique de 2012. Ce texte annonçait qu'au moins 80% des consommateurs devraient être dotés de cette technologie en 2020²²⁵. Les informations récoltées par ces compteurs sont traitées puis communiquées aux usagers afin qu'ils puissent modifier leurs comportements et ainsi réduire leur consommation énergétique [Faruqui et al, 2010b ; D'Oca et al, 2014 ; Gulbinas et al, 2014]. La diffusion des compteurs électriques a également été suivie par un essor des compteurs intelligents pour les réseaux de chaleur [CE 2016a]. Le second outil, fortement dépendant du développement des compteurs intelligent, est constitué des nouvelles tarifications de l'énergie. La tarification dynamique s'est diffusée et est devenue une norme dans les offres de fourniture électrique. Elle a pour but d'ajuster les prix aux variations de la demande afin de la maîtriser [Bergaentzlé et al, 2012 ; Werners, 2017].

²²³ La Directive 2010/31/UE du Parlement Européen et du conseil sur la performance énergétique du bâtiment définit dans son article 2 les bâtiments dont la consommation d'énergie est quasi nulle comme « un bâtiment qui a des performances énergétiques très élevées (...). La quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à proximité. ».

²²⁴ CRE, Dossier sur l'éclairage public et l'éclairage urbain, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?rubrique=dossiers&srub=eclairage-mobilier-intelligents&action=imprimer>, consulté le 10 avril 2017

²²⁵ Considérant 27 de la Directive 2012/27/UE du Parlement Européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique.

2.2.3. L’approvisionnement électrique du quartier

Le mix énergétique répondant aux besoins électriques du quartier repose sur des sources d’énergies diverses provenant à la fois de son périmètre et de l’extérieur. Les ressources utilisées à l’intérieur sont issues des énergies renouvelables. Le réseau électrique installé dans le territoire est quant à lui considéré comme une extension du réseau existant [Figure 49 : Schéma de l’approvisionnement électrique dans le quartier –source : Idéal-type n°2-].

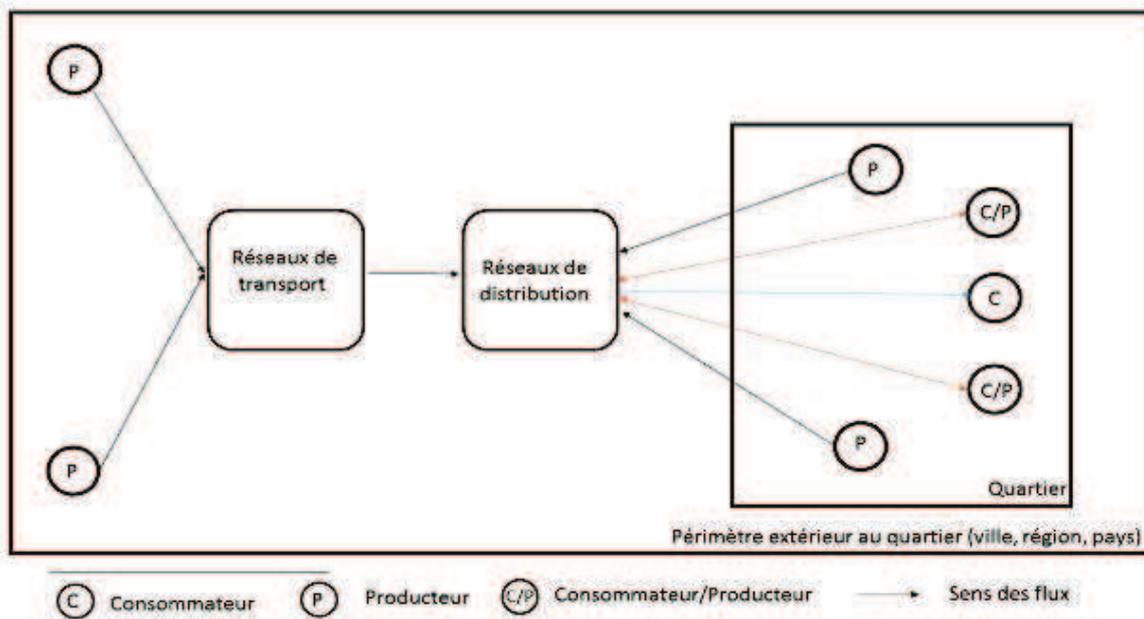
Mix énergétique et infrastructure de distribution

Le choix des capacités de production alimentant le quartier en électricité dépend des ressources disponibles sur le territoire et sur le choix des politiques nationales.

A l’intérieur du quartier, chaque bâtiment neuf est doté de capacité de production électrique de quelques kilowatts, ce qui en fait des lieux de consommation mais aussi de production [Ackerman, 2001]. Des capacités de production électrique bas carbone sont également installées dans le quartier sans qu’il s’agisse des capacités de production dédiées aux bâtiments. Il peut s’agir de centrales micros hydrauliques ou de systèmes de cogénération [Cf. Chapitre 3]. Ces capacités décentralisées sont accompagnées de capacités de stockage mobile et/ou stationnaire (*vehicle to grid*, batteries,...) [Moussavi et al, 2014]. Bien que les systèmes de production distribuée puissent répondre à une grande part de la consommation du quartier, il est nécessaire d’avoir recours à des capacités de production installées hors du territoire du quartier. Comme pour l’idéal-type 1, des recours aux mix énergétiques nationaux est nécessaire. Ces derniers sont plus ou moins carbonés selon les politiques énergétiques mises en place par les Etats [CE, 2014b].

L’installation du réseau de distribution dans le quartier est une extension du réseau existant. Dans le cadre des quartiers réalisés sur des friches, les réseaux de distribution sont neufs et dimensionnés pour répondre aux évolutions des usages électriques avec l’augmentation de la demande et l’apparition de la bidirectionnalité des flux. Les réseaux existants, pour leur part, sont modernisés pour prendre en compte l’évolution des usages grâce à d’importants investissements planifiés par les politiques nationales et européennes [Eurelectric, 2012a ; Von Hirschhausen et al, 2014].

Figure 49 : Schéma de l’approvisionnement électrique au niveau du quartier dans l’idéal-type n°2 [Construction de l’auteur]



Les relations entre acteurs dans la chaîne d’approvisionnement électrique

La décentralisation d’une partie de la production à l’échelle locale modifie les relations entre les acteurs de la chaîne de valeur électrique en faisant émerger de nouveaux besoins de régulation à l’échelle locale.

Les consommateurs du quartier sont à la fois les habitants y résidant, les travailleurs travaillant dans les bâtiments tertiaires et administratifs ainsi que tous les usagers de la ville susceptibles de le traverser en faisant usage d’équipements urbains. Dans cet idéal-type, chaque consommateur du quartier est considéré comme un acteur indépendant raccordé au réseau de distribution et qui a son propre contrat de fourniture. Ces consommateurs peuvent également être producteurs d’énergie. Ils ont la particularité de ne pas être des professionnels de l’énergie. Ils détiennent de petites capacités de production inférieures au mégawatt ainsi que des capacités de stockage stationnaires ou mobiles (ex : batteries, véhicules électriques). Leurs productions sont soit consommées sur place, soit stockées, soit injectées dans les réseaux de distribution. Ils ont également besoin d’acteurs professionnels afin d’assurer l’exploitation et la valorisation de leurs capacités de production sur le marché.

La production d’électricité dépend également de deux types d’acteurs institutionnalisés se partageant le marché. Un premier type d’acteur est le producteur dont l’installation produit plusieurs mégawatts d’énergie et dont le raccordement est réalisé sur le réseau de transport. La gestion des flux provenant de ce type d’acteur est faite soit directement par l’opérateur alloué aux réseaux très haute tension, soit par des intermédiaires comme des agrégateurs dont le rôle est de renforcer la flexibilité sur le réseau [Bouneau et al, 2009]. Ces grands producteurs et l’opérateur de réseau de transport n’ont toutefois pas de contact direct avec les usagers finaux des quartiers. Un second type de producteur institutionnalisé sont les producteurs professionnels dont les capacités de production sont raccordées au réseau de

distribution. Ces producteurs peuvent ainsi avoir des centrales de faibles capacités localisées dans le quartier (ex : micro-hydraulique, photovoltaïque...).

Au-delà de son activité de distribution des flux ayant transité par le réseau de transport car provenant des grands producteurs afin de fournir les consommateurs, cet opérateur doit gérer les nouvelles capacités de productions installées sur la partie moyenne et basse tension du réseau électrique [Eurelectric, 2012a ; Von Hirschhausen et al, 2014]. L'opérateur de réseau de distribution voit ainsi son rôle évoluer du fait de la possibilité d'une plus grande réactivité grâce à l'installation de systèmes d'information sous forme de compteurs intelligents qui lui offrent une connaissance fine des flux circulant dans les réseaux locaux. Il peut ainsi recevoir les injections des consommateurs producteurs tout en garantissant une bonne qualité de l'énergie fournit au quartier et tout en évitant au maximum l'apparition d'incidents [McDonald, 2008].

La gestion des flux au niveau local est également améliorée par l'augmentation de la prise en compte de la flexibilité et de l'effacement dans la chaîne de valeur de l'électricité. L'effacement peut être considéré comme un moyen de lisser la courbe de charge de la demande électrique en cas de survenance de déséquilibre entre l'offre et la demande. L'effacement va être déclenché par une simulation extérieure comme un signal tarifaire ou un signal mécanique. Le développement de l'effacement proviendra du besoin d'aider la prise en compte des intermittences dans le réseau dues à l'essor des productions renouvelables ainsi qu'à la difficulté de stocker l'électricité. Ce développement sera facilité par l'essor des compteurs intelligents [Rious et al, 2014].

Pour pouvoir valoriser économiquement les capacités, il est aussi possible d'agréger sous la forme d'une centrale électrique virtuelle les capacités de production et les capacités de stockage afin de pouvoir proposer des offres acceptées par le marché. L'ensemble de ces capacités sont considérées comme des microcentrales et agrégées de manière virtuelles via des centrales d'achats dématérialisées ; cela sans prendre en compte le lieu où elles se trouvent avant d'être mises en réseau via des systèmes informatiques [Javad Kasei et al, 2017].

Ces deux possibilités de valorisation des flux nécessitent l'émergence d'un nouvel acteur. Pour ce faire, il est nécessaire de faire appel à un acteur spécialisé dans la gestion de la flexibilité. Cet acteur fait écho aux agrégateurs de flexibilité qui sont en relation avec les producteurs de grandes capacités évoluant sur le réseau de transport électrique. Ils ont pour rôle de gérer la flexibilité en proposant un effacement de la demande lorsque le réseau est saturé afin de le soulager et d'éviter une rupture d'approvisionnement. La mission de l'agrégateur décentralisé est identique à celle de l'agrégateur opérant sur le réseau de transport mais il jouera sur des capacités plus petites (<1 MW).

2.2.4. L’approvisionnement en chaleur du quartier

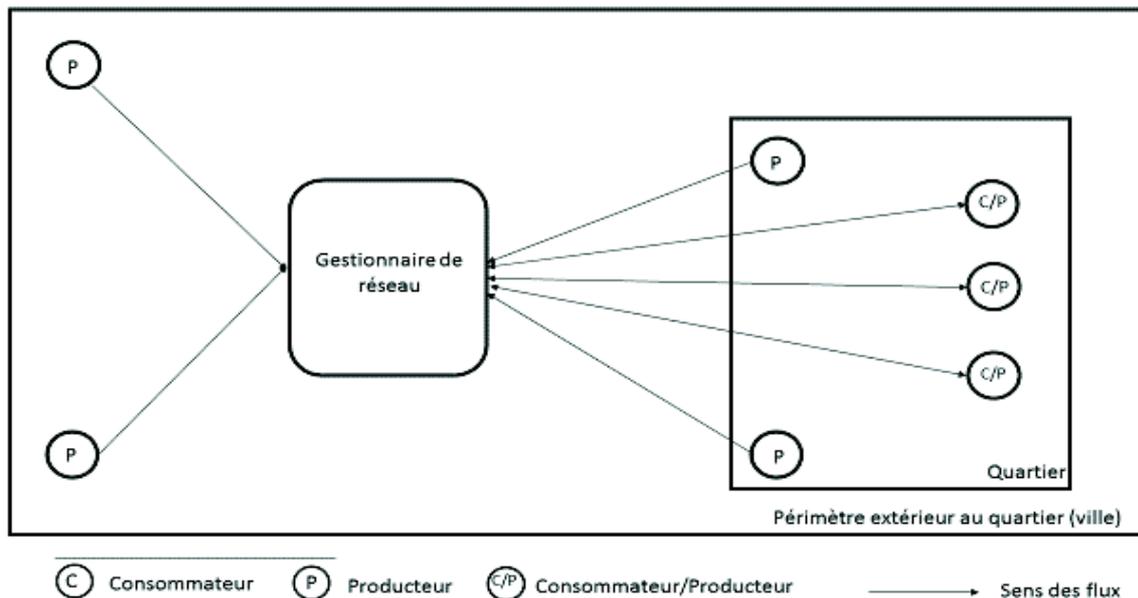
L’approvisionnement en chaleur du quartier repose sur un mix de capacités de production installées dans le quartier et des capacités de production provenant de l’environnement urbain [Figure 50 : Schéma de l’approvisionnement en chaleur du quartier - Idéal-type n°2]. L’alimentation du quartier est alors considérée comme une extension du réseau de chaleur urbain.

Mix de production et distribution

Le choix des capacités de production bas carbone à installer dépend fortement des ressources naturelles renouvelables disponibles dans le périmètre du quartier (ex : biomasse, solaire, géothermie) et de l’environnement (géographie, climat, ...). Le territoire du quartier pouvant ne pas avoir la faculté de produire suffisamment d’énergie pour répondre à la demande, le recours aux capacités de production issues du réseau de chaleur urbain existant reste concevable. Comme pour l’idéaltype n°1, il est considéré que les technologies de production sont suffisamment matures pour assurer un approvisionnement en chaleur bas carbone dans le quartier. Des capacités de stockage de chaleur sont installées dans le quartier afin d’améliorer les performances.

Le réseau assurant l’approvisionnement du quartier est l’extension du réseau de chaleur urbain existant. Le dimensionnement du réseau dans le périmètre est toutefois optimisé afin de supporter la baisse de la consommation de chaleur résultant des travaux de rénovation et/ou des réalisations neuves. En effet, les bâtiments sont de moins en moins consommateur de chauffage en raison d’une amélioration de leur performance énergétique qui continue d’être promue par les différentes directives européennes relatives à l’efficacité énergétique. De plus, les équipements électroménagers sont devenus peu consommateurs d’eau chaude. Enfin, les consommateurs auront appris à consommer de manière plus intelligente grâce à l’essor des technologies *smart grid* dédiées à la chaleur [CE, 2014b, 2016a&b].

Figure 50 : Schéma de l'approvisionnement en chaleur au niveau du quartier dans l'idéal-type n°2 [Construction de l'auteur]



La relation entre acteurs de la chaîne de valeur du réseau de chaleur

Les relations entre les acteurs dans ces modes d'approvisionnement énergétique permettent de développer de nouvelles relations contractuelles entre les fournisseurs et les consommateurs de chaleur.

La production de chaleur reste encore sur le même modèle que dans l'idéal-type précédent et, par conséquent le profil des producteurs est quasiment identique. Les capacités de production de plusieurs mégawatts d'énergie situées dans le quartier ou hors de ce dernier seront exploitées par des producteurs d'énergies institutionnalisés reconnus comme des professionnels du secteur. Ils peuvent détenir différentes capacités de production sur le territoire urbain et ses environs. Le raccordement de leurs capacités de production est fait sur le réseau de chaleur urbain de la ville. Un second profil de producteur apparaît, il s'agira des consommateurs producteurs. Ils détiennent de petites capacités de production inférieures au mégawatt qu'ils peuvent soit consommer directement, soit stocker avant consommation ou enfin injecter dans le réseau. Ces acteurs vont avoir l'autorisation d'injecter leur production dans le réseau de chaleur [Cf. Chapitre 3].

La relation entre l'opérateur de réseau et le consommateur est plus active car le consommateur devient producteur. Dans ce cadre, il peut y avoir un parallèle avec l'approvisionnement électrique décentralisé. Toutefois, contrairement aux réseaux électriques, il y a un besoin moindre de recourir à un marché de flexibilité pour valoriser les capacités de chaleur distribuée. La question du renvoi des productions dans le système repose donc essentiellement sur une problématique technique pour l'opérateur de réseau qui a en charge d'assurer la flexibilité [Wissner, 2014]. L'opérateur de réseau restera un acteur public ou soumis à une délégation de service public afin de respecter la mission de service public de

l'approvisionnement énergétique. Les injections seront soumises à un contrat de fourniture avec une tarification dynamique.

2.2.5. La valorisation de la flexibilité énergétique dans le quartier

La particularité de cet idéal-type correspond à la nécessité de gérer la flexibilité des systèmes énergétiques présents dans le quartier. Ce besoin résulte de l'essor des ressources distribuées, des capacités de stockage, des nouveaux usages de l'énergie et la possibilité offerte aux consommateurs de devenir producteurs d'énergie.

La valorisation de l'effacement sur le marché de l'électricité peut être réalisée via des contrats de fourniture prenant en compte cette fonction ou en valorisant les capacités d'effacement directement sur le marché. Une autre forme de valorisation serait de valoriser les capacités de production via des centrales virtuelles de production. L'objectif de ces centrales est d'exploiter les différentes capacités comme s'il s'agissait d'une ressource unique. Ces deux possibilités permettent de limiter les pertes d'énergies en s'adaptant aux fluctuations de charges grâce à la prévision et surtout grâce à un contrôle informatisé, tout en optimisant en temps réels les ressources énergétiques diffuses présentes dans le quartier [Javad Kasei et al, 2017 ; Othman et al, 2017].

L'approvisionnement en chaleur évolue également avec l'apparition de la bidirectionnalité dans le réseau. Si le jeu d'acteur reste quasiment le même que dans l'idéaltype n°1 en raison des spécificités des systèmes de production de chaleur, la bidirectionnalité entraîne le besoin de gérer les flexibilités entre les différentes sources de production présentes dans le quartier et le réseau de chaleur urbain [Wissner, 2014]. L'opérateur de réseau va pouvoir assurer une meilleure gestion du réseau en temps réel grâce à des outils lui permettant de savoir quelle puissance thermique produire ou encore quel niveau d'énergie choisir pour distribuer l'énergie et ainsi assurer la flexibilité nécessaire au réseau pour bien fonctionner [Giraud, 2016]. Contrairement à la gestion intégrée au secteur électrique conventionnel, la valorisation économique ne se fait pas par la création d'une plateforme de marché et ne nécessite pas la création d'un nouveau profil d'acteur.

Cet idéal-type propose, outre des dispositions permettant d'améliorer l'efficacité énergétique, une réflexion autour de la décentralisation des systèmes de production. Ainsi, l'approvisionnement énergétique du quartier est constitué de capacités de production issues de ressources renouvelables installées sur le périmètre mais également des capacités de production extérieures à ce dernier. La conséquence de ce mix de production est l'émergence de la bidirectionnalité des flux au niveau des réseaux locaux. Pour assurer le bon fonctionnement de ces réseaux, il est alors nécessaire de savoir gérer la flexibilité. Des moyens techniques comme les plateformes de gestion des flux, des moyens économiques comme la tarification sont alors envisageables que ce soit pour la chaleur et l'électricité.

Au sein du réseau électrique, une innovation organisationnelle peut apparaître. Il s'agit de la création d'un acteur dont le rôle sera de valoriser les systèmes techniques afin de garantir la fiabilité du réseau de distribution. Il va également avoir pour rôle de valoriser économiquement les capacités de production et d'effacement présentes sur le territoire du quartier. Le rôle de cet acteur sera de prendre en compte les différentes capacités disponibles sur le territoire. Si jamais les capacités ne sont pas suffisantes pour faire des offres crédibles sur le marché, cet acteur aura la possibilité de réaliser des agrégations de différents sites et territoires comme d'autres écoquartiers provenant des alentours ou étant basés à l'extérieur du territoire urbain.

2.3. Idéal-Type n°3 : Le quartier comme échelle pertinente pour l'autonomie énergétique bas carbone

Dans cet idéaltype, le quartier est envisagé comme un îlot énergétique. Le quartier prend ainsi la forme d'un ensemble de bâtiments regroupés sur un périmètre donné dont les infrastructures d'approvisionnement énergétique ont été dimensionnées pour répondre aux besoins des usagers de la zone grâce à la valorisation des ressources locales. Cet idéaltype permet de valoriser la dimension d'autonomie.

2.3.1. Cartographie du territoire

Le quartier est construit comme un îlot énergétique²²⁶ regroupant un ensemble de bâtiments à usage résidentiel et/ou tertiaire sur un périmètre dédié et physiquement délimité par l'architecture ou par un ensemble de voies de circulation [ADEME, 2010]. Juridiquement, il est considéré comme une propriété privée fonctionnant sur le modèle de la copropriété²²⁷. Chaque propriétaire, résidentiel ou tertiaire, possède une partie des bâtiments ainsi que des infrastructures présentes sur son périmètre. La copropriété respecte les principes de développement durable en proposant de la mixité sociale, intergénérationnelle et/ou fonctionnelle.

Au niveau environnemental, la copropriété est principalement centrée sur la recherche de l'autonomie énergétique. L'autonomie s'entend comme la volonté d'être en capacité de répondre à l'essentiel des besoins énergétiques des usagers grâce à un système d'infrastructures dédié construit à l'intérieur du périmètre de la copropriété. Elle doit ainsi permettre de limiter le plus possible le recours aux réseaux et aux capacités de production présentes à l'extérieur de l'îlot. Les bâtiments et le mobilier urbain

²²⁶ L'ADEME définit les îlots comme « des segments de bâtiments contigus ou non, d'usages diversifiés ou non (logements, équipements, bâtiments tertiaires), constituant une unité de fonction ou d'identité d'un quartier sur le plan énergétique tant pour la mutualisation des besoins énergétiques que pour celles des productions énergétiques » [ADEME, 2010, p4]

²²⁷ Une copropriété est l'organisation d'un immeuble bâti ou d'un groupe d'immeubles bâtis dont la propriété est répartie entre plusieurs personnes, par lots comprenant chacun une partie privative et un quote-part des parties communes.

construits à l'intérieur de la copropriété sont neufs afin de limiter les besoins énergétiques. Du côté de l'offre, les capacités de production sont dimensionnées pour répondre aux besoins de l'îlot. Le recours à l'optimisation des systèmes techniques est nécessaire non seulement pour limiter la consommation énergétique mais également pour limiter les coûts d'investissements initiaux lors de la construction de l'îlot [Curien, 2005].

Dans cet idéaltype, le quartier est une échelle d'optimisation technico-économique avec un statut juridique particulier qui permet d'expérimenter l'autonomie énergétique. L'optimisation technico-économique offre la liberté aux acteurs finançant le projet de choisir leur système énergétique et de le gérer comme ils l'entendent sans dépendre de l'approvisionnement énergétique offert par les infrastructures classiques présentes à l'extérieur du périmètre. Si l'approvisionnement énergétique peut être étudié séparément selon les flux, ce statut donne également la possibilité d'envisager une gestion multi-flux pour alimenter les usagers du quartier.

2.3.2. L'efficacité énergétique

Les bâtiments installés dans l'îlot sont neufs et répondent par conséquent aux réglementations les plus strictes en matière de performance énergétique. Lors de la phase de conception du projet d'îlot, les usages historiques du bâti défini dans la réglementation thermique (le chauffage, l'eau chaude sanitaire, le refroidissement et les auxiliaires comme la ventilation) vont être pris en compte ainsi que les nouveaux usages comme les usages électroniques (domotiques, téléphones, ordinateurs,...) ou la mobilité électrique afin de déterminer quelles sont les technologies les plus adéquates à installer pour limiter la consommation des bâtiments [CEb, 2014, p 41-42].

La maîtrise de la demande d'énergie est réalisée par un ensemble d'outils mis à la disposition des usagers de l'îlot. Il s'agit des compteurs intelligents développés pour relever et analyser les consommations électriques et de chaleur et de la tarification dynamique [CE, 2013, 2016a&b]. Ces outils, associés à l'essor de la domotique, offrent la possibilité aux usagers d'avoir un rôle plus actif sur leur consommation en pouvant gérer à distance leurs appareils électroménagers ainsi que les moyens de suivi de leur consommation. L'îlot offre également la possibilité de mutualiser certains usages afin de réaliser des économies d'énergie. Il pourra, par exemple, être proposé des laveries mutualisées. Ce type de proposition repose sur des mécanismes déjà mis en œuvre dans certains pays comme, par exemple, en Suisse où les logements coopératifs²²⁸ se partagent des appareils ménagers (machine à laver ou lave-linge) [Faruqi et al, 2010b].

²²⁸ La coopérative d'habitants est une société coopérative ayant pour objectif d'offrir à ses membres les meilleurs services possibles au moindre coût.

2.3.3. L’approvisionnement électrique dans la copropriété énergétique

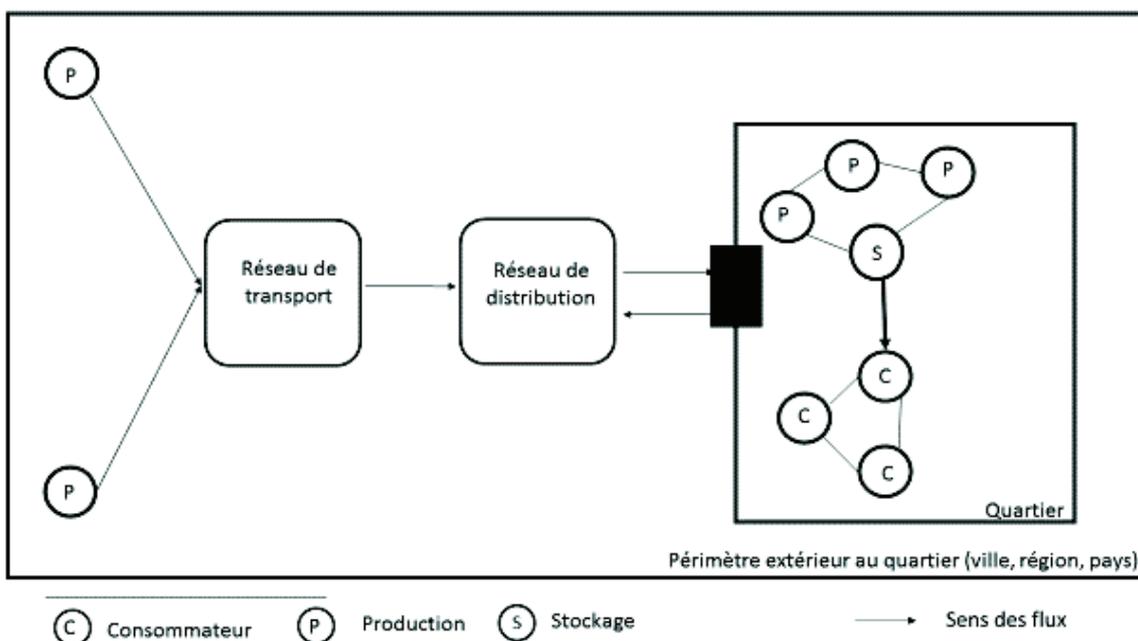
Le mix énergétique répondant aux besoins électriques de la copropriété repose sur des sources d’énergies provenant majoritairement de son périmètre. Le système fonctionne en autonomie, au sens où les infrastructures sont dimensionnées pour répondre aux besoins des usagers tout en limitant le recours au réseau extérieur.

Mix énergétique et distribution de l’électricité dans la copropriété

Le choix du mix de production installé dans la copropriété résulte de l’étude des ressources renouvelables pouvant être exploitables sur le périmètre (ex : éolien, biomasse, solaire, hydraulique) et la maturité technico-économique des capacités de production [Chapitre 3]. La production locale doit être consommée sur place à moins que la demande ne soit pas suffisante. Dans ce cas, elle peut être stockée ou injectée dans le réseau extérieur. Si la production n’est pas suffisante pour répondre à la demande, le recours à des capacités de production extérieures à la copropriété est possible.

Le réseau de distribution installé à l’intérieur de la copropriété est considéré comme un réseau privé. En effet, la zone à l’intérieur du quartier ne dépend pas du domaine public et il ne répond pas, par conséquent, à une mission de service public. L’opérateur de réseau de distribution électrique historique n’a donc pas les prérogatives pour construire ce réseau. La possibilité que les capacités de production internes ne suffisent pas à répondre à la demande contraint cependant à ce qu’une connexion de la copropriété soit réalisée avec le réseau de distribution historique [Figure 51 : Schéma d’approvisionnement électrique dans le quartier –source : Idéal-type n°3].

Figure 51 : Schéma de l’approvisionnement électrique dans la copropriété dans l’idéal-type n°3 [Construction de l’auteur]

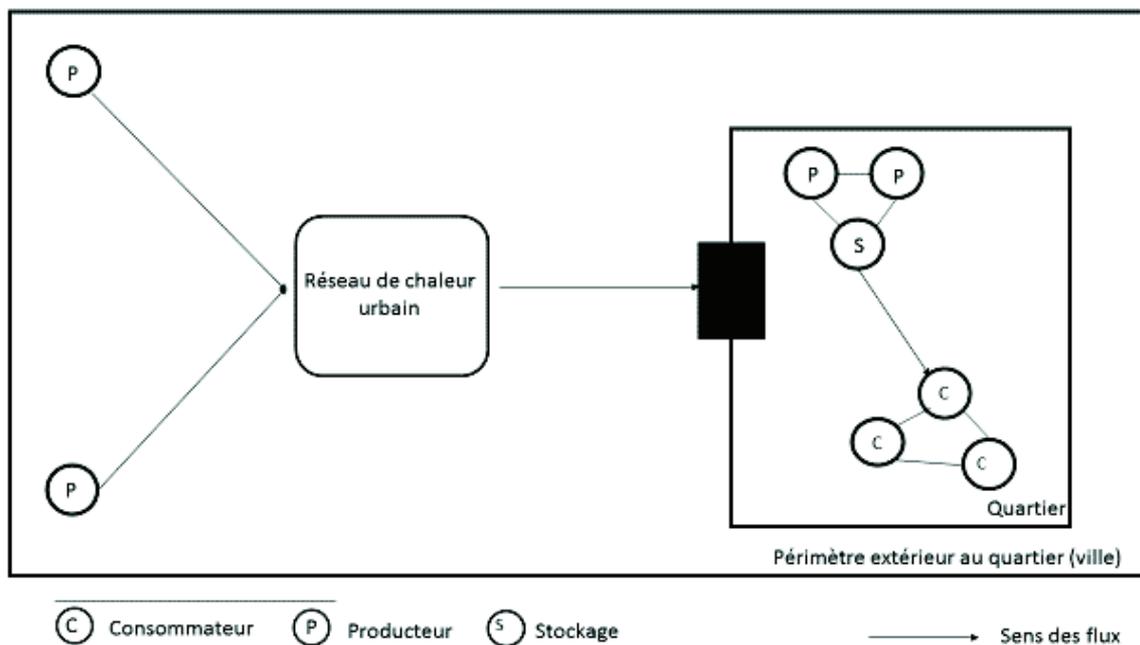


2.3.4. L’approvisionnement en chaleur

Mix énergétique et distribution de chaleur dans la copropriété

Tout comme pour l’électricité, le choix des capacités de production à installer dans la copropriété dépend fortement des ressources renouvelables disponibles sur le territoire (ex : biomasse, solaire, géothermie). Le dimensionnement des capacités de production et du réseau de distribution dans l’ilot dépend des besoins en chaleur prédéfinis lors de la création de la copropriété. Les prévisions prendront en compte non seulement la performance des bâtiments en matière de consommation énergétique mais également la densité de population présente dans le périmètre car le système thermique est fortement dépendant de cette variable [AMORCE, 2011]. Le recours au réseau de chaleur urbain est réduit au strict minimum et est considéré uniquement comme un moyen secours si le système installé dans la copropriété devenait défaillant. [Figure 52 : Schéma de l’approvisionnement en chaleur dans le quartier -Idéal-type n°3].

Figure 52 : Schéma de l’approvisionnement en chaleur au niveau du quartier -Idéal-type n°3 [Construction de l’auteur]



2.3.5. Relation entre les acteurs de la copropriété et les réseaux extérieurs

La création d’un quartier prenant la forme d’un ilot et ayant le statut juridique de copropriété énergétique conduit à redéfinir le rôle et la relation qu’entretiennent les acteurs du secteur électrique et du secteur de la chaleur à l’échelle du quartier.

Le droit de propriété s'étend sur le terrain, les bâtiments construits dans le périmètre et les systèmes d'infrastructures d'approvisionnement énergétique alimentant l'îlot. Les propriétaires sont ceux qui investissent dans le système technique de l'îlot et qui ont la charge de l'exploiter et de réaliser sa maintenance. L'enjeu pour ces acteurs est de garantir la viabilité du système interne tout en réduisant le plus possible le rapport avec les réseaux extérieurs. Les membres de la copropriété énergétiques sont considérés comme un seul consommateur pour les acteurs énergétiques extérieurs à cette dernière.

En ce qui concerne la chaîne de valeur électrique, l'opérateur du réseau de distribution historique a dans cette configuration le rôle d'assurer la flexibilité entre les flux sortants et entrants de la copropriété et son réseau. Sa relation avec le consommateur, la copropriété, est donc active. En effet, même si le recours au réseau de distribution historique diminue, il reste nécessaire pour assurer la viabilité du système interne notamment en cas d'aléas. La même problématique se retrouve dans le cadre du réseau de chaleur. Le développement des copropriétés énergétiques impacte alors les contrats et la tarification puisque les acteurs historiques tels que les producteurs et les opérateurs de réseaux voient leur intérêt décroître.

2.3.6. Nouveau statut pour le quartier : la copropriété énergétique²²⁹

Cet idéal-type apporte une nouvelle manière d'envisager le quartier. Ainsi, contrairement aux propositions précédentes, il n'est pas la résultante d'une politique publique visant à moderniser un morceau de ville dans une perspective de développement durable et de transition énergétique. Ici, le quartier est envisagé comme un périmètre physiquement défini de quelques bâtiments et qui peut être considéré comme un îlot et, juridiquement, comme un acteur privé. Son ambition énergétique est d'atteindre l'autonomie pour être le plus indépendant possible de son environnement. Afin de pouvoir avoir une identité vis-à-vis des acteurs de la chaîne énergétique, le statut de copropriété va s'imposer. La réalisation de ce projet est soumise à deux enjeux qui peuvent être examinés d'un point de vue économique.

Premièrement, il s'agit du dimensionnement des systèmes techniques et plus particulièrement énergétiques installés dans le périmètre. Pouvant être perçus comme un microsystème technique à l'instar des macrosystèmes techniques [Lopez et al, 2015], il doit résoudre les difficultés technico-économiques liées à l'établissement d'un nouveau réseau d'infrastructure. D'un point de vue technique, il s'agit de dimensionner le système pour qu'il soit en mesure de répondre le plus possible à la demande

²²⁹ L'idée de copropriété énergétique s'inspire de la possibilité prévue par la Directive 2009/72/CE du Parlement Européen et du Conseil concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité (article 28) de créer des réseaux fermés de distribution. Ce type de réseau est défini comme « *un réseau qui distribue de l'électricité à l'intérieur d'un site industriel, commercial ou de partage de services géographiquement limité et qui, ..., n'approvisionne pas de clients résidentiels* ». Dans le cadre de l'idéal-type n°3, ce système est étendu aux clients résidentiels et n'est pas limité au seul approvisionnement électrique.

énergétique interne sans avoir recours aux réseaux extérieurs. Le dimensionnement passera par la définition de l'usage, de la densité et de l'aire du projet. Il faudra prendre également en compte l'environnement dans lequel sera réalisé le projet immobilier ainsi que la maturité des technologies qui pourraient être installées sur le territoire [Cf. Chapitre 3, Section 3].

La demande potentielle exprimée ainsi que l'analyse des ressources environnementales et techniques exploitables vont alors conduire à un arbitrage économique. En effet, l'investissement dans les capacités de production ainsi que dans les infrastructures de réseaux sont caractérisées par des coûts initiaux extrêmement élevés. A ces coûts de départ doivent être ajoutés les coûts d'exploitation et de maintenance du système énergétique [Cf. Chapitre 3, Section 3]. Dans le cadre d'un système énergétique local de type copropriété, les investissements doivent être supportés par les propriétaires. Il faut donc que les acteurs aient la capacité de financer de tels systèmes.

Deuxièmement, l'îlot va obtenir un nouveau statut juridique en devenant une copropriété qui regroupe l'ensemble des propriétaires. Ces acteurs peuvent être perçus à la fois comme les consommateurs du système énergétique dans le périmètre de l'îlot mais également comme des producteurs puisque les centrales de production répondant à la demande sont situées sur le périmètre. Ces '*prosumers*' vont être considérés comme des acteurs non spécialistes de l'énergie. Ils vont donc avoir besoin de recourir à des acteurs de services énergétiques pour gérer le système en interne et d'un acteur qui sera capable de faire le lien avec les réseaux de distribution extérieurs qu'ils soient thermiques ou électriques. En effet, les capacités de production et de stockage installées dans l'îlot vont pouvoir être valorisées techniquement afin d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande et économiquement grâce à la flexibilité apportée. L'enjeu est alors de définir le rôle et le périmètre d'action sur la chaîne de valeur énergétique du nouvel acteur qui gèrera la copropriété énergétique.

Le système énergétique comprenant l'infrastructure électrique et le réseau de chaleur installés dans la copropriété doit être géré en temps réel afin de garantir l'autonomie énergétique de la copropriété. Il est nécessaire d'avoir un acteur capable de pouvoir répondre à ce besoin. Selon la taille de la copropriété, il peut être envisagé que cet acteur ait un rôle d'opérateur de service énergétique ayant pour mission d'optimiser le système technique interne à la copropriété en apportant le meilleur équilibrage possible entre la demande et la production. Cet acteur a la compétence pour intervenir sur les systèmes techniques qu'ils soient électrique, thermique ou multi fluide.

Ces trois idéaltypes présentent des enjeux liés à l'approvisionnement énergétiques bas carbone à l'échelle du quartier. Historiquement, le quartier n'était pas considéré comme une échelle pertinente par les acteurs énergétiques mais l'émergence de la production locale, du stockage et des nouveaux usages de l'énergie font de cette échelle un territoire d'expérimentation qui pourrait à terme devenir une échelle pour les acteurs de l'énergie. C'est pourquoi, il est apparu nécessaire de réaliser des idéaux types afin d'envisager quelles seraient les formes possibles des offres d'approvisionnement énergétique bas

carbone décentralisées. De nombreuses possibilités semblent émerger. Néanmoins, une problématique commune à deux des trois idéal-types semble émerger : la gestion de la flexibilité locale par un acteur défini. Ce dernier n'existant pas actuellement, il apparaît nécessaire de définir les possibles fonctions qu'il pourrait exercer.

3. Emergence d'un nouvel acteur dans le réseau de valeur énergétique : le gestionnaire de l'énergie

Le développement des énergies renouvelables engendre un besoin de flexibilité des systèmes d'approvisionnement énergétique. L'émergence de cette question à l'échelle locale est très récente et reste encore largement limitée à des expérimentations pour le vecteur électrique. Dans un même temps, les quartiers durables se déploient dans les territoires urbains depuis quelques années. L'essor de ce périmètre associé à un mouvement de décentralisation de l'approvisionnement énergétique bas carbone conduit à envisager de nouvelles manières de gérer l'énergie à l'échelle locale.

L'élaboration des idéaux types dans la section précédente illustre la possibilité d'émergence d'un nouvel acteur qui aurait pour mission d'assurer le bon fonctionnement des systèmes techniques à l'échelle d'un ensemble de bâtiments tout en proposant une valorisation économique des moyens de production et de stockage qu'il pilote. Cette dernière section les pistes de création de valeur pour un gestionnaire de l'énergie en fonction des profils de quartier considérés. Nous concluons cette partie en montrant que cette question a déjà fait l'objet d'une réflexion avancée dans d'autres pays européens.

3.1. Le quartier comme copropriété dont l'approvisionnement énergétique est décentralisé et bas carbone

Les idéaux-types 2 et 3 présentés dans la section précédente illustrent l'intérêt d'avoir un gestionnaire de l'énergie pour gérer la flexibilité engendrée par les systèmes énergétiques installés dans les quartiers. Pour tenter de mieux caractériser les fonctions de ce type d'acteur, nous commencerons par définir les besoins qui émergent à cette échelle et nous ferons pour cela notamment appel aux scénarios développés dans le cadre du projet de recherche Ecoquartier Nexus Energie.

Rassemblement des idéaux-types 2 et 3

Dans la section précédente, nous avons défini trois idéaux-types offrant des visions différentes des modalités de fonctionnement d'un schéma de l'approvisionnement énergétique à l'échelle du quartier. Si l'idéaltype n°1 propose un approvisionnement énergétique bas carbone externe au quartier et se rapproche ainsi des modèles classiques, les deux autres propositions offrent des innovations de procédés et d'organisation qui vont être reprises dans cette partie.

Dans l'idéal-type n°2, le développement des énergies renouvelables intermittentes fait émerger des besoins en effacement et, par conséquent, valorise des capacités de production et de stockage à l'échelle locale. Ce besoin apparaît car les opérateurs de réseau électrique doivent garantir son fonctionnement. La possibilité de valoriser économiquement les capacités diffuses crée un espace pour des acteurs émergents. Dans l'idéal-type n°3, nous envisageons le regroupement des usagers du quartier dans une nouvelle structure que nous avons appelé « copropriété énergétique ». Cette copropriété partagerait les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance, qu'elle contrôle tout en valorisant les capacités de production et d'effacement lorsque cela est considéré comme bénéfique pour le collectif.

Il est ici possible d'envisager que ces deux idéaux-types soient réunis : la copropriété (idéal-type n°3) cherche à maintenir un bon fonctionnement de son système technique en interne (à l'îlot) et a recours à un nouvel acteur (idéal-type n°2), qui assure cette fonction tout en concourant au fonctionnement général des réseaux auxquels le système technique de quartier est connecté.

Les propositions du projet Nexus

Issu du projet de recherche Ecoquartier Nexus Energie, l'ouvrage « Scénarios de transition énergétique en ville : acteurs, régulations, technologies » propose des schémas-type d'approvisionnement énergétique à l'échelle locale à l'horizon 2040. Cette étude propose quatre scénarii, chacun centrés sur un acteur particulier : les grandes entreprises, les collectivités territoriales, l'Etat prescripteur et les acteurs coopératifs [Debizet et al, 2016]. L'attention portée à chacun de ces acteurs repose sur l'observation des responsabilités de partie du système énergétique global à partir de la notion de nœud socio-énergétique : «*un ensemble d'éléments assurant la transformation, le stockage ou le transport d'énergie dont la conception a été supervisée par un même acteur décisionnel (promoteur, opérateur d'énergie, collectivité,...) interagissant globalement avec les mêmes actants (humains et non-humains)* » [Debizet, 2016, p 169].

- i. Dans le scénario « *Etat prescripteur* », l'Etat a un rôle prédominant dans la définition de la politique énergétique et impacte la prise de décision à l'échelle locale. Les collectivités ont donc très peu d'autonomie en matière de politique énergétique. L'Etat impose les niveaux de conception pour les infrastructures et les objectifs d'efficacité énergétique à tenir grâce à une démarche prescriptive. Il décide des solutions techniques et des systèmes de régulation nécessaires au bon fonctionnement des réseaux. L'action de l'Etat est réalisée grâce à une politique d'investissement forte tout en ayant recours aux contrats de type partenariat public-privé afin de soutenir la somme des investissements attendus. L'Etat met également en œuvre des politiques de maîtrise de la demande d'énergie et de lutte contre la précarité énergétique.

Dans ce scénario, la gestion des réseaux intelligents de type *smart grids* est très encadrée par l'Etat via des dispositions réglementaires que ce soit pour les aspects de sécurité des données, l'anonymisation des données privées, les prix, la durée des effacements et leur cadencements qui peuvent impacter la qualité de vie des usagers. Ce contexte oblige les distributeurs à proposer des offres variables incitant à moins consommer. La production décentralisée est stimulée non pas pour favoriser l'autoconsommation mais pour soutenir le fonctionnement du système énergétique qui reste pour l'essentiel centralisé. Ces choix sont réalisés dans l'optique d'assurer une équité sociale à l'échelle nationale via des tarifs uniformes et des péréquations économiques entre les territoires. Enfin, le stockage est valorisé, plus particulièrement le stockage thermique qui doit permettre d'assurer une autonomie de quelques jours aux acteurs pour les flux électriques et thermiques.

- ii. Le scénario « *Grande Entreprise* » propose une vision dans laquelle les collectivités locales délèguent la gestion des réseaux d'un morceau de ville à une société privée qui est considérée comme étant en mesure de réaliser et coordonner des investissements non seulement en matière de réseau de distribution mais aussi de production et de stockage. Ces entreprises vont offrir des solutions de performance énergétique aux usagers. Ces sociétés ont une obligation de résultats (prix plafonnés aux usagers, efficacité énergétique, taux de renouvelable,...) envers les collectivités mais elles n'ont pas une obligation de moyens. Elles peuvent piloter les systèmes énergétiques des bâtiments tout en garantissant la performance énergétique ; elles peuvent aussi moduler le service énergétique en fonction des comportements des différents usagers des bâtiments.

Dans ce scénario, l'énergie devient un axe stratégique de développement pour différents industriels, les opérateurs historiques bien entendu mais également de nouveaux acteurs issus des secteurs du bâtiment ou des télécommunications. Pour ces entreprises, modèles d'affaires conduisent à rechercher un équilibre entre l'autoproduction (gérée à l'échelle de la concession) et des valorisations possibles sur les marchés énergétiques nationaux et continentaux, en fonction des coûts de production et les prix de marché. Plusieurs évolutions en matière de régulation ont permis à ces acteurs de remplir ces deux missions : une taxation réduite des réseaux publics concédés à l'entreprise, l'instauration d'un statut de concession multi-énergie, et l'obligation de céder l'usufruit des toitures pour valoriser les capacités de production solaire.

- iii. Le scénario « *Collectivités Locales* » considère les collectivités comme l'acteur clé pour planifier la transition énergétique en prenant en compte à la fois la production, la distribution et le stockage de l'énergie. La politique énergétique qu'elles mettent en œuvre vise la transition énergétique avec une attention particulière à la question des emplois et des revenus à l'échelle locale. Leur action repose sur une multitude de leviers, à la fois techniques (outils de

supervision), économiques (subventions, tarification) et réglementaires (règles d'urbanisme). La gestion des réseaux est généralement laissée à des entreprises spécialisées par le biais de concessions d'exploitation. Mais les collectivités disposent de larges possibilités d'orienter la politique énergétique locale dans le sens de l'efficacité énergétique, la décarbonation et surtout la valorisation des ressources énergétiques locales.

L'enjeu des relations entre les acteurs dans ce scénario est essentiellement centré sur les relations avec les territoires alentours. En effet, les collectivités cherchent à accroître leur autonomie en promouvant la mobilisation des ressources énergétiques locales, d'abord sur le territoire, puis à leur périphérie. Ceci peut conduire à poser la question d'une exploitation des ressources des zones rurales pour approvisionner les zones urbaines. Dans ce scénario, les collectivités sont dotées de compétences diverses : prescrire la performance énergétique en complément de la réglementation thermique nationale, imposer le raccordement des bâtiments à un type de réseau, accéder aux données énergétiques de consommation et de production sur leur territoire, différencier les modalités de la concession et le concessionnaire sur le territoire.

- iv. Le scénario « *Acteurs Coopératifs* » repose sur les principes de mutualisation d'équipements de production et de stockage et/ou d'échanges horizontaux entre habitants/coopérateurs d'un même îlot ou quartier et dans une optique de développement durable. Une certaine autonomie dans l'approvisionnement en énergie, voire également pour l'alimentation est visée. Les relations avec les réseaux publics sont réduites pour les coopérateurs ayant les moyens d'investir dans des systèmes performants ; les autorités publiques auront un rôle de soutien à l'investissement via des mécanismes de subventions auprès des coopératives/coopérateurs moins fortunés. Les coopératives diffèrent en termes de choix techniques en raison du pouvoir d'achat, de l'ancienneté des bâtiments et des capacités d'investissement des acteurs constituant ces coopératives.

En ce qui concerne l'offre d'énergie, les capacités de production locale se situent essentiellement dans ou sur le bâti. La gestion de la production dans les espaces communs dépend des habitants qui sont des consommateurs individuels et des producteurs coopérateurs. Les moyens de production décentralisés sont construits dans l'optique d'être le plus indépendant possible des réseaux classiques et mobilisent donc des moyens de stockage ainsi que des technologies *smart grids* pour faire coïncider au mieux demande et production interne. Des modèles sophistiqués reflétant de manière fine les activités de réseaux peuvent alors aider les habitants de ces périmètres à gérer leur système de production. Mais des prestataires de services extérieurs peuvent également être mobilisés pour gérer la fourniture, le transport et la distribution.

Profil de la copropriété énergétique bas carbone

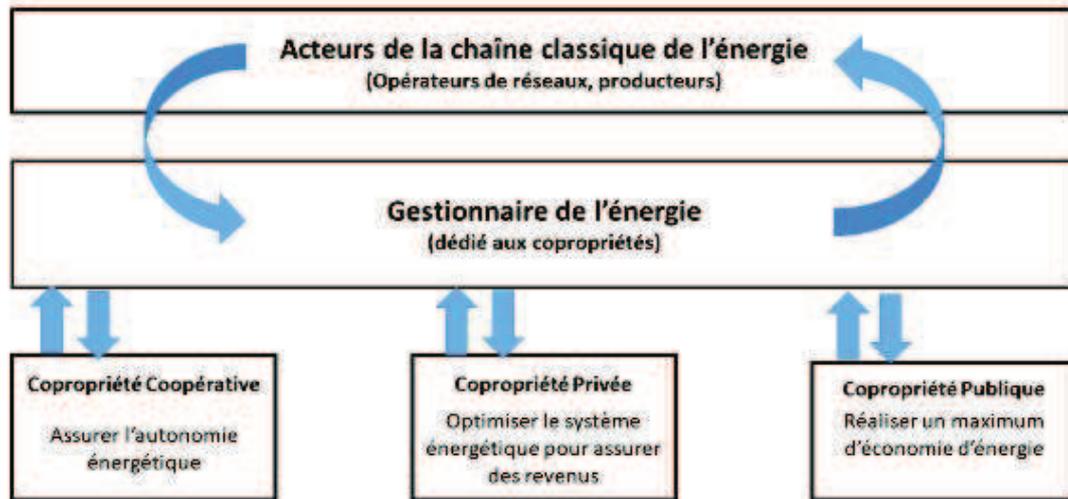
Suite à la présentation des idéal-types et du projet Ecoquartier Nexus Energie, il apparaît que plusieurs profils de copropriété peuvent être envisagés permettant de définir différents besoins auxquels le gestionnaire d'énergie devra répondre [Figure 53 : Les différents profils de copropriété énergétique ayant besoin de recourir à un gestionnaire de l'énergie].

En reprenant le scénario « *Acteurs coopératifs* » du projet Nexus, un premier modèle de copropriété énergétique émerge. Il représente un regroupement de citoyens recherchant un lieu de vie correspondant à leur conviction sociale et politique de vivre-ensemble et de respect de l'environnement. Dans ce type de copropriété, le principal but poursuivi est l'autonomie énergétique. Elle se traduit par la volonté des habitants du quartier d'avoir un système énergétique bas carbone dédié à leurs usages dont l'optimisation technique leur permet d'avoir recours le moins possibles aux réseaux extérieurs. Les moyens techniques installés dans la copropriété sont bien entendu dépendants des moyens financiers dont disposent les futurs habitants, même si par ailleurs ils peuvent bénéficier de subventions pour réaliser certains travaux. Dans ce type de copropriété, la gestion de l'énergie peut être réalisée par les membres constituant cette dernière ou par un acteur délégué qui aura été choisi par les habitants.

Un second modèle de copropriété peut s'appuyer sur le scénario « *Grande entreprise* » dans lequel le choix des technologies installées est réalisé par des entreprises dans le but de proposer un système énergétique performant pour de futurs occupants ayant les moyens financiers d'investir dans ce type de projet. Les systèmes techniques proposés sont très efficaces sur le plan de la demande d'énergie ce qui permet de viser une assez grande autonomie en s'appuyant sur des moyens de production décentralisés et des dispositifs de stockage. Ces capacités de production et de stockage sont valorisées économiquement sur les marchés électriques, ce qui apporte des revenus complémentaires à la copropriété. Dans cette proposition, la gestion énergétique est réalisée par des acteurs privés qui sont issus du monde industriel.

Enfin, un troisième modèle de copropriété s'inspire des scénarii « *Etat prescripteur* » et « *Grande Entreprise* » dans lequel l'Etat et/ou les collectivités territoriales subventionnent l'émergence d'ilots de bâtiments pour loger des résidents qui n'ont pas forcément les moyens d'investir dans des infrastructures très capitalistiques mais qui ne sont pas non plus motivés par une démarche coopérative. La copropriété énergétique se concentre principalement l'efficacité énergétique et la volonté de réaliser un maximum d'économie d'énergie. Les moyens de production mobilisant des sources locales et bas carbone sont également pris en compte mais contrairement aux autres types de copropriété énergétique, leur valorisation économique est faite au profit des organismes publics ou privés ayant investis et administrant les copropriétés.

Figure 53 : Les différents profils de copropriété énergétique ayant besoin de recourir à un gestionnaire de l'énergie [Construction de l'auteur]



L'approche par les idéaux types, enrichie par les analyses issues du projet Ecoquartier Nexus Energie permet d'approfondir la réflexion autour des enjeux de l'approvisionnement énergétique bas carbone à l'échelle des quartiers. Dans cette section, le quartier se transforme en une copropriété dont les objectifs énergétiques diffèrent selon le profil des acteurs réunis. Néanmoins, elles se retrouvent toutes sur le besoin de recourir à un nouvel acteur pour gérer le système énergétique installés dans la copropriété tout assurant la relation avec les infrastructures et les acteurs de l'énergie présents à l'extérieur.

3.2. Les fonctions du gestionnaire de l'énergie comme administrateur de la copropriété

La décentralisation de l'approvisionnement énergétique à l'échelle du quartier va entraîner le développement d'un nouveau statut pour ce territoire. Les innovations en termes de jeu d'acteur ne s'arrêteront pas à la création d'un statut regroupant un ensemble de consommateurs-producteurs en une personne morale. Outre cet apport, la création d'un gestionnaire de l'énergie semble primordiale pour rendre l'échelle du quartier viable dans le long terme. Cet acteur n'existant pas encore, nous proposons dans la section qui suit une réflexion sur les différentes fonctions qu'il devrait remplir.

3.2.1. La gestion des flux à l'intérieur de la copropriété

L'intérêt de mettre en place une copropriété énergétique est avant tout de permettre de réaliser une production provenant des ressources locales tout en assurant la maîtrise de la demande des usagers de la copropriété. Dans ce cadre, le gestionnaire de l'énergie va avoir pour mission non seulement de relever et communiquer sur les modes de consommation afin d'optimiser les systèmes énergétiques, mais il devra aussi chercher à réaliser des contrats de fourniture qui reflètent la part que chaque usager dans de la copropriété [Figure 54 : Les différentes fonctions du gestionnaire de l'énergie].

Le pilotage de l'énergie dans la copropriété

Une première fonction du gestionnaire de l'énergie va être d'assurer un fonctionnement optimal du système énergétique installé dans la copropriété. Afin d'y parvenir, il va mobiliser les technologies de l'information et de la communication. Elles lui fourniront une assistance dans l'exploitation du réseau et dans la planification de son fonctionnement dans le but d'assurer la bonne marche du système énergétique tout en étant capable de communiquer sur son fonctionnement. Ces actions reposent sur des systèmes de mesurage énergétiques qui ont pour rôle d'analyser les données énergétiques dans le but d'assurer leur bon fonctionnement et la performance énergétique des systèmes [ATEE, 2016, Kabalci, 2016].

Les systèmes d'information et de management de l'énergie (SIME) sont constitués généralement de trois briques qui prennent en compte le mesurage, les moyens de relève et d'historisation ainsi que les logiciels de gestion énergétiques. Les dispositifs de mesurage sont destinés à être utilisés pour faire des mesures et sont constitués des appareils capables de comptages comme les compteurs d'énergie (électricité, chaleur, gaz,...). Les moyens de relève qui ont pour rôle de collecter et centraliser les données issues des appareils de mesurages. Ils reposent sur des systèmes de supervision comme des capteurs communicants, des systèmes de télé-relève, des concentrateurs et fonctionnent avec des systèmes de supervision (GTB, GTC, SCADA). Enfin, il y a utilisation des moyens d'analyses qui sont tous les outils d'analyses permettant d'exploiter les données et de les restituer à différents acteurs [ATEE, 2016, Kabalci, 2016].

Ces outils vont permettre au gestionnaire de garantir plusieurs fonctions au sein de la copropriété énergétique que ce soit pour l'exploitation, la maintenance et assurer la maîtrise de la demande énergétique.

L'exploitation et la maintenance du système énergétique de la copropriété

La supervision et la consolidation des données énergétiques vont être employées par le gestionnaire de l'énergie pour assurer la maintenance des systèmes énergétiques. Par exemple, la supervision en temps réel va permettre de distinguer des anomalies sur les systèmes techniques et de faire déplacer des équipes de maintenance pour résoudre les dysfonctionnements de l'infrastructure. Dans un même temps, ces outils de mesure vont permettre d'exploiter le système en pointant les gisements d'économies possibles pour prévenir le gaspillage d'énergie et optimiser le fonctionnement des équipements consommateurs d'énergies. Cette possibilité va pouvoir également impacter le choix des contrats de fourniture qui pourront être souscrits par les membres de la copropriété et de réaliser des économies dans leur facture. En effet, l'optimisation des systèmes techniques dans la copropriété permet de baisser les appels de puissance nécessaire à son fonctionnement qui constitue la part fixe des contrats de fourniture tout en réduisant la consommation énergétique et par conséquent en réduisant la part variable du contrat de fourniture [ATEE, 2016].

La maîtrise de la demande énergétique des membres de la copropriété

Outre assurer le bon fonctionnement technique du système énergétique installé dans la copropriété, le développement des technologies *smart grid* va donner la possibilité au gestionnaire de l'énergie de mieux suivre les consommations des usagers de la copropriété et de les inciter à une meilleure maîtrise des consommations. Son rôle va être de collecter l'information via les compteurs intelligents, de l'analyser puis de la renvoyer vers les membres de la copropriété afin qu'ils puissent agir sur leurs consommations. La communication sur les profils de consommation a été reconnue comme ayant un impact positif sur la consommation et par conséquent sur la réduction de la facture énergétique [Cf. Chapitre 1]. Cette possibilité impose de mettre en œuvre des plateformes qui permettent de récolter les données et de les exploiter. Ces plateformes pourront être utilisées de façon dissociées ou combinées pour l'électricité et la chaleur par le gestionnaire de l'énergie selon les besoins et la demande des membres de la copropriété.

La promotion de l'autoconsommation

Le gestionnaire de l'énergie va avoir pour rôle de favoriser l'autoconsommation des systèmes énergétiques par les usagers de la copropriété. Le but est de faire en sorte que les copropriétaires consomment tout ou une partie de l'énergie produite sur place. L'enjeu est alors de faire réaliser des économies aux membres de la copropriété en favorisant les coûts évités, notamment en profitant de l'écart entre les coûts de production de l'énergie autoconsommée et le coût de l'électricité soutirée sur le réseau. Cette possibilité de valoriser l'autoconsommation sera notamment recherchée par les copropriétés coopératives qui recherchent à être les plus autonomes possibles par rapport aux réseaux extérieurs.

Le profil actuel des acteurs traitant de ces thématiques

Actuellement, de nombreux acteurs sont positionnés sur le marché des logiciels de gestion énergétique. Plusieurs classes d'acteurs peuvent ainsi être distinguées comme les équipementiers (Schneider Electric, Delat D'ore, Sauter,...), les bureaux d'études spécialisés dans l'efficacité énergétique (Metron, Dapesco, Artelys,...) les fournisseurs d'énergies, les exploitants spécialisés dans le *facility management* (Dalkia, Bouygues Energies et Services, Vertuoz by Engie,...), les pures players indépendants (Energisme, effiPilot, Dexma,...) ou encore les intégrateurs (Actemium, API,...) [ATEE, 2016]. Ces différents ne sont pas matures sur l'intégralité des briques de système de mesurage constitué du dispositif de mesure, des moyens de relève et d'historisation de la donnée et enfin des moyens de d'analyses. Néanmoins, certains de ces acteurs tentent de se positionner comme des acteurs globaux et pourraient devenir des gestionnaires de copropriété pour assurer le bon fonctionnement des systèmes énergétiques de cette dernière.

3.2.2. La gestion des flux à l'extérieur de la copropriété

Après avoir étudié le rôle du gestionnaire de l'énergie dans le cadre du fonctionnement interne des copropriétés ; il faut analyser comment ce nouvel acteur pourrait répondre au besoin d'assurer les relations externes des copropriétés avec les réseaux historiques existants. Au niveau de la réalisation des infrastructures dans les îlots de bâtiments qui constituent une copropriété, cette prise en compte peut être menée de façon dissociée ou de façon conjointe.

Traitement des flux de façon dissociée

En ce qui concerne le réseau électrique, la fonction du gestionnaire va être à la fois technique et économique.

D'un point de vue technique, l'enjeu est de soulager l'opérateur de réseau de distribution électrique. En effet, il a été prouvé que l'émergence de la production distribuée dans le réseau est un facteur d'instabilité important. Plus les ressources distribuées sont concentrées en un certain point du réseau, plus leur impact est négatif [De Joode, al, 2009]. Ainsi, l'observation des impacts des modes de gestion des opérateurs de systèmes de distribution, montre qu'il y a un avantage manifeste à une gestion active [Anaya et al, 2017 ; Kabalci, 2016]. Les gestionnaires de réseaux de distribution pourront ainsi mieux anticiper les investissements à réaliser en maintenance et en renforcement des infrastructures, ce qui permettrait une meilleure insertion des énergies renouvelables sur le réseau.

D'un point de vue économique, l'apparition de la flexibilité à l'échelle locale offre la possibilité de valoriser sur le marché les systèmes de production et de stockage installés dans la copropriété. Les membres de la copropriété n'étant pas des spécialistes du marché de l'électricité, ils devront recourir à un acteur ayant les compétences requises pour valoriser leurs différentes capacités. Le gestionnaire de

l'énergie devra pouvoir être accepté par les différents acteurs du marché électrique. Pour se faire, il pourra prendre le statut d'agrégateur. Dans ce cadre, il pourra valoriser les seules capacités de la copropriété ou plusieurs capacités provenant de différentes copropriétés sur le marché afin d'assurer la fiabilité du réseau de distribution en temps réel. Ces acteurs pourront également valoriser les capacités de production et de stockage sur le marché de gros via des structures de centrale virtuelle de production ou par le système de valorisation du *demand/response* [CF. Chapitre 5, Partie 1].

En ce qui concerne le réseau de chaleur intégré dans la copropriété ce dernier est a priori autonome dans le sens où il se suffit à lui-même et qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une relation avec le réseau de chaleur urbain existant pour répondre aux besoins des usagers. Néanmoins, il est possible qu'apparaissent des besoins dans le réseau de chaleur urbain extérieur qui pourrait être palliés par le réseau interne de la copropriété. Dans ce contexte, le gestionnaire de l'énergie aurait pour but d'informer l'opérateur de réseau des disponibilités des différentes capacités de production et d'effacement du réseau. Si l'opérateur de réseau décide d'utiliser ces capacités, il devra rémunérer la copropriété pour le service rendu. Le gestionnaire de réseau aura alors la mission de traiter les relations contractuelles avec cet acteur [Brand et al, 2014].

Traitement des flux de façon conjointe

Les copropriétés installant un système énergétique dans leur périmètre pourront faire le choix de réaliser une infrastructure où différents vecteurs énergétiques seront utilisés pour produire de la chaleur ou de l'électricité. Ces systèmes, appelés systèmes multi-énergies (*multi-energy systems*), ont l'avantage d'apporter de la flexibilité et de pouvoir réduire les coûts des infrastructures installées [Mancarella et al, 2014 ; Niemi et al, 2012].

Le système multi-énergie, le plus connu et le plus mature technologiquement, est la cogénération. Elle consiste à produire simultanément deux vecteurs énergétiques dans la même centrale à partir d'une même énergie primaire. Généralement, il s'agit de l'énergie de l'électricité et de la chaleur. La production d'électricité dégage de la chaleur qui peut être valorisée en étant utilisée pour chauffer les bâtiments présents dans le quartier. Outre l'intérêt de valoriser la chaleur, la cogénération permet également d'obtenir un très haut rendement énergétique pouvant aller jusqu'à 85%. Des évolutions technologiques ont également permis de réaliser des systèmes de tri génération qui produisent à la fois de l'électricité, de la chaleur et du froid. Néanmoins, il existe encore de nombreuses barrières pour valoriser ces systèmes de cogénération que ce soit économiques ou institutionnelles [AIE, 2014 ; Comenar-Santos et al, 2015].

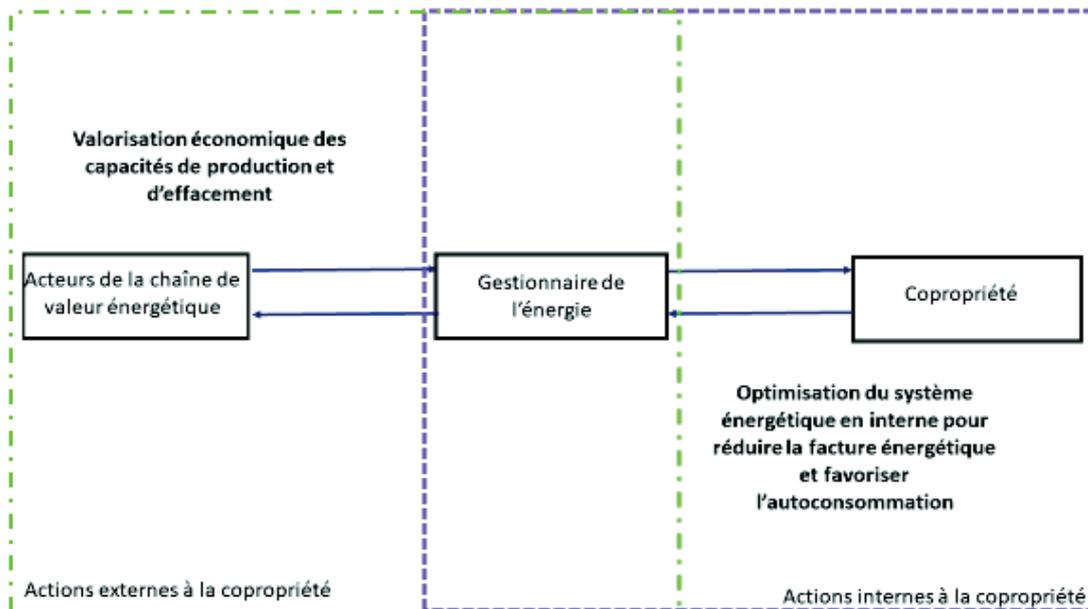
Le rôle du gestionnaire de l'énergie sera alors d'identifier quel mécanisme est préférable en fonction du schéma d'approvisionnement électrique installé dans la copropriété, afin qu'il soit source de revenus pour les membres de la copropriété.

La rémunération du gestionnaire de l'énergie

Le rôle du gestionnaire de l'énergie va alors être de valoriser économiquement les systèmes énergétiques qu'ils soient mono-énergies ou multi-énergies, d'abord dans le but d'optimiser la production par rapport à la consommation d'énergie dans la copropriété comme cela a été vu dans la sous-partie précédente. Mais le but du gestionnaire de l'énergie va être également de valoriser les capacités de production ou de stockage présentes dans la copropriété pour rendre des services aux opérateurs de réseaux, tout en faisant en sorte que cette aide puisse être une source de revenu pour la copropriété.

Dans un même temps, il va falloir que le gestionnaire de l'énergie puisse se rémunérer pour remplir ce type de fonction afin d'avoir une activité rentable. Le gestionnaire de l'énergie, pour ses activités de promotion des capacités hors de la copropriété, doit prendre en compte non seulement les coûts des marchés, les coûts de structure et les coûts liés aux capacités. En effet, le gestionnaire de réseau doit dans ce cas pouvoir couvrir ses coûts fixes qui englobent les coûts de structures et ses coûts d'accès au marché, ainsi qu'une marge qui représente un pourcentage du prix proposé au producteur. Le gestionnaire de l'énergie doit prendre en compte les coûts des écarts, qui devra rendre compte à l'opérateur de réseau, notamment lorsqu'il valorise des capacités électriques afin de compenser les écarts entre la production prévue et la production réelle [Finergreen, 2017].

Figure 54 : Les différentes fonctions du gestionnaire de l'énergie [Construction de l'auteur]



Le gestionnaire de l'énergie comme acteur unique ayant les fonctions de valoriser les systèmes énergétiques présents dans les copropriétés à la fois à l'intérieur de ces dernières mais également à l'extérieur n'existe pas comme tel. En effet, les fonctions existent mais soit elles sont désorganisées car non hiérarchisées dans un même acteur, soit elles n'existent pas encore pour le type de flux étudiés ou pas à cette échelle du réseau. Néanmoins, des travaux et des dispositions réglementaires émergeant ces dernières années au niveau de l'Union Européenne et des Etats Membres semblent montrer le développement d'une réflexion sur le besoin de ce type d'acteur dans les prochaines années.

3.3. Le développement du statut au niveau de l'Union Européenne

L'enjeu de la flexibilité à l'échelle locale associé au développement des écoquartiers fait apparaître le besoin de créer de nouveaux statuts pour les consommateurs et de nouvelles relations entre les acteurs de la chaîne de valeur énergétique. La description des idéaux-types, nous a permis de faire deux propositions dans ce sens. Nous avons introduit la notion de copropriété énergétique qui regroupe sous un même statut juridique un ensemble de consommateurs/producteurs présents dans un écoquartier. Nous avons également introduit le concept de gestionnaire de l'énergie qui aurait pour mission de gérer le système énergétique installé dans la copropriété que ce soit pour assurer l'optimisation du système et réaliser des économies mais également sa valorisation à l'extérieur de la copropriété. Dans cette section, nous allons à présent nous interroger sur la possible émergence d'un tel acteur dans les systèmes énergétiques européens. Nous présentons ci-dessous les orientations de l'Union Européenne sur ce sujet.

La valorisation économique de la flexibilité électrique locale

Tout comme il existe un marché de gros avec des valorisations de court terme (marché spot) et de long terme (marché à termes) ainsi que des mécanismes de marché pour les services systèmes où des acheteurs, des vendeurs et des détaillants peuvent intervenir pour assurer la flexibilité. Il pourrait alors être envisagé de créer un marché local. L'accroissement des besoins de flexibilité au niveau local conduit à poser la question du mode de valorisation de cette dernière. Outre les besoins d'un accord sur la qualité, la quantité et le prix des biens, d'autres éléments doivent être pris en compte comme la date de délivrance, le format de l'accord et les conditions contractuelles. Tous ces éléments sont pris en compte par les acteurs pour qui ce marché est accessible ; il s'agit des acteurs ayant de grosses capacités de production ou d'effacement [Hansen et al, 2009 ; Glachant et al, 2014].

La valorisation de la flexibilité à l'échelle locale par des systèmes de marché pourrait prendre différentes formes [Ramos et al, 2016]. La forme la plus simple serait qu'elle puisse être valorisée sur le même marché que pour les grosses capacités. L'intérêt serait alors de bénéficier des mêmes plateformes de marché, tout en ayant introduit des spécificités pour valoriser les capacités locales comme des mécanismes de prix particuliers. Il peut être envisagé d'utiliser des prix nodaux, par exemple [Henriot et al, 2013]. Il peut aussi être envisagé de créer un nouveau marché séparé du marché de gros pour les échanges locaux. Dans ce cadre, l'opérateur de réseaux de distribution prendrait un poids considérable et gérerait les flexibilités seul ou avec l'aide d'un acteur spécialisé [Ruester et al, 2013]. Il pourrait également être envisagé que la flexibilité locale soit utilisée comme un système de réserve. Néanmoins cette possibilité nécessite de clairement définir quelles sont les capacités allouées à la réserve et celles qui pourraient être allouées au marché de gros [CEDEC, 2014].

La valorisation économique de la chaleur

L'apparition d'un acteur de flexibilité pour la chaleur ne fait pas forcément sens en raison des fortes spécificités d'actifs des réseaux de chaleur [Cf. Chapitre 4]. Néanmoins le développement des copropriétés comme systèmes multi-énergies pourraient nécessiter l'émergence d'acteurs capables de valoriser les différentes capacités sur les réseaux extérieurs. En ce sens, le gestionnaire de l'énergie tel que décrit dans cette partie pourrait avoir la compétence nécessaire pour valoriser les systèmes de production et stockage de chaleur de la copropriété.

Actuellement le marché n'est pas assez mature pour déterminer quelle forme supplantera les autres. Néanmoins, ces différentes possibilités auront possiblement recours à un acteur pouvant gérer les flexibilités locales. Ce rôle pourra être tenu par l'opérateur de réseau de distribution, par un agrégateur déjà institutionnalisé ou par que le gestionnaire d'énergie tel que défini dans la section précédente. Actuellement, une réflexion émerge sur le statut de l'agrégateur au niveau de l'Union Européenne.

Le concept de l'agrégateur

Le concept d'agrégateur est étudié depuis quelques années par la Commission Européenne qui le considère comme un acteur desservant différentes entités du réseau électrique comme les opérateurs indépendants du système électrique, les services publics, les opérateurs de réseau de transport ou les opérateurs de réseau de distribution. Cet opérateur doit être capable de gérer la flexibilité de la demande, pour assurer le délestage ou le profilage des charges. En janvier 2015, le groupe de travail Smart Grid Task Force²³⁰ et la Commission Européenne ont affirmé que les agrégateurs, en tant qu'entités juridiques, peuvent être considérés comme un moyen essentiel pour l'utilisateur final d'agir sur le marché, étant

²³⁰ Le groupe Smart Grid Task Force est un groupe de travail sur les smart grids mise en place par la Commission Européenne en 2009. Il a pour mission de conseiller sur les sujets liés au déploiement et au développement des réseaux intelligents. Il se compose de 5 groupes d'experts qui se concentrent sur des domaines spécifiques.

donné que ces acteurs ont la capacité d'extraire la valeur des services de flexibilité au nom de leurs clients [CE, 2015 a et b].

Toutefois, le développement de cet acteur au niveau des réseaux de distribution reste encore très incertain. On note un manque de maturité dans les réflexions techniques, économiques et juridiques analysant l'apparition d'un tel acteur à une échelle de réseau jusqu'ici peu étudiée. Il est donc nécessaire de continuer à investir dans la recherche pour expérimenter ce type de profil d'acteurs et d'actions. C'est l'un des principaux défis identifiés dans les programmes de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union Européenne. Ce programme repose sur une réflexion sur les enjeux énergétique qui sont considérés comme un défi à relever afin de soutenir la transition énergétique²³¹. L'une des principales priorités est l'énergie « sûre, propre et efficace » incluse dans la section « Défis sociétaux » et elle porte essentiellement sur l'efficacité énergétique et les technologies bas carbone. Les activités de recherche dans ce domaine couvrent les sources d'énergies renouvelables et les mécanismes visant à assurer une meilleure pénétration de ces dernières dans le système électrique grâce à différents acteurs comme les agrégateurs.

L'agrégateur aurait pour rôle d'optimiser le fonctionnement d'un ensemble de bâtiments provenant de sites résidentiels ou tertiaires pour permettre d'assurer la flexibilité et la fiabilité des systèmes énergétiques. L'introduction de ce nouvel acteur pourrait modifier le fonctionnement de la chaîne de valeur électrique en introduisant de nouvelles relations entre l'opérateur de réseau de distribution et les consommateurs devenus producteurs. Or, les différents marchés européens ne sont pas tous prêts. Au niveau de la production et de la distribution de la chaleur, la création d'un nouvel acteur créerait un précédent en instaurant un besoin de flexibilité. Pour réussir à assurer la flexibilité, l'agrégateur devra tirer avantage des technologies de l'information et de communication associés.

Le cas Français

La gestion de la flexibilité à l'échelle locale se traduit par trois évolutions importantes. Il s'agit du développement des agrégateurs qui s'intéressent à la valorisation des capacités locales, la création du statut de l'autoconsommation collective et à la réflexion sur les réseaux fermés de distribution.

De nouvelles formes d'organisations émergent actuellement pour réaliser des activités d'agrégation avec des acteurs non industriels qui n'ont pas les moyens d'accéder directement au marché de capacités. En effet, les limites liées aux capacités minimales nécessaires pour pouvoir accéder au marché de capacité

²³¹ Horizon 2020 est doté d'un budget de 5 931 milliards d'euros pour soutenir les projets de recherche entre 2014 et 2020. Le défi énergétique s'articule autour de sept objectifs et domaines de recherche spécifiques: réduction de la consommation d'énergie et de l'empreinte carbone, fourniture d'électricité à faible coût, combustibles alternatifs et sources d'énergie mobiles, un réseau européen unique et intelligent, nouvelles connaissances et technologies, prises de décisions solides et engagement du public, l'adoption par le marché de l'innovation énergétique et des technologies de l'information et de la communication.

restreignent l'accès à certains acteurs qui produisent et/ou qui peuvent s'effacer seulement sur de faibles capacités. Ces nouveaux acteurs sont des organisations spécialisées dans différents segments de marchés. Ainsi, Energy Pool, devenue récemment une filiale de Schneider Electric, est un des premiers acteurs de flexibilité se tournant vers les acteurs locaux. Economering, filiale d'Engie, offre des systèmes de flexibilité pour des acteurs industriels et tertiaires. Voltalis propose de faire de l'effacement diffus chez les particuliers. Tandis que Uniper France, Hydronext et Sun'R Smart Energy sont des agrégateurs de production renouvelables [Reverdy, 2015].

En 2017, l'autoconsommation collective a été reconnue comme une nouvelle forme de gestion possible de gestion de l'énergie²³². Elle est définie comme suit « *Lorsque la fourniture d'électricité est effectuée entre un ou plusieurs producteurs et un ou plusieurs consommateurs finals liés entre eux au sein d'une personne morale et dont les points de soutirage et d'injection sont situés en aval d'un même poste public de transformation d'électricité de moyenne en basse tension.* »²³³. L'autoconsommation collective se distingue des autres profils de raccordements par un dispositif de comptage et d'affectation des flux reposant sur une répartition de la production entre un ou plusieurs consommateurs particuliers appliqué selon une clé de répartition spécifique définie par la personne morale et appliquée par le gestionnaire de réseau²³⁴.

Les réseaux fermés de distribution sont issus d'une réflexion issue de l'ordonnance du 15 décembre 2016 annoncée par la Loi sur la transition énergétique pour une croissance verte. Cette disposition fait écho à l'article 28 de la directive de 2009 relative aux règles communes pour le marché intérieur de l'électricité²³⁵. Ce type de réseau ne peut être reconnu que si des conditions particulières sont présentes et justifient ce statut. Il s'agit soit de raisons techniques ou de sécurité, comme par exemple pour les sites industriels ou les installations nécessitant une fréquence électrique spécifique), soit de distribuer

²³² Suite à la Loi n°2015-992 d 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, l'ordonnance n°2016-1019 du 27 juillet 2016 intègre un cinquième chapitre dans le livre 3 du code de l'énergie sur l'autoconsommation qui a été suivi d'un décret d'application n°2017-676 du 28 avril 2017 publié le 30 avril 2017. Ce texte énonce que les gestionnaires de réseaux de distribution doivent intégrer dans leur documentation technique de référence, une documentation relative à l'autoconsommation collective.

²³³ Article L315-2 du code de l'énergie

²³⁴ La personne morale a pour rôle de définir la clé de répartition de la production entre les différents producteurs et consommateurs. Le gestionnaire de réseau de distribution a pour rôle d'appliquer cette clé selon un pas de temps de 30 minutes et d'affecter la part de production correspondante à chaque acteur. La méthode de répartition repose sur une analyse des pas de temps de la production, totale et la consommation totale avant d'évaluer la part de production consommée dans le cadre de l'opération (autoconsommation) et la part de production non consommée dans le cadre de l'opération (surplus). Cette part est ensuite répartie à chaque consommateur et à chaque producteur selon les clés de répartition indiquée par la personne morale organisatrice de l'opération.

²³⁵ Directive 2009/72/CE du Parlement Européen et du conseil du 13 juillet 2009 concernant les règles communes pour le marché intérieur de l'électricité. Son article 28 énonce que « *Les Etats membres peuvent prévoir que les autorités de régulation nationales ou d'autres autorités compétentes qualifient de réseau fermé de distribution un réseau qui distribue de l'électricité à l'intérieur d'un site industriel, commercial ou de partage de service géographiquement limité et qui [...] n'approvisionne pas de clients résidentiels* »

de l'électricité aux propriétaires ou aux gestionnaires de réseau, excluant les immeubles de bureaux et centres commerciaux. Bien que le cadre d'application ne rentre pas dans l'analyse des écoquartiers, il peut être envisagé que ce type de réflexion aboutisse pour le résidentiel et le tertiaire.

Le cas Suisse

La Suisse a mis en place un statut de communauté d'auto consommateurs qui s'applique à des consommateurs finals d'un immeuble ou d'une copropriété ayant le statut de Propriété Par Etage (PPE)²³⁶. La seule condition est que le point de raccordement soit unique. Le propriétaire du système énergétique constitue une communauté d'auto-consommateurs dont l'un d'entre eux deviendra le responsable. Ce dernier doit être reconnu par l'ensemble de la communauté. Tous les membres doivent bénéficier du même tarif de fourniture d'électricité. Le gestionnaire de la communauté d'autoconsommation va vendre la part autoconsommée aux membres de la communauté et établir leur décompte. L'énergie excédentaire, c'est-à-dire celle injectée dans le réseau, est reprise par le distributeur local, un tiers ou un organisme tels que l'opérateur de réseau de transport (Swissgrid) ou des fournisseurs d'énergie [E-cube, 2018].

La Confédération helvétique s'intéresse également à la flexibilité. Sur ce sujet, il semble plus en avance que la France puisque la fonction d'agrégateur est intégrée dans la chaîne de valeur électrique à toutes les échelles de réseau. Ainsi, l'agrégateur peut être présent pour offrir des services d'équilibres au gestionnaire de réseau de transport mais aussi aux gestionnaires de réseaux de distribution [E-Cube, 2018].

Le cas du Royaume-Uni

Le Royaume-Uni réfléchit également aux enjeux de la décentralisation des systèmes énergétiques au niveau local et de leur impact sur les marchés, notamment électrique. Plusieurs solutions sont envisagées comme le développement des compétences des opérateurs de réseaux de distribution, la création de manager de l'énergie, la possibilité pour des compagnies municipales puissent entrer sur le marché électrique pour valoriser les capacités de production et de stockage locales. Néanmoins, actuellement le marché électrique est confronté à de nombreux freins économiques (coût des technologies, prix de l'énergie,...) et en lien avec les systèmes de régulation (jeux d'acteurs) qui ralentissent le développement de l'émergence d'un nouvel acteur pour gérer les flexibilités locales [REA, 2016].

²³⁶ La Propriété Par Etage est une sorte de copropriété où plusieurs personnes se retrouvent propriétaires d'une certaine partie d'une habitation. Les coûts et les risques sont partagés entre tous les copropriétaires.

La création d'un nouvel acteur et d'un nouveau statut pour promouvoir l'approvisionnement énergétique bas carbone à l'échelle locale trouve des échos dans les textes et les programmes de recherche de l'Union Européenne. Même si aucun de ces éléments n'est figé, ces dispositions permettent d'envisager l'intérêt d'avoir un acteur pour gérer la décentralisation des systèmes d'approvisionnement énergétique au niveau local. Néanmoins, il manque encore de nombreuses réflexions autour du statut du quartier et des profils d'acteurs pouvant réaliser la gestion de l'énergie à l'intérieur ou à l'extérieur de ce dernier que ce soit sur leur profils, leur organisation et leur modèle d'affaire.

4. Conclusion

La définition des idéaux-types à l'échelle du quartier a permis d'appréhender de plusieurs manières possibles la décentralisation de l'approvisionnement énergétique au niveau local. Au regard des idéaux-types, il existe plusieurs façon d'envisager le traitement de la thématique énergie pour cette échelle. Néanmoins le quartier semble aujourd'hui rester essentiellement une échelle de mise en œuvre des politiques d'efficacité énergétique. La performance énergétique et la maîtrise de la demande sont des leviers d'action dans le processus de transition énergétique extrêmement pertinent à l'échelle des quartiers. Néanmoins, l'approvisionnement énergétique local et bas carbone à l'échelle du quartier retient de plus en plus l'attention et dans ce domaine, la réponse doit être différenciée selon qu'il s'agit du traitement de l'approvisionnement en chaleur ou en électricité.

En ce qui concerne l'approvisionnement électrique, il est clair que la décentralisation totale du système énergétique pour répondre aux besoins du quartier tout en reposant sur des sources bas carbone est extrêmement difficile à mettre en œuvre. Il semble plus intéressant de valoriser les capacités de production décentralisées au travers de divers mécanismes économiques allant de la tarification dynamique à la gestion en temps réel des flexibilités. La valorisation des capacités de production et d'effacement semble plus pertinente que de se limiter territorialement pour favoriser les productions bas carbone locales. Les expérimentations pour envisager les futurs systèmes de régulation des flux électriques au niveau local se multiplient.

En ce qui concerne l'approvisionnement en chaleur, la maturité des systèmes techniques pouvant être installés à l'intérieur des quartiers est plus grande que pour l'électricité. Il est donc envisageable de développer des boucles locales qui pourraient être considérées comme des systèmes décentralisés par rapport aux réseaux de chaleur urbain. Néanmoins contrairement à l'électricité, on constate un retard dans l'installation de compteurs intelligents pour la chaleur ce qui retarde retardant la mise en place de nouveau modèle de tarification. La gestion dynamique des capacités en temps réel semble donc beaucoup plus difficile à mettre en œuvre à moins que les systèmes multi-énergies comme les copropriétés énergétiques puissent valoriser les systèmes d'approvisionnement de chaleur gérés de manière dynamique.

L'émergence de nouveaux acteurs de l'énergie, comme le gestionnaire de l'énergie, semble être un axe de recherche pertinent si les besoins de flexibilité se développent à l'échelle locale. Il est ainsi nécessaire d'encourager la recherche sur la forme que l'acteur pourrait prendre (marché, organisation, système hybride) selon les besoins qu'ils lui seront demandé de remplir (optimisation interne et/ou externe) par les usagers des copropriétés car il est encore extrêmement difficile de déterminer quel type de système prendra forme (hiérarchisé ou vertical) et sur quel modèle d'affaire pourra subsister.

Conclusion Générale

Ce travail de recherche a eu pour origine l'intérêt croissant porté à un territoire urbain particulier, le quartier, qui est devenu en quelques années un espace d'expérimentation pour des modèles de développement plus durable, en particulier sur le plan énergétique. Les projets d'écoquartiers correspondent ainsi à la volonté grandissante que manifestent certaines collectivités locales à travers l'Europe d'explorer de nouvelles manières d'approvisionner leur territoire in situ et bas carbone afin de participer plus activement à la transition énergétique. De plus, les politiques énergétiques mises en œuvre dans le secteur du bâtiment conduisent de plus en plus non seulement à améliorer l'efficacité énergétique mais aussi à valoriser les ressources énergétiques renouvelables disponibles localement. Notre objectif est alors d'explorer les opportunités qu'offre cette échelle de territoire urbain à la transition énergétique.

Dans les deux premiers chapitres, nous avons analysé le traitement accordé à l'énergie dans les écoquartiers au travers d'un double prisme, théorique et empirique. Nous avons ainsi observé que la prise en compte des enjeux énergétiques dans les écoquartiers a, pour l'instant, essentiellement porté sur la demande énergétique avec l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments et la maîtrise de la demande grâce à l'essor de la domotique et des compteurs intelligents. Les réalisations visant l'approvisionnement énergétique (les activités de production et de distribution au niveau local) ont été beaucoup moins nombreuses malgré le grand nombre d'écoquartiers revendiquant un positionnement sur ce plan. Les études de cas réalisées montrent que de nombreux freins techniques, économiques, politiques ou encore réglementaires font obstacle à la réalisation de système d'approvisionnement énergétique réellement innovants, et expliquent l'écart important observé entre les ambitions initiales et les réalisations effectives.

Le constat de l'intérêt porté à l'échelle du quartier pour favoriser le déploiement des systèmes énergétiques innovants et bas carbone, malgré les difficultés recensées, nous a conduits à développer une réflexion sur les potentiels du développement d'une offre locale décentralisée. Celle-ci est susceptible de remettre en cause les systèmes d'approvisionnement énergétique centralisés existants tout en complétant de manière efficace les actions entreprises du côté de la demande.

Les deux chapitres suivants, nous ont permis d'étudier les enjeux technico-économiques et institutionnels résultant de la prise en compte de l'approvisionnement énergétique bas carbone à l'échelle du quartier. Il apparaît que la décentralisation des systèmes énergétiques à cette échelle a un impact sur les relations des acteurs de la chaîne de valeur énergétique présents au niveau local et par conséquent sur le choix des modèles d'affaires. L'optimisation technico-énergétique des systèmes énergétiques, bien que possible théoriquement à cette échelle entraîne une réflexion sur l'autonomie énergétique et remet en cause un certain nombre des fondamentaux de l'économie des réseaux et qui ont

constitué leur force. Les apports de la théorie économique néo-institutionnaliste montrent comment les nouveaux modèles doivent émerger pour répondre aux enjeux technico-économiques des systèmes énergétiques des quartiers et ce, en dépit des inerties dans les modes de régulation préexistants.

Il convient pour cela de repenser l'ensemble des conditions techniques, économiques et institutionnelles des infrastructures à l'approvisionnement. En raison des relations de coévolution entre les infrastructures techniques et les institutions, la transformation des systèmes techniques conduit à modifier les règles qui régissent ces systèmes. La théorie des systèmes sociotechniques, et plus particulièrement l'analyse par la perspective multi-niveaux, montrent la nécessité d'étudier les relations entre les différentes parties d'un système pour comprendre les dynamiques le constituant et éventuellement les faire évoluer. La Nouvelle Economie Institutionnelle a également permis de démontrer l'importance des institutions dans la décentralisation des systèmes d'approvisionnement énergétique. Malgré la lenteur des évolutions, la transformation des institutions permet d'encadrer et d'assurer le bon fonctionnement des systèmes techniques. De plus, les relations entre les organisations et les systèmes techniques doivent être régulées au niveau contractuel. Ces contrats structurés par la prise en compte des coûts de transaction vont être modifiés pour accompagner les nouveaux jeux d'acteurs mais ils vont également pouvoir modifier les comportements même de ces acteurs.

Afin d'envisager la forme que pourrait prendre l'approvisionnement énergétique bas carbone à l'échelle des quartiers, nous avons choisi de montrer combien ce territoire offre un terreau favorable à l'innovation organisationnelle avec l'apparition de nouvelles relations entre les acteurs de la chaîne de valeur énergétique.

Dans le dernier chapitre, nous avons essayé d'imaginer la forme que pourrait prendre l'approvisionnement énergétique bas carbone à l'échelle des quartiers et les nouvelles relations entre les actions de la chaîne de valeur énergétique qui pourrait en résulter. Un enjeu central pour les acteurs est de préserver les marges de flexibilité du système énergétique du quartier de façon à garantir le bon fonctionnement du système énergétique. Pour illustrer cette problématique, nous avons choisi de construire trois idéal-types qui présentent trois visions différentes d'un approvisionnement énergétique bas carbone à l'échelle du quartier. Le premier idéaltype met principalement l'accent sur l'efficacité énergétique et envisage l'approvisionnement bas carbone via des contrats de fourniture spécifiques avec des producteurs spécialisés ou via des garanties d'origine. Le second idéaltype considère la possibilité de développer un système énergétique s'appuyant sur les sources renouvelables disponibles localement, mais sans rechercher une autonomie maximale pour ne pas impacter la qualité et le coût de l'approvisionnement. Enfin, le dernier idéal-type explore la possibilité d'une copropriété énergétique dans laquelle le système technique est optimisé pour répondre aux besoins énergétique des usagers du quartier et cela en maximisant la production locale d'énergie. La construction des deux derniers idéal-types qui s'appuient dans des proportions variables mais significatives de production locale d'énergie

font apparaître le besoin d'un nouvel acteur : le gestionnaire d'énergie. Il aura le rôle de garantir le bon fonctionnement du système énergétique du quartier.

Cette dernière partie montre en particulier que pour que le quartier devienne une échelle pertinente en matière d'approvisionnement énergétique bas carbone, la flexibilité du système énergétique doit être garantie. Cette garantie peut passer par l'émergence d'un nouveau profil d'acteur dont le rôle est d'assurer le bon fonctionnement du système énergétique installé.

Ce travail de recherche permet d'ouvrir la voie à des travaux de recherche futurs. Ainsi, plusieurs dimensions de la problématique devraient être explorées plus avant comme le développement et la mise en place des contrats de fourniture verts pour garantir que l'approvisionnement énergétique est issue des énergies bas carbone lorsque la production locale ne peut être assurée en quantité suffisante. Mais plus important encore, il nous semble nécessaire de réaliser des travaux de recherche sur la nouvelle entité que pourraient constituer le gestionnaire de l'énergie. En effet, cet acteur qui n'existe pas en tant que tel peut prendre diverses formes. Il peut être public ou privé, hiérarchisé ou vertical dans son organisation. Sa relation au marché n'est pas encore réellement claire tout comme sa relation avec les acteurs du quartier. La dernière sous-section du chapitre 5 a permis de montrer que de nombreuses réflexions sur ce sujet commençaient à essaimer à travers l'Europe.

Les politiques énergies-climats doivent incontestablement être conçues et mises en œuvre dans une perspective de gouvernance multi-niveaux. Si de très nombreux travaux de recherche ont déjà été consacrés aux régimes internationaux et à la définition des politiques européennes et nationales, l'échelle urbaine, et a fortiori l'échelle infra-urbaine avec le quartier, ont été moins explorées. Ce travail a donc eu pour ambition de contribuer à construire une réflexion sur ce sujet, qui ne peut dans le futur que s'affirmer comme stratégique.

Bibliographie

1. Ackerman T., Anderson G., Söder L., 2001, “Distributed generation : a definition”, *Electric Power systems research*, n°57, pp 195-204
2. Ackerman T., Knyazkin V., 2002, “Interaction between distributed generation and the distribution network: operational aspect”, Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific, IEEE/PES , pp 1357-1362
3. Ackerman T., 2013, “What matters for successful integration of distributed generation”, Energynautics, 28 slides, pdf
4. ADEME, 2008, « Urbanisme-Energie : les éco-quartiers en Europe », France, 36 pages [ADEME, 2008a]
5. ADEME, 2008, « L’efficacité énergétique dans l’Union Européenne : panorama des politiques et des bonnes pratiques », France, 52 pages [ADEME, 2008b]
6. ADEME, 2013, « Repenser les villes dans la société post-carbone », France, 298 pages [ADEME, 2013a]
7. ADEME, 2013, “Etude sur le potentiel du stockage d’énergie”, France, 235 pages [ADEME, 2013b]
8. ADEME, 2014, « Greenlys- un démonstrateur urbain smart grids à grande échelle à Lyon et Grenoble », France, 2 pages
9. Agence Européenne de l’Environnement, 2006, « Urban Sprawl in Europe : The ignored challenged”, Report n°10/2006, 60 pages
10. Agence Internationale de l’Energie, 2010, « Energy Technology Perspectives », 710 pages
11. Agence Internationale de l’Energie, 2011, « Technology Roadmap- Energy Efficient Buildings : heating and cooling equipment », 56 pages
12. Agence Internationale de l’Energie, 2014, “Linking Heat and Electricity systems”, 62 pages [AIE, 2014a]
13. Agence Internationale de l’énergie, 2014, “Technology Roadmap-Energy storage”, 64 pages [AIE, 2014b]
14. Agence Internationale de l’Energie, 2016, “Re-powering the market”, 246 pages [AIE, 2016a]
15. Agence Internationale de l’Energie, 2016, “World Energy Investment”, 177 pages [AIE, 2016b]
16. Akbari K., Nasiri M.M., Jolai F., Ghaderi S.F., 2014, « Optimal investment and unit sizing of distributed energy systems under uncertainty: a robust optimization approach”, *Energy and Buildings*, 35 pages
17. Akrich M., 1987, « Comment décrire les objets techniques ? », *Techniques & Culture*, Editions de la maison des sciences de l’homme, pp 49-64

18. Akrich M., 1998, « Les utilisateurs, acteurs de l'innovation », Education permanent, Paris : Documentation française, pp 79-90
19. Alchian A.A., Demstetz H., 1973, "The property right paradigm", *The journal of Economic History*, Vol.33, No.1, pp 16-27
20. Allix G., 2009, « Les villes abusent de l'appellation d'éco-quartier », *Le Monde*, 1 page
21. AMORCE, 2011, « Réseaux de chaleur et bâtiments basse consommation : l'équation impossible ? », 64 pages
22. Anaya K.L., Pollitt M.G., 2017, « Going smarter in the connection of distributed generation », *Energy Policy*, Volume 105, pp 608-617
23. Andaloro A.P.F., Salomone R., Ioppolo G., Andaloro L., 2010, "Energy certification of buildings : a comparative analysis of progress towards implementation in European countries", *Energy Policy*, n°38, pp 5840-5866
24. Appert M., 2012, "Les JO 2012 à Londres : un grand évènement alibi du renouvellement urbain à l'est de la capitale », *Géoscience*, 17 pages
25. ARENE, avril 2005, « Quartiers durables : Guide d'expériences européennes », IMBE, <http://www.areneidf.org/HQE-urbanisme/pdf/qde-exp-europe.pdf>
26. Association Evènement OSE, 2013, « Energie, citoyens et ville durable », Congrès OSE 13^{ième} édition, Presses des Mines, 92 pages
27. Association Technique Energie Environnement, 2016, « Guide des logiciels de gestion énergétique », 29 pages
28. Barro R.J., 1990, "Government spending in a simple model of endogeneous growth", *Journal of Political Economy*, pp 103-125.
29. Barton H., « Sustainable Communities : The potential for Eco-Neighbourhood. », *Earthscan*, London, Première publication en 2000, Réédition en 2009, 305 pages
30. Baumol W.J. , 1982, "Contestable markets : an uprising in the theory of industry structure", *The American Economic Review*, vol.72, n°1, PP 1-15
31. Beltran A., Carre P.A., 2000, « Une fin de siècle électrique », *Les cahiers de médiologie*, n°10, pp 90-101
32. Bento N., 2012, « Le défi du déploiement des nouveaux réseaux énergétiques : quel rôle de l'Etat ? », *Vie & Sciences de l'entreprise*, n°190, pp 71-94
33. Bio Intelligence Service, 2008, "Impacts of information and communication technologies on energy efficiency", Final report, European Commission DG INFSO, 432 pages
34. Bobroff J., 2011, « La caserne de Bonne : Projet emblématique d'un développement urbain à la française », Rapport pour le PUCA 81 pages
35. Bouffard F., Kirschen D.S., 2008, « Centralised and distributed electricity systems », *Energy Policy*, pp 4504-4508

36. Bouneau C., 2004, « Les réseaux de transport d'électricité en Europe occidentale depuis la fin du XIXème siècle : de la diversité des modèles régionaux à la recherche d'une convergence européenne », *Annales historiques de l'électricité*, n°2, pp 23-37
37. Bouneau C., 2006, « Réseaux électriques et électrification rurale : des territoires périphériques de l'innovation ? », *Flux*, n°63-64, pp 85-88
38. Bouneau C., Derdevet M., Percebois J., 2007, « Les réseaux électriques au cœur de la civilisation industrielle », Timée-Éditions, 173 pages
39. Brand L., Calven A., Englund J., Landersjo H., Lauenburg P., 2014, "Smart district heating networks –A simulation study of prosumers' impact on technical parameters in distribution networks", *Applied Energy*, pp39-48
40. Broesma S., Fremouw M.A., 2015, « The City-Zen approach for urban energy master plans addressing technical opportunities +non technical barriers », 10 pages
41. Brousseau E., 1993, « L'économie des contrats, technologies de l'information et coordination interentreprises », PUF, Paris, 361 pages
42. Bouteaud B., « Quartier durable ou éco-quartier ? », *Cybergo : European Journal of Geography* [en ligne], Débats, Quartier durable ou éco-quartier ?, mis en ligne le 24 septembre 2009, consulté le 13 mars 2014, URL : <http://cybergo.revues.org/22583;DOI:10.400/cybergo.22583>
43. Bouttes J.P., 1990, « Régulation technique et économique des réseaux », *Flux*, n°2, pp 43-55
44. Brechon P., 2011, « Enquêtes qualitatives, Enquêtes quantitatives », Presse Universitaire Grenoble, Collection Politique, 232 pages
45. Buchanan J.M., 1965, « An economic Theory of Club », *Economica, New Series*, Vol.32, No.125, pp 1-14
46. Bulkeley H., Castan Broto V., Maasen A., 2013, « Governing urban low carbon transitions », in *Cities and Low Carbon Transitions*, Routledge Studies in Human Geography, pp 29-41, 205 pages
47. Callon M., 1986, « Éléments pour une sociologie de la traduction. La domestication des coquilles Saint-Jacques et des marins-pêcheurs dans la baie de Saint-Brieuc », *L'année sociologique*, n°6, pp 169-207
48. Callon M., Ferrary M., 2006, « Les réseaux sociaux à l'aune de la théorie de l'acteur-réseau », *Sociologies pratiques*, 2006/2 (n°13), pp 37-44
49. Carreiro A.M., Jorge H.M., Henggeler Antunes C., 2017, « Energy Management Systems Aggregators : a literature survey », *Renewable and sustainable energy reviews*, Volume 73, pp 1160-1172
50. CEDIS, 2012, « Ville durable et écoquartier », *Les pratiques* #9, 125 pages
51. Chappin E.J.L., Van der Lei T., 2014, "Asaptation of interconnected infrastructure to climate change : a sociotechnical systems perspective", *Utilities Policy*, n°31, pp 10-17

52. Charlot-Valdieu C., Outrequin P., 2009, « L'urbanisme durable : Concevoir un écoquartier », Editions Le Moniteur, Paris, 311 p, réédition 2011
53. Chourabi H., Nam T., Walker S., Gil-Garcia J.K., Mellouli S., Nahon K., Pardo T.A., Scholl H.J., 2012, « Understanding smart cities : an integrative framework », 45th Hawaii International Conference on System Sciences, 9 pages
54. Cité de l'énergie, 2012, « Un même modèle, deux objectifs équivalents », 18 pages
55. Coase R., 1937, « The nature of the firm », *Economica*, New Serie, Vol. 4, N°16, pp 386-405
56. Commissariat Général du Plan, 2000, « Les réformes de l'industrie électrique en Europe », Rapport sous la direction de J.M. Glachant, 180 pages
57. Commission Européenne, 2007, "Strategic research agenda for Europe's Electricity networks of the future", 92 pages
58. Commission Européenne, 2010, « Schéma directeur pour un réseau énergétique européen intégré », 45 pages [CE, 2010a]
59. Commission Européenne, 2010, "European Smart Grids Technology Platform –Vision and strategy for Europe Electricity Network of the Future", 22 pages [CE, 2010b]
60. Commission Européenne, 2012, « Pour un bon fonctionnement du marché intérieur de l'énergie », 24 pages
61. Commission Européenne, 2013, "Smart Thermal Grids", 28 pages
62. Commission Européenne, 2014, « Bien Vivre, dans les limites de notre planète », 7^e PAE : Le Programme d'action générale de l'union pour l'énergie à l'horizon 2020, 4 pages [CE, 2014a]
63. Commission Européenne, 2014, « Trends to 2050 », 176 pages [CE, 2014b]
64. Commission Européenne, 2016, « Vers un secteur du chauffage et du refroidissement intelligent, efficace et durable », Fiche d'information du 16.02.16, 5 pages [CE, 2016a]
65. Commission Européenne, 2016, « Stratégie de l'Union Européenne en matière de chauffage et refroidissement », 16 pages [CE, 2016b]
66. Communities and Local Government, 2010, "Code for sustainable home-Technical Guide", 292 pages
67. Connolly D, Lund H, Mathiensen B.V, Werner S, Moller B, Persson U, Boermans T, TRIER D, Østergaard P.A, Nielsen S., 2012, « Heat Roadmap Europe 2050 : First pre-study for the EU27 », Euroheat & Power, 161 pages
68. Connolly D, Lund H, Mathiensen B.V, Werner S, Moller B, Persson U, Boermans T, TRIER D, Østergaard P.A, Nielsen S., 2013, "Heat Roadmap Europe : Combining district heating with heat savings to decarbonize the EU energy system", *Energy Policy*, pp 475-489
69. Conseil Européen des Urbanistes, 1998, "Nouvelle Charte d'Athènes : prescription pour l'aménagement des villes", 16 pages
70. Coutard Olivier, 2001, « Imaginaire et développement des réseaux techniques. Les apports de l'histoire de l'électrification rurale en France et aux Etats-Unis », *Réseaux*, n°109, 14p

71. Courtard O, 2009, « Chapitre 6 : Services urbains : la fin des grands réseaux ? », *Ecologies urbaines*, sous Olivier Coutard et Jean-Pierre Levy, p 372, pp102-129
72. Coutard O., Rutherford J., 2010, « Energy transition and city region-planning : understanding the spatial politics of systemic change », *Technology Analysis & Strategic Management*, 22:6, pp 711-726
73. Coutard O., Rutherford Jonathan, 2011, “The rise of post-networked cities in Europe ? Recombining infrastructural ecological and urban transformations in low carbon transitions”, in *Cities and Low Carbon Transitions*, Routledge Studies in Human Geography, 205 pages, pp 107-125
74. Coutard O., Rutherford J., 2013, « Vers l’essor des villes « post-réseaux » : infrastructures, innovation sociotechnique et transition urbaine en Europe », in Forest J, et Hamdouch A, (eds) *L’innovation face aux défis environnementaux de la ville contemporaine*, Presses Polytechniques Universitaires Romandes, 29 pages
75. Curien N, 2005, « Economie des réseaux », Editions La Découverte, Editions Repère, 128 p
76. Debizet, Gilles. 2016. *Scénarios de Transition Énergétique En Ville : Acteurs, Régulations, Technologies*. Paris, France: La Documentation Française. 200 pages
77. Degefa M.Z, Humayun M, Safdarian A, Koicisto M, Millar R.J., Lehtonen M., 2014, “Unlocking distribution network capacity through real-time thermal rating for high penetration of DGs”, *Electric Power System Research*, pp 36-46
78. De Joode J., Jansens J.C., Van der Welle A.J, Scheepers M.J.J.; 2009, « Increasing penetration of renewable and distributed electricity generation and the need for different network regulation », *Energy Policy*, pp 2907-2915
79. Delestre I., 2015, “Gaz Electricité de Grenoble (GEG), un acteur local porteur d’innovation énergétique”, *Encyclopédie de l’énergie*, consulté en janvier 2018
80. Deloitte, 2012, “Le bâtiment vert par les chiffres. Les conséquences de la fragmentation », 12 pages
81. Derdevet M., 2003, « Les réseaux de transport d’électricité, au cœur de la construction de l’Europe électrique », *Revue du marché commun et de l’Union Européenne*, n°471, pp 519-525
82. Derdevet M., 2015, « Energie : l’Europe en Réseaux », Rapport à François Hollande, La Documentation Française, 136 pages
83. Derdevet M., 2016, « Le monde ne pourra pas se passer de réseaux électriques », *Le Monde*, 11 juin 2016, 1 page
84. Desage F., 2015, “Pas de quartier(s) pour les « grands ensembles » ? », *Cahier Français*, n°388, pp 22-28
85. Dind JP, Thomann M., Bonard Y., 2007, “Quartiers et structure urbaine : quelles articulations pour un développement urbain durable ? », *Urbia* n°4, Les cahiers du développement durable, Université de Lausanne, pp 49-73

86. DGALN, 2008, « Ecocités : les villes du développement durable », 4 pages
87. DGALN, 2011, La démarche Ecocité, power point, 33 slides
88. D’Oca S., Corgnati S. P., Buso T., 2014, “Smart meters and energy savings in Italy : Determining the effectiveness of persuasive communication in dwellings.”, *Energy Research and Social Science*, pp 131-142
89. Dosi G., 1972, « Technological Paradigms and technological trajectories », *Research Policy*, n°11, pp 147-162
90. Dupuy G., 1987, « Les réseaux techniques sont-ils des réseaux ? », *Espace Géographique*, Tome 16 n°3, pp 175-184
91. Dupuy G., 1991, « L’urbanisme des réseaux : théories et méthodes », 185 pages
92. E-Cube, 2012, “Les technologies de stockage de l’énergie électrique et thermique”, 61 slides
93. E-Cube, 2018, “Suisse. Déploiement du comptage intelligent. Défis et bonnes pratiques », 18 pages
94. Economides N., 1995, “The Economic of Networks”, *International Journal of Industrial Organization*, vol.14, n°2, 37 pages
95. Emelianoff C., 2004, « L’urbanisme durable en Europe : à quel prix ? », *Ecologie et Politique*, Presse de Sciences Po, pp 21-36
96. Emelianoff C., 2007, « Les quartiers durables en Europe : un tournant urbanistique ? », *Urbia*, n°4, pp11-30 [Emeliannoff, 2007a]
97. Emelianoff C., 2007, « L’éco-quartier peut servir à un changement de mode de vie », *Urbia*, n°4 [Emeliannoff, 2007b]
98. Emelianoff C., Stegasy C., 2010, « Villes durables : 21 expériences pionnières en Europe », éd. Autrement, 31 pages
99. ENEA Consulting, 2012, « Le stockage énergétique –enjeux, solutions techniques et opportunités de valorisations », 18 pages
100. Energy Cities, 2017, « La réappropriation locale de l’énergie en Europe », 57 pages
101. Eurelectric, 2012, “Decentralised storage : impact on future distribution grid”, 49 pages [Eurelectric, 2012b]
102. Eurelectric, 2014, “Electricity Distribution Investments : What regulatory framework do we need ?”, 43 pages
103. EurObserv’Er, 2015, “Etat des énergies renouvelables en Europe”, 15ième édition, 210 pages
104. EurObserv’Er, 2016, « Etat des énergies renouvelables en Europe », 16^{ième} édition, 263 pages
105. Euroheat&Power, 2015, “Statistic Overview”, 1 page
106. European Association for Storage of Energy (EASE),2013, “European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030”, 72 pages

107. EWZ, 2012, « Pour une énergie durable et porteuse d'avenir. EWZ-Portrait de l'entreprise », 12 pages
108. EWZ, 2015, « Engagé pour l'avenir : rapport d'activité et de durabilité 2015 », 70 pages
109. Finergreen, 2017, « L'agrégation : Etat des lieux. Panorama des acteurs et revue des enjeux », 40 slides
110. Finon D., Lamort F., Quast. O, Song K., 1996, « La dynamique d'organisation des industries de réseaux énergétiques : l'apport des approches de la Nouvelle Economie Institutionnelle », IEPE, 47 pages
111. Gardey D., 1993, « Histoire de l'électricité en France –Tome 1, 1881-1918 », sous la direction de François Caron et Fabienne Cardot, *Flux*, n°12, pp 55-57
112. Geels F.W, 2002, “Technological transition as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case study”, *Research Policy*, n°31, pp 1257-1274
113. Geels F.W, 2004, « Processes and patterns in transitions and systems innovations: Refining the co-evolutionary multi-level perspective », *Technological Forecasting and Social Change*, n°33, pp 681-696
114. Geels F.W, Kemp R., 2007, “Dynamic in socio-technical systems: Typology of change processes and contrasting case studies”, in *Technology in Society*, n°29, pp 441-455 [Geels et al, 2007a]
115. Geels F.W, Schot J, 2007, “Typology of sociotechnical transition pathways”, *Research Policy*, n°36 pp 399-417 [Geels et al, 2007b]
116. Geels F., 2013, « The role of cities in technological transitions : analytical clarifications and historical examples », in *Cities and Low Carbon Transitions*, Routledge Studies in Human Geography, 205 p, pp 13-28
117. Genus A., Coles A-M., 2007, “A critique of Geels’ Multi-Level Perspective of Technological Transition”, International Summer Academy on Technology Studies – Transforming the Energy System, 18 pages
118. Gerbeau D., 2014, « Les 9 principales de la loi « Métropoles » dans le détail », La gazette des communes, <http://www.lagazettedescommunes.com/218245/les-9-principales-dispositions-de-la-loi-metropoles-dans-le-detail/>
119. Giffinger R., Fertner C., Kramar H., Kalasek R., Pichler-Milnovic N, Meijers E., 2007, “Smart Cities. Ranking of European Medium Sized-Cities”, Centre of Regional Science, Vienna University of Technology, 28 pages
120. Giraud L., 2016, “ Modélisation dynamique et gestion avancée de réseaux de chaleur”, Thèse en sciences de l'ingénieur, Université Grenoble Alpes
121. Glachant J-M., 2001, «Une quinzaine de « marché unique » de l'électricité dans l'Union Européenne ? », *Flux*, n°44-45, pp 8-27

122. Glachant J.M., 2002, “L’approche néo-institutionnelle des réformes des industries de réseaux », *Revue Economique*, Vol.53, n°3, pp 425-435
123. Good N., Martinez Cesena E., Zhang L., Mancrella P., 2015, “Techno-economic and business case assessment of low carbon technologies in distributed multi-energy systems”, *Applied Energy*, Volume n°167, pp 158-172
124. Grafmeyer Y., « Le quartier des sociologues », in Sous la direction de Authier Jean-Yves, Bacque Marie-Hélène, Guerin-Pace France, 2007, « Le quartier : Enjeux scientifiques, actions politiques et pratiques sociales », collection Recherches, Editions La découverte, 304 p, pp 21-31
125. Gras A., 1997, « Les Macrosystèmes techniques », Editon Presses Universitaires de France, Collection : Que-sais-je ?, 128 pages
126. Grenoble Alpes Métropole et Ville de Grenoble, 2011, « Ecocité Grenobloise : Vivre la ville post-carbone –dossier de candidature », 80 pages
127. Grenoble Alpes Métropole, 2015, « Charte d’engagements des partenaires pour la période 2015-2020 », 6 pages
128. Grigoryan A., 2015, “Energy Efficiency in Buildings-Advanced District Heatings”, IEA Workshop –District Heating and Cogeneration- GDF Suez, 13 slides
129. Gulbinas Rimantas, TAYLOR John E., 2014, “Effects of real-time eco-feedback and organizational network dynamics on energy efficient behavior in commercial buildings”, *Energy and Buildings*, pp 493-500
130. Hansen J.P, Percebois J., 2010, « Energie : Economie et politique », Edition De Boeck, 3^{ième} édition 2011, 779 pages
131. Hardin G., 1968, “The tragedy of the Commons”, *Science*, Vol.162, pp 1243-1248
132. Henriot A., Glachant J.M., 2014, “Design des marchés d’électricité pour l’intégration des renouvelables”, *Revue d’Economie Politique*, n°148, pp 31-53
133. Hughes T.P, 1983, “Network of power: Electrification on Western Society (1880-1930)”, Johns Hopkins University Press, 488 pages
134. Hughes Thomas.P, 1987, « The Evolution of Large Technical Systems”, in *The Social Construction of Technological Systems : new directions in the sociology and history of Technology*”, edited by Wiebe E. Bijker, Thomas P. Hughes, Trevor Pinch, MIT press, pp 51-82
135. Hughes T.P, 2004, « Afterword », *Annales Historiques de l’Electricité*, n°2, pp 173-179
136. Humain-Lamoure A-L., “Le quartier comme objet en géographie”, in Sous la direction de Authier Jean-Yves, Bacque Marie-Hélène, Guerin Pace France, 2007, « Le quartier : Enjeux scientifiques, actions politiques et pratiques sociales », collection Recherches, Editions La découverte, 304 p, pp 41-51

137. Hyder Consulting Limited, 2013, “Strategic Environment Assessment and Sustainability Appraisal –Local Plan–”, Report, 495 pages
138. Idt J., 2012, « Le temps de la réalisation des projets urbains : une fabrique a posteriori des enjeux politiques de l’action collective », *Géocarrefour* [En ligne], Vol. 87/2, pp 75-85
139. IRENA, 2014, “REmap 2030- A renewable energy roadmap”, 52 pages
140. IRENA, 2016, « Renewable Energy in Cities », 64 pages
141. Joerges B., 1988, “Large technical systems: Concepts and issues”, in *The development of Large Technical System*, edited by Renate Mayntz and Thomas P.Hughes, 300 pages, pp 9-37
142. Joerges B., 1994, “How to recombine Large Technical Systems : The case of European Organ Transplantation”, 14 pages
143. Joerges B., 1999, “High variability discourse in the history and sociology of Large Technical Systems”, in Olivier Coutard (ed.), *The Governance of Large Technical Systems*, London: Routledge, pp 259-290
144. Kabalci Y., 2016, “A survey on smart metering and smart grid communication”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 57, pp 302-348
145. Karjalain S., 2013, « Should it be automatic or manual –The occupant’s perspective on the design of domestic control systems », *Energy and Buildings*, pp 119-126
146. Katz M.L., Shapiro C., 1985, “Network externalities, competition and compatibility”, *The American Economic Review*, Vol. 75, N°3, pp 424-440
147. Kaufman J-C, 2004, « L’entretien compréhensif » Armand Colin, Collection Sociologie, 127 pages
148. Künneke R., Finger M., 2009, « The governance of infrastructure as common pool-resources », in WOW4 workshop, 24 p
149. Künneke R., Groenewegen J., Ménard C., 2010, “Aligning modes of organization with technology: Critical transactions in the reform of infrastructure”, *Journal of Economic Behavior and Organization*, N°75, pp 494-505
150. Kyvelou S., Papadopulos T., 2011, “Exploring a South European eco-neighbourhood model : planning forms, constraints of implementation and emerging resilience practices”, *Sustainable Development*, Vol.14, Nos 1/2 pp 77-94
151. La Fabrique de la Cité, 2014, “Quel rôle pour les villes dans la transition énergétique ? », 61 pages
152. Laigle L., 2008, « Les villes durables en Europe : conceptions, enjeux et mise en œuvre », *Annales des Mines, Responsabilité et environnement*, n°52, pp 7-14
153. Lamort F., 1994, “The notion of service public un European Power industries : a comparative cultural and historical analysis in France, Germany and England”, Institut d’Economie et de Politique de l’Energie, ENER seminar, 18 pages

154. Laponche B., 2017, « L'énergie dans l'Union Européenne : 2000-2014 », Encyclopédie de l'énergie, site internet : <http://encyclopedieenergie.org/articles/l%E2%80%99union-europ%C3%A9enne-2000-2014>
155. Latour B., 1992, « Aramis ou l'amour des techniques », Edition La Découverte, Paris, 240 pages
156. Law J., 2003, "Networks, Relations, Cyborgs: on the Social Study of Technology", Centre for Sciences Studies, Lancaster University, 13 pages
157. Lavastre O., 2001, Les coûts de transaction et O.E. Williamson : retour sur les fondements », Xième Conférence de l'Association Internationale de Management Stratégique, 26 pages
158. Lebris C., Coutard O., 2008, « Les réseaux rattrapés par l'environnement ? Développement et transformations de l'organisation des services urbains, Flux n°74, pp6-8
159. Le Courier, 1971, « Un message de 2 200 savants aux 3 milliards et demi d'habitants de notre planète », pp 4-6
160. Lefevre P., 2008, « Voyage dans l'Europe des Villes durables. Exposé des premiers projets urbains remarquables réalisés dans une perspective de développement durable », PUCA, 400 pages
161. Lefevre P., Sabard M., 2009, « Les écoquartiers », Editions Apogée, 261 pages
162. Lefevre B., Renard V. 2011, « Développement durable et fabrique urbaine », Working Paper, Fabrique Urbaine, n°08, 15 pages
163. London Legacy Development Corporation, 2012, "Your sustainability guide to Queen Elizabeth Olympic Park", 88 pages [LLDC, 2012a]
164. London Legacy Development Corporation, 2012, « A walk around Queen Elizabeth Olympic Park », 197 pages [LLDC, 2012b]
165. London Legacy Development Corporation, 2014, "Your Park, Our Planet", Environmental Sustainability Report 2014, 35 slides
166. Lopez F., 2014, « Le rêve d'une déconnexion : de la maison autonome à la cité auto-énergétique », Editions de la Villette, 317 pages
167. Lopez F., Bouton A., 2015, « Les microsystemes techniques dans la transition énergétique », Urbanités, La Ville et les tuyaux, 9 pages
168. Loorbach D., Frantzeskaki N., Thiessen W., 2010, "Introduction to the special section : Infrastructures and transitions", in *Technological Forecasting and Social Change*, pp 1195-1202
169. Losinger Marazzi SA, 2012, « Greencity est le premier quartier, en Suisse, à recevoir le label « Cité de l'énergie-Site 2 000 Watts », Communiqué de Presse, 2 pages

170. Losinger Marazzi SA, 2014, « GreenCity, le Magazine », 44 pages [Losinger Marazzi SA, 2014a]
171. Losinger Marazzi SA, 2014, « Challenges », n°6, 56 pages [Losinger Marazzi SA, 2014b]
172. Lowenstein O., 2012, “Not just buildings : sustainability and the London 2012 Olympics”, *Detail Green*, pp 4-7
173. Mancarella P., 2014, “MES (Multi-Energy Systems) : an overview of concepts and evaluation models”, *Energy*, Volume n°65, pp 1-17
174. Magnin G., 2013, « La Transition Energétique pour quelle société ? », International Conference of Territorial Intelligence, « Territorial Intelligence, socio-ecological, transition and resilience of the territories », 30-31 mai 2013, Besançon-Dijon, France, 17 pages
175. McDonald Jim, 2008, « Adaptive intelligent power system: Active distribution networks », *Energy Policy*, pp 4346-4351
176. McDonald K., 2012, “District Energy Delivery Models-the Concession Approach”, Cofely, 27 slides
177. Meadows D., Meadows D., Randers J., Behrens J., 1972, “The Limits of the Growths”, A report for the Club of Rome’s project on the predicament of Mankind, A Potomac associates books, 211 pages
178. Menanteau P., Blanchard O., 2014, “Quels systèmes énergétiques pour les écoquartiers ? Une première comparaison France-Europe », *Revue de l’énergie*, pp 463-471
179. Ménard C., 1997, “L’économie des organisations”, éditions La découverte, 124 pages
180. Ménard C., 2003, « L’approche Néo-Institutionnelle : des concepts, une méthode des résultats », *Cahier d’économie Politique*, 2003/1 (n°44), pp103-118
181. Ménard C., 2011, « A new institutional economics perspective on environmental issues », *Environmental Innovation and Societal Transitions*, pp 115-120
182. MLETR, édition 2013, « Investissement d’avenir : l’Etat soutient 146 projets innovants présentés par les 19 Ecocités », 76 pages
183. MLETR, édition 2016, « 31 territoires soutenus par le programme d’investissements d’avenir-Ville de demain 2015-2017 », 57 pages
184. Mor E., 2011, « Des initiatives locales européennes pour atteindre le facteur 4 ? », Développement durable et territoires [En ligne], Vol. 2, n°1, mis en ligne le 25 juillet 2014
185. Moss T., Francesch-Huidobro M., 2015, “Realigning the electric city. Legacies of energy autarky in Berlin and Hong Kong”, *Energy Research&Social Science*, n°11, pp 225-236
186. Moussavi S.M., Nikdel M., 2014, “Various battery models for various simulation studies and applications”, *Renewable and Sustainable Energy*, n°32, pp 477-485
187. Nelson R.R, Winter N., 1982, « An evolutionary theory of economic change », Belknap Press/Harvard University Press, 452 pages

188. Niemi R., Mikkola J., Lund P.D., 2012, "Urban energy systems with smart multi-carrier energy networks and renewable energy generation", *Renewable Energy*, Volume n°48, pp 524-536
189. Noam E.M., 1992, « Network Tipping : The rising and fall of the public network monopoly », in *Telecommunication in Europe*, Oxford University Press, Oxford, point 3, pp 26-43
190. North D.C., 1989, « Institutions, Institutionnal Change and Economic Performance », Cambridge University Press, 159 page
191. North D.C., 1991, "Institutions", *The Journal of Economic Perspectives*, Vol.5, n°1, pp 97-112
192. North D.C., 1994, "Economic performance through time", *The American Economic Review*, pp 359-368
193. Novarina, Gilles et Natacha Seigneuret. 2013. « POPSU2 Axe Thématique Développement Durable : Grenoble Entre Stratégies et Projets ». Rapport de recherche POPSU Convention 11300 NT 1796.
194. O Broin E., 2007, "Energy Demand of European Buildings: a mapping of available data, indicators and models", Thesis for the Degree of Master of Science in Industrial Ecology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 205 pages
195. OCDE, 2009, "Chapitre 6. L'investissement en infrastructure : liens avec la croissance et rôle des politiques publiques », *Réformes Economiques*, 2009 (1) n°5, pp 169-186
196. OFEN, 2013, « Perspectives énergétiques 2050 : résumé », 43 pages
197. OFEN, 2015, « Statistique globale Suisse de l'énergie 2015 », 64 pages
198. Offner Jean-Marc, 1996, " Réseaux" et « Large Technical System » : concepts complémentaires ou concurrents ?, in *Flux*, n°26, Octobre-Décembre, pp 17-30
199. Ostrom E., 2010, « Gouvernance des biens communs : pour une nouvelle approche des ressources naturelles », De Boeck, 300p
200. Othman M.M, Hegazy Y.G., Abdelaziz A.Y., 2017, "Electrical energy management in unbalanced distribution networks using virtual power plan concept", *Electric Power Systems Research*, n°145, pp 157-165
201. Pares-Ramos I.K., Dupas S., 2010, « Gouvernance et la vision vers la ville base consommation : visions de villes européennes », *Energy Cities*, 108 pages
202. Paris Innovation Review, 2013, "Les écoquartiers sont-ils le futur de la ville ? », <http://parisinnovationreview.com/2013/04/04/eco-quartiers/>
203. Percebois J., 1997, " La dérégulation de l'industrie électrique en Europe et aux Etats-Unis : un processus de décomposition-recomposition », CREDEN, 47 pages
204. Perez L., Ortiz J, Pout C., 2008, « A review on building energy consumption information », *Energy and Buildings*, volume 40, issue 3, pp 394-398

205. Peschiera G., Taylor J.E., Siegel J. A., 2010, « Response-relapse patterns of building occupant electricity consumption following exposure to personal, contractualized and occupant peer utilization data », *Energy and Buildings*, pp 1329-1336
206. Persson U., Möller B., Werner S., 2014, “Heat Roadmap Europe: Identifying strategic heat synergy regions”, *Energy Policy*, N°74, pp 663-681
207. Prasad Koirala B., Koliou E., Friege J., Hakvoort R.A., Herder P.M., 2016, “Energetic communities for community energy : A review of key issues and trends shaping integrated community energy systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n°56, pp 722-744
208. PUCA, janvier-juin 2008, « Concevoir un éco-quartier », 16 pages
209. Querrien A., 2005, « Le logement social en Europe : Dans le passé et vers quel avenir ? », *Informations sociales*, n°123, pp 126-135
210. Raffestin C., 1980, « Pour une géographie du pouvoir », édition LITEC, collection « Géographie économique et sociale », 250 pages
211. Ramos A., De Jonghe C., Gomèz V., Belmans R., 2016, “Realizing the Smart Grids potential : defining local markets for flexibility”, *Utilities Policy*, pp 1-10
212. Renauld V., 2012, « Fabrication et usage des écoquartiers français », Thèse en Géographie, Aménagement, Urbanisme, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 460 pages
213. Renauld V., 2014, *Fabrication et usage des écoquartiers. Essai critique sur la généralisation de l'aménagement durable en France*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Collection Espace en société, 128 pages
214. Renewable Energy Association, 2016, « Development of decentralised energy and storage systems in the UK », 45 pages
215. Reverdy T., 2015, « Construire la valeur d'un service énergétique : la trajectoire de l'effacement diffus en France », HAL, 31 pages
216. Romer P., 1986, “Increasing returns and Long-Run growth”, *Journal of Political Economy*, Vol.94, No.5, pp 1002-2037
217. Romer P., 1990, “Endogenous Technological Change”, *Journal of Political Economy*, Vol.98, No.5, pp 71-102
218. Rothe F., 2012, « La gouvernance des entreprises », Hermès Science Application,
219. Ruester S., Schwenen S., Batlle C., Pérez-Arriaga I., 2014, « From distribution networks to smart distribution systems : rethinking the regulation of European electricity DSOs » *Utilities Policy*, pp1-9
220. Salomon J, 2009, « Enjeux de l'urbanisme durable : « Les Chartes d'Athènes », Mémoire de Fin d'étude, Ecole Nationale d'Architecture de Lyon, 97 slides
221. Salsbury S., Watson E., 1995, « Grands réseaux techniques, modèles de développement dans le temps : l'exemple des chemins de fer et de l'électricité », *Flux*, n°22, pp 31-42

222. Samuelson A., 1954, “The Pure Theory of Public Expenditure”, *The Review of Economics and Statistics*, Vol.36., No°4, pp 387-389
223. Simon, H.A., 1961, *Administrative behavior*, 2nd Edition, Mc Milan, New York
224. Sprend D., 2005, « Distribution of energy consumption and the 2000W/capita target », *Energy Policy*, n°33, pp 1905-1911
225. Souami T., 2007, « Montage et conduite de projets durables en Europe », PUCA, Ville et recherche Urbaine à Grenoble, Supplément, pp 10-14
226. Souami T., 2009, « Conceptions et représentations du territoire énergétique dans les quartiers durables », *Flux*, N°76-77, pp 71-81 [Souami, 2009a]
227. Souami T., 2009, « Ecoquartiers-Secrets de fabrication-Analyse critique d'exemples européens », *Les carnets de l'info*, réédition 2011, 240 pages [Souami, 2009b]
228. Suisse Energie, 2010, “ Les cités de l'énergie sur la voie de la Société à 2 000 Watts”, 14 pages
229. Suisse Energie, 2013, « Cité de l'énergie –rapport annuel 2013 », 24 pages
230. Suisse Energie, 2014, “Concept pour l'établissement du bilan de la Société à 2 000 Watts”, 2 pages [Suisse Energie, 2014a]
231. Suisse Energie, 2014, « Greencity. Zurich », Fiche d'information, 2 pages [Suisse Energie, 2014b]
232. Suisse Energie, 2015, « Le certificat « Site à 2 000 Watts » », 20 slides [Suisse Energie, 2015a]
233. Suisse Energie, 2015, « Site à 2 000 Watts, Catalogue de critères avec outil de l'aide à l'évaluation », 50 pages [Suisse Energie, 2015b]
234. Suisse Energie, 2015, « Greencity. Zurich », Fiche d'information, 2 pages [Suisse Energie, 2015c]
235. Suisse Energie, 2015, « Site à 2 000 Watts : l'exemple de GreenCity à Zurich », 16 slides [Suisse Energie, 2015d]
236. Tabourdeau, Antoine, and Gilles Debizet. 2017. « Concilier ressources in situ et grands réseaux : une lecture des proximités par la notion de nœud socio-énergétique ». *Flux* 109–110 (3–4): 87–101.
237. Toppeta D., 2010, “The smart city vision : How innovation and ICT can built smart, “liveable”, sustainable cities”, *I-Think*, 11 pages
238. Tranda-Pittion M., 2014, « Temporalités du projet urbain et jeux d'acteurs », *Urbia*, Les Cahiers du Développement Urbain Durable, n°16, Université de Lausanne, pp 33-51
239. Tuballa M.L., Lochinvar Abundo M., 2016, “A review of the development of Smart grid technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp 710-725

240. Vannini C., 1997, “Service d’intérêt économique général, obligation de service public, service universel : où en est le droit communautaire ? », Fondation Robert Schuman, Question d’Europe n°61
241. Van der Schoor T., Scholtens B., 2015, “Power to the people : Local community initiatives and the transition to sustainable energy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n°43, pp 666-675
242. Vassileva I., Wallin F., Dahlquist E., 2012, « Understanding energy consumption behavior for futur demand-response strategy development », *Energy*, pp 94-100
243. Verbong G.P.J., Geels F.W., 2010, “Exploring sustainability transitions in the electricity sector with socio-technical pathways“, *Technological Forecasting & Social Change*, pp 1214-1221
244. Veron J., 2007, “La moitié de la population mondiale vit en ville”, *Population&Sociétés*, n°435, 4 pages
245. Ville de Grenoble, 2011, « Ecocité Grenobloise : vivre la ville post-carbone dans les alpes –Dossier de candidature », 41 pages
246. Ville de Grenoble, 2012, « Grenoble Facteur 4, Pour une ville solidaire et durable », 7 pages
247. Ville de Grenoble, 2013, « Grenoble Facteur 4, Bilan de l’année 2013 », 38 pages
248. Ville de Zurich, 2016, “Energy Master Plan of the city of Zurich”, 30 pages
249. Von Hirschhausen C, Holz F., Gerbaulet C., Lorenz C., 2014, « European Energy Sector : Large investments required for sustainability and supply security”, DIW Berlin Economic Bulletin, pp 31-38
250. Von Tunzelmann, 2003, “Historical Coevolution of gouvernance and technology in the industrial in the industrial revolution”, *Structural Change and Economic Dynamics*, n°14, pp 365-384
251. Werner S., 2017, “European District Heating Price Series”, *Energyforsk*, 58 pages
252. Williamson O.E., 1975, “Markets and Hierarchies: Analysis and Antitrust Implications”, New York, Free Press,
253. Williamson O.E., 1985, “The Economic Institutions of Capitalism : Firm, Markets and relational contracting”, Free Press, New York, a division of Macmillan, INC., New York, traduit en français en 1994, “Les institutions de l’économie”, InterEdition, Paris.
254. Williamson O.E., 1991, « Comparative Economic Organization: The Analysis of Discrete Structural Alternatives », *Administrative Science Quaterly*, Vol.36, No.2, pp. 269-296
255. Williamson O.E., 2007, “Transaction Cost Economics : An Introduction”, Economic Discussion Paper, 34 pages
256. Wissner M., 2014, “Regulation of district-heating system”, *Utilities Policies*, pp 63-73

257. Woods P., 2015, “The development of the Queen Elizabeth Olympic Park District Energy Scheme”, Energy 4 Power Live, Cofely, 28 slides
258. Wolfe P., 2008, “The implication of an increasingly decentralized energy system”, *Energy policy*, n°36, pp 4509-4513
259. World Energy Council, 2016, “ World Energy Resource –e-storage : shifting from cost to value wind and solar applications”, 52 pages
260. Yang Y., Zhang S., Xiao Y., 2015, « Optimal design of distributed energy resource systems coupled with energy distribution networks », *Energy*, n°85, pp 433-448
261. Yepez-Salmon G., 2011, « Construction d’un outil d’évaluation environnementale des écoquartiers : vers une méthode systémique de mise en œuvre de la ville durable », Thèse en Sciences physiques et de l’ingénieur, Université Bordeaux 1, 464 pages
262. Zhuk A., Zeigarnik Y., Buzoverov E., Sheindlin A., 2015, “Managing peak loads in energy grids: Comparative economic analysis”, *Energy Policy*, n°88, pp 39-44

Annexes

Annexe 1 : Tableau comparatif des labels de performance énergétique [Construction de l'auteur]

Annexe 2 : Tableau comparatif des labels environnementaux [Construction de l'auteur]

Annexe 3 : Carte des réseaux de chaleur en Europe [Connolly et al, 2013]

Annexe 4 : Grille d'évaluation des Ecoquartiers [Construction de l'auteur]

Annexe 5 : Grille d'entretien [Construction de l'auteur]

Annexe 6 : Chronologie du projet Queen Elizabeth Olympic Park [Construction de l'auteur]

Annexe 7 : Comparatif des procédures d'aménagement classiques et spécifiques aux Jeux Olympiques [Appert, 2012]

Annexe 8 : Chronologie du projet Greencity [Losinger Marrazzi, 2015]

Annexe 9 : Chronologie du projet Ecocité [Construction de l'auteur]

Annexe 10 : Fiches actions du projet Ecocité [Ville de Grenoble, 2011]

Annexe 11 : Les financements demandés dans le cadre du projet Ecocité [Ville de Grenoble, 2011]

Annexe 12 : Le jeu d'acteurs pour le projet énergétique de la Presqu'île Grenobloise [Construction de l'auteur]

Annexe 13 : Récapitulatif des idéal-types [Construction de l'auteur]

Annexe 1 : Tableau comparatif des différents labels spécialisés dans la performance énergétique, 2014

	HAUTE PERFORMANCE ENERGETIQUE (HPE)	EFFINERGIE	MINERGIE®	PASSIV'HAUS® (BATIMENT PASSIF)																																				
PAYS D'ORIGINE LABEL EXISTANT	France	France	Suisse	Allemagne																																				
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Haute Performance Energétique (HPE) ➤ Très Haute Performance Energétique (THPE) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Effinergie + ➤ Effinergie rénovation ➤ BePos Effinergie 2013 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Minergie Standard ➤ Minergie -P® ➤ Minergie-A® 	Passiv'haus																																				
PRIVE OU PUBLIC	Public	Privé	Privé	Privé																																				
ORGANISMES CERTIFICATEURS	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Promotelec ➤ Cerqual ➤ Cequami ➤ Certivea 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Promotelec ➤ Cerqual ➤ Cequami ➤ Certivea 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Minergie (Suisse) ➤ Prioriterre (France) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Institut Passiv'haus de Darmstadt (Allemagne) ➤ La maison Passive (France) 																																				
BATIMENTS CONSIDERES	Neuf Résidentiel/Tertiaire	Neuf/Réhabilitation Résidentiel/Tertiaire	Neuf/Réhabilitation Résidentiel/Tertiaire	Neuf Résidentiel/Tertiaire																																				
ENERGIE CONSIDEREE	Primaire	Primaire	Primaire	Finale (chauffage -1-) et Primaire (pour tous les postes-2-)																																				
TEMPERATURE CONSIGNE	19°C	19°C	20°C	20°C																																				
NIVEAU DE PERFORMANCE ENERGETIQUE POUR L'HABITAT NEUF (INDICE THERMIQUE)	HPE : 45 kWh/m²/an THPE : Effinergie+ : 40 kWh/m ² /an	Effinergie + : 40 kWh/m²/an	Minergie : 38 kWh/m²/an Minergie-P® : 30 kWh/m ² /an Minergie-A® : 0 kWh/m ² /an	Besoins en chauffage < 15 kWh/m ² /an (1) Besoins en énergie primaire totale (électroménager inclus) < 120 kWh/m²/an (2)																																				
NIVEAU DE PERFORMANCE ENERGETIQUE POUR LA RENOVATION		Effinergie rénovation : 80 kWh/m ² /an	Minergie : 60 kWh/m ² /an Minergie-P® : 30 kWh/m ² /an	Besoins en chauffage < 15 kWh/m ² /an (1) Besoins en énergie primaire totale (électroménager inclus) < 120 kWh/m ² /an (2)																																				
USAGES PRINCIPAUX PRIS EN COMPTE	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Chauffage</td><td style="text-align: center;">X</td></tr> <tr><td>ECS</td><td style="text-align: center;">X</td></tr> <tr><td>Refroidissement</td><td style="text-align: center;">X</td></tr> <tr><td>Eclairage</td><td style="text-align: center;">X</td></tr> </table>	Chauffage	X	ECS	X	Refroidissement	X	Eclairage	X	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Chauffage</td><td style="text-align: center;">X</td></tr> <tr><td>ECS</td><td style="text-align: center;">X</td></tr> <tr><td>Refroidissement</td><td style="text-align: center;">X</td></tr> <tr><td>Eclairage</td><td style="text-align: center;">X</td></tr> </table>	Chauffage	X	ECS	X	Refroidissement	X	Eclairage	X	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Chauffage</td><td style="text-align: center;">X</td></tr> <tr><td>ECS</td><td style="text-align: center;">X</td></tr> <tr><td>Refroidissement</td><td></td></tr> <tr><td>Eclairage</td><td></td></tr> </table>	Chauffage	X	ECS	X	Refroidissement		Eclairage		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">2</td></tr> <tr><td>Chauffage</td><td style="text-align: center;">X</td><td style="text-align: center;">X</td></tr> <tr><td>ECS</td><td></td><td style="text-align: center;">X</td></tr> <tr><td>Refroidissement</td><td></td><td style="text-align: center;">X</td></tr> </table>		1	2	Chauffage	X	X	ECS		X	Refroidissement		X
Chauffage	X																																							
ECS	X																																							
Refroidissement	X																																							
Eclairage	X																																							
Chauffage	X																																							
ECS	X																																							
Refroidissement	X																																							
Eclairage	X																																							
Chauffage	X																																							
ECS	X																																							
Refroidissement																																								
Eclairage																																								
	1	2																																						
Chauffage	X	X																																						
ECS		X																																						
Refroidissement		X																																						

Auxiliaires (dont ventilation)	X
Electroménager	

Auxiliaires (dont ventilation)	X
Electroménager	

Auxiliaires (dont ventilation)	X
Electroménager	

Auxiliaires (dont Ventilation)		X
Electroménager		X

SURFACE DE REFERENCE	SHON (Surface Hors Œuvre Nette)	SHON (Surface Hors Œuvre Nette)	SRE (Surface de Référence Energétique)	SHAB (Surface HABitable)
PONDERATION, LOCALISATION, ALTITUDE	Oui Oui	Oui (localisation+ nombre d'étage) Oui	Non Oui	Non Oui
RAPPORT ENERGIE PRIMAIRE/ENERGIE FINALE POUR ELECTRICITE	2,58	2,58	2,00	2,85
NORMES METHODES DE CALCUL	RT 2012	RT 2012	SIA 380	EnEV 2014 (décret d'économie d'énergie)
PRESENCE D'ENERGIE RENEUVELABLE	Exigence de recours aux énergies renouvelables ou à des systèmes très performants	Obligation de mettre des énergies renouvelables dans la logique Bepos-Effinergie	Minergie et Minergie-P® : 20% consommation électrique pour ECS est couverte par les énergies renouvelables Minergie-A® : Le recours à la biomasse est autorisé, pour autant que la chaleur provienne d'un système relié hydrauliquement et qu'au moins 50% des besoins de chaleur soient couverts par une installation solaire thermique	Obligation de production électrique ou de chaleur par énergie renouvelable non obligatoire

Annexe 2 : Tableaux comparatifs des différents labels environnementaux, 2014

	BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT (BRE) ENVIRONMENTAL ASSESSMENT METHOD	HAUTE QUALITE ENVIRONNEMENTALE	LEADERSHIP IN ENERGY AND ENVIRONMENTAL DESIGN				
SIGLE	BREAAM	HQE	LEED				
PAYS D'ORIGINE	Angleterre	France	Etats-Unis				
DATE DE CREATION	1990	1996 et application en 2005	1998				
LABELS EXISTANT ET NIVEAU DE LABEL	Chaque type de bâtiment à son référentiel (Habitation, Etablissement scolaires, bureaux, centres commerciaux,...)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ HQE Aménagement ➤ HQE Bâtiment 	Chaque type de projet à son référentiel pour la certification				
PUBLIC OU PRIVE	Privé (BRE)	Privé (Association HQE)	Privé (US Green Building council)				
PAYS D'APPLICATIONS	International	International	International				
ORGANISMES CERTIFICATEURS	Varie selon les pays	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cerqual, ➤ Céquami ➤ Certivéa 	Varie selon les pays				
BATIMENTS CONSIDERES	Neuf/Réhabilitation Résidentiel/Tertiaire	Neuf/Réhabilitation Résidentiel/Tertiaire	Neuf/Réhabilitation Résidentiel/Tertiaire				
NOMBRES DE CRITERES/CIBLES	9	14	9				
GRILLE DE CRITERES/CIBLES PRIS EN COMPTE	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Management ➤ Santé et Bien-être ➤ Energie ➤ Transport ➤ Eau ➤ Matériaux ➤ Déchets 	<table border="1"> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">Maitrise des impacts sur l'environnement extérieur</td> <td>Ecoconstruction :</td> <td rowspan="2" style="text-align: center;">1. Relation harmonieuse des bâtiments avec leur environnement immédiat</td> </tr> <tr> <td>maitriser les impacts dus au fait que l'on construit un bâtiment</td> </tr> </table>	Maitrise des impacts sur l'environnement extérieur	Ecoconstruction :	1. Relation harmonieuse des bâtiments avec leur environnement immédiat	maitriser les impacts dus au fait que l'on construit un bâtiment	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gestion de Projet (pris en compte mais ne donne pas lieu à des crédits pour la certification) ➤ Transport ➤ Matériaux et déchet ➤ Eau
Maitrise des impacts sur l'environnement extérieur	Ecoconstruction :	1. Relation harmonieuse des bâtiments avec leur environnement immédiat					
	maitriser les impacts dus au fait que l'on construit un bâtiment						

- Biodiversité
- Pollution

- Energie
- Aménagement du territoire
- Qualité de l'air
- Innovation
- Priorité Régionale

		2. Choix intégré des produits et des matériaux de construction 3. Chantier à faibles nuisances
	Ecogestion : maîtriser les impacts dus au fait que l'on exploite un bâtiment	4. Gestion de l'énergie 5. Gestion de l'eau 6. Gestion des déchets d'activités 7. Gestion de l'entretien et de la maintenance
Produire un environnement intérieur satisfaisant	Confort	8. Confort hygrométrique 9. Confort acoustique 10. Confort visuel 11. Confort Olfactif
	Santé	12. Condition sanitaires des espaces 13. Qualité de l'air 14. Qualité de l'eau

PROCEDURE DE LABELISATION

Donne une note sur 100 basée sur 9 cibles	
Score	Niveau de Performance

Dans le respect de la démarche HQE pour un niveau de "base", un bâtiment doit respecter 3 des 14 critères désignés ci-dessus, pour le niveau "performant" il doit en respecter 4 et pour le niveau "très performant" il doit en respecter 7²³⁷.

Donne une note sur 100 basée sur 9 cibles	
Score	Niveau de performance

COMMENTAIRES

<30%	Unclassified
≥30%	Passable
≥45%	Good
≥55%	Very good
≥70%	Excellent
≥85%	Outstanding

Standard de certification le plus répandu dans le monde
Plus de 200 000 bâtiments certifiés BREEAM dans le monde

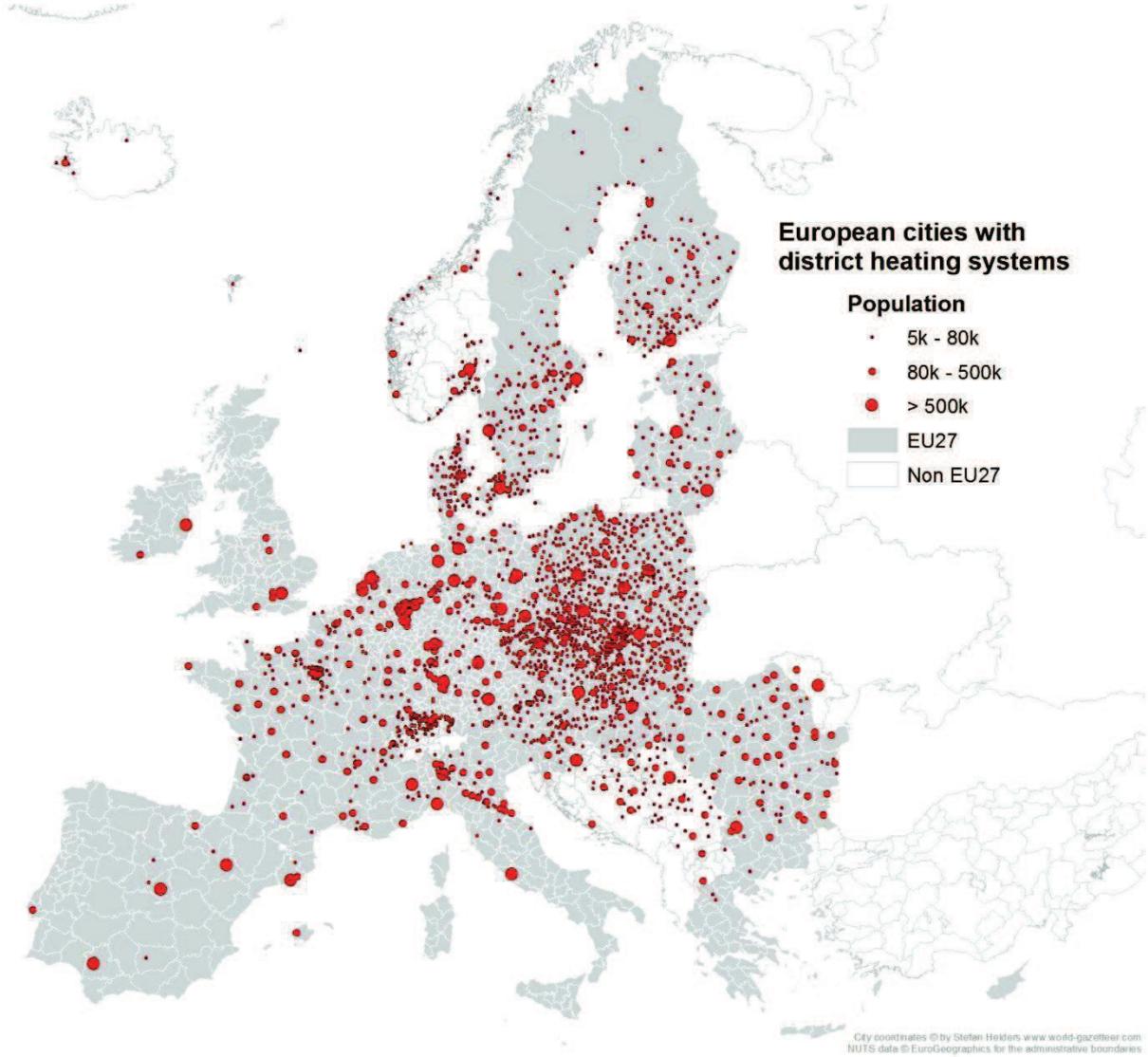
Certification dominante sur le marché français

< 40 points	Pas certifié
40-49 points	Certifié
50-59 points	Argent
60-79 points	Or
80 points et +	Partinium

Créé par US Green Building Council
Plus de 20 000 bâtiments certifiés

Annexe 3: Systèmes de chauffage urbain en Europe selon la taille de la ville et pour les villes ayant plus de 5000 habitants. La carte montre 2428 villes avec 2779 systèmes [Connolly et al, 2013]

District heating systems in Europe by city size and for cities having more than 5000 inhabitants. The map shows 2428 cities with 2779 systems. Source: Halmstad University DHC Database in Heat Roadmap Europe



Ecoquartiers	Pays	Critères de choix																			Pertinence pour le choix des études de cas	
		Bâtiment				Réseau électrique							Réseau de chaleur					EnR	Management des énergies			
		Label Performance Energétique	Labels Environnementaux	Bâtiment Bioclimatique	Travaux sur l'existant	Suivi de consommation	Pilotage intelligent de l'offre et de la demande	Production PV standard	Production EnR hors PV standard	Réseau électrique hors réseau de distribution	Stockage	VE	Existence d'un réseau de chaleur alimentant le quartier	Production locale de chaleur	Réseau de chaleur fonctionnant sans réseau de chaleur urbain (interne)	Stockage	Suivi de consommation	Intégration EnR présentes localement	Cogénération /Trigénération	Gestion intelligente chaleur et électricité		
GreenCity	Suisse	1	1		1	1	1	1				1	1	1	1	1				1	15	
Presqu'île	France	2			1	1	1	1				1	1	1	1	1	1	1			13	
Queen ElizabethPark	Angleterre	1	1	1		1		1	1			1	1	1			1	1			12	
Poblenou	Espagne				1			1		1		1	1	1				1			8	
Cap Azur	France	2		1				1				1	1	1		1	1				8	
Tweewaters	Belgique				1	1		1		1			1		1	1	1				8	
Alldhem	Suède				1	1		1			1		1		1	1	1				8	
Kronsberg	Allemagne			1				1	1			1	1	1		1		1			8	
Bedzed	Angleterre			1		1		1		1		1	1	1				1			8	
HafenCity	Allemagne		1					1				1	1	1	1			1			7	
Quartier Fréquent Fontarable	France	1			1	1		1					1			1	1				7	
Almere	Pays-Bas				1			1	1			1	1			1		1			7	
Parc Marianne	France	1			1	1		1				1	1	1				1			7	
ZAC Balma-Gramont	France	1		1		1						1	1	1			1				7	
SolarCity	Autriche			1				1		1		1	1		1						7	
Ginko	France	1		1				1				1	1	1			1				7	
Eikenott	Suisse	1				1		1				1	1	1			1				6	
ZAC de Bonne	France	1				1		1				1	1	1							5	
Hikari	France	1			1	1		1				1									5	
Schweighofpark	Suisse	1						1	1			1									5	
Greenlys	France					1	1	1				1	1								5	
Issy Grid	France					1	1			1		1									4	
Les docks de Saint Ouen	France	1															1				4	
Le Plateau de Haye	France	1			1							1	1								4	
Ecoparc	Suisse	1		1	1								1								4	
Arago	France	1			1							1	1	1							4	
Erlenmatt	Suisse	1						1			1		1								4	
Milton Keynes Energy Park	Angleterre							1					1	1	1						4	
Bahnstadt	Allemagne	1				1						1	1	1							3	
Marstal	Danemark											1	1	1							3	
EQ de la Jonction	Suisse	1										1					1				3	
NiceGrid	France					1		1		1											3	
Nouveau Mons	France											1	1								2	
ZAC des Grisettes	France											1	1								2	
Oberfeld	Suisse	1											1								2	
Greenwich Millennium Village	Angleterre		1			1															2	
GWL	Pays-Bas				1								1								2	
Soto de Henares	Espagne							1				1									2	
Wakefield	Angleterre							1						1							2	
Cœur de Bourg	France												1				1				2	
Leidsche Rijn	Pays-Bas											1									1	
Ecoquartier du Champ de foire	France	1																			1	
Pôle de l'éco-construction des Vosges	France											1									1	
Soto de Henares	Espagne											1									1	
Les plaines du Loup	Suisse																				0	
ZAC des aciéries	France																				0	

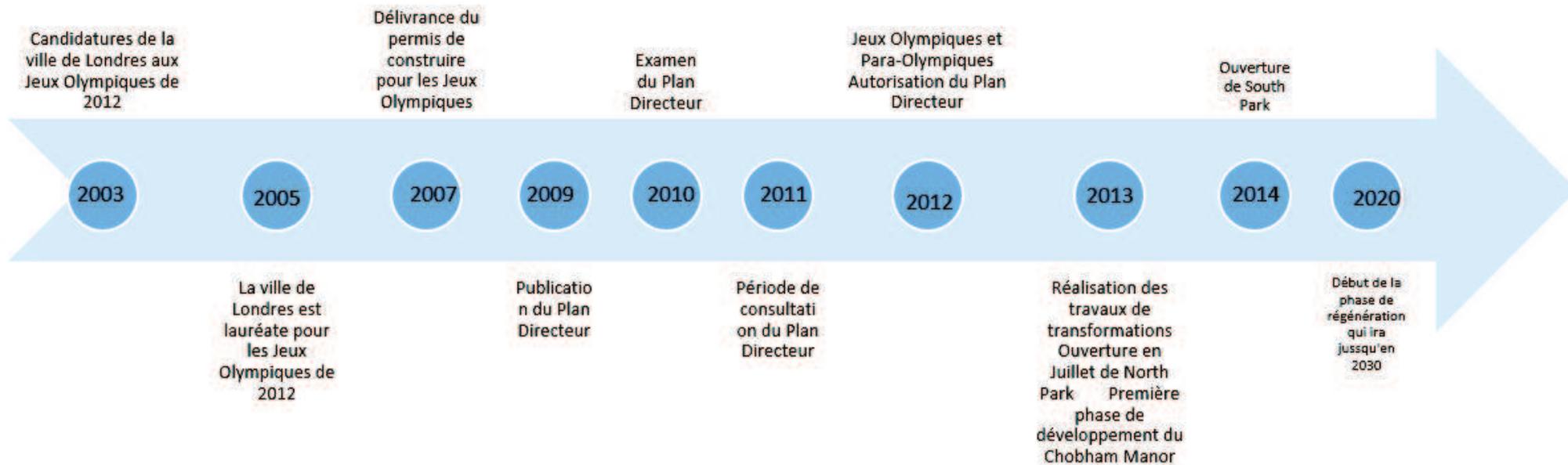
Annexe 5 : Grille d'entretien [Construction de l'auteur]

	Municipalité	Gestionnaire de quartier	Opérateurs de réseaux énergétiques	Aménageur	Constructeur	Autres Parties Prenantes
Genèse du projet	Pouvez-vous m'expliquer la genèse du projet et le développement du projet au regard du fonctionnement de votre organisation ?					
Motivation de l'acteur	Quelles ont été vos motivations pour participer au projet ? Vos motivations ont-elle évoluées au cours du projet ?					
Condition de participation	Quelles ont été vos conditions de pour participer au projet ?					
Comportement des acteurs entre eux	La relation avec les autres acteurs a-t-elle soulevée des difficultés dans la réalisation du projet d'écoquartier ?					
Définition de l'écoquartier	Avez-vous été l'auteur de la commande de l'écoquartier ? Et à quelles conditions ?	Comment définissez-vous le terme écoquartier ?	Comment définissez-vous le terme d'écoquartier ? Avez-vous été le demandeur de l'écoquartier ?	Comment définissez-vous le terme écoquartier ? Avez-vous été le demandeur ?	Comment définissez-vous le quartier ? Avez-vous été le demandeur ?	Comment définissez-vous l'écoquartier ?
Modèle énergétique	Pouvez-vous me définir le modèle énergétique du projet ?					

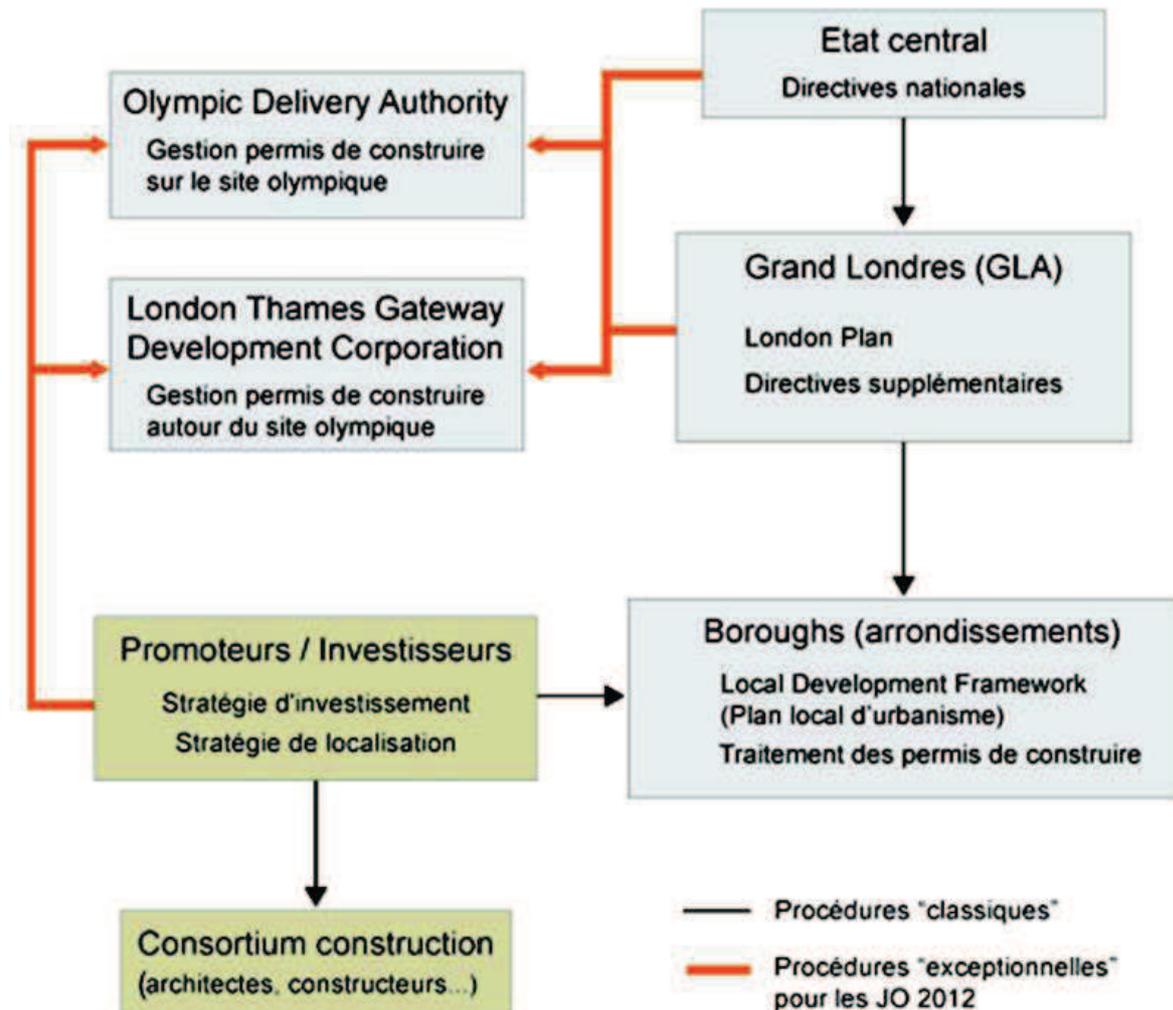
Nouveau Modèle énergétique vs Ancien modèle	Pouvez-vous m'expliquer la différence entre le nouveau et l'ancien modèle ?					Avez-vous connaissance de l'évolution du mix énergétique ?
Le choix technologique	Avez-vous eu le choix des technologies installées dans l'EQ ?	Comment régiez-vous les technologies énergétiques présentes dans le quartier ?	Avez-vous eu le choix des technologies installées dans l'EQ ?			Le choix du mix énergétique dans le quartier a-t-il impacté votre décision de vous installer dans ce dernier ? Si oui, à quel niveau ? Si non, pourquoi ?
La diffusion technologique	Pensez-vous que les technologies choisies pourront être diffusables sur l'ensemble de votre territoire ?	Pensez-vous que les technologies choisies pourront être facilement mobilisables ?	Les technologies choisies ont-elles impacté vos réseaux ? De quelle manière ? Pensez-vous que cette technologie peut être diffusée à une plus large échelle dans les années à venir ?	Les choix techniques sont-ils envisagés pour d'autres espaces ?	Les choix techniques ont-ils entraîné une évolution dans votre manière de construire un bâtiment ? Un Quartier ? Autre	Comment estimez-vous le potentiel de diffusion des technologies choisies ?

L'usage	Comment le nouveau mix a-t-il transformé les usages des services publics/urbains habituels ?	Comment gérez-vous le mix énergétique ?	Comment gérez-vous le nouveau mode d'approvisionnement énergétique ? A-t-il entraîné des difficultés dans issu de votre ancien mode de gestion énergétique ?	Comment l'approvisionnement énergétique choisi dans le projet a-t-il influencé vos choix en matière d'aménageur du territoire ?	Comment l'approvisionnement énergétique choisi dans le projet a-t-il influencé vos choix en matière de construction ?	Votre façon de consommer l'énergie a-t-elle évoluée depuis votre installation dans le quartier ? Avez-vous perçu une baisse au niveau économique ?
Le financement	Quel a été le mode de financement de l'EQ ?	Comment fonctionne votre modèle d'affaire pour gérer le quartier ?	Comment fonctionne votre modèle d'affaire pour le quartier ? Une évolution des coûts est-elle constatée ?	Comment fonctionne votre modèle d'affaire pour réaliser l'EQ ?	Comment fonctionne votre modèle d'affaire pour réaliser l'EQ ?	Voyez-vous un impact dans la facture énergétique ou des coûts indirects depuis votre présence sur l'EQ ?
Financièrement viable	Pensez-vous que l'écoquartier a une équation économique positive pour l'ensemble des acteurs ? Avez-vous une idée du mix énergétique idéal pour avoir un écoquartier décentralisé, décarboné et économiquement non déficitaire ?					
Jeu d'acteurs	Votre rôle traditionnel en matière d'approvisionnement énergétique a-t-il évolué avec la création de l'EQ ?	Comment définiriez vous votre rôle ?	Votre rôle traditionnel en matière d'approvisionnement énergétique a-t-il évolué avec la création de l'EQ ?	Votre rôle a-t-il évolué en matière énergétique ? Prenez-vous une part plus active dans le projet ? Trouvez-vous un nouveau marché ?	Votre rôle a-t-il évolué en matière énergétique ? Prenez-vous une part plus active dans le projet ? Trouvez-vous un nouveau marché ?	Votre rôle a-t-il évolué en matière énergétique ? Prenez-vous une part plus active dans le projet ? Trouvez-vous un nouveau marché ?

Annexe 6 : Chronologie Queen Elizabeth Olympic Game [Construction de l'auteur]



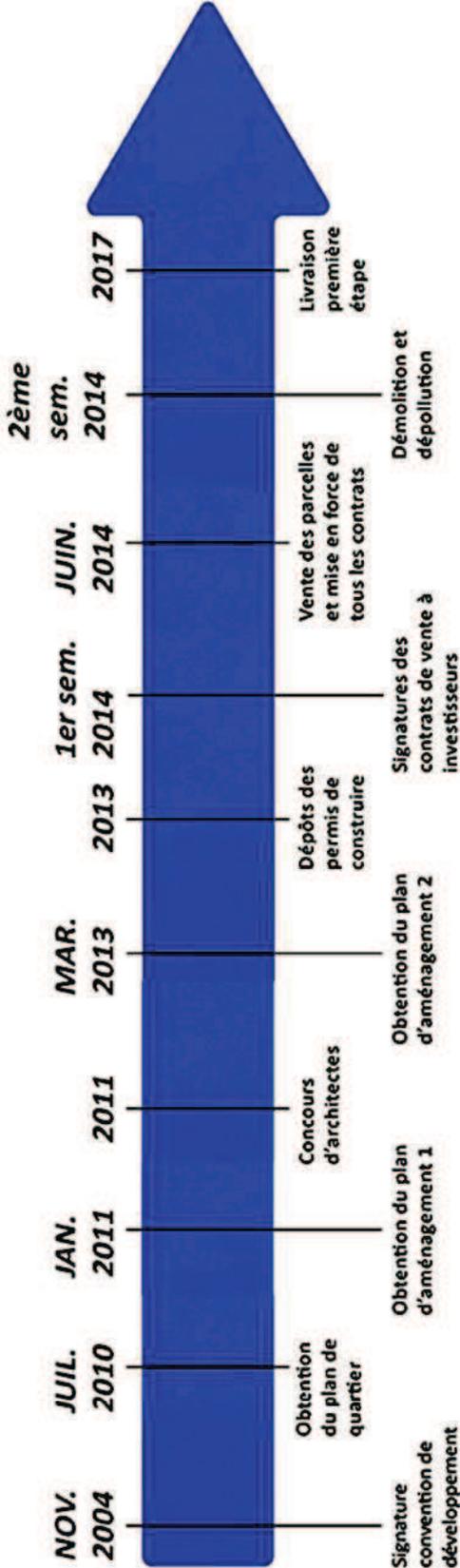
Londres, JO 2012 : schémas d'aménagement, avant et pendant



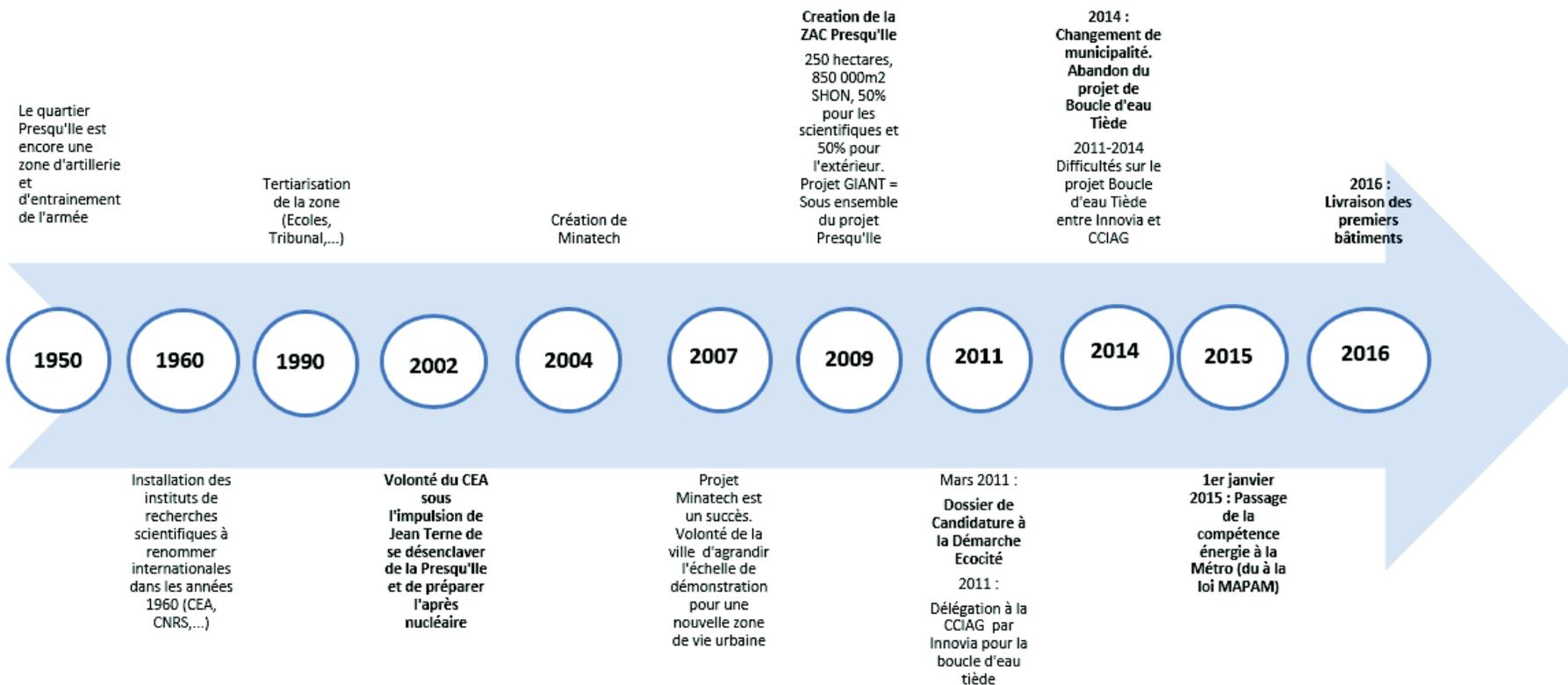
Réalisation : Manuel Appert, pour Géoconfluences, 2012

GREENCITY ZÜRICH SUD

Les dates clés



Annexe 9 : Chronologie du projet Ecocité [Construction de l'auteur]



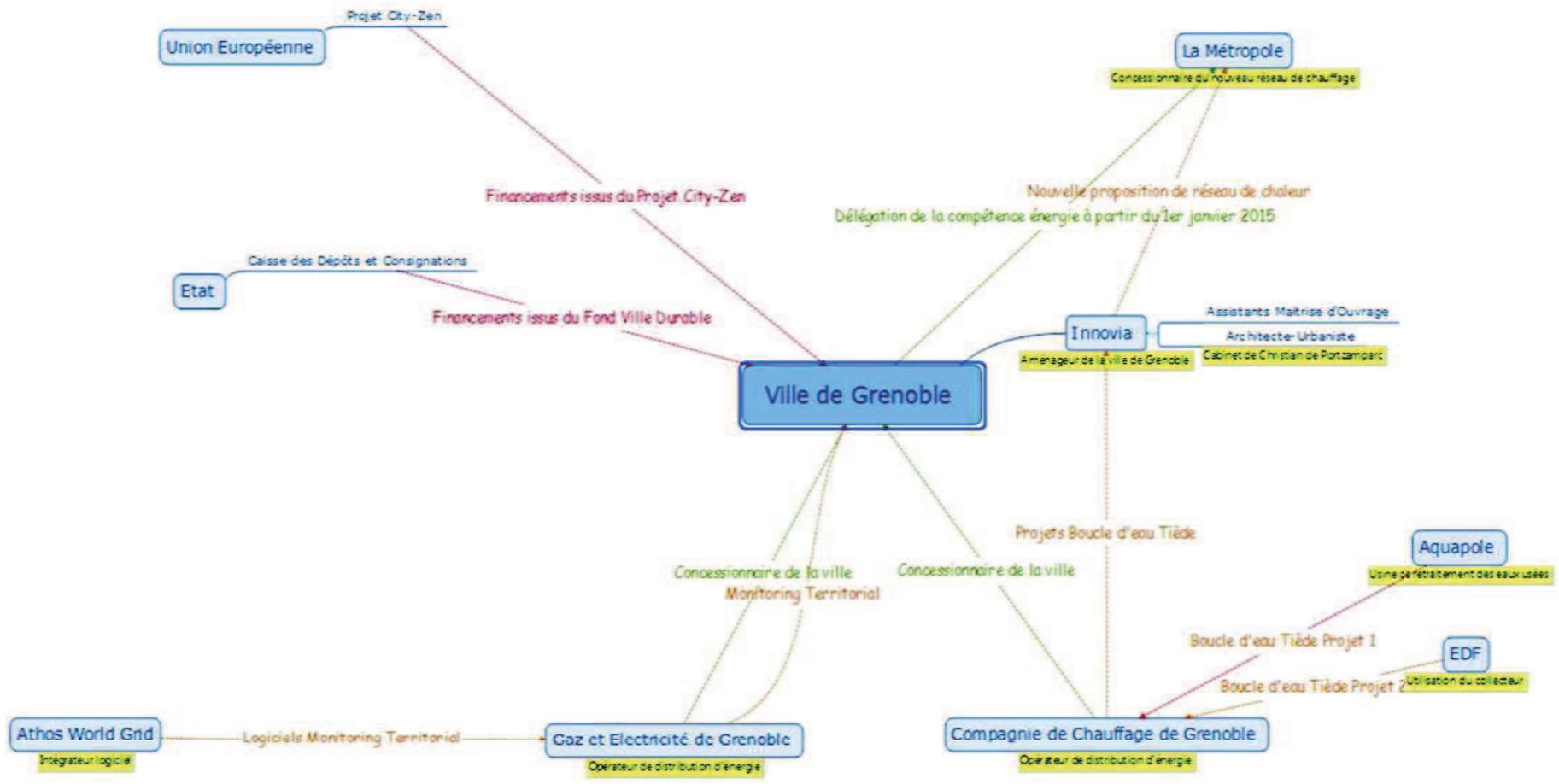
Annexe 10 : Fiches actions du projet Ecocité Grenobloise [Ville de Grenoble, 2011]

Thématiques	Propositions	Numéro	Actions
Système urbain intégré	1. Ilôts urbains intégrés	1.a	Ilot Cambridge
		1.b	Complexe Oxford
		1.c	Opération Porte du Vécors
	2. Bâtiments innovants	2.a	Bâtiments à usages innovants
		2.b	Presqu'île (bureaux Schneider)
		2.c	Esplanade
Nouvelle Mobilité	3. Nouvelle offre de mobilité	3.1	Agence de mobilité
		3.2	Kiosque et Pass Mobilité
		3.3	GreenCar-e et Tweezy
		3.4	Parc d'Oxford
		3.5	Projet de Zone d'Actions Prioritaire pour l'Air
Gestion collaborative de l'énergie	4. Smart Grid	4.a	Gestion coopérative de l'énergie
		4.b	Production d'électricité verte hydraulique
		4.c	Production d'électricité verte
	5. Réseaux thermiques coopératifs	5.a	Production thermique sur nappe phréatique
		5.b	Polygénération, biomasse : production de chaleur, de froid et d'électricité

Annexe 11 : Les financements demandés pour Ecocité Grenobloise [Ville de Grenoble, 2011]

RECAPITULATION DES FINANCEMENTS DEMANDES AU FONDS VILLE DE DEMAIN					
ACTIONS	INGENIERIE en M€ttc		INVESTISSEMENT En M€ht		
	Assiette totale ttc	Subvention ttc	Assiette totale ht	Subvention	Prise de participation
I. SYSTEME URBAIN INTEGRE					
1 – Ilots urbains intégrés					
1-a – Ilot Cambridge : habitats intergénérationnel, jardins et locaux mutualisés, énergie et mobilité partagés. <ul style="list-style-type: none"> 1-a-1 – Ilot Cambridge : logements intergénérationnels, jardins d'étagage, services intégrés, parking mutualisé, cœur d'îlot passif, gestion des déchets à l'échelle de l'îlot, nouveaux usages (living-lab) mobilité partagée, énergie et ressources mutualisées. 1-a-2 – Autonomie santé à domicile : soutenir le développement et la diffusion de technologies et les services fondés sur ces technologies, en lien avec les publics concernés (vitrine technologique). Diffusion démonstratrice des technologies développées pour le maintien à domicile des personnes âgées. 1-a-3 – Technologie innovante et industrialisation pour la rénovation thermique des copropriétés et intégration de bâtiments existants dans un système coopératif innovant. 	2,15	0,7525	28,7	10	
1-b – Complexe Oxford : îlot pôle de vie étudiants-chercheurs-familles avec colocation, superposition pôle forme santé, loisirs, culture et nature intégrée. <ul style="list-style-type: none"> 1-b-1 – Résidence combinée Oxford : Superposition logements étudiants-chercheurs en colocation et services intégrés, nouveaux usages, jardins intérieurs et pôle forme santé loisirs culture. 1-b-2 – Ilot intégré Oxford : Recyclage et énergie grise des matériaux. Mutualisation espaces mobilités, énergies, ressources. Intégration de la nature dans l'îlot, parcours santé-Isère. 	0,15		20		4
	0,07		10	3	
1-c – Opération Portes du Vercors : un quartier de ville intense avec zone inondable (gestion de l'eau, risques naturels et technologiques, compacité, desserte...).	0,84	0,294	0,7	0,2 (tranche 1)	
			18,5	6,5 (tranche 2)	
2 – Bâtiments Innovants					
2-a – Centre Ouvert de l'Innovation pour favoriser l'acceptabilité et le contact du grand public avec des nouvelles technologies.	0,12	0,042	15		3
2-b – Bureaux Schneider : démonstrateur, à la pointe de la technologie, pour une très haute performance énergétique et une gestion de la consommation en temps réel des bureaux.	0,24	0,084	30		5,49
2-c – Première tour de logements de plus de 100m à très haute performance énergétique (BEPOS) , compacité, libération du sol, performance écologique et confort d'usage.	0,12	0,042	50		9
II. OFFRE GLOBALE DE MOBILITE					
3 – Nouvelle offre de mobilité					
3- Nouvelle offre de mobilité. 3-1 – Agence de mobilité : développer un système d'information hautement performant pour les voyageurs afin de favoriser le report modal de la voiture personnelle vers d'autres modes. 3-2 – Kiosque et Pass Mobilité : mutualiser des espaces-stationnement en ouvrage et nouvelle offre de service mobilité complète comprenant TC, vélos, flotte de véhicules électrique partagés, covoiturage dynamique, autopartage... 3-3 – GreenCar-e et Twizy : réseau d'infrastructures de recharge de véhicules électriques : aller vers un système de gestion intégrée dans un réseau énergétique plus vaste et dans un réseau de mobilité plus vaste. Le secteur Nord-Ouest - site démonstrateur. 3-4 – Parc d'Oxford : Plateforme de logistique urbaine mutualisée et non carbonée avec livraison par véhicules électriques. 3-5 – Projet de ZAPA Zones d'Actions Prioritaires pour l'Air : mise en œuvre de mesures visant à réduire les émissions de particules et d'oxydes d'azote. Innovation en matière de gestion urbaine, d'identification des véhicules et de dispositif de surveillance.	1,5	0,525	33,85	11,1	
III. GESTION COOPERATIVE DE L'ENERGIE					
4 – Smart Grid					
4-a – Gestion coopérative du réseau électrique <ul style="list-style-type: none"> 4-a-1 – Projet "smart grid" - Green Lys, réseau électrique intelligent interactif avec délestage des pics de consommation. 4-a-2 – Éclairage public actif : efficacité énergétique, modulation-détection et lutte contre les pollutions lumineuses. 	0,16	0,056	11,7	4,1	
4-b – Production d'électricité verte hydro <ul style="list-style-type: none"> 4-b-1 – Micro centrale hydro-électrique basée sur faibles chutes d'eau du Drac 	0,12	0,042	5,1		0,8
4-c – Production d'électricité verte solaire <ul style="list-style-type: none"> 4-c-1 – Couverture solaire amorphe PV en toiture du Synchrotron ESRF. 4-c-2 – Couverture solaire PV ombragée sur parking avec recharges de véhicules électriques. 	0,12	0,042	9,1	2,1	
5 – Réseaux thermiques coopératifs					
5-a – Production thermique sur nappe phréatique <ul style="list-style-type: none"> 5-a-1 – Mise en œuvre d'un réseau mutualisé d'eau tiède dans les îlots neufs pour distribuer et récupérer de l'énergie, avec complément sur nappe phréatique. 5-a-2 – Presqu'île : Evaluation et gestion dynamique des ressources : optimisation des sollicitations de la nappe phréatique pour une exploitation maximale des capacités en géothermie. 5-a-3 – Esplanade : Gestion innovante des risques naturels d'inondation (nappe phréatique, crues de l'Isère, eau pluviale et talweg) ; intégration de l'eau dans le projet d'aménagement. Lien avec les jardins suspendus, comme lieux d'agrément mais aussi rétention, canalisation... 	4,18	1,463	29,2		5
	0,3	0,105	0,55	0,2	
	0,14	0,049	3,12	1,1	
5-b – Polygénération, biomasse : production de chaleur, de froid et d'électricité <ul style="list-style-type: none"> 5-b-1 – Polygénération biomasse : innovation sur son intégration en milieu urbain, innovation sur son alimentation en bois ; été : production de froid et gazéification. 5-b-2 – Production de froid – machine à absorption et réseau de froid dédié aux labos et process. 	4,3	1,505	16	2,6	
TOTAL	14,51	5,08	263 + 18,5 (tr.2)	34,4 + 6,5 (tranche 2)	27,3

Annexe 12 : Le jeu d'acteur pour le projet énergétique de la Presqu'île Grenobloise [Construction de l'auteur]



Annexe 13 : Récapitulatif des idéal-types [Construction de l'auteur]

Idéaltype		Idéaltype n°1	Idéaltype n°2	Idéaltype n°3
Enjeu traité dans l'idéaltype		Efficacité	Flexibilité	Autonomie
Aménagement du projet		Public	Public	Privé
Usages		Résidentiel et Tertiaire	Résidentiel et tertiaire	Mix possible ou un seul type d'usage
Bâti		Neuf	Neuf et Ancien	Neuf
Mobilier Urbain		Neuf	Neuf et Ancien	Neuf
Efficacité énergétique	Performance énergétique des bâtiments	Oui	Oui	Oui
	Maitrise de la demande énergétique	Oui	Oui	Oui
Approvisionnement en Electricité	Production	Exclusivement extérieure au quartier	Majoritairement extérieure au quartier	Majoritairement interne au quartier
	Distribution	Extension du réseau existant	Extension du réseau existant	Réseau privé
Approvisionnement en Chaleur	Production	Exclusivement extérieure au quartier	Majoritairement extérieure au quartier	Majoritairement interne au quartier
	Distribution	Extension du réseau existant	Extension du réseau existant	Réseau privé
Principale innovation		<u>Contractuelle</u> (évolution des contrats de fourniture)	<u>Organisationnelle</u> (Acteur gérant les flexibilités locales)	<u>Organisationnelle</u> (Nouveau statut pour les consommateurs)

