Energie, territoire et Path dependence : enjeux spaciaux et territoriaux d'une déclinaison régionale de la transition énergétique en Provenc-Alpes-Côte d'Azur

Maximin Chabrol

▶ **To cite this version:**

Maximin Chabrol. Energie, territoire et Path dependence : enjeux spaciaux et territoriaux d'une déclinaison régionale de la transition énergétique en Provenc-Alpes-Côte d'Azur. Géographie. Université d'Avignon, 2016. Français. NNT : 2016AVIG1167 . tel-01541460

HAL Id: tel-01541460

https://theses.hal.science/tel-01541460

Submitted on 19 Jun 2017

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.

ACADÉMIE D'AIX-MARSEILLE

UNIVERSITÉ D'AVIGNON ET DES PAYS DE VAUCLUSE

THÈSE

pour obtenir le grade de Docteur en Sciences Humaines et Sociales
de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

SPECIALITE : Géographie

École doctorale 537 Culture et Patrimoine / UMR ESPACE 7300

Energie, territoire et *Path dependence*

Enjeux spatiaux et territoriaux d'une déclinaison régionale de la transition énergétique en Provence-Alpes-Côte d'Azur

Maximin Chabrol

Octobre 2016

Jury

Mme Sylvie Daviet	Professeure, Université d'Aix-Marseille – TELEMME	*Rapporteure*
Mme Cyria Emelianoff	Professeure, Université du Mans – ESO	*Examinatrice*
M. Loïc Grasland	Professeur, Université d'Avignon – ESPACE	*Directeur de thèse*
M. Alain Nadaï	Directeur de recherche, CNRS – CIRED	*Examinateur*
M. Éric Verdeil	Professeur, Sciences Po – IEP	*Rapporteur*
Mme Christine Voiron-Canicio	Professeure, Université de Nice – ESPACE	*Examinatrice*

Energie, territoire et *Path dependence*

Enjeux spatiaux et territoriaux d'une déclinaison régionale de la transition énergétique en Provence-Alpes-Côte d'Azur

La transition énergétique est un projet de société qui impose un modèle énergétique durable marquant le passage d'une économie énergivore largement basée sur les ressources fossiles à une économie plus sobre en énergie et fondée sur un mix garantissant un niveau de performance économique au moins équivalent à celui d'aujourd'hui, l'économie bas-carbone. Alors que dans le passé, les transitions énergétiques étaient des processus intégrés à l'évolution générale des sociétés par les progrès techniques, la transition énergétique d'aujourd'hui est un processus nettement engagé à l'initiative des pouvoirs publics, particulièrement en Europe. Ce changement énergétique implique l'adaptation des territoires à des modes de fonctionnement moins énergivores et de développer des productions d'énergie renouvelable. Cette thèse répond à un double questionnement géographique. Quelles sont, pour l'organisation de l'espace et le fonctionnement des territoires, les implications de ce changement énergétique ? Quels sont les influences et rôles de l'organisation spatiale et des territoires sur le changement énergétique ?

La transition énergétique est ici considérée comme un processus fondamentalement géographique qui implique la remise en cause des configurations spatiales actuelles de l'activité économique et sociale, et que l'on examine ainsi comment espace et territoire y répondent, s'y adaptent, la contraignent ou l'accélèrent. Cette thèse saisit plus précisément les enjeux d'une déclinaison régionale de la transition énergétique en révélant les contraintes spatiales et territoriales qui l'encadrent et la déterminent. En s'appuyant sur des travaux d'analyse spatiale et de traitement de données, les dimensions spatiale et territoriale du concept de *Path dependence* sont développées dans le cadre d'une analyse régionale en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Trois domaines de la dimension spatiale de la transition énergétique comme élément relevant de la *Path dependence* sont abordés : l'influence des structures spatiales et la dépendance au lieu ou *material lock-in*, la territorialisation et le développement durable inégal ou *territorial lock-in*, et le poids des structures socio-spatiales héritées ou *socio-spatial lock-in*.

La transition énergétique n'est pas seulement une question économique et politique et l'espace n'est pas seulement un facteur de différenciation spatiale de ce processus. L'espace des sociétés contient aussi des principes d'évolution qui engagent une logique de *Path dependence*. Toute la complexité de la transition énergétique réside alors dans la complexité spatiale et territoriale qui l'encadre et la détermine, celle de l'organisation des hommes dans l'espace.

Mots clés : énergie, transition, espace, territoire, *path dependence*

Crédits photos : Observatoire Régional Energie-Climat-Air PACA

Energy, territory and *Path dependence*

Spatial and territorial challenges of a regional version of energy transition in Provence-Alpes-Côte d'Azur

The energy transition is a societal project that imposes a sustainable energy model marking the shift from an energy economy based largely on fossil fuels to a more efficient economy based on an energy mix ensuring a level of economic performance at least equivalent to the actual situation today, the low-carbon economy. While in the past, energy transitions were integrated processes to the general evolution of societies by technological advances, today's energy transition is a process clearly committed to the initiative of the authorities, especially in Europe. This energy change involves the adaptation of territories to less energy-intensive modes and to develop renewable energy production. This thesis has a dual geographical questioning. What are the implications of this energy change for the space organization and functioning of the territories? What are the influences and roles of the spatial organization and territories on the energy change?

The energy transition is here seen as a basically geographical process that involves the questioning of current spatial patterns of economic and social activity, and which can thus examine how space and territory meet it, adapt to it, limit it or accelerate it. This thesis captures more precisely the issues of a regional version of the energy transition by revealing the spatial and territorial constraints that frame and determine it. Building on the work of spatial analysis and data processing, spatial and territorial dimensions of the concept of *Path dependence* are developed as part of a regional analysis in Provence-Alpes-Côte d'Azur. Three areas of the spatial dimension of the energy transition as an element of *Path dependence* are studied: the influence of spatial structures and place dependence or *material lock-in*, territorialization and uneven sustainable development or *territorial lock-in*, and the weight of inherited socio-spatial structures or *socio-spatial lock-in.*

The energy transition is not only an economic and political issue, and space is not only a spatial differentiation factor in this process. The geographical space also acquired its principles of evolution that involve logic of *Path dependence*.

The complexity of the energy transition is in the spatial and territorial complexity that surrounds and determines the organization of humanity into space.

Keywords: energy, transition, space, territory, *path dependence*

ACADÉMIE D'AIX-MARSEILLE
UNIVERSITÉ D'AVIGNON
ET DES PAYS DE VAUCLUSE

THÈSE

pour obtenir le grade de Docteur en Sciences Humaines et Sociales
de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

SPECIALITE : Géographie

École doctorale 537 Culture et Patrimoine
UMR ESPACE 7300

Energie, territoire et *path dependence*

Enjeux spatiaux et territoriaux d'une déclinaison régionale
de la transition énergétique en Provence-Alpes-Côte d'Azur

Maximin Chabrol

Soutenue le ***21 octobre 2016*** devant le jury composé de :

Mme Sylvie Daviet	Professeure, Université d'Aix-Marseille – TELEMME	*Rapporteure*
Mme Cyria Emelianoff	Professeure, Université du Mans – ESO	*Examinatrice*
M. Loïc Grasland	Professeur, Université d'Avignon – ESPACE	*Directeur de thèse*
M. Alain Nadaï	Directeur de recherche, CNRS – CIRED	*Examinateur*
M. Éric Verdeil	Professeur, Sciences Po – IEP	*Rapporteur*
Mme Christine Voiron-Canicio	Professeure, Université de Nice – ESPACE	*Examinatrice*

INTRODUCTION GENERALE 7

PARTIE 1 LA TRANSITION ENERGETIQUE : OBJET ET PROCESSUS GEOGRAPHIQUE 17

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE 19

CHAPITRE 1 L'ENERGIE DANS L'EVOLUTION DES SYSTEMES SPATIAUX 21

CHAPITRE 2 TRANSITION ENERGETIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES : AMBIGUÏTES D'UN NOUVEAU MODELE ENERGETIQUE 69

CHAPITRE 3 ENJEUX SPATIAUX ET TERRITORIAUX DE LA TRANSITION ENERGETIQUE 97

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE 129

PARTIE 2 LA TRANSITION ENERGETIQUE SOUS CONTRAINTES SPATIALES ET TERRITORIALES, ENTRE POTENTIALITES DE CHANGEMENT ET *PATH DEPENDENCE* 131

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE : POSITIONNEMENT ET HYPOTHESES DE RECHERCHE 133

CHAPITRE 4 MATERIAL LOCK-IN : L'INFLUENCE DES STRUCTURES SPATIALES ET LA DEPENDANCE AU LIEU 139

CHAPITRE 5 TERRITORIAL LOCK-IN : LA TERRITORIALISATION ET LE DEVELOPPEMENT DURABLE INEGAL 189

CHAPITRE 6 SOCIO-SPATIAL LOCK-IN : LE POIDS DES STRUCTURES SOCIO-SPATIALES HERITEES 237

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE 273

CONCLUSION GENERALE 275

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 287

TABLES 307

TABLE DES FIGURES 309

TABLE DES CARTES 311

TABLE DES GRAPHIQUES 313

LISTE DES TABLEAUX 314

TABLE DES MATIERES 315

Alors que mon fils entrait à l'école pour la première fois, je me retrouvais moi aussi à revivre les craintes et les émotions de la rentrée des classes. Les années passant, mon fils termine son CP et moi mon doctorat, chacun donnant des leçons de vie à l'autre. Papa, pourquoi est-ce qu'on n'habite pas vraiment en ville et pas vraiment à la campagne ? me demandait-il. Si la question t'intéresse vraiment, tu pourras faire une thèse de géographie quand tu seras grand, aurais-je pu lui répondre… Papa, elle est belle ta carte. Moi aussi j'ai fait un beau coloriage aujourd'hui, regarde ! Papa, moi aussi j'ai fait des hypothèses aujourd'hui, et toi t'en as trouvé ? Et c'est là qu'on comprend que faire de la recherche, c'est retrouver son âme d'enfant, la curiosité, l'envie de comprendre ce qui nous entoure et de jouer à se représenter le monde…

À l'issue de ces trois années de recherche, je souhaite remercier chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé, soutenu et accompagné dans ce projet.
Je tiens tout d'abord à remercier Loïc Grasland, pour ses qualités d'encadrement. Un immense *bennozh doue* pour ses conseils, son écoute, son intuition, son regard critique, ses relectures et sa disponibilité.

Je remercie sincèrement Sylvie Daviet, Cyria Emelianoff, Alain Nadaï, Éric Verdeil et Christine Voiron-Canicio d'avoir accepté de participer au jury de thèse.

En m'accordant un financement, le Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur m'a permis de réaliser ce travail de recherche dans les meilleures conditions. Mes remerciements s'adressent à la Direction Régionale du Développement Soutenable qui a accepté sans hésitation un partenariat qui fut riche d'échanges et d'interactions. Je remercie ainsi tout particulièrement Tatiana Fayard, Catherine Balguerie-Bais et Yohanna Martinie pour l'intérêt qu'elles ont manifesté à l'égard de mon travail et pour m'avoir rapidement intégré au petit monde de la territorialisation de la transition énergétique en région. Mes remerciements vont aussi dans ce sens à l'Agence d'Urbanisme Rhône Avignon Vaucluse. Je remercie Gilles Périlhou de m'avoir sollicité pour participer à leurs réflexions sur les enjeux locaux de la transition énergétique. Merci à Romain et Laura ainsi qu'à toute l'équipe pour leur accueil chaleureux !

Je tiens à remercier l'UMR ESPACE et l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse pour les conditions de travail exceptionnelles qui m'ont été offertes. Milles mercis aux personnels d'appui à la recherche, Nathalie Brachet, Alexia Bouffel, Laetitia Faure et Mathieu Coulon, pour leurs grandes qualités humaines et professionnelles. J'adresse tous mes remerciements à l'ensemble de l'équipe d'Avignon qui m'a toujours considéré comme un collègue et parfaitement intégré dans la vie du laboratoire et du département de géographie. Merci pour leur confiance, leur soutien et leurs encouragements. Cette thèse n'aurait sans doute jamais abouti sans le soutien des pairs. Je remercie très amicalement l'ensemble des doctorant(e)s de l'UMR ESPACE (ancien(ne)s et futur(e)s), et en particulier Chloé Desgranges, Julien Bordagi, Jules Kouadio, Béatrice Gisclard, Lauriane Thomas, Romain Louvet, Ingrid Canovas, Michaël Ferri et Rémi Pascal. Mes remerciements s'adressent aussi aux collègues doctorants travaillant sur des questions similaires rencontrés au gré des colloques et écoles thématiques, Annaïg Oiry, Sophie Hou, Lucas Durand, Vincent Baggioni et Joseph Cacciari.
Many thanks Alan for your help in english.

J'exprime enfin tous mes remerciements les plus profonds à mes proches pour leur soutien et leur affection, et tout particulièrement à Emmanuelle, Zoé et Ulysse pour l'amour qu'ils me portent et l'équilibre qu'ils me procurent.

ADEME
Agence pour l'Environnement et la Maîtrise de l'Énergie

AGIR
Action Globale Innovante pour la Région

AIE
Agence Internationale de l'Énergie

ALEC
Agence Locale de l'Énergie et du Climat

APUR
Atelier Parisien d'Urbanisme

BD TOPO
Base de Données Topographiques

CAH
Classification Ascendante Hiérarchique

CEA
Centre d'Étude Atomique

CERTU
Centre d'Études sur les Réseaux, le Transport, l'Urbanisme et les constructions publiques

CET
Cotisation Économique Territoriale

CFE
Cotisation Foncière des Entreprises

CLER
Comité de Liaison sur les Énergies Renouvelables

CNR
Compagnie Nationale du Rhône

CPO
Conseil des Prélèvements Obligatoires

CPV
Centrale Photovoltaïque

CRE
Commission de Régulation de l'Énergie

CVAE
Cotisation sur la Valeur Ajoutée des Entreprises

DGFIP
Direction Générale des Finances Publiques

DREAL
Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EDF
Électricité De France

EDF EN
Électricité De France Énergies renouvelables

EnR
Énergies Renouvelables

EPCI
Établissement Public de Coopération Intercommunale

EPEES
Espaces Post-Euclidiens et Evénements Spatiaux

ERDF
Électricité et Réseau de Distribution de France

FA
Fiscalité Additionnelle

FNAU
Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme

FPU
Fiscalité Professionnelle Unique

GES
Gaz à Effet de Serre

GDF
Gaz De France

HT
Haute Tension

IEA
International Energy Agency

IFER
Impôt Forfaitaire sur les Entreprises de Réseau

IGN
Institut Géographique National

INSEE
Institut National de le Statistique et des Études Économiques

IPCC
Intergovernmental Panel on Climate Change

ITER
International Thermonuclear Experimental Reactor

Ktep
Kilotonne équivalent pétrole

Kv
Kilovolt

Kwef
Kilowatt efficace

Kwh

Kilowattheure

LIF
Lower Inner Fence

LOADDT
Loi d'Orientation pour l'Aménagement et le Développement Durable du Territoire

LOG
Logarithme

MAPAM (loi)
Loi de Modernisation de l'Action Publique territoriale et d'Affirmation des Métropoles

MEDDE
Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

MEEM
Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

MEP
Maximum Entropy Production

MLG
Multi-Level Governance

MLP
Multi-Level Perspective

Mtep
Million de tonne équivalent pétrole

MW
Mégawatt

MWc
Mégawatt crête

MWh
Mégawattheure

NOTRe (loi)
Loi sur la Nouvelle Organisation Territoriale de la République

OCDE
Organisation de Coopération et de Développement Economiques

ONG
Organisation Non-Gouvernementale

ORECA
Observatoire Régional de l'Énergie, du Climat et de l'Air

PAC
Pompe à Chaleur

PACA
Provence-Alpes-Côte d'Azur

PCAET
Plan Climat Air Énergie Territorial

PCET
Plan Climat Énergie Territorial

PDU (i)
Plan de Déplacement Urbain (Intercommunal)

PIB
Produit Intérieur Brut

PLH
Plan Local de l'Habitat

PLU (i)
Plan Local d'Urbanisme (Intercommunal)

PME
Petite et Moyenne Entreprise

PNR
Parc Naturel Régional

POPE (loi)
Loi de Programme fixant les Orientations de la Politique Énergétique

PPA
Plan de Prévention de l'Atmosphère

PV
Photovoltaïque

R&D
Recherche et Développement

RT
Règlementation Thermique

RTE
Réseau de Transport de l'Électricité

SARL
Société à Responsabilité Limitée

SAS
Société par Action Simplifiée

SCoT
Schéma de Cohérence Territoriale

SIG
Système d'Information Géographique

SNBC
Stratégie Nationale Bas-Carbone

SNET
Société Nationale d'Electricité et de Thermique

SOeS
Service de l'Observation et des Statistiques du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

SRADDET
Schéma Régional d'Aménagement,
de Développement Durable et d'Égalité des Territoires

SRADDT
Schéma Régional d'Aménagement
et de Développement Durable des Territoires

SRCAE
Schéma Régional Climat Air Énergie

SSCE
Schéma de Service Collectif de l'Énergie

STEP
Station d'Épuration

TECV (loi)
Loi pour la Transition Énergétique et la Croissance Verte

TEPCV
Territoire à Énergie Positive pour la Croissance Verte

TEPos
Territoire à Énergie Positive

UEM
Usine Électrique de Metz

UMR ESPACE
Unité Mixte de Recherche Étude des Structures et des Processus d'Adaptation et de Changement de l'Espace

UIF
Upper Inner Fence

ZIP
Zone Industrialo-Portuaire

Introduction générale

La consommation et la production d'énergie ont été multipliées par 9 au cours du XX^{e} siècle (Acket, Vaillant, 2011). Un tel développement a été facilité par la mise à disposition d'une énergie bon marché basée sur les combustibles fossiles. Ces combustibles couvrent aujourd'hui 80% des besoins énergétiques mondiaux, 52% pour la France (Barré, Mérenne-Schoumaker, 2011). Le doublement annoncé de la population mondiale au cours du XXI^{e} siècle conduira inévitablement à une augmentation des besoins énergétiques (Solier, Trotignon, 2010). Or l'appel aux combustibles fossiles doit être limité autant pour des raisons écologiques définies dans l'ensemble des sommets mondiaux sur le climat, que pour des raisons d'épuisement physique et économique.

La transition énergétique est présentée dans ce contexte comme un projet normatif dont l'objectif est de tendre vers un modèle énergétique qualifié de durable. Elle se définit comme le passage d'une économie fondée sur l'utilisation d'énergies fossiles largement disponibles et à coût faible ou modéré, à une économie moins énergivore et fondée sur un mix énergétique garantissant un niveau de performance économique au moins équivalent à celui d'aujourd'hui, l'économie bas-carbone. Alors que, dans le passé, les transitions énergétiques étaient des processus intégrés à l'évolution générale des sociétés, essentiellement liées à l'évolution des technologies (moteur à vapeur, dynamo…), la transition énergétique d'aujourd'hui est un processus engagé par les pouvoirs publics, particulièrement en Europe. C'est un changement institutionnalisé cherchant à définir un nouveau modèle énergétique qui implique d'adapter les territoires à des modes de fonctionnement moins énergivores et de développer les productions d'énergie renouvelable. Les systèmes énergétiques actuels basés sur les énergies fossiles montrent leurs limites et interrogent sur les possibilités d'autres modèles.

Le défi énergétique du XXI^{e} siècle consiste à provoquer une transition vers un système garantissant un accès universel aux services énergétiques et vers une sécurité de l'approvisionnement par les énergies renouvelables. Maintenir ou développer le niveau de performance économique des territoires dans un monde sous contrainte carbone nécessite de développer de nouvelles façons de produire, de transformer et de transporter l'énergie.

Toutefois, les implications spatiales et territoriales de ce nouveau paysage énergétique ne sont pas bien définies, et une large gamme de modèles peut être envisagée. La production d'électricité peut être réalisée par exemple autant par de grandes infrastructures (nucléaire, éolien off-shore ou solaire à échelle « industrielle ») et un transport sur de longues distances par de vastes réseaux interconnectés, que par des « mini-réseaux » régionaux ou locaux, ou encore par l'intermédiaire de systèmes hautement décentralisés (microproduction, autonomie et boucle

locale). De même, les éléments d'une politique de transition énergétique, de la maîtrise de la demande au déploiement des technologies renouvelables, reposent sur des hypothèses divergentes sur le niveau d'échelle ou territorial auquel devraient être développés et régis les systèmes énergétiques de demain (Union européenne, politiques nationales, collectivités territoriales, entreprises multinationales, microentreprises, coopératives, citoyens…).

L'exploitation de nouvelles ressources pour la production d'énergie renouvelable est un élément essentiel de la transition énergétique. Même si ces ressources sont omniprésentes (soleil, vent, eau), leur mise en valeur énergétique est située et inscrite dans les structures spatiales des systèmes de production et d'approvisionnement. Ces structures relèvent d'un modèle d'organisation centralisé, hiérarchisé et arborescent, aujourd'hui questionné, voire remis en cause par le développement des énergies renouvelables. Les modèles de transition énergétique proposés s'appuient en effet sur un déplacement relatif d'une production centralisée vers une production distribuée (Unruh, 2000 ; Labrousse, 2006). La transition du secteur de la production énergétique vers des mix intégrant les énergies renouvelables peut être associée à des changements dans la nature et la localisation des éléments des systèmes énergétiques. La structure spatiale actuelle des systèmes énergétiques exerce des contraintes sur l'exploitation des nouvelles ressources qui nécessitent d'être comprises et évaluées. La mise en valeur de nouvelles ressources modifie la répartition géographique de l'offre énergétique dont l'activation peut aussi dépendre des caractéristiques régionales des structures existantes.

La territorialisation de l'énergie à l'échelle de la nation en France a été un projet politique et économique majeur, qui a conduit à la mise en valeur d'un système de gestion centralisé et hiérarchisé, basé sur le dimensionnement de l'infrastructure énergétique nationale, mais aussi sur la diffusion des technologies comme partie intégrante des projets politiques de modernisation de la nation (Bouneau, 2006). La transition énergétique remet en cause cette organisation en concevant une territorialisation basée sur l'interaction entre la puissance politique nationale, les entreprises, l'Union européenne et les collectivités territoriales (Chanard, 2011). Cette mise en politique de la transition énergétique s'inscrit dorénavant en France dans un processus descendant de l'État aux intercommunalités coordonné par les Régions. Or la territorialisation du système français de l'énergie est dotée d'une très forte inertie liée au monopole historique d'entreprises comme Électricité De France (EDF), Gaz De France (GDF) ou la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), entreprises qui, par ailleurs, se positionnent fortement sur le marché des énergies renouvelables. Le système énergétique français est également soumis au contexte des politiques de l'Union européenne sur la libéralisation des marchés de l'énergie, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, le développement des énergies renouvelables et la volonté de mettre en place une stratégie énergétique communautaire européenne.

La transition énergétique se pose aujourd'hui aux échelles régionale et locale alors que le problème de l'approvisionnement et du transport de l'énergie est encore une responsabilité nationale dans la plupart des pays. Elle implique alors de reconsidérer les rapports entre production et consommation d'énergie tout en évaluant les potentiels de production et de mise en

œuvre des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Le territoire est en ce sens une instance déterminante de réflexion et la question de son étendue est ouverte. Aujourd'hui, le rôle des collectivités territoriales en matière de planification énergétique en France est fortement réaffirmé et passe par l'intégration des enjeux de la transition énergétique dans les documents de planification locale. L'élaboration des Schémas Régionaux Climat, Air, Énergie (SRCAE) et des Plans Climat Air Énergie Territoriaux (PCAET) engage les territoires français dans une démarche de mise en œuvre de la transition énergétique. Mais la déclinaison de la transition énergétique dans les territoires n'est pas un processus de décision politique indifférent aux lieux. La transition énergétique convoque aussi une réévaluation de la forme, de la fonction et de la valeur de certaines structures socio-spatiales en particulier celles des espaces urbains et périurbains. La transition énergétique peut s'inscrire dans une géographie soucieuse de comprendre autant les facteurs et logiques de localisation de l'activité énergétique que les recompositions et dynamiques de développement des territoires (Fournier *et al*., 2012).

Par ailleurs, dans un contexte généralisé de crise économique, les énergies renouvelables sont souvent citées comme levier potentiel pour des politiques de ré-industrialisation et de création d'emplois. Ce type de politique s'accorde souvent avec de vastes programmes d'aménagement du territoire. Les récents appels d'offres pour le déploiement des énergies éoliennes off-shore en témoignent. Il est probable que davantage de mesures de ce type seront prises dans ce sens dans un avenir à moyen terme, d'autant plus que les questions d'indépendance énergétique sont des éléments importants de la gouvernance des États.

En dehors de tout discours idéologique, fantaisiste ou alarmiste, la transition énergétique semble être une réalité, celle de demain, sans doute l'un des plus grands défis et enjeux du XXI^{e} siècle dont les jalons sont posés aujourd'hui.

L'objet central de cette thèse s'articule autour d'une question à double sens. Il s'agit en effet autant de comprendre les implications de ce changement énergétique sur l'organisation et le fonctionnement de l'espace géographique, que d'éclaircir l'influence et le rôle de l'organisation et du fonctionnement de l'espace géographique sur ce changement. Peuvent-ils y répondre, s'y adapter, le contraindre, l'accélérer ?

Le postulat de cette thèse consiste à considérer la transition énergétique comme un processus fondamentalement géographique (Juisto, 2009 ; Bradshaw, 2010 ; Bridge *et al.*, 2013 ; Coenen, Hansen, 2015) qui implique de remettre en cause les configurations spatiales actuelles de l'activité économique et sociale, c'est-à-dire l'un des objets scientifiques des géographes.
La transition énergétique implique des investissements massifs pour repenser les infrastructures, l'habitat, l'équipement – c'est-à-dire les modalités de l'organisation spatiale des sociétés – dans une perspective de durabilité, mais aussi de faire des choix dans une gamme d'échelles spatiales possibles de gouvernance (Bridge *et al.*, 2013). L'implication des ressources énergétiques et l'évolution de leur part dans les mix énergétiques nationaux, dans les changements sociétaux tels que l'industrialisation, l'urbanisation, la croissance économique et l'émergence de la société de consommation, ont largement été démontrées dans les études historiques sur la transition

énergétique (Gales *et al.,* 2007 ; Fouquet, 2010 ; Smil, 2010 ; Kander, Malanima, Warde, 2013). L'utilisation et la transformation des ressources énergétiques par les sociétés exercent une influence sur leur développement économique et l'évolution de leurs structures spatiales et territoriales. Les systèmes énergétiques ont souvent contribué à des changements spatiaux et territoriaux. Une transition énergétique, par l'intégration massive des énergies renouvelables dans les mix énergétiques, est donc *en théorie* susceptible d'impliquer des changements aussi importants que le passage du bois au charbon, ou l'électrification des zones urbaines et rurales de la fin du XIX^{e} siècle, aussi difficile qu'il soit d'imaginer actuellement ces changements d'ordre sociétaux, technologiques et territoriaux. Ces changements possibles sont toutefois confrontés à une série de résistances et de verrous qui entraînent plutôt une continuité d'évolution que des changements radicaux de trajectoire.

La question de la transition énergétique ouvre depuis quelques années des perspectives renouvelées de recherche en géographie et plus largement en sciences sociales (Calvert, 2015 ; Sovacool *et al.,* 2015). La question de la transition énergétique permet de réinterroger des démarches théoriques relevant de l'analyse de l'évolution des systèmes sociotechniques, de la géographie économique, des théories de la diffusion des innovations, la théorie du MLP (Multi-Level Perspective), ou encore de la *Path dependence* (Araujo, 2014). Les travaux récents en sciences sociales sur la transition énergétique contribuent largement à la compréhension de la façon dont les transitions peuvent se produire en analysant et en identifiant les facteurs qui freinent ou favorisent ces mutations dans les systèmes sociotechniques (Jaglin, Verdeil, 2013 ; Rutherford, Coutard, 2014), en particulier les interactions entre acteurs et les gisements d'innovation sociale (Nadaï, Labussière, 2010 ; Zelem, 2010). Ces approches sociotechniques s'inscrivent largement dans les champs de l'analyse économique, politique et sociologique et ont parfois tendance à conférer aux structures spatiales et territoriales, et plus largement à l'espace, le simple rôle de support. Pourtant les systèmes énergétiques sont intégrés dans des organisations spatiales et territoriales spécifiques. Si cette intégration de la dimension spatiale par la prise en compte des spécificités des lieux est de plus en plus présente dans les recherches, l'analyse du rôle et du poids exercé par les structures spatiales et territoriales sur les capacités de changement et d'évolution n'est pas toujours très explicite.

Si on considère en effet que l'espace est en partie construit et organisé par des interactions sociales, nous ajoutons qu'en retour, les structures spatiales et territoriales produites réduisent les marges de manœuvre et les potentialités de changement. La deuxième partie de cette phrase est l'idée fondamentale de cette thèse. Nous considérons en effet que les structures spatiales et territoriales ont acquis au cours du temps un poids considérable, une inertie, qui peut ralentir ou empêcher tout changement notable dans l'évolution des modes d'organisation des

sociétés dans leur espace, et donc dans l'évolution des systèmes énergétiques, en dehors d'événements rares et imprévisibles comme les *Cygnes Noirs*[1] (Taleb, 2007).

Le processus de transition énergétique n'est pas qu'une question économique et politique et l'espace des sociétés n'est pas seulement un facteur de différenciation spatiale de ce processus. L'espace des sociétés a aussi acquis ses principes d'évolution qui impliquent une logique de *Path dependence*. Toute la complexité de la transition énergétique réside aussi dans la complexité spatiale et territoriale qui l'encadre et la détermine, celle de l'organisation des hommes dans l'espace. Aussi cette thèse est construite en deux parties qui rendent compte de cette double question.

La première partie s'attache à définir la transition énergétique comme un objet et un processus géographique. Elle déroule trois chapitres qui abordent successivement l'implication de l'énergie dans l'évolution des systèmes spatiaux, les ambiguïtés inhérentes à l'émergence d'un nouveau modèle énergétique et les enjeux spatiaux et territoriaux de ce nouveau modèle.

Le premier chapitre apporte des éléments de définition et de contexte général et rappelle les grands débats actuels sur les impacts sociétaux de la crise énergétique. Il révèle comment la géographie a investi ce champ de recherche par la mise en évidence de l'implication de l'énergie dans les évolutions spatiales. Le concept d'entropie est mobilisé dans ce sens pour questionner les limites du modèle de développement qui a contribué à construire les organisations spatiales actuelles des activités humaines.

Le deuxième chapitre définit la transition énergétique à travers ses dimensions historique, économique et politique, et resitue les problématiques et les ambiguïtés liées au développement des énergies renouvelables et à la production d'électricité.

Le troisième chapitre examine enfin comment les sciences humaines et sociales, et plus particulièrement la géographie, s'approprient ces problématiques en révélant leur dimension territoriale, avant d'expliciter plus en détail le positionnement du travail de recherche proposé dans cette thèse.

La deuxième partie aborde les enjeux d'une déclinaison régionale de la transition énergétique en révélant les contraintes spatiales et territoriales qui l'encadrent et la déterminent. Cette partie mobilise le concept de *Path dependence* en développant sa dimension spatiale et territoriale dans le cadre d'une analyse régionale en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Elle propose un argumentaire étayé par des travaux d'analyse spatiale et de traitement de données. Cette thèse s'inscrit en effet dans une démarche d'analyse spatiale qui mobilise les méthodes les plus pertinentes à chaque étape de recherche : « *identification du phénomène, affiner sa représentation, produire des explications ; chacune de ces étapes impliquant le recours à la modélisation* » (Sanders L., 2000, p. 20). Il s'agit donc de ne pas privilégier un outil à un autre, mais de choisir en fonction des besoins, du type de données, de la démonstration souhaitée, des

[1] Taleb définit les *Cygnes Noirs* comme des événements présentant les trois caractéristiques suivantes : la rareté de l'événement (aberration statistique), un impact extrêmement fort et une prévisibilité rétrospective (explication de l'événement après sa survenue, le rendant par la suite prévisible).

hypothèses, des mesures, et des différentes étapes de travail, l'outil et la méthode les plus appropriés parmi tous ceux présents dans la boîte à outils du géographe. Cette démarche répond à l'exigence d'une construction de faits dans le cadre d'une démarche scientifique pour traiter les hypothèses suivantes.

Une première hypothèse consiste à dire qu'il est très probable que la transition énergétique n'annonce pas de changement radical dans l'évolution des structures spatiales et territoriales, mais plutôt une optimisation de celles-ci, une optimisation progressive des infrastructures énergétiques (*en théorie* jusqu'à la substitution des énergies fossiles par les énergies renouvelables), une optimisation des politiques énergétiques, une optimisation marginale de la consommation. Ces optimisations marginales relèveraient de mécanismes d'évolution auto-renforçants qui s'inscrivent dans la durée et dans l'espace (Martin, 2010 ; Essletzbichler, 2012). Si elles ne sont pas, selon cette hypothèse, susceptibles de générer de nouvelles trajectoires fortes, elles nécessitent cependant pour se produire d'ouvrir des degrés de liberté, c'est-à-dire de déverrouiller des situations actuelles. Ces espaces de déverrouillage possible pourraient en théorie générer des trajectoires de changements plus radicales, mais ils présentent des coûts et des risques tels qu'ils ne paraissent pas pouvoir s'ouvrir en totalité. C'est pourquoi une seconde hypothèse, ou plutôt une sous-hypothèse à la première, consiste à dire qu'il existe une certaine probabilité pour que ces situations évoluent soit radicalement si les coûts sont acceptés, soit marginalement si une partie seulement de ces coûts sont acceptés.

Cet argumentaire est structuré par trois chapitres, du quatrième au sixième.

Le quatrième chapitre vise à montrer, illustrer et évaluer le rôle des structures spatiales actuelles dans l'évolution des systèmes énergétiques en prenant l'exemple de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Une présentation du terrain d'étude et de son profil énergétique illustre des éléments de contexte spécifiques à ce cadre régional et constitue la base d'une analyse spatio-temporelle du développement récent des énergies renouvelables. Cette analyse montre comment les productions d'énergies renouvelables relèvent d'un processus de *Place dependence* ou dépendance au lieu, et de *Path dependence*. Ce chapitre présente les structures spatiales existantes comme un élément déterminant en partie la localisation de nouveaux sites potentiels de production d'énergie d'origine renouvelable.

Le cinquième chapitre montre comment l'analyse de la territorialisation de l'énergie dans l'espace régional Provence-Alpes-Côte d'Azur révèle des capacités et des opportunités de mise en œuvre locale de la transition énergétique différenciées susceptibles de générer ce qu'on peut qualifier de développement durable inégal. La territorialisation est présentée dans ce chapitre comme un élément de *Path dependence* où les décisions passées en matière de planification énergétique peuvent induire des trajectoires allant dans le même sens et desquelles il paraît difficile de se détacher.

Le sixième chapitre analyse enfin comment la transition énergétique convoque une réévaluation de la forme, de la fonction et de la valeur de certaines structures socio-spatiales en particulier celles des espaces urbains et périurbains. L'exemple de la région Provence-Alpes-

Côte d'Azur permet de s'interroger sur la capacité réelle de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme à agir dans le domaine de la maîtrise de la consommation d'énergie, face à des dynamiques territoriales maintenant anciennes et dont le résultat dans l'organisation des territoires fait contrainte. Ce chapitre présente les structures socio-spatiales comme un élément de *Path dependence* où les dynamiques qui les concernent peuvent être en contradiction avec le projet de transition énergétique.

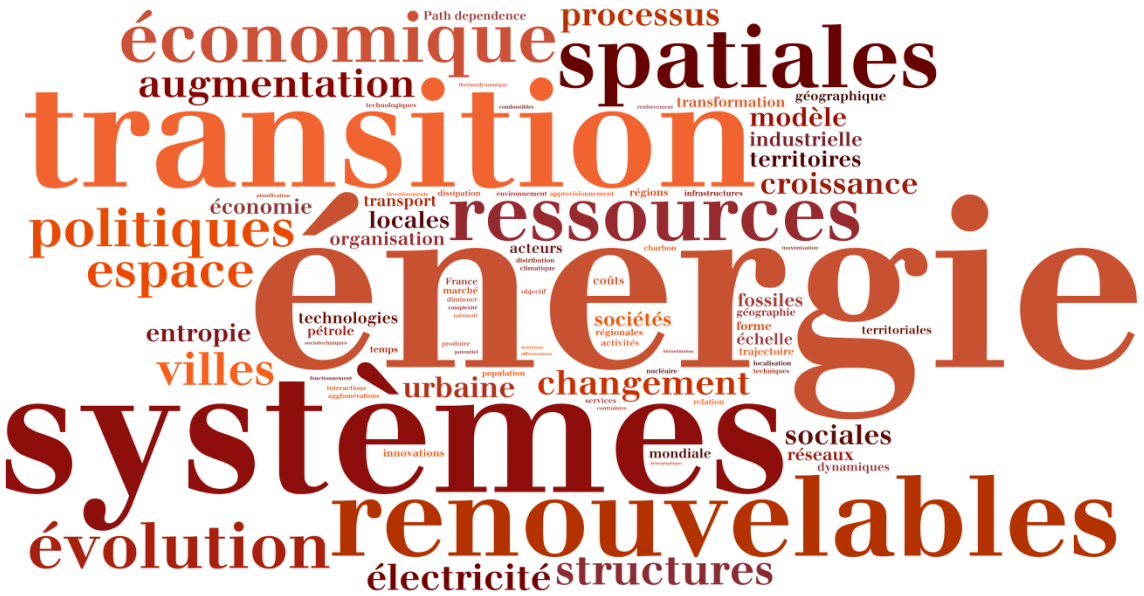
Chaque chapitre et chaque partie sont précédés d'un nuage de mots[2] représentant la fréquence d'occurrence des 50 termes les plus cités dans le texte. Ils présentent en cela un résumé synthétique des parties et chapitres.

Cette thèse qui a bénéficié du soutien financier du Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur s'est aussi déroulée en partenariat avec sa Direction du développement soutenable. Dans le cadre de ce partenariat, la plupart des résultats contenus dans la deuxième partie de la thèse ont été présentés lors de réunions de travail avec les services du Conseil Régional, de l'ADEME, de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement PACA (DREAL), et les agences d'urbanismes[3] de la région PACA, pour alimenter les réflexions et fournir une expertise lors de la phase dite de *territorialisation* du Schéma Régional Climat Air Énergie. À la suite de ces échanges, les résultats des chapitres 5 et 6 portant sur la fiscalité locale de l'énergie et sur la consommation d'énergie des espaces périurbains ont été présentés publiquement dans un séminaire sur la transition énergétique à destination des élus locaux organisé par l'Agence d'Urbanisme Rhône Avignon Vaucluse. Des résultats sur les retombées fiscales des énergies renouvelables au profit des collectivités territoriales ont aussi été intégrés dans un rapport d'étude portant sur les impacts économiques du SRCAE réalisé par les bureaux d'étude *Acteon* et *Energies Demain* pour le compte du Conseil Régional PACA et du Conseil Départemental du Var.

Enfin, les travaux présentés dans cette thèse ont donné lieu à plusieurs publications dans des revues à comité de lecture dont les références sont rapportées en bibliographie.

[2] Réalisés avec l'application Tagxedo avec les paramètres suivants : emphasis 120%, words 50, tightness 100%
[3] Agence d'Urbanisme Rhône Avignon Vaucluse (AURAV), Agence d'Urbanisme du Pays d'Aix (AUPA), Agence d'urbanisme de l'Agglomération Marseillaise (AGAM), Agence d'Urbanisme De l'Aire Toulonnaise (AUDAT).

Partie 1
La transition énergétique : objet et processus géographique



Introduction de la première partie

Cette première partie vise à définir la transition énergétique comme un objet et un processus géographique. Elle déroule trois chapitres qui abordent successivement l'implication de l'énergie dans l'évolution des systèmes spatiaux, les ambiguïtés inhérentes à l'émergence d'un nouveau modèle énergétique, et les enjeux spatiaux et territoriaux de ce nouveau modèle.

Après avoir précisé les éléments de définition nécessaires à la bonne compréhension de la suite de la thèse, cette partie rappelle à quel point les sociétés modernes dépendent d'un apport croissant en énergie et que cette dépendance est telle que l'énergie nous paraît acquise. Elle précise également comment la géographie traite de l'énergie depuis les années 1950 jusqu'à nos jours et définit le rôle de l'exploitation des ressources énergétiques dans la structuration de l'espace géographique. Pour aller plus loin dans l'analyse de l'implication de l'énergie dans l'évolution des systèmes spatiaux, les concepts d'entropie et de structures dissipatives sont mobilisés pour montrer comment les structures spatiales correspondent à une certaine optimalité de maximisation de la circulation des flux qui les traversent. Ces structures apparaissent et se maintiennent grâce à un apport permanent d'énergie dans une logique de production maximale d'entropie. L'occupation de l'espace par les activités humaines et l'intensification des formes de peuplement sont considérées de ce point de vue comme une conséquence de la dégradation progressive d'énergie au cours du temps, d'une production d'entropie.

La transition énergétique est ensuite examinée au travers de ses contradictions, de ses ambiguïtés et de sa complexité. La transition énergétique repose en effet sur l'interrogation et la remise en cause de multiples aspects des évolutions sociale, économique, politique et technologique alimentées par la croissance mondiale depuis plusieurs siècles. Cet examen des fondamentaux à la base de l'activité sociale et économique n'a pas été envisagé à une telle échelle jusqu'à aujourd'hui, même si les externalités négatives des modes de développement des sociétés sont connues et largement diffusées depuis plusieurs décennies (Meadows, 1972).

La mise en œuvre de nouveaux modèles énergétiques suggère en effet des évolutions sociales et territoriales importantes. L'évolution des systèmes énergétiques interroge ainsi de plus en plus les sciences humaines et sociales qui cherchent à mettre en évidence les changements sociaux et politiques induits par ces mécanismes et processus de transition. Les sciences humaines analysent la transition énergétique comme une question sociale en reliant la matérialité des systèmes énergétiques (flux, ressources, infrastructures) à des questions sociales

et politiques (dispositifs d'acteurs, choix dans les politiques urbaines, conflits d'usage, accès à l'énergie, structures sociales, etc.), et développent leurs observations à des niveaux d'échelles variés (Labussière, Nadaï, 2015). Cette approche de la transition énergétique s'appuie sur l'analyse des processus de territorialisation de l'énergie, des systèmes énergétiques et donc de leur transition supposée. Elles s'inscrivent largement dans les champs de l'analyse économique, politique et sociologique et ont parfois tendance à conférer aux structures spatiales et territoriales, et plus largement à l'espace, le simple rôle de support. Pourtant les systèmes énergétiques sont intégrés dans des systèmes spatiaux et territoriaux spécifiques. Le rôle des spécificités des lieux, l'implication des contextes géographiques et l'importance des relations multi-scalaires dans les processus de transition sont des questions essentielles dans une perspective géographique et expliquent pourquoi les territoires dans toute leur diversité (villes, régions, etc.) sont devenus des cas d'étude importants dans les travaux portant sur la transition énergétique (Coutard, Rutherford, 2010 ; Essletzbichler, 2012 ; Rocher, 2013 ; Bolzon *et al*., 2013 ; Rutherford, Coutard, 2014).

Chapitre 1
L'énergie dans l'évolution des systèmes spatiaux

L'exploitation et la transformation des ressources énergétiques par les sociétés exercent une influence sur leur développement économique et sur l'évolution de leurs structures spatiales et territoriales. Les systèmes énergétiques ont souvent contribué à des changements spatiaux et territoriaux, comme ceux qui ont accompagné le passage du bois et de la puissance de l'eau vers la puissance thermique du charbon au XIX^{e} siècle, ou du charbon vers le pétrole au cours du XX^{e} siècle (Smil, 2010 ; Kander, Malanima, Warde, 2013). L'augmentation de la consommation et de la production d'énergie au cours du XX^{e} siècle a été facilitée par la mise à disposition d'une énergie bon marché basée sur les combustibles fossiles. Les énergies fossiles permettent de répondre aujourd'hui à 80% des besoins énergétiques mondiaux. Mais la forte croissance attendue de la population mondiale au cours du XXI^{e} siècle conduira nécessairement à une diminution des stocks et à l'augmentation des besoins énergétiques (Solier, Trotignon, 2010). Le recours aux combustibles fossiles devra être limité d'une part pour des raisons écologiques définies dans l'ensemble des sommets mondiaux sur le climat et, pour des raisons d'épuisement physique et économique d'autre part.

Ce premier chapitre apporte des éléments de définition et de contexte général et resitue les grands débats actuels sur les impacts sociétaux de la crise énergétique. Il révèle comment la géographie s'est approprié ce champ de recherche par la mise en évidence de l'implication de l'énergie dans les évolutions spatiales. Le concept d'entropie est mobilisé pour questionner les limites d'un modèle de développement qui a contribué à la mise en place des organisations spatiales actuelles des activités humaines.

1 L'énergie, carburant des évolutions spatiales

Sans l'énergie chimique que nous apportent les aliments que nous mangeons et l'air que nous respirons, l'humanité n'existerait pas. Les sociétés modernes dépendent d'un apport croissant en énergie. Cette dépendance est telle que l'énergie paraît définitivement acquise. Pourtant une tempête détruisant des lignes hautes tensions ou des plates-formes pétrolières peut affecter l'économie d'une région entière. L'énergie nécessite production, transport, distribution et gestion des nuisances pour en tirer tous les bénéfices. Renouvelables ou non, les sources d'énergie ne sont pas distribuées uniformément à la surface du globe, et les espaces de consommation diffèrent souvent des espaces de production. La maîtrise progressive des sources d'énergie a permis l'expansion démographique de l'humanité. Mais l'énergie reste difficile à définir, car nous n'en ressentons que les effets sous forme de travail, de chaleur et de service.

1.1 De la physique générale aux évolutions sociétales, l'énergie au cœur des transformations

1.1.1 Travail, puissance et modification des systèmes matériels

En physique, travail et chaleur constituent deux formes équivalentes de transfert d'énergie, et selon Einstein, l'énergie et la masse sont deux aspects d'une même réalité. L'énergie est définie communément comme l'apport nécessaire à un système matériel pour lui faire subir une transformation (déplacement, modification de la forme ou changement de structure). L'énergie produit un travail mécanique, de l'électricité ou de la chaleur. L'énergie est donc une propriété d'un système capable de modifier d'autres systèmes. Elle est la grandeur physique nécessaire pour effectuer un travail. La physique définit le travail comme l'effort nécessaire pour déplacer un poids. La notion de poids est celle de la force exercée sur une masse. Pour déplacer la masse d'un corps, il faut de l'énergie. L'énergie est donc le déplacement d'une force sur une certaine distance. La quantité d'énergie est le produit de l'intensité de ce travail (la puissance) par le temps durant lequel cette puissance est fournie.

1.1.2 L'énergie dans tous ses états

L'énergie dont nous disposons est en fait contenue dans les ressources naturelles, mais celles-ci ne peuvent généralement pas être utilisées sous leur forme initiale. Elles nécessitent donc une transformation. Associer une forme à l'énergie revient à définir le type d'interaction mis en jeu lorsque la matière se transforme. L'énergie peut être alors : mécanique (moteur, muscle, aptitude à engendrer un mouvement), thermique (quantité de chaleur d'un corps), cinétique (engendrée par le mouvement), chimique (nourriture, carburant, combustion, biomasse), lumineuse ou rayonnante, nucléaire (concentrée dans les noyaux d'atomes radioactifs), électrique (produite par le mouvement de particules chargées) (Figure 1).

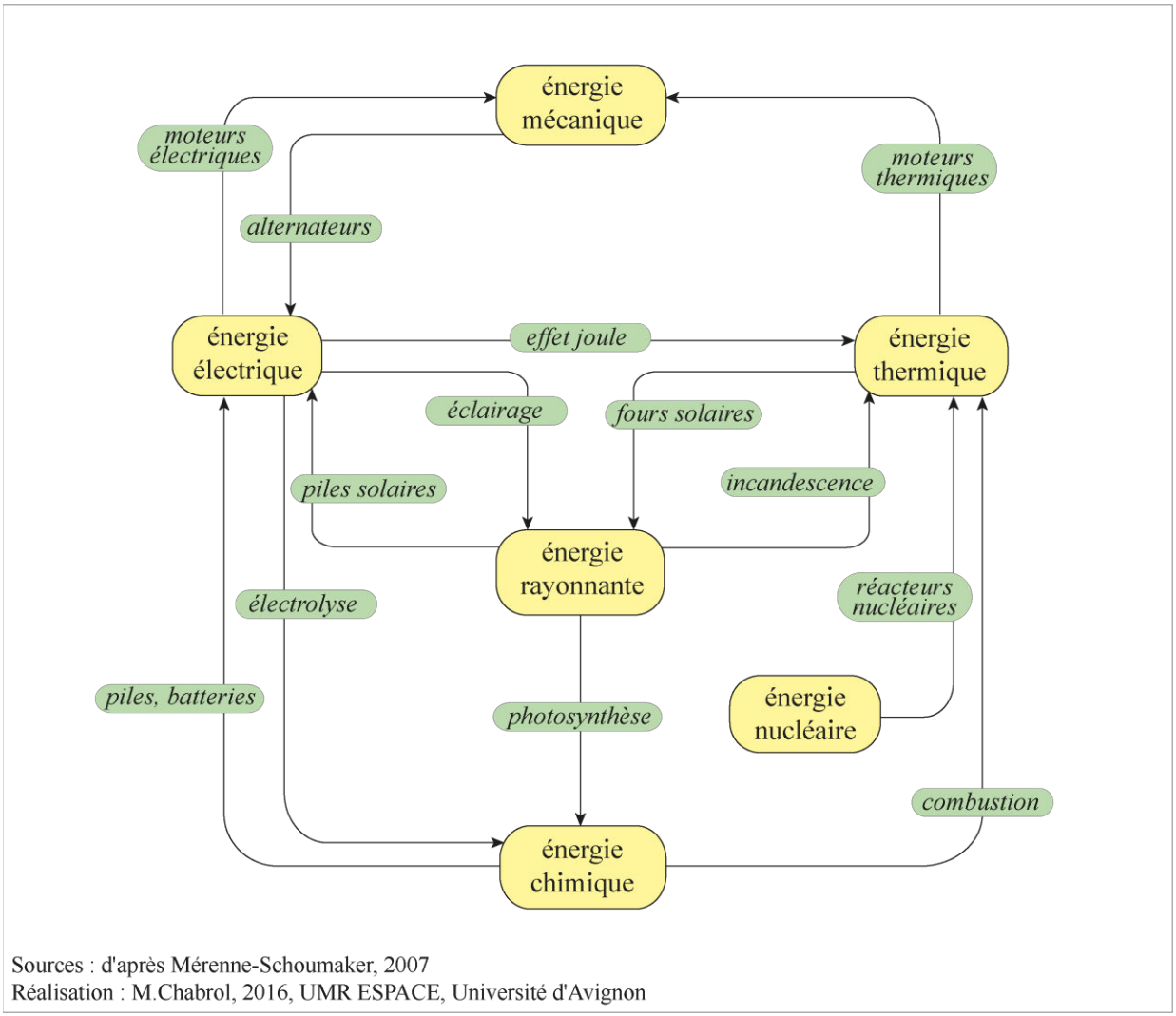


Figure 1. Formes d'énergie et transformations

En physique, on mesure l'énergie en joule, soit la mesure du travail nécessaire pour soulever de 10 cm une masse de 1 kg. À l'échelle de l'atome, on parle d'électronvolt qui mesure l'échange d'énergie entre molécules lors de réactions chimiques. La puissance représente la vitesse à laquelle l'énergie est produite. La puissance qui produit 1 joule en 1 seconde est un watt ; 1 kilowattheure (kWh) est égal à 3,6 millions de joules. C'est pourquoi en économie et plus largement en sciences humaines, le kilowattheure étant trop petit, on utilise le mégawattheure (MWh) ou les tonnes équivalents pétrole (tep).

Il n'est pas facile de mesurer et de comparer les énergies, car elles n'ont pas toutes le même pouvoir énergétique. Pour les comparer, la tep (tonne équivalent pétrole) est l'unité de mesure imposée aujourd'hui par l'Agence Internationale de l'Energie[4] (AIE). Le tableau 1 présente les taux de conversion en fonction des techniques de production et du type de ressource.

[4] L'Agence Internationale de l'Énergie a été créée par l'OCDE en 1974 suite au premier choc pétrolier. Sa mission est de coordonner les politiques énergétiques des États membres de l'Organisation de Coopération pour le Développement Économique.

Sources d'énergie	Taux de conversion en tep
1 MWh d'électricité d'origine nucléaire	0,2606 tep
1 MWh d'électricité d'origine renouvelable et thermique classique	0,086 tep
1 MWh de gaz de réseau	0,077 tep
1 Tonne de houille	0,619 tep
1 Tonne de lignite	0,405 tep
1 Tonne de Coke	0,667 tep
1 Tonne de Coke de pétrole	0,762 tep
1 Tonne de Butane propane	1,095 tep
1 Tonne de fioul lourd	0,952 tep
1 000 litres de fioul domestique	0,847 tep
1 Tonne de vapeur	0,086 tep

Source : www.iea.org

Tableau 1. Taux de conversion des différentes sources d'énergie en tonne équivalent pétrole

Lorsque l'on évoque des quantités d'énergie, il est indispensable de préciser de quelle énergie il s'agit. La consommation d'énergie nécessite des étapes de transformation que l'on distingue en quatre stades :

- l'énergie primaire (quantité totale produite ou importée)
- l'énergie secondaire (résultant d'une transformation d'énergie primaire)
- l'énergie finale (livrée au consommateur)
- l'énergie utile (celle réellement utilisée).

L'énergie diffère selon l'étape à laquelle on la mesure. L'énergie primaire est celle recueillie directement de la nature (pétrole brut, charbon extrait, chute d'eau, énergie lumineuse, chaleur produite dans le cœur d'une centrale). L'énergie secondaire est l'énergie convertie, l'électricité, le carburant raffiné… L'énergie finale est l'énergie transportée et distribuée, le carburant dans le réservoir, l'électricité au compteur, le gaz au brûleur… Enfin l'énergie utile correspond au besoin final, le chauffage, le déplacement, l'éclairage…). Les étapes de production, de conversion, de transport et de distribution consomment aussi de l'énergie. L'énergie finale représente environ un peu plus de 50% de l'énergie primaire.

Enfin, l'énergie nécessite vecteur et réseau de transport et distribution. Les réseaux sont multi-échelles et arborescents, des arcs longue distance à gros débit, des mailles plus serrées des réseaux nationaux et régionaux jusqu'aux réseaux de distribution locale à débit plus faible. La plupart des organismes qui diffusent des données sur l'énergie traitent les données de production en énergie primaire et les données de consommation en énergie finale. Les sources d'énergie sont multiples et proviennent toutes à la base de ressources naturelles. Elles se

différencient en fonction de plusieurs caractéristiques : leur origine, le caractère renouvelable ou fossile et leurs fonctions et applications (Tableau 2).

Sources	Origine	Caractère renouvelable	Principales applications
Bois et biomasse	Terrestre / sur sol	renouvelable	Chauffage, cuisson, agriculture, force motrice (biocarburant)
Charbon	Terrestre / sous-sol	Fossile / stocks limités	Chauffage, électricité, force motrice
Gaz	Terrestre / sous-sol	Fossile / stocks limités	Chauffage, électricité, force motrice
Gaz de Schistes	Terrestre / sous-sol	Fossile / stocks limités	Chauffage, électricité, force motrice
Pétrole	Terrestre / sous-sol	Fossile / stocks limités	Force motrice, chimie
Schistes bitumineux	Terrestre / sous-sol	Fossile / stocks limités	Force motrice, chimie
Uranium	Terrestre / sous-sol	Nucléaire classique : Fossile / stocks limités Nucléaire nouvelle génération : Fossile / stocks longue durée	Électricité
Géothermie	Terrestre / sous-sol	renouvelable	Chauffage, électricité
Hydraulique	Eaux	renouvelable	Électricité
Éolien	Vent	renouvelable	Électricité
Solaire	Soleil	renouvelable	Électricité, chauffage

Tableau 2. Sources d'énergie, caractéristiques et principales applications

Les ressources énergétiques fossiles représentent 87% de la production mondiale d'énergie primaire (AIE).

- **Le pétrole :** le pétrole est un mélange de matières provenant de la décomposition d'organismes végétaux et animaux qui vivaient il y a plusieurs millions d'années. Cette matière organique s'est déposée au fond des mers ou dans des couches sédimentaires imperméables. Le pétrole nécessite des étapes importantes d'extraction et de transformation pour obtenir un produit utilisable. En revanche, une fois transformé, il permet d'obtenir une énergie très concentrée (14 kWh par kg).
- **Les gaz :** il existe plusieurs types de gaz. Le gaz naturel est un mélange d'hydrocarbures présent naturellement à l'état gazeux dans des roches poreuses. Il est essentiellement composé de méthane. Le gaz de pétrole liquéfié est un mélange

d'hydrocarbures légers stocké à l'état liquide, issu du raffinage du pétrole et du traitement du gaz naturel (éthylène, propylène, propane, butane). Il existe aussi du gaz de coke issu de la distillation de la houille.

- **Le charbon :** c'est un combustible solide résultant de la fossilisation des végétaux. Il n'est pas considéré comme un hydrocarbure, car il ne contient pas d'hydrogène. Il est aujourd'hui le combustible le plus utilisé dans le monde, essentiellement pour produire de l'électricité par transformation en vapeur dans de grandes centrales thermiques.
- **L'uranium :** l'uranium naturel est un minerai à la base de l'énergie nucléaire. Après traitement, l'uranium constitue le combustible à la base des réacteurs nucléaires.

Aujourd'hui, l'essentiel de la production d'énergie renouvelable dans le monde provient des ressources forestières (bois de feu) et de l'hydraulique produisant de l'électricité. Les énergies renouvelables représentent 13% de la production énergétique mondiale primaire. Le terme même de renouvelable est à nuancer. La notion de ressource renouvelable dépend en effet de cycles de vie qui peuvent varier. Cette notion de renouvelable doit prendre en compte la notion de flux pris sur un stock. Mais contrairement aux énergies fossiles dont la constitution du stock a pris des millions d'années, les stocks de ressources renouvelables comme la forêt ou un lac alpin par exemple ont des durées de reconstitution beaucoup plus courtes.

- **Bois-énergie et déchets :** c'est l'énergie renouvelable la plus employée dans le monde, notamment sous forme de bois de feu. Le terme de renouvelable est à nuancer pour la biomasse forestière, car la reconstitution d'une forêt est longue et certaines régions du monde connaissent une déforestation accrue qui empêchent toute projection dans le développement de cette forme d'énergie. En France, les forêts s'étendent et représentent un gisement sous-exploité. Le développement de l'énergie biomasse est pertinent, car cela pose la question d'une meilleure gestion des forêts et des déchets. On parle d'ailleurs souvent de valorisation. La biomasse est essentiellement valorisée pour produire du biogaz ou pour satisfaire des besoins de chauffage individuel ou collectif. Mais il est possible d'envisager l'utilisation de la biomasse pour le fonctionnement de centrales thermiques produisant de l'électricité.
- **L'énergie hydraulique :** elle est une énergie très développée et dont l'efficacité n'est plus à prouver. Il faut s'attendre à un fort développement de l'hydraulique dans les pays émergents et en développement dans les années à venir. C'est l'énergie qui rejette le moins de CO_2, mais cela ne signifie pas qu'elle est sans conséquence sur l'environnement. En effet, le développement de l'hydraulique a un impact paysager fort et peut modifier les écosystèmes et le cycle de l'eau. Il entraîne parfois des déplacements importants de population.
- **L'énergie solaire :** elle concerne deux domaines distincts, la valorisation de la chaleur directe et la production d'électricité. La production d'énergie solaire se décline aujourd'hui entre un usage individuel (chauffe-eau solaire, toiture équipée en

panneaux solaires…) et un usage industriel (parcs solaires au sol et centrales thermodynamiques).

- **La géothermie :** il s'agit d'utiliser la chaleur du sous-sol. On produit de l'électricité par géothermie essentiellement dans des régions à l'activité géologique intense (Italie, États-Unis, Islande…). On distingue deux types de géothermie, l'une dite de haute énergie, pouvant produire de l'électricité (une seule centrale en France, en Guadeloupe), et l'autre dite de basse énergie, ne produisant pas d'électricité, mais pouvant alimenter directement les systèmes de chauffage. Rappelons que le chauffage domestique ou industriel, individuel ou collectif est le premier poste de consommation énergétique (40% de la consommation énergétique en France). L'apport des énergies renouvelables dans ce domaine mérite d'être examiné.
- **L'énergie éolienne :** c'est la source d'énergie produisant de l'électricité qui a le plus progressé ces dernières années. La production et la puissance installée ont été multipliées par 10 en 10 ans. La Chine, les États-Unis et l'Allemagne sont en tête au niveau mondial. En France, le nombre d'éoliennes a été multiplié par 20 en 10 ans (Acket, Vaillant, 2011). Les pouvoirs publics ont largement contribué à cette progression en investissant dans cette énergie.

1.1.3 Un élément moteur dans l'histoire de l'humanité

L'énergie a toujours été une composante essentielle de l'amélioration des conditions de vie (Barré, Mérenne-Schoumaker, 2011). Aux débuts de l'humanité, la chaleur solaire et les calories de la nourriture étaient les seules sources d'énergie. Avec la maîtrise du feu, le bois est devenu la source d'énergie principale pour le rester jusqu'au milieu du XIX^{e} siècle. Ensuite, lors la première industrialisation, le charbon est devenu la principale source d'énergie des pays nouvellement industrialisés. Et depuis la deuxième moitié du XX^{e} siècle, le pétrole y est devenu la première source d'énergie suivie par le gaz, tandis que commence l'exploitation de l'énergie nucléaire et des formes modernes des énergies renouvelables. Les sources se sont de plus en plus diversifiées et ont favorisé une croissance démographique et un développement économique rapide, bien qu'inégal. Jusqu'à la fin du XVIII^{e} siècle, l'expansion de l'humanité s'est faite par l'utilisation de l'énergie humaine, des animaux, du vent, de l'eau et du bois. Cependant, il ne faut pas imaginer pour autant que le développement humain était autrefois « durable ». La surexploitation du bois a entraîné une déforestation majeure en Europe (Allen, 2012 ; Rutter, Keirstead, 2012). L'exploitation de la houille a ensuite redonné à l'humanité une marge de croissance et sauvé *in extremis* les forêts françaises et anglaises (Kander *et al.,* 2013). L'industrialisation a créé une nouvelle demande en énergie, mais a aussi permis l'exploitation de nouvelles ressources. En réalité, l'augmentation de la demande en énergie n'a pas été générée par l'industrialisation. Il s'agit bien d'une consommation accrue d'énergie rendue possible par l'innovation qui a permis l'industrialisation. Innovation technologique et énergie sont intimement liées (Allen, 2012 ; Bouvier, 2012 ; Mumford, 1950). C'est bien la découverte de savoir-faire nécessaires à la transformation de l'énergie qui a permis à l'industrialisation

d'opérer. La production de vapeur assurée par le charbon révolutionna l'industrie et les transports. Puis ce fut la sidérurgie au coke, l'invention de la dynamo et du premier alternateur. La découverte des techniques de transformation du pétrole, déjà utilisé dans l'antiquité, le moteur à explosion et l'essor de la pétrochimie ont fait du pétrole la ressource de la deuxième révolution industrielle. Le pétrole, avec un pouvoir calorifique supérieur à celui du charbon, offrait plus de débouchés par des coûts d'exploitation plus faibles et une plus grande facilité de transport (Mérenne-Schoumaker, 2011). Dans le même temps, la consommation d'électricité connaissait une hausse considérable. Toutes ces évolutions ont favorisé la maritimisation de l'économie, la déconcentration d'activités et de population aux échelles régionale et locale, et plus globalement de nouvelles répartitions d'hommes et d'activités.

1.2 L'énergie comme objet géographique

1.2.1 Héritages et construction d'un objet disciplinaire

L'énergie comme objet d'étude des géographes n'est pas un fait nouveau. En 1961, dans *The Canadian Geographer*, John Chapman présentait la géographie de l'énergie comme un champ de recherche émergent. L'intérêt des géographes pour la thématique énergétique se manifeste dans les années 1950 et 1960 dans les travaux de géographie économique où la question énergétique apparaît sous l'angle de la localisation des ressources (George, 1950 ; Chapman, 1961 ; van Zyl, 1968 ; Chardonnet, 1962).

Les pics pétroliers des années 1970 ont ensuite relancé l'intérêt des géographes pour la question énergétique (Guyol, 1971 ; Curran, 1973 ; Odell, 1974 ; Wagstaff, 1974 ; Cook, 1976). Earl Ferguson Cook, géologue de formation, intègre rapidement à ses recherches le rôle de l'énergie dans la société et place durablement l'énergie au cœur des relations entre l'homme et son environnement dans son ouvrage *Man, Energy and Society* (1976). Ce lien entre la géographie humaine et la géographie physique est à nouveau défendu par Anthony Hoare en 1979 dans son article « *Alternative energies : alternative geographies ?* » publié dans la revue *Progress in Human Geography*, puis réaffirmé plus récemment par Vaclav Smil en 2008 dans son ouvrage « *Energy in Nature and Society : general energetics of complex systems* ». Dans les années 1980, les géographes anglophones commencent à défendre plus explicitement l'apport spécifique des géographes à la question énergétique (Spooner, 1981 ; Wilbanks, 1985 ; Calzonetti, Solomon, 1985). Thomas Wilbanks soulignait dans l'ouvrage *Geographical Dimensions of Energy* dirigé par Frank Calzonetti et Barry Solomon que l'apport d'une approche géographique de l'énergie résidait à la fois dans la capacité du géographe à manier des concepts spatiaux (localisation, structures et dynamiques spatiales, flux, réseaux, interactions spatiales, échelle, répartition, etc.), mais aussi, comme le rappellera Bernadette Mérenne-Schoumaker en 2007, dans sa capacité à développer une démarche systémique indispensable pour analyser et comprendre les territoires.

Les principales approches géographiques de l'énergie pendant cette période (1950-1990) analysent les chaînes d'approvisionnement énergétique, identifient les facteurs de localisation qui expliquent la répartition spatiale du secteur énergétique, évaluent les risques environnementaux et

économiques des installations de production, en particulier dans le contexte du développement de l'énergie nucléaire, cherchent à comprendre la diffusion des technologies de l'énergie et font la cartographie des variations régionales de production, distribution et utilisation de l'énergie. Le point commun fondamental de ces premiers travaux réside dans la volonté de contribuer à une *géographie de l'énergie* comme domaine disciplinaire impliquant un ensemble cohérent de pratiques scientifiques et un cadre épistémologique, théorique et conceptuel commun.

Par la suite, la thématique énergétique intervient de façon transversale dans des travaux portant sur les transports, l'environnement, les villes, le climat, la gestion des ressources, dans une perspective de développement durable. C'est au cours des années 2000, dans un contexte de prise de conscience des crises économique, climatique et environnementale, que les géographes semblent renouer avec cette *géographie de l'énergie*, principalement dans la géographie anglophone où Barry Solomon et Martin Pasqualetti rappellent cet héritage en 2004. Pourtant comme le démontre Kirby Calvert en 2015 (p. 4), « *il n'y a pas de désir perceptible au sein de la communauté des géographes étudiant l'énergie de produire une approche cohérente* » qui pourrait être considérée comme une *géographie de l'énergie*, de la même façon qu'il existe une géographie urbaine, une géographie des transports, une géographie du tourisme, etc. Kirby Calvert précise en effet, en s'appuyant sur les analyses de Derek Spooner (2000) et de Karl Zimmerer (2011), que de nombreux géographes contemporains qui étudient l'énergie ont adopté un pluralisme théorique et conceptuel de manière explicite. Les approches géographiques sur l'énergie s'inscrivent dans des cadres conceptuels, théoriques et méthodologiques très variés issus de disciplines différentes et de plusieurs domaines géographiques. Dans ce contexte, les approches géographiques de l'énergie se situent dans une zone de convergence multidisciplinaire. « *L'énergie est simultanément une entité physique dérivée de processus naturels, une relation sociale dans la mesure où ces entités physiques sont socialement construites comme des ressources grâce à des processus politico-économiques et culturels, mais aussi un facteur de spatialisation des activités sociales et économiques, et le principal médiateur de notre relation avec l'environnement* » (Calvert, 2015, p. 4).

Les géographes de l'énergie travaillent ainsi à structurer leurs recherches à la fois dans une perspective pluridisciplinaire, mais aussi disciplinaire en répondant aux attentes intellectuelles de la communauté scientifique de la géographie. La géographie cherche à comprendre les mises en forme de l'espace, son organisation, ses structures et ses dynamiques, et cette dimension spatiale fait la spécificité des géographes : chercher à rendre l'espace géographique intelligible et, par-là, à rendre les territoires intelligibles malgré leur complexité.
Le rôle des systèmes énergétiques dans la spatialisation des activités économiques et sociales et dans la relation entre l'homme et son environnement est ainsi un point central des approches géographiques de l'énergie (Luten, 1971 ; Cook, 1976 ; Manners, 1971 ; Chapman, 1989 ; Smil, 2008). L'exploitation des ressources énergétiques peut être génératrice de dynamiques spatiales modifiant la structuration de l'espace et en retour l'espace contraint l'usage et l'exploitation des ressources énergétiques en imposant des choix de localisation et d'usage des réseaux.

1.2.2 Énergie, espace et société

Les approches géographiques de l'énergie ont récemment élargi une vision de l'énergie définie comme un bien économique qui s'échange sur les marchés et circule dans les réseaux, ou comme une activité génératrice d'externalités négatives environnementales, par une conceptualisation de l'énergie vue comme une relation sociale. Ces nouvelles approches s'inscrivent largement dans les champs de la géographie sociale, politique et culturelle, et sont nourries par les apports de la sociologie et de l'anthropologie. Elles s'appuient en effet sur l'analyse de l'implication des systèmes énergétiques dans la façon dont les sociétés se comportent dans leur environnement et dont elles le perçoivent. L'historien David Nasaw (1992) décrit par exemple comment l'introduction de l'électricité a modifié notre perception de la ville. Larissa Nicholls et Yolande Strengers (2014) montrent par ailleurs comment le confort thermique modifie notre perception des événements climatiques. Parallèlement, ces approches relient aussi les modes de production et de distribution de l'énergie aux actes sociaux. Les systèmes énergétiques modernes ont permis d'augmenter à la fois le confort et le temps de loisirs, et l'énergie est utilisée par le biais de services relativement improductifs, mais culturellement importants inscrits dans le paysage, par exemple l'éclairage des monuments publics ou l'arrosage des pelouses. Les géographes sociaux, et plus encore les sociologues et les anthropologues ont montré comment la consommation d'énergie est impliquée dans un système de relations socio-matérielles dans lequel les individualités et les normes sociales sont questionnées ou réaffirmées (Zélem, 2010 ; Subrémon, 2014 ; Walker, 2014 ; Zélem, Beslay, 2015). L'intérêt de ces approches est de montrer que l'énergie est un élément influant fortement sur les pratiques de la vie quotidienne, à travers de multiples études de cas dans des contextes spatiaux et territoriaux différents. Ces analyses ont en effet montré que le choix du combustible par exemple et la diffusion de certaines technologies liées à l'énergie relèvent de pratiques sociales multiples et multi-situées qui constituent selon Nicholls et Strengers (2014) « *des imaginaires géographiques normatifs et des identités spatiales* ».

Le concept de *paysage énergétique* a par ailleurs été récemment développé pour traduire la façon dont les différents modes de production, de distribution et d'utilisation de l'énergie modifient les formes matérielles des paysages, mais aussi les perceptions et les représentations que nous en avons (Pasqualetti *et al.,* 2002 ; Nadaï, Van Der Horst, 2010 ; Nadaï, Labussière, 2013). Ces approches démontrent que ces paysages ne sont pas neutres d'un point de vue politique. Bulkeley *et al*. (2014) considèrent les infrastructures énergétiques comme l'expression spatiale des idéologies politico-économiques. Le choix des types et des localisations d'infrastructures énergétiques peut produire (ou reproduire) selon Bouzarovski *et al*. (2012) un développement économique inégal à l'échelle régionale. La production et la distribution d'énergie sont des outils de contrôle de l'espace et de contrôle social. Nous ajoutons que les infrastructures et les réseaux énergétiques sont des outils de territorialisation de l'espace : le déploiement de réseaux façonne et organise les territoires. La façon dont le pouvoir social, économique et politique se manifeste dans l'espace résulte de stratégies de partage, d'intégration

économique et/ou de gestion de l'espace par les acteurs (État, collectivités, entreprises) dans l'exercice de l'autorité politique ou commerciale et industrielle (Brenner, 1999). Cette définition se rapproche de la conception du territoire de Di Méo qui est « *d'abord l'inscription de l'organisation concrète des pouvoirs qui régissent la société dans l'espace géographique qu'il découpe* » (Di Méo, 2014, p. 121). Les systèmes énergétiques déterminent en partie la nature de l'organisation et de la répartition des activités économiques et des échanges, et la façon d'exercer le pouvoir politique. En définissant le communisme comme le pouvoir des soviets plus l'électrification de tout le pays[5], Lénine illustre bien ce lien entre énergie et pouvoir politique. Historiquement, la territorialisation de l'énergie à l'échelle de la nation en France a été un projet politique et économique majeur, et relève d'un système de gestion centralisé et hiérarchisé, lié au dimensionnement de l'infrastructure énergétique nationale, mais aussi à la diffusion des technologies comme partie intégrante des projets politiques de modernisation de la nation (Bouneau, 2006). Après la Seconde Guerre mondiale, l'État a en effet procédé à une vaste campagne de nationalisation et mis en place une politique nationale de l'énergie. En 1946, la loi de nationalisation de l'électricité et du gaz donne le monopole à un exploitant pour la production, le transport, la distribution, l'importation et l'exportation d'électricité et de gaz.

Ces approches géographiques de la relation énergie/société font finalement résonner la pensée de Claude Raffestin (2012), mais surtout celle d'Henri Lefebvre à travers le concept de production de l'espace (Lefebvre, 1974), rappelé récemment par Karplus et Meir dans la revue *Environment and Planning* (2013), et qui s'articule autour des notions d'espace conçu, perçu et vécu. Les approches de Bulkeley *et al.*, (2014) ou de Rutherford et Coutard (2014), qui font référence à la mise en politique des systèmes énergétiques, à leur gouvernance et aux institutions à travers lesquelles l'accès aux ressources et la planification territoriale sont exercés, relèvent du concept d'espace conçu, associé par Lefebvre à l'espace des scientifiques et des aménageurs. Les approches dans lesquelles s'inscrivent entre autres les travaux d'Alain Nadaï, Olivier Labussière et Dan Von Der Horst, qui analysent la façon dont les productions d'énergie renouvelable (particulièrement l'éolien) s'inscrivent dans les paysages, modifient en conséquence la représentation qui en est faite, et révèlent les conflits et problèmes d'acceptabilité qui en résultent, résonnent particulièrement avec le concept d'espace perçu qui représente l'espace matériel socialement produit par les pratiques quotidiennes des individus, et celui d'espace vécu qui représente l'espace de l'échange entre l'homme et son environnement à un moment et en un lieu précis.

Au-delà de l'étude des principes de localisation de la production d'énergie, les géographes ont donc introduit dans leurs analyses le postulat qui consiste à ne pas considérer les systèmes énergétiques uniquement comme un objet matériel, mais comme un objet multiple qui contribue à des processus de production, voire de reproduction de l'espace.

La prise en compte de la dimension sociale des systèmes énergétiques a conduit les géographes à s'intéresser davantage aux acteurs et systèmes d'acteurs (Dubois et Thomann), et par là, à leur contribution au processus de production de l'espace dans une perspective de

[5] Œuvres complètes, tome 31.

développement territorial (Theys, Vidalenc, 2011 ; Durand, Pecqueur, Senil, 2015) et de développement urbain durable (Emelianoff, 2007). L'énergie n'est d'ailleurs devenue que très récemment un objet d'étude en soi, alors qu'auparavant elle était présente de façon transversale dans des recherches portant sur la durabilité des villes et des systèmes de transport par exemple (Criqui, Allaire, 2007). Les approches sont par ailleurs très pluridisciplinaires et s'inscrivent dans le champ large des sciences sociales (Labussière, Nadaï, 2015).

1.2.3 Le rôle de l'énergie dans la modification des organisations spatiales

Comme beaucoup d'industries extractives, l'exploitation des ressources énergétiques fossiles transforme les territoires. L'extraction du charbon au XIX^{e} siècle a favorisé le développement industriel et urbain dans les régions concernées. L'exploitation du charbon a aussi contribué à la localisation d'industries liées (centrales thermiques, sidérurgie) stimulant à leur tour l'implantation d'activités annexes (activités de fabrication, commerces, services, transports) et fixant également un certain type d'habitat. Ces régions ont connu des processus de croissance liée à l'accumulation d'hommes, de capitaux, d'industries, de voies de communication. À contrario, ces espaces organisés à l'origine autour de l'extraction d'une ressource connaissent des difficultés depuis la fermeture des mines et l'arrêt du charbon en France. Dans certains d'entre eux, les pouvoirs publics investissent dans des programmes de reconversion, en structurant autrement l'espace et le territoire afin de les redynamiser.

D'autres types de ressources modifient également leur environnement même si « *de manière générale, le rôle des ressources énergétiques, notamment en matière de localisation des activités et des populations, s'est largement réduit avec le temps* » (Mérenne-Schoumaker, 2002). Les problématiques sont en effet différentes depuis une cinquantaine d'années avec la mondialisation de l'économie des ressources. L'émergence de réseaux d'approvisionnement et de transport à l'échelle mondiale et la spécialisation de certaines régions du monde dans l'économie du pétrole et du gaz sont les éléments d'une organisation spatiale mondialisée des ressources énergétiques. En outre, « *la structure spatiale d'un territoire n'est pas étrangère aux modalités de son approvisionnement* » (Mérenne-Schoumaker, 2007).

Les ports et leur proximité sont des lieux privilégiés de localisation des raffineries de pétrole qui nécessitent autant la proximité des marchés qu'une bonne accessibilité, une proximité aux infrastructures de transport (voies d'eau, réseau routier, voies ferrées, oléoducs), la possibilité de s'approvisionner en eau et en énergie, de vastes terrains aux sols résistants et stables, une situation exposée au vent pour la dispersion des fumées, l'accès aux équipements collectifs comme les collecteurs d'eaux usées, et bien sûr l'accès à une main-d'œuvre qualifiée.

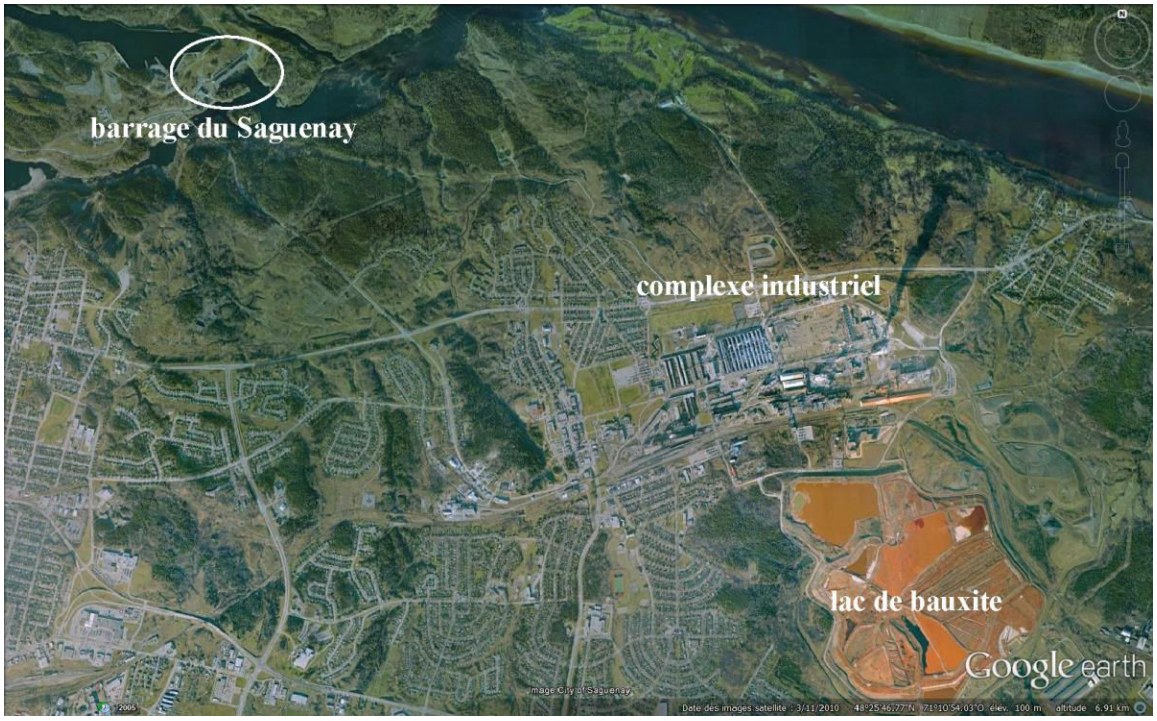
Ces logiques de localisation communes à la transformation de différentes sources d'énergie (pétrole, gaz, nucléaire, charbon) sont parfois à l'origine de vastes complexes industriels qui favorisent les économies d'échelle.
On peut citer en l'occurrence les grands centres pétrochimiques européens comme Fos-sur-Mer

où « *l'opération d'aménagement de la ZIP ne s'implante pas dans un milieu géographique vide d'activité* » (Michel, 1994). Les structures spatiales héritées orientent ainsi les choix de localisation. Dans l'estuaire du Rhin à Rotterdam, l'importation de pétrole a contribué à faire de cette ville l'un des nœuds majeurs d'un réseau mondialisé, mais s'inscrit aussi dans l'histoire de l'empire marchand des Hollandais. Selon le même principe, Roger Brunet définit la géographie de l'énergie en France par une concentration de la production sur les axes majeurs et une dissymétrie confirmée du territoire (Brunet, 2001). Sur la carte des localisations énergétiques de *Transports et énergie* dans le volume 11 de *L'Atlas de France*, apparaît nettement un axe basse-Seine-Paris-bas-Rhône, avec un élargissement autour de Paris, un axe vers le nord et un axe Nantes-Lorraine. La géographie française de l'énergie s'appuie très nettement sur une organisation spatiale ancienne centralisée par Paris. Les localisations énergétiques se concentrent dans les espaces les mieux équipés et les plus denses. À proximité relative des grands foyers de consommation, les espaces de la production énergétique contribuent à renforcer les grands déséquilibres du territoire métropolitain et les disparités régionales et confortent le poids des axes de transport. Malgré les possibilités d'exploitation du gaz en Aquitaine et dans tout le Sud-Ouest qui auraient pu entraîner un développement industriel dans cet espace périphérique du territoire, la tendance a été de s'appuyer sur les structures existantes.

Jusqu'au milieu du XX^{e} siècle, le pétrole n'avait pas véritablement donné naissance à des complexes urbains et industriels sur les lieux d'extraction, contrairement au charbon. Cette ressource n'est pas utilisable en l'état. Elle nécessite des étapes de transformation coûteuses et d'importants investissements financiers ; ce qui implique un marché organisé en fonction de la demande des pays développés. Le pétrole brut est par ailleurs facile et peu cher à transporter. Pour ces deux raisons, les raffineries d'hydrocarbures se sont localisées près des lieux de consommation qui diffèrent fortement des lieux de production, jusqu'à s'inscrire dans l'exacerbation des rapports de dépendance, autant entre les pays du Nord et du Sud, que vis-à-vis des ressources fossiles. Les pays producteurs comme le Mexique, le Venezuela ou l'Algérie ont cherché à utiliser les ressources de leurs hydrocarbures pour financer leur développement économique et augmenter leur compétitivité (Cf. Discours du président algérien Boumediene à l'ONU en 1974). Dans des cas spécifiques, l'exploitation du pétrole a pu agir sur les organisations spatiales en questionnant les rapports centre-périphérie comme en Sibérie occidentale (Marchand-Vaguet, 2005) et en favorisant l'intégration des hinterlands comme en Amérique australe (Carrizo, Velut, 2005) ou au Cameroun (Ndjambou, 2005).

Dans les pays développés en revanche, le pétrole et le gaz ont suscité peu de complexes industriels. On peut même dire que le recours massif aux énergies fossiles et à l'électricité, devenues accessibles et bon marché, a littéralement libéré les entreprises des contraintes de localisation. Les vrais complexes créés par l'hydroélectricité sont également rares même s'il existe quelques exemples. La ville industrielle d'Arvida au Québec a été spécifiquement créée à partir de 1925 par et pour les besoins de la compagnie Alcan et de l'implantation de son usine de production d'aluminium (Figure 2). La compagnie industrielle gère de fait une bonne partie des services de la ville (urbanisme, services de santé, éducation, sports et loisirs) jusqu'à la Seconde

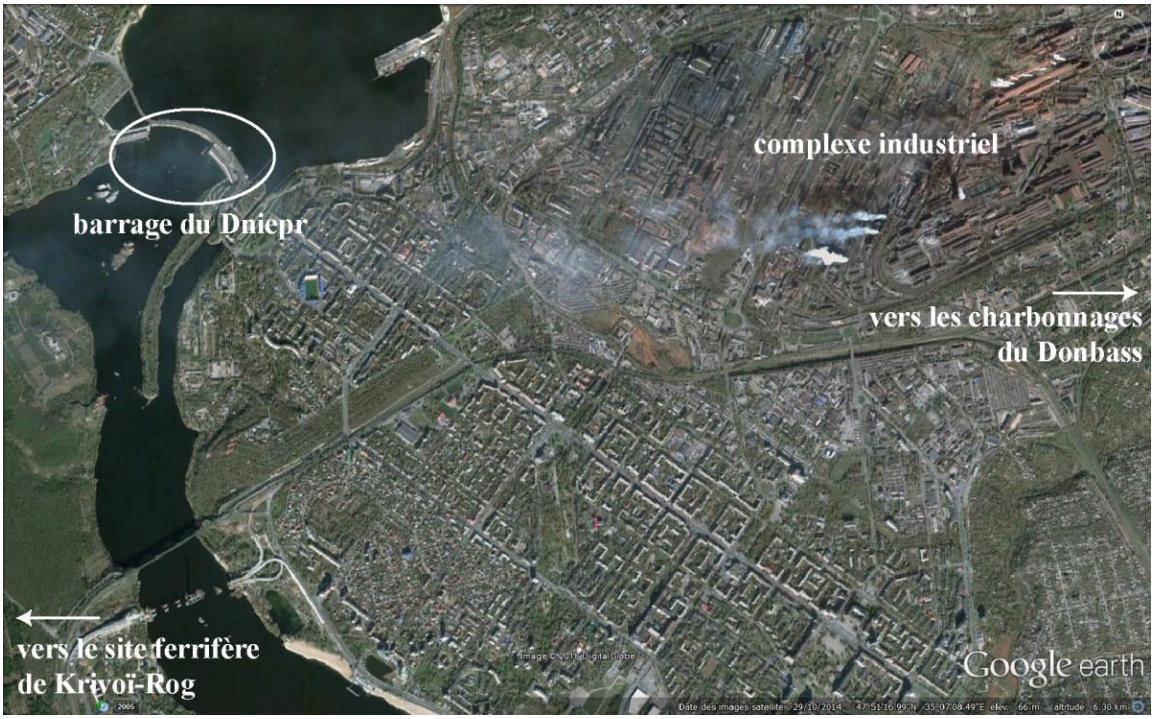
Guerre mondiale. L'électricité représente une part importante du prix de revient de l'aluminium et le moyen le plus rentable de produire l'électricité reste, encore aujourd'hui, la force hydraulique (Moisset, 1972). Cela implique la nécessité pour « *toute grande usine d'aluminium de s'établir à proximité d'une source abondante d'énergie hydroélectrique* » (McGuire, Sarrazin, 1963, p. 6). Dans ces conditions, la compagnie Alcan est rapidement devenue propriétaire des droits d'exploitation de la rivière Saguenay pour en exploiter tous les potentiels.



Sources : Google earth, 2016

Figure 2. Ville d'Arvida, Québec : barrage hydroélectrique et complexe industriel

La ville de Zaporojia en Ukraine est un autre exemple (Figure 3). Profitant de sa situation à mi-chemin entre les charbonnages de la région du Donbass à l'est et le site ferrifère de Krivoï-Rog à l'ouest, la ville de Zaporijia devint un centre industriel de première importance dont les activités furent stimulées par l'aménagement de la centrale hydroélectrique du fleuve Dniepr, entrée en production en 1932.



Sources : Google earth, 2016

Figure 3. Ville de Zaporojia, Ukraine : barrage hydroélectrique et complexe industriel

L'hydroélectricité peut également contribuer à des transformations importantes de l'espace simplement en permettant d'électrifier de nouveaux espaces. On peut citer cette fois le cas de nombreuses régions de Chine ou encore le barrage de Ouarzazate au Maroc qui ont permis d'apporter l'électricité dans des régions qui en étaient dépourvues. L'électrification de l'espace le rend plus attractif et s'accompagne toujours d'une croissance urbaine et d'une modification des structures spatiales. L'électrification des espaces a d'ailleurs été dans l'histoire un vecteur innovant de modernisation du territoire. En France, « *l'électrification rurale fut le thème majeur de la modernisation des campagnes dans l'entre-deux-guerres.* » […] À cette période, *« les réseaux de distribution d'électricité dressent une géographie régionale cohérente des lacunes des réseaux basse tension. Ils dessinent les contours d'un grand vide énergétique dans la France de l'Ouest et du Centre qui a largement marqué les réflexions sur l'aménagement du territoire après le second conflit mondial »* (Bouneau, 2006, p. 88).

Par le caractère monumental des barrages, l'énergie hydroélectrique est à l'origine de modifications évidentes de l'espace géographique. Mais au-delà de la modification du paysage par les ouvrages d'art et les lacs de retenue, l'hydroélectricité a la particularité de conjuguer deux ressources qui ont un impact sur l'organisation spatiale : la gestion de l'eau et la production d'électricité. Les barrages hydroélectriques s'accompagnent d'une gestion de l'eau qui permet l'approvisionnement de foyers de consommation et l'exploitation des sols pour la production agricole.

L'exploitation des ressources énergétiques est donc incontestablement génératrice de dynamiques spatiales fortes modifiant la structuration de l'espace. La localisation des ressources oriente les choix de localisation des activités et l'usage des réseaux.
Dès lors, le développement récent de ressources énergétiques renouvelables peut-il avoir un impact sur les structures et dynamiques spatiales existantes ? Les structures spatiales existantes sont-elles aptes à intégrer des systèmes énergétiques basés sur des énergies renouvelables alors qu'elles ont été optimisées pour l'utilisation des ressources fossiles ? Toutes les régions du monde sont-elles par ailleurs égales devant ce phénomène ? Ne faudrait-il pas privilégier telle ou telle source d'énergie en fonction de toutes les caractéristiques des territoires : le potentiel de ressources renouvelables locales bien sûr, mais aussi les besoins qui se différencient selon le niveau de développement, le besoin de croissance, les capacités techniques et financières à exploiter la ressource ?

Enfin, la question du développement des périphéries du monde paraît essentielle (Kirai, 2009). L'exploitation de ces nouvelles ressources fera-t-elle apparaître de nouveaux espaces de production modifiant l'attractivité des pays émergents ou en voie de développement ? Les ressources renouvelables peuvent-elles devenir un levier pour le développement des périphéries du monde, et ce, dans quelles limites, notamment au regard des situations financière, sociale et politique ? Rappelons que l'augmentation des besoins énergétiques attendue au cours du XXI^{e} siècle vient essentiellement des pays émergents et en développement. Le développement des énergies renouvelables dans les pays du Sud peut-il avoir un impact sur l'attractivité de leurs territoires ? De la même façon que le prix de l'essence est moins cher dans les pays producteurs, le prix de l'électricité pourrait-il également devenir moins cher dans ces pays, augmentant ainsi leur compétitivité économique ?

2 La loi d'entropie et l'évolution des systèmes spatiaux

La thermodynamique du XX^{e} siècle, avec les travaux d'Ilya Prigogine (1968), a montré que dans des systèmes traversés par des flux de matière et d'énergie, peuvent se produire des processus de structuration et d'organisation spontanées. Ces structures s'auto-organisent de façon à maximiser le flux d'énergie qui les traverse. Cela a pour effet de maximiser la vitesse à laquelle l'énergie se dissipe. Ces structures sont par conséquent qualifiées de structures dissipatives. Elles maximisent leur taux de production d'entropie (Chaisson, 2001).

On peut considérer les systèmes spatiaux comme des structures dissipatives. Ils sont en effet traversés continuellement par des flux de matière et d'énergie. Les structures spatiales produites permettent une certaine optimalité pour maximiser la circulation des flux qui les traversent (villes, réseaux, etc.). Ces structures apparaissent et se maintiennent grâce à un apport permanent d'énergie dans une logique de production maximale d'entropie. Leur niveau de consommation énergétique équivaut à une mesure de leur dissipation d'énergie et de leur production d'entropie. L'entropie est en effet pour les physiciens une mesure de la dégradation (ou dissipation) de l'énergie. En thermodynamique, le terme de dissipation est préféré à celui de consommation, car l'énergie *consommée* ne disparaît pas réellement, elle est transformée en chaleur. Les expressions *dissipation*, *dégradation*, *production d'entropie* et *consommation* d'énergie sont en fait équivalentes. L'occupation de l'espace par les activités humaines et l'intensification des formes de peuplement peuvent être considérées de ce point de vue comme une conséquence de la dégradation progressive d'énergie au cours du temps, d'une production d'entropie.

Cette partie propose d'explorer les concepts issus de la thermodynamique pour rendre compte de leur pertinence dans l'appréhension de la crise énergétique et des transitions économiques (Roddier, 2012). Mais il s'agit également d'évaluer la transférabilité de ces concepts à l'analyse des systèmes spatiaux et territoriaux dans une perspective évolutionniste.

2.1 Principes généraux de la thermodynamique et applications en sciences humaines

Il paraît difficile de rédiger une thèse portant sur les questions énergétiques sans consacrer quelques lignes à la thermodynamique. Cette branche de la physique, à l'origine même de la notion d'énergie, étudie le comportement thermique des corps, l'énergie et la transformation des systèmes (Cf. 1.1.1). Mais elle pose surtout les fondements des techniques industrielles modernes et d'une société thermo-industrielle aujourd'hui contestée (Grinevald, 2007 ; Lorius, Carpentier, 2010). De plus, la thermodynamique a ouvert la voie aux théories de l'auto-organisation dont les intérêts pour la géographie ont été démontrés à plusieurs reprises (Pumain *et al.,* 1989 ; Sanders, 1992 ; Dauphiné, 2003), et la *pensée complexe* exprimée par Edgar Morin (1990) s'est largement répandue dans les sciences humaines et sociales.

Les théories des sciences de la complexité comme l'auto-organisation (Nicolis et Prigogine, 1992), l'émergence et la morphogénèse (Turing, 1952), la bifurcation (Thom, 1972), la criticité (Bak, 1999) et la fractalité (Mandelbrot, 1975) s'appuient sur les concepts d'espace, d'échelle, d'interaction, de forme et de structure. De ce point de vue, il est naturel que les géographes se soient emparés de cette approche en y trouvant une opportunité d'enrichissement théorique (Pumain, 1997 ; Dauphiné, 1995, 2003 ; Martin, 2008) et méthodologique (Sander, 1992, 2001 ; Bonnefoy, 2001 ; Frankhauser, 2013). L'intégration dans les années 1960-1970 de la systémique en géographie, puis l'avènement des outils informatiques de modélisation et de traitement de l'information géographique ont alimenté un terreau fertile pour l'introduction de la pensée complexe en géographie.

2.1.1 Entropie et structures dissipatives

La thermodynamique du XIX^{e} siècle a montré que l'énergie utilisée pour produire un travail mécanique ne disparaît pas. Une partie est conservée et une autre est transformée. Par exemple, en soulevant un poids, nous utilisons de l'énergie musculaire. Mais cette énergie n'est pas perdue, elle peut être récupérée en faisant redescendre le poids. En revanche, une partie de l'énergie nécessaire pour soulever ce poids se sera transformée en chaleur. Ce sont les calories brûlées en le soulevant. On dit alors que l'énergie se dissipe. Les physiciens ont constaté qu'une même quantité d'énergie produit une même quantité de chaleur, et cette transformation d'énergie en chaleur est irréversible. Quelle que soit sa forme (Cf. 1.1.2), l'énergie finit toujours par se transformer intégralement en chaleur. Il est cependant possible de convertir la chaleur produite en énergie mécanique (Cf. figure 1), mais cette transformation ne peut pas être totale, car une partie de l'énergie est conservée par le système pour revenir à son état initial. Ces observations sont à l'origine des deux premières lois de la thermodynamique formalisées par Sadi Carnot (1824), la conservation et la dissipation de l'énergie. À la suite des travaux de Carnot, Clausius baptisera du nom d'entropie la quantité d'énergie dissipée par un système au cours de cycles de transformation et qui n'est plus convertible en énergie mécanique. Autrement dit, lorsqu'un système thermodynamique effectue un cycle de transformations réversibles (pour revenir à son état initial), il reçoit autant d'entropie qu'il en fournit. On peut dire dans ce cas que son entropie interne se conserve. Mais lorsque ce système effectue des cycles de transformations irréversibles, son entropie interne augmente. Les échanges radiatifs entre le Soleil et la Terre sont un exemple de cycle de transformation réversible qui permet à la biosphère de produire un travail mécanique (et d'autres cycles de transformations) avec un rendement proche de 100%. Une bouilloire électrique produit à l'inverse des cycles de transformation irréversible. Après avoir été chauffée, l'eau ne rendra pas l'électricité qui aura été consommée pour augmenter sa température. Dans ce cas, la production d'entropie augmente et l'énergie se dissipe de façon irréversible sous forme de vapeur. De ce point de vue, l'augmentation de l'entropie est une caractéristique de l'irréversibilité des transformations.

Les systèmes vivants présents dans l'univers, quelle que soit l'échelle considérée, sont des systèmes ouverts traversés par un flux permanent d'énergie qui alimente des structures en mouvement. L'arrêt de ce flux d'énergie conduirait à la fermeture de ces systèmes, à l'augmentation de leur entropie interne, à l'arrêt des dynamiques et à la disparition des structures. À l'inverse, ce flux d'énergie permet à ces systèmes d'être dynamiques et de dissiper de l'énergie mécanique. Leur entropie interne (à l'intérieur des cycles de transformations) diminue pour augmenter le rendement de l'énergie mécanique produite, et leur entropie externe augmente (l'énergie qui n'est plus convertible à l'issue des cycles de transformations). Le flux d'énergie qui traverse ces systèmes produit des processus de structuration et d'organisation spontanée que Prigogine qualifia de structures dissipatives. L'apparition de mouvements dans l'eau qui bout dans la bouilloire (Cf. exemple du paragraphe précédent) est une forme de structure dissipative.

Depuis quelques années, certains physiciens pensent que les structures dissipatives s'auto-organisent de façon à maximiser le flux d'énergie qui les traverse. Cela a pour effet de maximiser la vitesse à laquelle l'énergie se dissipe. Cette position constitue une troisième loi de la thermodynamique qualifiée de loi de production maximale d'entropie (MEP, Maximum Entropy Production) (Chaisson, 2001). Si cette loi n'est pas encore admise comme un principe général, elle a ouvert une nouvelle voie de recherche en biologie évolutionniste dans l'explication des processus de sélection naturelle. La maximisation de l'entropie externe permet en effet de diminuer l'entropie interne des systèmes. Autrement dit, elle optimise leur fonctionnement, les rend plus efficaces et pérennise leur existence dans les cycles d'évolution.

2.1.2 La loi d'entropie et le processus économique[6]

Pour François Roddier (2012), les premières connexions entre les lois de la thermodynamique et l'économie sont attribuables au chimiste Frederick Soddy (1926) en reliant la monnaie et la richesse à la quantité d'énergie que l'on peut dissiper. Soddy estime en effet que tant que les investissements sont rentables, la dissipation de l'énergie s'accroît et la société s'enrichit. Mais c'est sans aucun doute le mathématicien, devenu économiste par la suite, Nicholas Georgescu-Roegen qui a clairement formalisé l'application des principes de la thermodynamique à l'économie et aux sociétés humaines dans son ouvrage *The Entropy Law and the Economic Process* (1971). Non seulement Georgescu-Roegen révèle les interrelations entre l'économie, la dissipation de l'énergie et la production d'entropie, mais il relie également le problème de l'entropie au problème de la matière dans sa formule « *matter matters too* » (la matière compte aussi) (1977, p. 293). La production d'entropie par les sociétés humaines entraîne selon lui une dégradation irréversible des ressources naturelles, les ressources énergétiques fossiles bien entendu, mais également l'ensemble de la matière extraite et utilisée par les sociétés de façon irréversible (sables, minerais, etc.). Il révèle en cela les contradictions entre la finitude des ressources utilisées par les sociétés et les modèles de développement

[6] Traduction du titre de l'ouvrage de Nicholas Georgescu-Roegen, *The Entropy Law and the Economic Process*, 1971, Harward University Press.

qu'elles adoptent. "*The fact that the economic process consists of a continuous and irrevocable transformation of low into high entropy has some important consequences which should be obvious to anyone willing to descend for a moment from the higher spheres of elucubrated growth models down to the level of elementary facts*" (Georgescu-Roegen, 1971, p. 292). En 1980, Rifkin développe davantage la pensée de Georgescu-Roegen dans une analyse fine de la société et de l'économie des États-Unis. Il termine son argumentaire en lançant un appel pour construire une nouvelle théorie économique intégrant pleinement cette dimension (Rifkin, 1980), appel qu'il relancera en 2012 avec le concept de *troisième révolution industrielle* (Rifkin, 2012). La loi d'entropie s'oppose ainsi à la pensée économique traditionnelle qui définit le processus économique comme un système fermé se suffisant à lui-même par la recherche de l'équilibre entre l'offre et la demande. Pour Georgescu-Roegen, le processus économique est un système ouvert traversé par des flux de matière et d'énergie. Ce qui entre dans le système consiste en ressources naturelles de valeur (valeur d'échange, valeur marchande) et ce qui en sort sont des déchets sans plus aucune valeur économique. Il définit ainsi l'analogie avec la thermodynamique en ajoutant que « *la matière et l'énergie absorbées par le processus économique sont dans un état de basse entropie et elles en sortent dans un état de haute entropie* » (Georgescu-Roegen, 1995, p. 45). Autrement dit, le système économique nécessite de l'énergie libre pour fonctionner et diminuer son entropie interne (c'est-à-dire compenser la perte d'énergie liée à sa seule existence), puis il dégrade cette énergie et augmente son entropie externe. Selon cette conception, l'énergie se présente en effet sous deux états qualitativement différents que l'on définit communément d'énergie libre et d'énergie liée.

Est qualifiée d'énergie libre, l'énergie utilisable sur laquelle l'homme exerce une maîtrise quasi totale. L'énergie chimique contenue dans du charbon est de l'énergie libre, car l'homme peut la transformer en chaleur puis en travail mécanique. Lors de la combustion du charbon, son énergie chimique se conserve, n'augmente pas, ne diminue pas. Mais son énergie libre initiale s'est tellement dissipée sous forme de chaleur, de fumée et de cendres que l'homme ne peut plus l'utiliser. Elle s'est dégradée en énergie liée.

Est qualifiée d'énergie liée, l'énergie inutilisable, l'énergie que l'homme ne peut absolument pas ou plus utiliser. La quantité d'énergie thermique contenue dans l'eau des mers est de l'énergie liée. Les navires ne peuvent pas utiliser cette énergie pour s'y déplacer. Ils sont contraints d'utiliser l'énergie libre d'un carburant ou du vent.

Ainsi d'un point de vue thermodynamique, les sociétés humaines s'auto-organisent en structures dissipatives en puisant dans leur environnement de la basse entropie pour compenser leur perte d'énergie, c'est-à-dire leur production d'entropie. Cet échange leur permet de diminuer leur entropie interne et par conséquent de continuer d'évoluer quantitativement et qualitativement. La loi d'entropie est donc par nature une loi d'évolution qui a deux conséquences majeures.

La première réside dans le fait que l'évolution des sociétés humaines n'est pas un processus réversible. Dans un monde aux ressources infinies, cela ne poserait en définitive aucun problème. Mais l'évolution de nos sociétés est basée sur la recherche permanente de nouvelles sources de basse entropie dans l'environnement, et ces sources sont rares et se raréfient au point que le droit spatial international est aujourd'hui questionné afin d'envisager l'exploitation des ressources minérales des corps célestes (Kerrest, 2016). Barack Obama a ainsi signé en novembre 2015, « l'*US commercial space launch competitiveness act* » (HR 2262) autorisant l'exploitation privée des ressources minérales des corps célestes (Nordqvist, 2015).

La seconde concerne l'augmentation du niveau de complexité des sociétés humaines. En effet selon la loi de production maximale d'entropie, la maximisation de l'entropie externe et la diminution de l'entropie interne des systèmes sociaux leurs permettent d'optimiser leur fonctionnement dans le but de dégrader plus efficacement l'énergie pour augmenter leur rendement. Or les systèmes sociaux augmentent en taille et en complexité proportionnellement à l'augmentation de la consommation globale d'énergie (Haberl, 2002), c'est-à-dire de la production d'entropie externe. Ces systèmes ont atteint aujourd'hui un niveau de complexité tel qu'une augmentation significative de la consommation d'énergie sera nécessaire uniquement pour les maintenir (Tainter, 1988).

Tout cela implique que des quantités très importantes d'énergie libre de basse entropie sont nécessaires pour garantir la pérennité de nos sociétés. Et cette énergie libre ne pourra être que renouvelable. Le terme de renouvelable est à nuancer (Cf. 1.1.2). La notion de ressource renouvelable dépend en effet de cycles de reconstitution de la matière qui peuvent varier considérablement dans le temps (bois, pétrole, etc.).

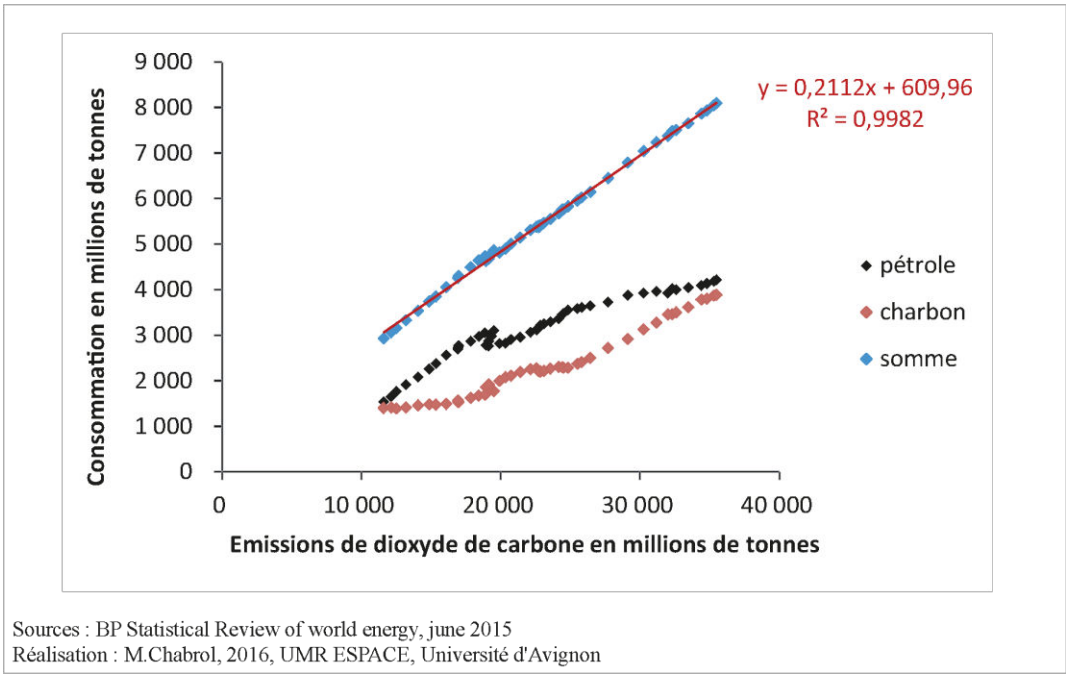
2.2 Loi d'entropie et crise énergétique : un modèle de croissance à bout de souffle

2.2.1 Incertitudes climatiques et implications énergétiques

L'humanité manipule aujourd'hui des quantités d'énergie et de matière qui en font un acteur important à l'échelle des équilibres terrestres et climatiques. Certains chercheurs vont d'ailleurs plus loin en qualifiant d'Anthropocène l'ère géologique qui fait suite à l'Holocène et qui rend compte d'une rupture où l'humanité est devenue une force géologique majeure (Lorius, Carpentier, 2010 ; Bonneuil, Fressoz, 2013). La déforestation, la production de ciment, la combustion d'énergies fossiles sont autant d'activités qui entraînent le rejet de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère, l'un des gaz à effet de serre, phénomène physique qui permet la présence de la vie sur terre (Graphique 1).

Les gaz à effet de serre modifient le bilan radiatif terrestre en piégeant le rayonnement infrarouge dans les basses couches de l'atmosphère et en réfléchissant une partie du rayonnement solaire. La variabilité du climat dépend de perturbations radiatives naturelles (activité volcanique, activité du soleil), anthropiques (rejets de gaz à effet de serre) et de la variabilité interne du système d'échange thermique entre les océans et l'atmosphère (Godard, Tabeaud, 2004). Si les modèles de prévision du climat futur sont à manipuler avec toutes les précautions qui s'imposent à

l'étude des systèmes complexes (stochasticité, imprévisibilité et *Cygnes Noirs*) tels que le climat et l'atmosphère, les observations empiriques des climats passés et des changements actuels ont permis d'établir une part de responsabilité anthropique dans son évolution récente (depuis environ 1900) (Jeandel, Mosseri, 2011). Ces observations montrent un réchauffement d'environ 0,8°c de la température à la surface du globe depuis 1900, une modification du profil vertical de température, une augmentation de l'humidité atmosphérique, un réchauffement plus marqué à la surface des continents que des océans et très prononcé dans l'Arctique, caractérisé par un retrait des zones enneigées et englacées, une augmentation de la fréquence des vagues de chaleur et de l'intensité des précipitations les plus fortes… (IPCC, 2014).



Graphique 1. Consommation d'énergie fossile et émissions de CO_2 dans le monde de 1965 à 2014

Les impacts du changement climatique sont et seront variables selon les différentes parties du monde et affecteront à la fois la capacité de production d'énergie et la demande en services énergétiques. La demande en chauffage pourrait ainsi diminuer de façon globale, mais générer ponctuellement des pics importants de consommation liés à des vagues de froid plus intenses, notamment dans l'hypothèse d'un arrêt du Gulf Stream. À l'inverse, la demande d'énergie pour la climatisation pourrait augmenter. Mais le changement climatique peut aussi en théorie affecter directement les filières de production énergétique. Les impacts sur les débits et les températures des eaux de surface pourraient modifier les capacités de refroidissement des centrales thermiques et nucléaires. Les modifications dans le cycle de l'eau pourraient modifier les capacités de production hydroélectrique, mais aussi les cycles de renouvellement de la biomasse. Il existe par ailleurs de très grandes incertitudes sur l'évolution de la fréquence des événements climatiques extrêmes auxquels sont exposés les systèmes de production énergétiques et les réseaux électriques. Ces éléments augmentent la vulnérabilité des populations, des infrastructures et des réseaux techniques de l'énergie.

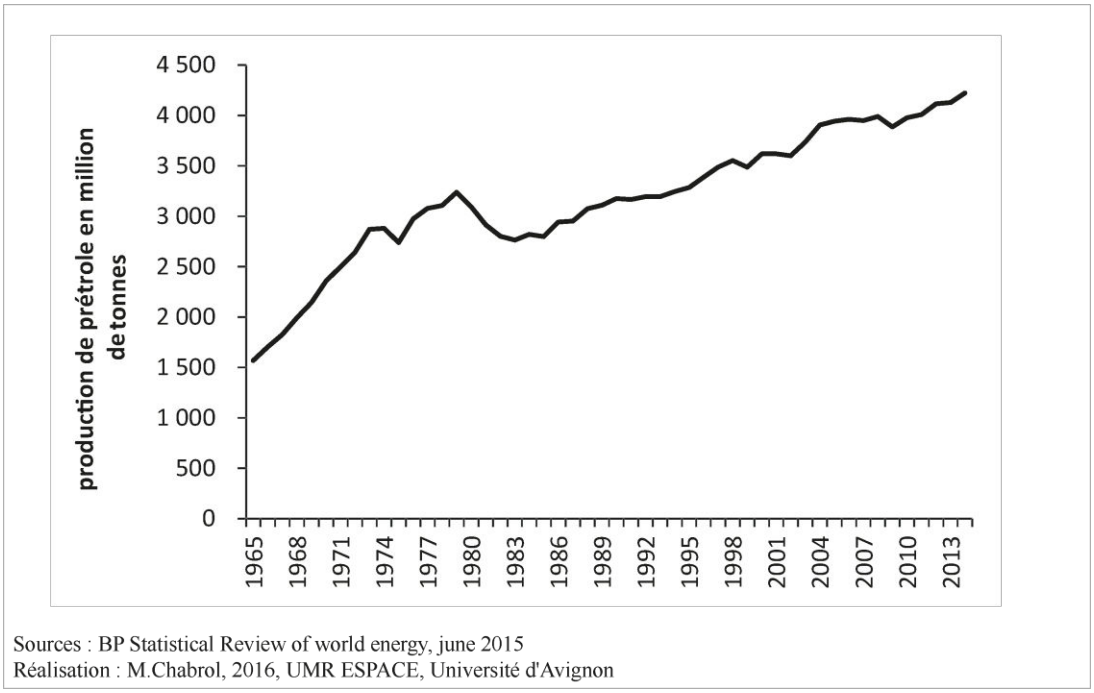
De plus, la production d'énergie représente la source principale d'émissions de gaz à effet de serre qui ne se limitent pas au CO_2 et comptent aussi du méthane, du protoxyde d'azote et, de manière indirecte, de l'ozone et de la vapeur d'eau. C'est dans ce contexte que s'inscrit le développement des énergies renouvelables afin de diminuer l'impact de la production d'énergie sur les émissions de gaz à effet de serre. Mais paradoxalement, la croissance planifiée des énergies renouvelables dans le mix énergétique ajoute des incertitudes en renforçant les besoins de prévisions météorologiques pour optimiser les productions solaires et éoliennes et en augmentant la vulnérabilité des réseaux électriques en situation d'aléa climatique.

Dans ce lot d'incertitudes, il est difficile de considérer le développement des énergies renouvelables uniquement comme une réponse au changement climatique et aux décisions mondiales prises à ce sujet. La crise énergétique actuelle trouve également son origine dans les limites d'un modèle économique basé sur les énergies fossiles dont la question du changement climatique a accentué la nécessité de reconsidération.

2.2.2 Entre épuisement physique et épuisement économique des ressources fossiles

Au début du XIX^{e} siècle, le monde consommait 250 millions de tonnes équivalents pétrole, surtout sous forme de bois, et dans une moindre mesure sous forme d'énergie éolienne et hydraulique. La consommation mondiale d'énergie a doublé entre 1900 et 1950, passant de 1 à 2 milliards de tonnes équivalents pétrole. Elle a ensuite sextuplé pour atteindre 12 milliards de tonnes équivalents pétrole en 2010. De plus, le taux de croissance de la consommation est deux fois plus élevé que celui de la croissance démographique. En 2000, 6 milliards d'individus consommaient 10 milliards de tonnes équivalent pétrole d'énergie primaire. En 2008, 6,7 milliards en consommaient 12,3 (BP Statistical Review, 2015). Alors que la consommation des pays de l'OCDE s'est stabilisée depuis les crises successives des années 2000, celle des pays hors OCDE a presque doublé entre 2000 et 2010. L'avenir énergétique mondial se joue sans aucun doute dans les pays du Sud.

Cette augmentation exponentielle de la demande suscite de nombreux questionnements sur l'état des réserves fossiles et la venue à plus ou moins longue échéance d'un pic à partir duquel la production d'énergies fossiles devrait décliner jusqu'à l'épuisement (Campbell, Laherrère, 1998). Mais l'épuisement des ressources fossiles recouvre des réalités multiples. La mesure d'un épuisement physique des réserves est en fait extrêmement difficile, car cela nécessite une connaissance parfaite et définitive du sous-sol de l'ensemble de la planète en réserves exploitables et potentielles, mais aussi des capacités technologiques et humaines pour pouvoir les exploiter. Si la notion de pic qualifie le moment dans l'exploitation d'un gisement à partir duquel la production commence à décliner, sa généralisation à l'ensemble de la filière est hasardeuse et donne lieu à de nombreuses spéculations souvent empreintes de catastrophisme quant à la survenue d'un pic au niveau mondial. Si la croissance de la production mondiale de pétrole paraît ralentir (Graphique 2), elle cache cependant de fortes disparités régionales.



Graphique 2. Production mondiale de pétrole de 1965 à 2014

Toutes choses égales par ailleurs, le total des réserves mondiales prouvées ne s'élèverait qu'à 240 millions de tonnes (BP Statistical Review, 2015). Mais l'épuisement des ressources fossiles doit être aussi relativisé au regard des coûts d'exploitation et de production de ces ressources par rapport à des substituts possibles, existants ou potentiels. Cette notion d'épuisement représente donc davantage un arrêt de l'exploitation de ces ressources à une échéance encore non déterminée plutôt qu'une disparition complète des réserves par épuisement physique. Sans renier la question de l'épuisement des réserves, ni même celle d'une implication de l'utilisation des ressources fossiles dans le phénomène du changement climatique (cf.supra), il semble aussi toutefois qu'une sortie des énergies fossiles trouve raison dans les problématiques liées à la dépendance des pays développés vis-à-vis de ces ressources, à leur accès et à la sécurité des approvisionnements. Les réserves mondiales d'hydrocarbures sont inégalement réparties et se trouvent dans des régions éloignées des zones de consommation. Les hydrocarbures doivent être importés par la plupart des pays consommateurs. Les réserves sont parfois localisées dans des régions du monde instables sur le plan politique. Il peut résulter de cette situation des risques géopolitiques. Un nombre limité d'acteurs contrôle la majeure partie des réserves, ce qui accentue les monopoles et peut aggraver les problèmes de sécurité d'approvisionnement. Le Moyen-Orient avec 57% des réserves mondiales de pétrole et 40% des réserves de gaz comprend des États dont la situation politique est très instable. Le pétrole est un vecteur de conflits et la rente pétrolière peut bénéficier à des organisations belliqueuses et terroristes. C'est donc bien aussi pour la place qu'il occupe dans l'économie mondialisée que le pétrole est source de risque et non uniquement pour des raisons écologiques. Dans le cas du gaz, les réserves sont moins concentrées. La Russie contient un tiers des réserves et reste le principal exportateur avec le Canada, la Norvège, l'Algérie, les Pays-Bas et l'Indonésie. Les tensions récentes entre la Russie

et l'Union européenne au sujet de l'Ukraine ont montré les risques que peut entraîner une dépendance forte à un fournisseur majeur. La répartition du charbon est plus favorable aux grands pays consommateurs. Cette ressource est très abondante, ce qui permet d'éviter les conflits et des montées des prix spectaculaires. Si on exclut la biomasse traditionnelle difficilement quantifiable, les énergies fossiles représentent 87% de l'approvisionnement total en énergie à l'échelle mondiale. Le pétrole est toujours la première énergie mondiale. Ses atouts sont d'être un liquide facilement transportable, stockable et avec une forte énergie volumique et massique. Le gaz naturel est en progression constante. Le charbon après avoir été supplanté par le pétrole connaît un regain d'intérêt attribuable à la croissance des pays émergents, surtout la Chine avec 49% du charbon mondial. L'hydraulique et le nucléaire ne représentent que 6 et 5% avec une lente croissance. Le solaire et l'éolien ont connu une croissance soutenue de 14% au cours de la dernière décennie, mais leur part dans le mix énergétique mondial se limite à 1,6%.

Les défis énergétiques du XXI^{e} siècle doivent donc être aussi analysés à la lumière des questionnements qui entourent la croissance économique et le développement humain. La dépendance aux énergies fossiles a favorisé la multiplication des échanges mondiaux. Le transfert d'une partie des activités industrielles, en particulier celles qui consomment beaucoup d'énergie, vers les pays émergents a contribué au développement économique rapide de ces pays et se traduit par une augmentation très forte de la consommation d'énergie. La recherche de sites de production industrielle à bas coûts a entraîné une forte croissance de la consommation énergétique des pays émergents. L'énergie est omniprésente dans l'économie et joue un rôle essentiel dans tous les domaines d'activités, industrie, secteur résidentiel-tertiaire et transports. Sans cet apport continu d'énergie, la société ne pourrait plus fonctionner. Nos économies modernes sont donc vulnérables de ce point de vue. L'économie mondiale fait appel à des quantités croissantes de combustibles fossiles. La diffusion de moyens de transport relativement peu coûteux à l'échelle de la planète a favorisé la mondialisation de l'économie qui en retour alimente la demande en énergie. L'augmentation de la consommation mondiale d'énergie est liée en partie à la croissance de l'économie mondiale et à l'émergence des pays du Sud. Mais l'énergie est d'autant plus intégrée aux évolutions économiques que le secteur de l'énergie est lui-même une activité économique mondialisée, moteur de croissance. Le secteur de l'activité énergétique est aussi concerné par une ouverture des marchés à la concurrence mondiale. Cette intégration dans l'économie mondialisée se réalise dans l'exercice de monopoles et de jeux stratégiques menés par des cartels, des oligopoles et de multiples entreprises publiques ou privées de taille variable qui rayonnent à l'échelle mondiale, et dans l'implication forte des États (régulation, grandes infrastructures, appels d'offres) et des organisations internationales (Agence Internationale de l'Énergie).

La dérèglementation appliquée au secteur de l'énergie des pays industrialisés a ouvert la concurrence et entraîné une vague de fusions et acquisitions pour permettre aux groupes industriels de l'énergie d'atteindre des tailles adaptées aux marchés visés. Cela a eu comme conséquence d'accroître la puissance des compagnies internationales et de diminuer le rôle des États. Ce mouvement s'est d'abord déroulé dans le secteur pétrolier (Total-Fina-Elf…), puis

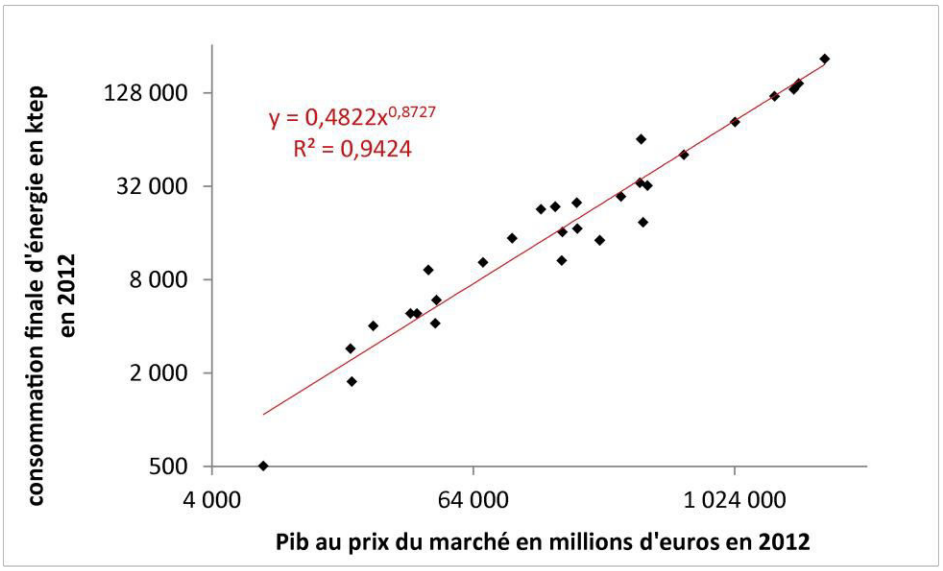
dans le secteur de la production d'électricité (E.ON, Suez, EDF…), mouvement qui se poursuit aujourd'hui (GDF-Suez devenu Engie). La mondialisation de l'économie a renforcé la dépendance vis-à-vis du pétrole. L'énergie est un secteur majeur de la croissance économique mondiale et les investissements dans les infrastructures énergétiques sont souvent utilisés pour créer des revenus et des emplois dans le cadre de programmes de relance économique.

Mais si l'impact de l'énergie sur le développement économique et la croissance est bien réel, la relation inverse entre l'énergie et le développement est bien plus problématique. Il faut comprendre en cela l'influence exercée par la croissance économique et le développement humain sur la demande énergétique. Si on a pu en effet observer que l'économie mondiale supportait relativement bien l'augmentation du prix de l'énergie, une rupture dans les approvisionnements fossiles provoquerait une crise majeure. Nous sommes en effet aujourd'hui confrontés au risque de ne pas pouvoir répondre à la demande future en énergie. La consommation énergétique augmente deux fois plus vite que la croissance démographique. La consommation a évolué en un siècle au rythme annuel moyen de +2,3%.
Croissance démographique et augmentation du niveau de vie entraînent une croissance régulière de la demande énergétique. Les grandes prospectives énergétiques mondiales de l'Agence Internationales de l'Énergie, du Conseil Mondial de l'Énergie, de la Commission européenne ou encore du Département de l'énergie américain sont convergentes pour les scénarios tendanciels. Ces prospectives estiment que la population mondiale sera comprise entre 9 et 10 milliards d'habitants en 2050, que le PIB sera multiplié par 4 et que la consommation sera multipliée par 2 soit entre 20 et 22 Gtep (IEA, 2015).

Une croissance du PIB implique une augmentation de la consommation énergétique. La figure 4 décrit cette corrélation en Union européenne en 2012. Cette relation suit une loi de puissance et montre bien que l'économie est un processus d'auto-organisation de structure dissipative. Ce processus conduit les sociétés à maximiser leur dissipation d'énergie pour augmenter leur niveau de richesse, c'est-à-dire augmenter le rendement de l'énergie mécanique pour produire des biens matériels.

Cette relation cache par ailleurs des disparités régionales. La relation entre le PIB et la consommation d'énergie est plus complexe et révèle des cas particuliers en Europe. Dans certains pays, une consommation accrue d'énergie ne conduit pas nécessairement à une augmentation de la richesse, et inversement. La carte des résidus présentée dans la figure 4 illustre ces spécificités régionales en Europe. Les États qui ont des résidus positifs élevés surconsomment par rapport à leur niveau de richesse et les États qui ont des résidus négatifs importants produisent plus de richesse avec moins d'énergie. Cette observation est révélatrice de l'efficacité énergétique des économies nationales. La Pologne a besoin de consommer davantage d'énergie pour alimenter sa croissance économique, alors que la Norvège arrive à produire plus de richesse avec moins d'énergie.

Les politiques énergétiques nationales cherchent en effet à réduire l'intensité énergétique de l'économie, mesurée par le rapport entre la consommation d'énergie et le PIB.



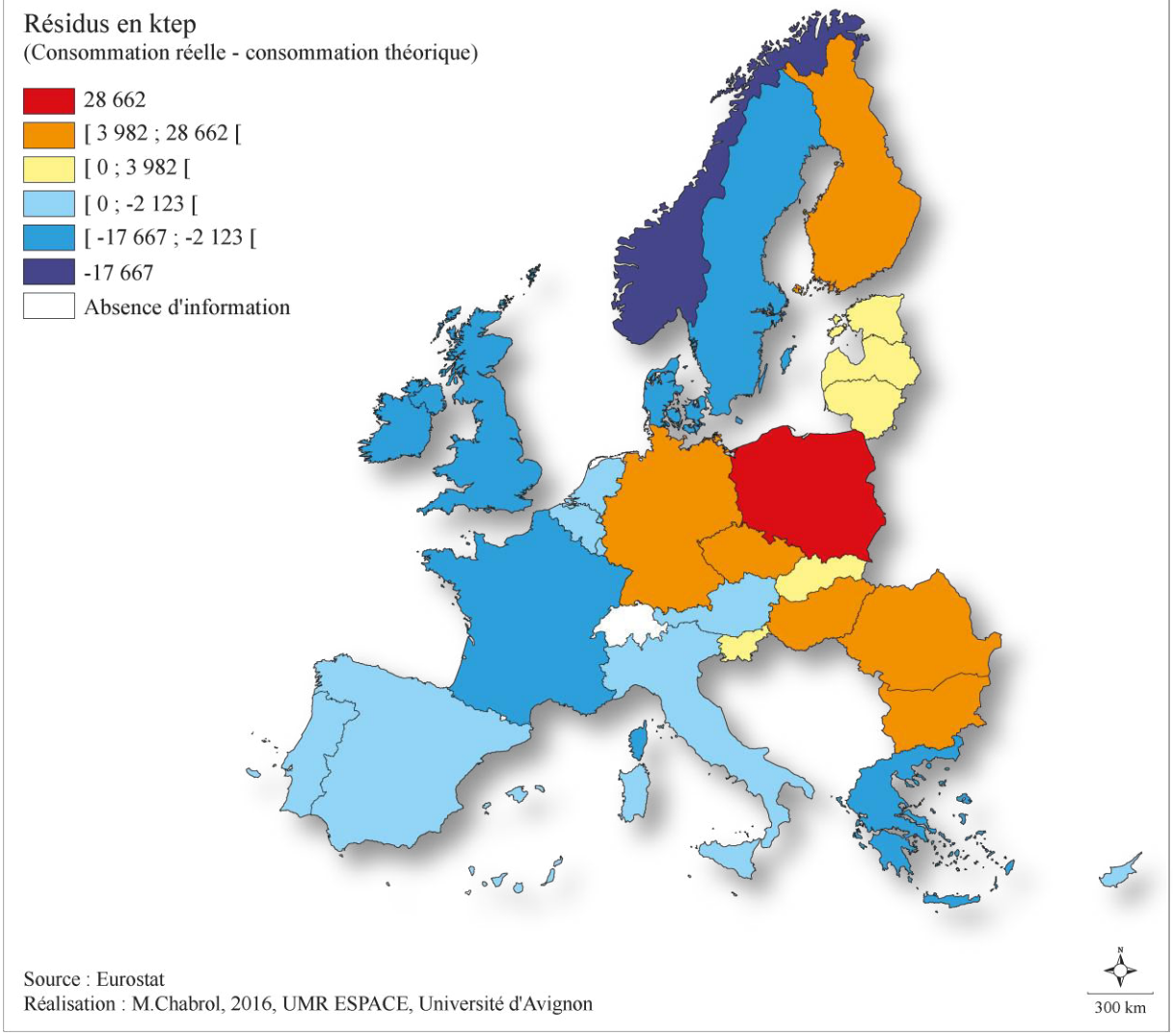
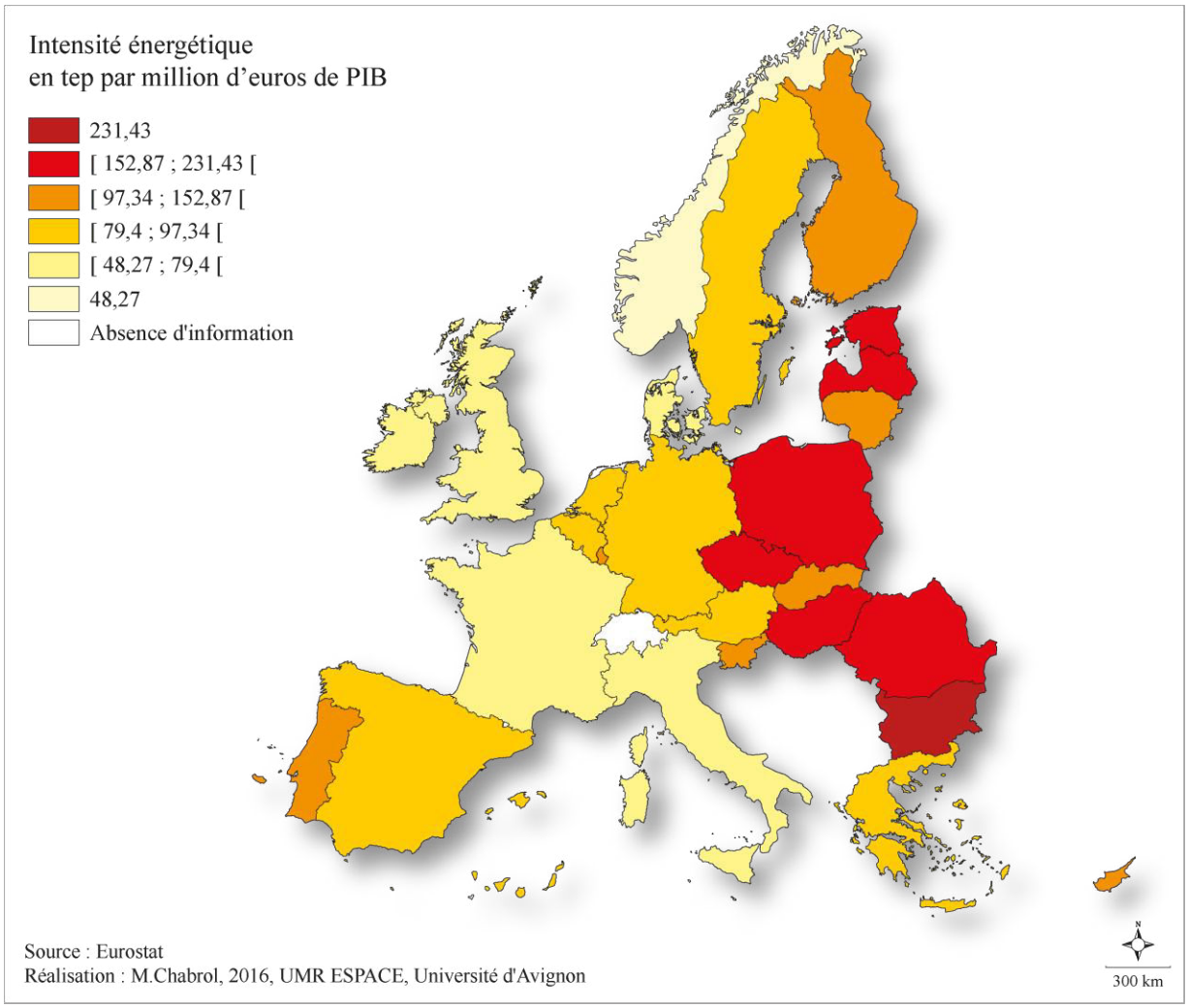


Figure 4. Produit Intérieur Brut et consommation d'énergie en Union européenne en 2012

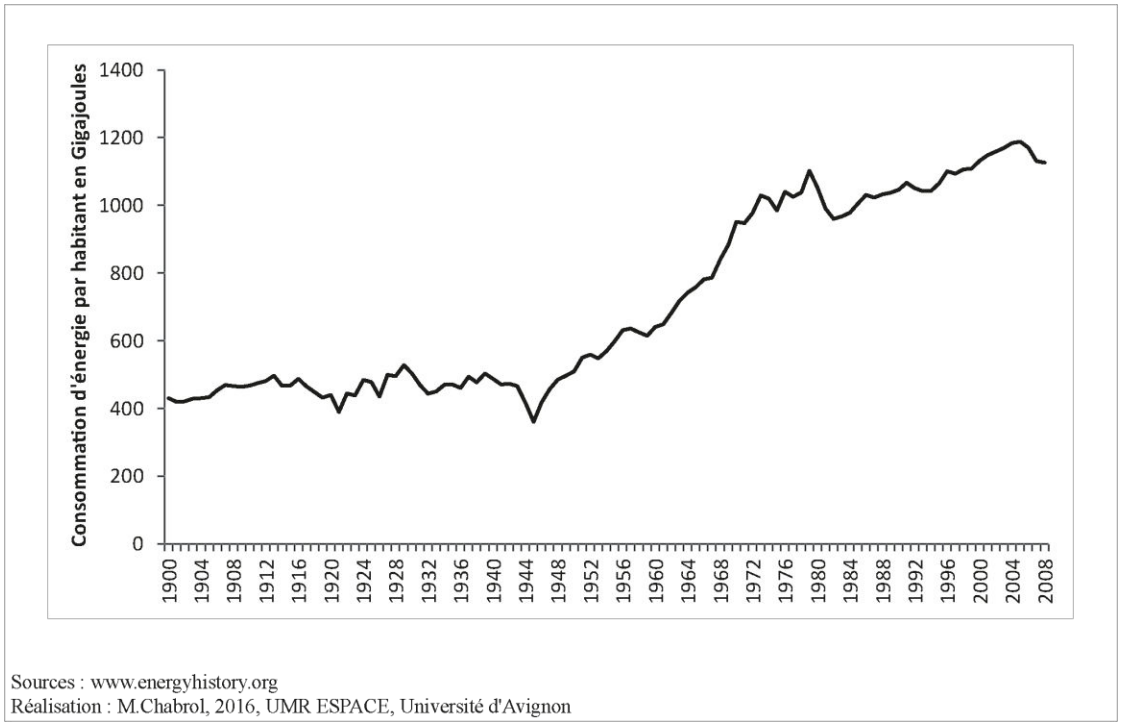
Il s'agit de produire plus de richesse avec moins d'énergie, c'est-à-dire d'augmenter l'efficience énergétique de l'économie. Nos sociétés se comportent donc comme des structures dissipatives. L'augmentation au cours du temps de l'entropie externe permise par la maîtrise de l'énergie libre disponible dans l'environnement permet de diminuer l'entropie interne de nos systèmes socio-économiques pour en améliorer la performance ou le rendement, mesuré ici par l'intensité énergétique, la quantité de richesses et de biens produits avec un minimum d'énergie. La cartographie de l'intensité énergétique en Europe (Carte 1) entre en résonnance avec la cartographie des résidus présentée dans la figure 4. La Norvège a effectivement l'économie la moins énergivore alors que les États de l'Est de l'Europe nécessitent une consommation élevée d'énergie pour stimuler leur économie et augmenter leur niveau de vie.



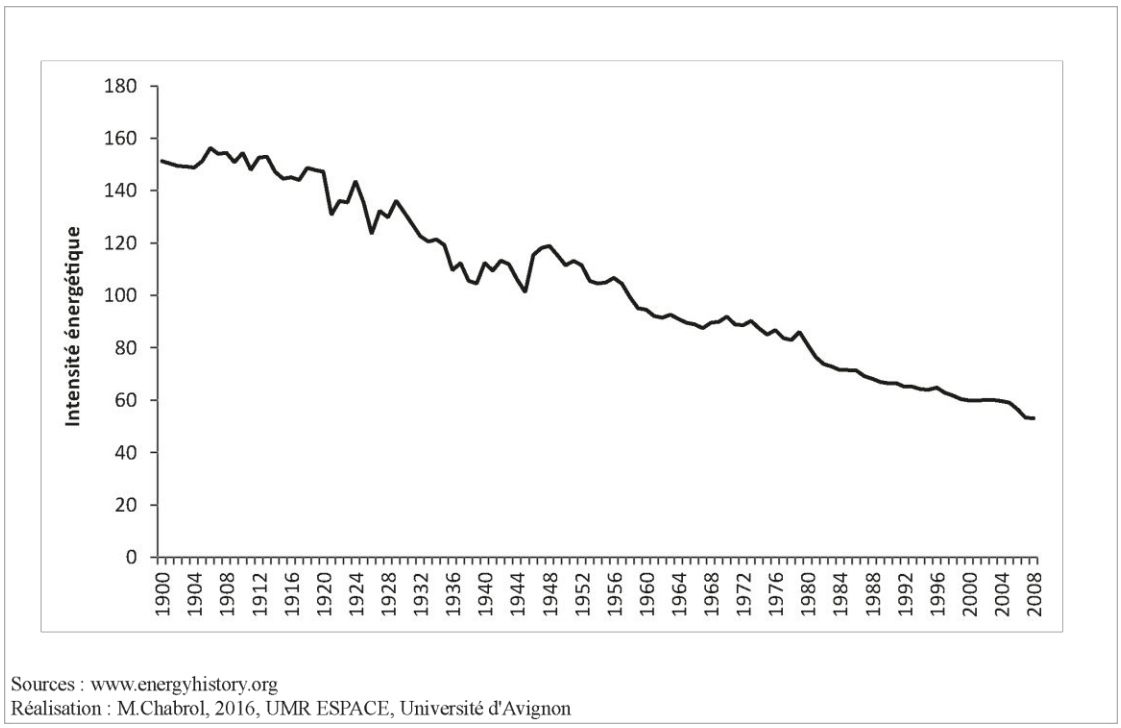
Carte 1. Intensité énergétique en Union européenne en 2012

Le graphique 3 montre bien la dissipation d'énergie par individu au cours du XX^{e} siècle. On remarque l'accroissement important du taux de dissipation d'énergie à partir de la fin de la Seconde Guerre mondiale qui correspond à une phase importante de réorganisation de nos sociétés et à un changement qualitatif des systèmes socio-économiques, la mondialisation de l'économie. Le graphique 4 illustre par conséquent la diminution de l'entropie interne permise par la production

d'entropie décrite dans le graphique précédent. La maximisation du taux de dissipation d'énergie a permis de minimiser la quantité d'énergie libre nécessaire pour produire une unité de richesse. Il s'agit bien d'une optimisation du système.



Graphique 3. Évolution de la consommation d'énergie par habitant au cours du XX^e^ siècle en Europe



Graphique 4. Évolution de l'intensité énergétique[7] au cours du XX^e^ siècle en Europe

[7] Mj/1,000 intern. Geary-Khamis 1990 dollars, cf. www.energyhistory.org

Ces observations sont au cœur des interrogations sur l'avenir énergétique de nos sociétés. D'un point de vue thermodynamique, si nos modèles de développement continuent d'être fondés sur la croissance du PIB, une augmentation de la fourniture énergétique sera indispensable et dans des proportions importantes. Cette situation correspond en substance à celle connue aujourd'hui par les pays émergents. Or dans les territoires de l'Union européenne, la croissance du PIB a considérablement ralenti et plafonne. Ces éléments sont en faveur de l'hypothèse développée par Franco Romerio (2012) sur la nature transitoire du phénomène de croissance économique. Selon cette hypothèse, les pays occidentaux sont en train de terminer une phase de croissance à laquelle devrait correspondre une transition énergétique vers les énergies renouvelables. Il convient de préciser que le plafonnement actuel de la croissance économique dans les pays développés favorise une stabilisation de la consommation énergétique. Cette observation pourrait être en faveur des partisans de la décroissance. Mais l'idéologie de la décroissance omet de dire que la croissance économique est nécessaire au développement et à la diffusion des nouvelles technologies de l'énergie, car elle stimule le changement. Ces derniers revendiquent par ailleurs la pensée de Georgescu-Roegen comme une source d'inspiration. Mais il apparaît clairement qu'il s'agit d'une erreur d'interprétation ou d'une volonté d'apporter une justification scientifique à un discours idéologique (Di Méo, 2006). À regret, certains de ses écrits traduits en français font figurer le terme de décroissance, alors qu'il n'est absolument jamais utilisé par l'auteur dans ces écrits originaux en anglais. Si Georgescu-Roegen questionne sans aucun doute le paradigme de la croissance, c'est avant tout pour démontrer que la production d'entropie est un processus irréversible et que la poursuite de l'évolution de nos sociétés est conditionnée par l'abondance d'énergie libre qui minimise la dégradation de la matière, c'est-à-dire l'impact sur l'environnement.

Tout ceci révèle bien la difficulté de remettre en cause le paradigme de la croissance. La dégradation de l'environnement, la dépendance aux énergies fossiles, les tensions sur les marchés de l'énergie sont autant d'arguments en faveur du développement des énergies renouvelables et de l'augmentation de l'efficience énergétique, inscrits aujourd'hui dans ce que l'on nomme *transition énergétique*. Mais ces arguments évoquent tout autant la remise en cause d'un modèle de croissance qui a par ailleurs permis d'augmenter le bien-être matériel et humain, et dont les bénéfices participent au développement de politiques environnementales, sociales, de santé, d'éducation, de recherche, etc. Cette ambiguïté est au cœur des questionnements sur l'avenir énergétique qui nécessitent d'articuler les réflexions autant autour de questions techniques et technologiques qu'autour des dimensions philosophiques et éthiques inhérentes à la définition de choix de société, tout en évitant les pièges idéologiques qui peuvent biaiser les débats.

2.3 Structures dissipatives et dégradation entropique de l'espace géographique, l'exemple des systèmes de villes en Europe 1800-2010

Des recherches récentes se sont penchées sur l'analyse de l'évolution des systèmes énergétiques passés afin de mieux en comprendre les facteurs et les déterminants, dans la perspective d'en tirer des enseignements pour l'avenir (Fouquet, Pearson, 2012 ; Grubler, 2012 ; Kander et *al.*, 2013 ; Hirsh, Jones, 2014). Si l'ensemble des facteurs d'évolution a été largement étudié en mettant l'accent sur l'influence des contextes économiques historiques, en particulier l'évolution des prix (Allen, 2012), la demande en services énergétiques et le taux de pénétration des innovations technologiques dans les marchés (Fouquet, 2010), l'évolution des systèmes de villes et l'urbanisation sont souvent présentées comme une conséquence ad hoc sans que des liens soient clairement établis entre ces processus et ceux qui animent les changements énergétiques (Rutter, Keirstead, 2012). Cette partie propose de reconsidérer cette question dans de bonnes conditions méthodologiques. « *La relation entre consommation d'énergie et population est positivement corrélée* » (Araujo, 2014, p. 114), mais qu'en est-il des relations entre l'évolution des systèmes énergétiques et la structuration des systèmes de villes en agglomérations hiérarchisées dans les pays européens de 1800 à aujourd'hui (France, Grande-Bretagne, Suède, Pays-Bas, Espagne et Italie) ?

Une ville peut être considérée comme un nœud dans un système hiérarchisé de relations. Elle est alors définie par sa position relative dans une hiérarchie complexe de fonctions productives, sociales et territoriales qui ne sont pas exercées au niveau local mais au niveau du réseau, régional ou national (Pumain, Sanders, Saint Julien, 1989 ; Pumain, 2005). Notre hypothèse est que l'occupation de l'espace par les activités humaines et l'intensification des formes de peuplement peuvent être considérées comme une conséquence d'une dégradation progressive et croissante d'énergie au cours du temps, ce que Nicholas Georgescu-Roegen (1971) décrit comme la production d'entropie par la dégradation des ressources naturelles, en référence aux lois de la thermodynamique (Cf. 2.1 et 2.2). Le terme de dégradation se réfère donc au caractère irréversible de la transformation ou de la consommation de l'énergie et des ressources naturelles. Nos sociétés sont devenues dépendantes d'apports énergétiques qui permettent la pérennité, le développement ou l'extension de leurs organisations spatiales (expansion des réseaux et des infrastructures, croissance urbaine, étalement urbain, etc.). Ces apports d'énergie sont essentiels pour assurer l'existence, la reproduction et la pérennité des systèmes urbains, comme pour tous les organismes vivants. Pour tester cette hypothèse, des corrélations ont été mesurées en croisant les données nationales historiques sur l'énergie développées par le *Center for History and Economics* et le *Center for the Environment* de l'université de Harvard et de Cambridge[8], et les données de population de la base e-Geopolis[9]. Cette partie interroge l'implication de l'énergie et de l'utilisation des ressources dans les processus d'évolution des systèmes de villes et examine le rôle des systèmes énergétiques, de

[8] www.energyhistory.org
[9] www.e-geopolis.eu

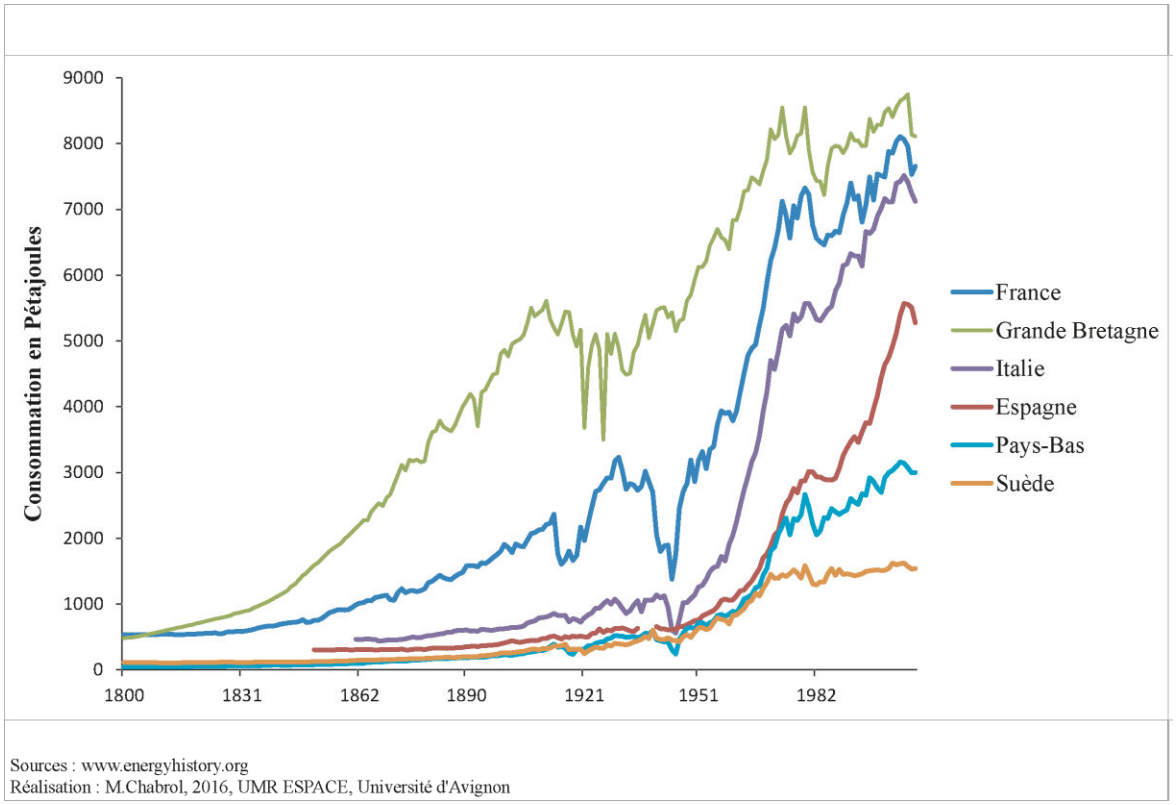
leur évolution et des facteurs socio-économiques et technologiques qui leur sont liés, dans les différenciations ou les régularités observées. Une telle approche évolutive permet d'émettre des hypothèses sur l'avenir des dynamiques urbaines dans un contexte de crise énergétique.

2.3.1 Consommation et hiérarchies urbaines, le modèle rang-taille revisité

L'objectif central de cette partie est de montrer comment l'occupation de l'espace par des activités humaines et la densification des formes de peuplement relèvent d'une production d'entropie, en référence aux lois de la thermodynamique, par l'analyse des relations entre l'augmentation de la consommation d'énergie au cours du temps et l'évolution des systèmes de villes. De ce point de vue, les systèmes de villes peuvent être considérés comme des structures dissipatives qui apparaissent et se maintiennent grâce à un flux constant d'énergie (Prigogine, 1968). Leur niveau de consommation d'énergie équivaut à une mesure de leur production d'entropie (Roddier, 2012). Ces systèmes tendent à maximiser leur production d'entropie pour optimiser leur fonctionnement. Cette optimisation se traduit par l'augmentation du niveau de complexité de leurs organisations.

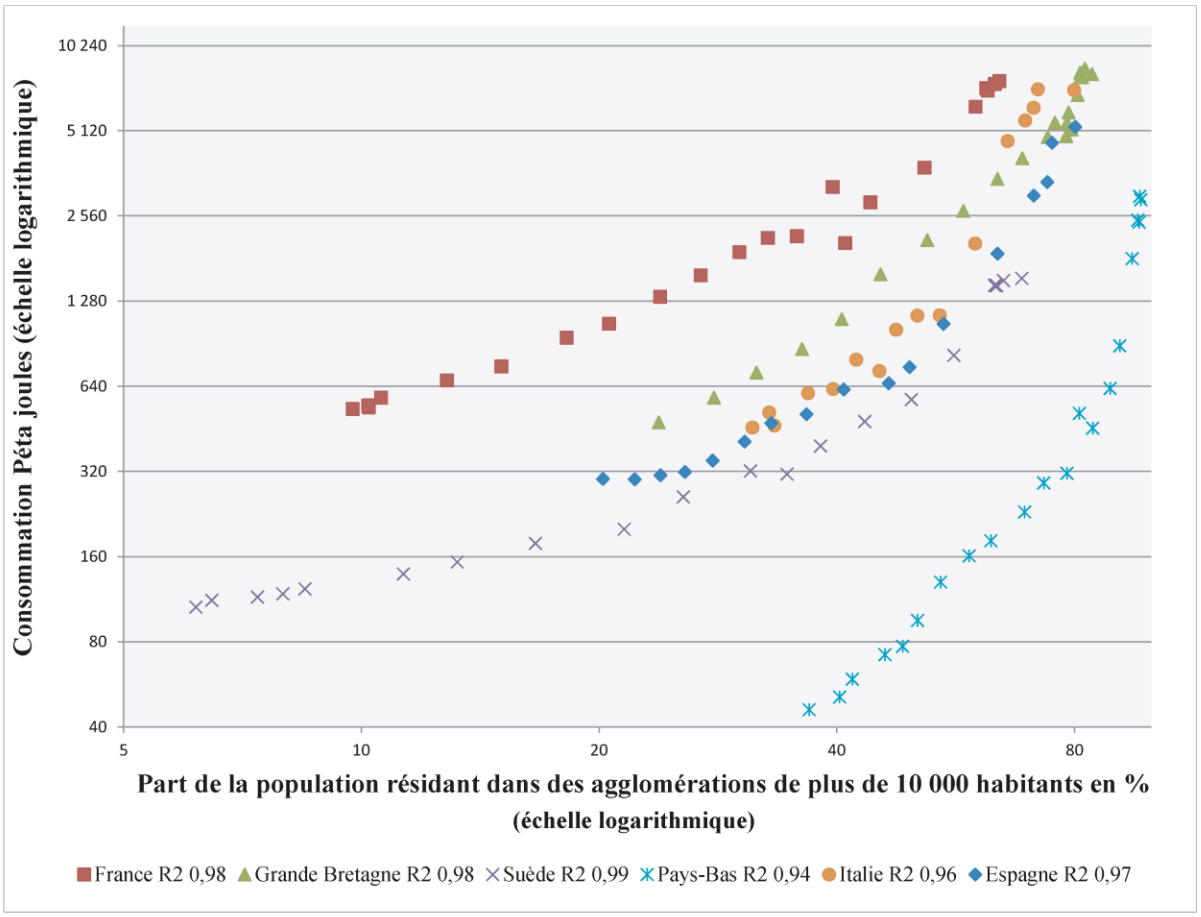
Dans ce cadre conceptuel, l'organisation spatiale des territoires apparaît comme un processus lent dont les structures produites sont dotées d'une très forte inertie. Cette structuration est un phénomène irréversible, nourri par des processus de croissance (croissance démographique, urbaine, économique…). Les villes croissent et se rejoignent. Les agglomérations s'étendent et la demande en énergie augmente. Seuls des phénomènes de rupture dans ces processus de croissance peuvent diminuer ou stabiliser la demande globale en énergie. Et ces ruptures sont imprévisibles et relèvent d'événements aléatoires comme ceux décrits par Nassim Nicholas Taleb dans le *Cygne Noir* (Taleb, 2007). C'est d'ailleurs ce qu'on observe aujourd'hui dans un contexte de crise économique mondiale ou ce que l'on a pu observer pendant les deux guerres mondiales (Graphique 5).

C'est pourquoi le lien entre la croissance urbaine et la consommation d'énergie est une réalité évidente. Les systèmes énergétiques répondent en très grande partie à la demande en services énergétiques d'une population urbaine. Historiquement, ces besoins se limitaient au chauffage et à la cuisson, pour constituer aujourd'hui une gamme diversifiée de services : chauffage et refroidissement des bâtiments, éclairages intérieur et extérieur, fonctionnements des équipements domestiques, mobilités, systèmes de communication...



Graphique 5. Consommation d'énergie dans six pays d'Europe de 1800 à 2010

La confrontation de la consommation d'énergie avec la part de population vivant dans des agglomérations de plus de 10 000 habitants de 1800 à 2010 en France, en Grande-Bretagne, en Italie, en Espagne, en Suède et aux Pays-Bas présente des corrélations très élevées (Graphique 6). Cette relation s'inscrit dans une évolution croissante qui accélère au cours du temps et s'ajuste à une courbe de tendance exponentielle. La vitesse à laquelle les villes dissipent l'énergie augmente. Les trajectoires de chaque pays tendent vers un maximum de consommation et un maximum de 100% pour la part de population urbaine. Mais derrière cette tendance commune, les pays se distinguent les uns des autres par des trajectoires différenciées. Les courbures sont différentes et des discontinuités s'affirment.



Sources : www.energyhistory.org, www.e-geopolis.eu
Réalisation : M.Chabrol, 2016, UMR ESPACE, Université d'Avignon

Graphique 6. Consommation d'énergie et population urbaine dans six pays d'Europe de 1800 à 2010

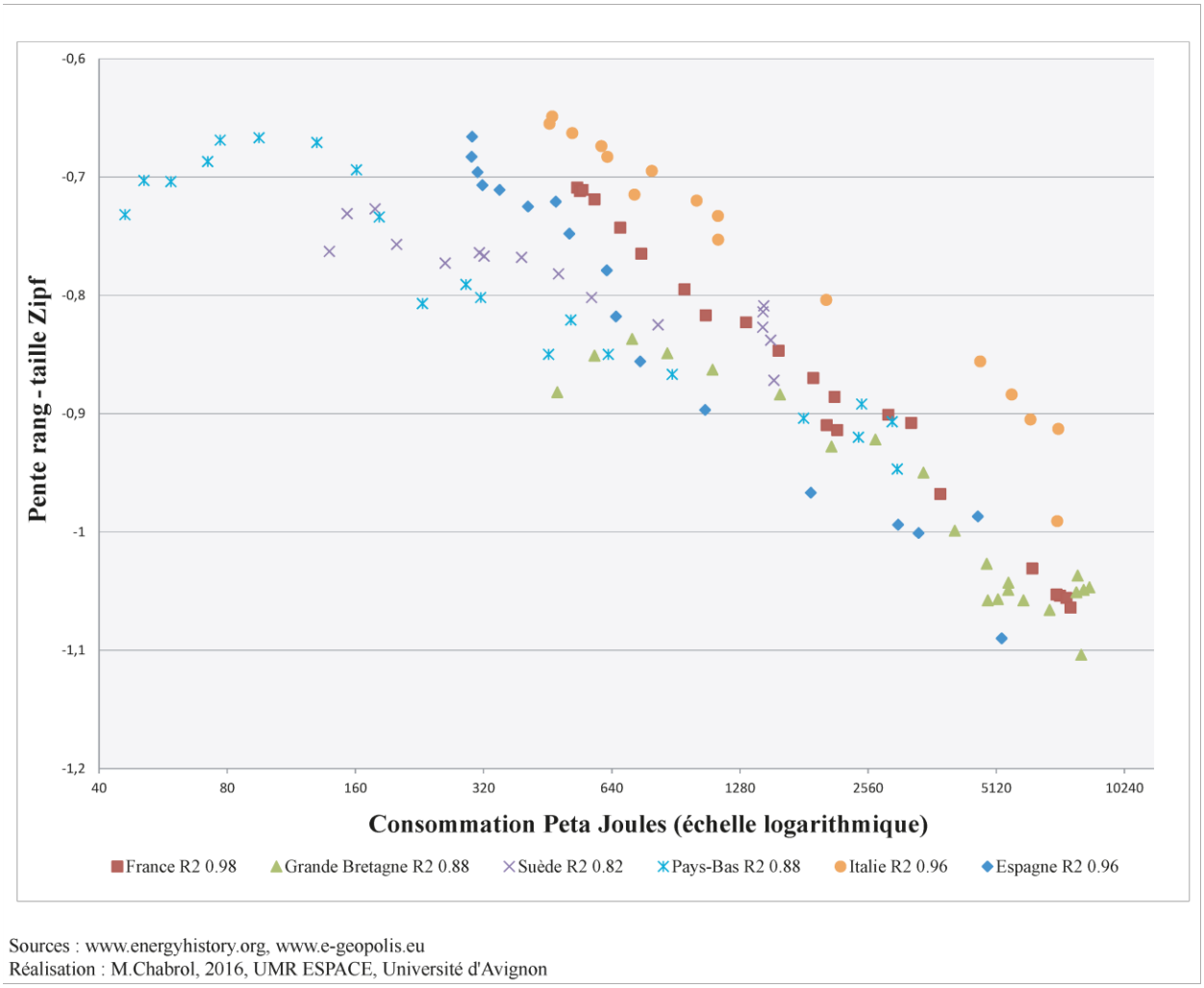
Nous observons ici les agglomérations morphologiques de plus de 10 000 habitants définies par une contiguïté du bâti avec une distance maximale de 200 mètres entre chaque bâtiment[10]. Nous nous intéressons donc à la croissance de la population urbaine et à l'évolution des systèmes de villes d'un point de vue morphologique. Les agglomérations englobent plusieurs communes de sorte que la croissance des grandes agglomérations se fait autant par croissance démographique que par extension spatiale et changement d'échelle. C'est pourquoi les pays qui ont une surface réduite comme les Pays-Bas présentent une part de population urbaine beaucoup plus importante et une courbure plus marquée. La population totale nationale différencie également les trajectoires. Aussi, la France, qui reste le pays le plus peuplé pendant toute la période, présente une trajectoire qui se situe dans la partie supérieure du graphique. Pour cette raison également la trajectoire de l'Italie présente une forte discontinuité à partir de 1970 où la courbe se place au-dessus de celle de la Grande-Bretagne. À partir de cette date, la population italienne est en effet supérieure à la population britannique.

[10] www.e-geopolis.eu

La loi « *rang-taille* » (Auerbach, 1913 ; Lotka, 1925 ; Zipf, 1941, 1949), appelée aussi loi de Zipf, est généralement utilisée pour décrire les systèmes de villes et leur évolution (Pumain, 1982 ; Moriconi, 1993 ; Guérin-Pace, 1993). Elle qualifie les distributions de type $P = kr^{-1}$ où P désigne la population, *r* le rang et *k* une constante (Sanders, 2012). Les villes sont classées par ordre décroissant de taille de population. L'insertion dans un graphique bi-logarithmique de la taille et du rang produit une pente proche de -1. Cette pente constitue un indice de hiérarchie et son observation au cours du temps décrit en partie l'évolution des systèmes de villes. Quand la pente se renforce, le système de villes se hiérarchise. Les inégalités de taille de population entre les villes augmentent pour aboutir à une distribution hiérarchisée équilibrée. À l'inverse, quand la pente diminue, la répartition de la population tend à s'homogénéiser en laissant plus de poids aux petites villes et aux villes moyennes (Guerin-Pace, 1993). Tout ceci n'exclut pas d'observer des seuils et des irrégularités, notamment la présence d'une ville primatiale[11] (Schaffar, 2009).

La mesure de cet indice de hiérarchie des systèmes de villes montre également des régularités lorsqu'on le met en relation avec la consommation d'énergie. La pente rang-taille pour tous les pays concernés a une tendance générale à augmenter pendant 200 ans et tend vers des valeurs proches de -1. Pendant que les systèmes de villes se hiérarchisent, la consommation d'énergie augmente. Une corrélation forte apparaît entre la structuration hiérarchique des systèmes de villes au cours du temps et l'évolution de la consommation d'énergie pour ces six pays d'Europe. Lors d'un ajustement à une courbe logarithmique, tous les coefficients de détermination R^2 sont supérieurs à 0,82. Des particularités émergent selon les pays. La relation entre consommation d'énergie et dynamique de hiérarchisation varie et trace des trajectoires différentes selon les pays (Graphique 7). L'analyse de cette variabilité permet d'identifier l'implication du fait énergétique dans la dynamique d'agglomération du peuplement sur plus de 200 ans d'urbanisation, et d'établir le rôle des systèmes énergétiques et de leurs transitions dans les différenciations et les régularités observées.

[11] La littérature abonde sur ce sujet en géographie et en économie urbaine, révélant souvent des biais comme la sensibilité du modèle à l'échantillonnage et le fait qu'il caractérise mieux les villes situées dans la partie supérieure des hiérarchies urbaines (Haggett, 1976 ; Pumain, 2012).



Sources : www.energyhistory.org, www.e-geopolis.eu
Réalisation : M.Chabrol, 2016, UMR ESPACE, Université d'Avignon

Graphique 7. Consommation d'énergie et évolution des hiérarchies urbaines dans six pays d'Europe de 1800 à 2010

Il n'existe pas aujourd'hui de consensus sur l'explication à donner à l'observation des distributions de type rang-taille[12]. Zipf suggérait que cette organisation résulte d'un optimum économique entre deux forces opposées (Zipf, 1941, 1949) :

- la *diversification* : un grand nombre de petites villes se développent de manière à se trouver au plus près des matières et des sources d'énergie spatialement dispersées afin de diminuer les coûts de transport à la production.
- L'*unification* : le système permet l'émergence de peu de très grandes villes pour minimiser les coûts de transport au consommateur.

Les spécificités des systèmes énergétiques nationaux et leur évolution permettent d'attribuer des éléments d'explication aux différenciations observées (Figure 5).

[12] De nombreux écrits scientifiques questionnent cette loi. Consulter entre autres : Schaffar, 2012 ; Sanders, 2012

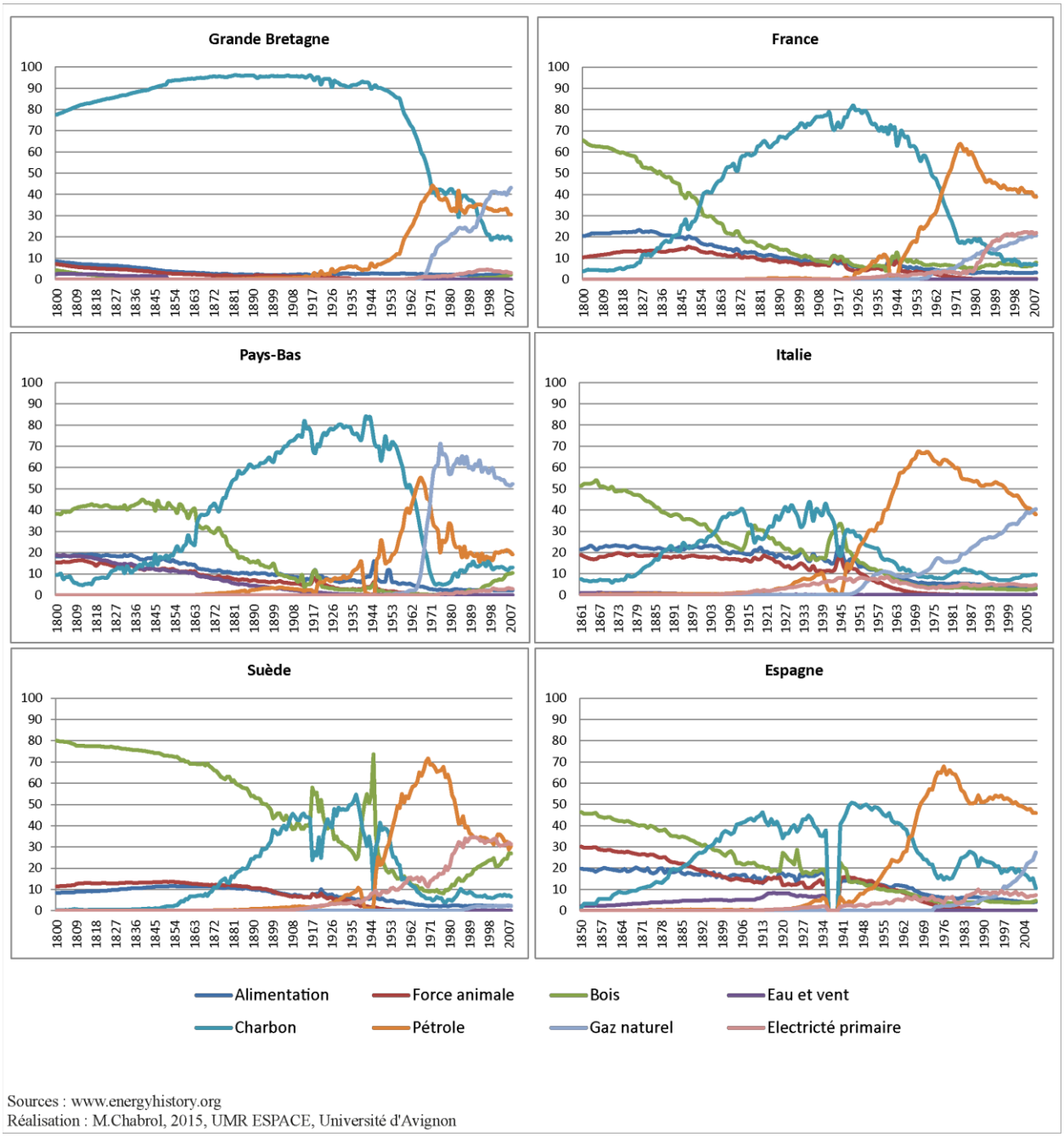


Figure 5. Évolution des mix énergétiques nationaux dans six pays d'Europe 1800-2010

La substitution des énergies fossiles aux vecteurs traditionnels, mais aussi la part qu'occupent ces énergies dans le système énergétique et les facteurs de leur évolution impactent la dynamique de hiérarchisation des systèmes de villes et la croissance des agglomérations. La composition du mix énergétique, la nature et la part de la source d'énergie dominante impliquent des dynamiques différentes. Lorsque les mix énergétiques sont encore dominés par les ressources renouvelables traditionnelles, la hiérarchie des systèmes de villes diminue. Les inégalités de taille entre les villes diminuent. La population augmente dans les villes moyennes. Les vecteurs traditionnels d'énergie produisent une énergie qui nécessite une consommation locale. Par ailleurs, cette demande locale concerne des services énergétiques réduits au chauffage et à la

cuisson, mais lorsque la croissance démographique a fait pression sur la demande, les ressources en bois ont présenté des signes d'épuisement. Aux prélèvements à des fins énergétiques, s'ajoutait la déforestation liée à l'augmentation des besoins en terres cultivables et en terres destinées à l'urbanisation (Warde, 2007 ; Rutter, Keirstead, 2012). Les prix de cette ressource ont augmenté et induit une logique de minimisation de ses coûts. Ces ressources *locales* sont donc davantage favorables au développement des villes proches de ces sources d'énergie et l'optimum économique se situe dans la *diversification* du système de villes. Le calcul d'un indice de primatie (rapport entre la population de la première agglomération et la population des cinq premières agglomérations ; Guerin-Pace, 1993) illustre également ce fait. Lorsque les systèmes énergétiques sont dominés par les ressources traditionnelles, la primatie diminue (Suède, Pays-Bas, Italie).

Le passage au charbon va en revanche activer les dynamiques de hiérarchisation. Associée aux processus de l'industrialisation, la transition vers le charbon alimente la croissance des agglomérations et la concentration de la population dans les villes. La croissance démographique active la demande et contribue à une diminution des prix de cette ressource. Mais la répartition spatiale des gisements va impliquer deux types de hiérarchisation des systèmes de villes : une dynamique dans laquelle l'optimum économique se situe davantage dans l'*unification* des systèmes de villes, et une dynamique d'équilibre entre *diversification* et *unification*. Les systèmes de villes qui se situent à proximité des grands bassins houillers (Grande-Bretagne et Pays-Bas) évoluent vers une distribution de la taille des villes hiérarchisée et équilibrée. Le poids de la ville primatiale diminue en raison de la croissance des agglomérations minières et industrielles. La population se concentre dans plusieurs grandes agglomérations. Conjugué à l'évolution des systèmes de transports (chemin de fer), le système évolue vers une situation d'équilibre entre *diversification* et *unification*. En revanche, dans les pays où les gisements sont moins nombreux, moins importants ou inexistants (France, Espagne, Suède), le système favorise la croissance de l'agglomération primatiale pour diminuer les coûts de transports au consommateur. L'indice de primatie illustre ces deux dynamiques. La période pendant laquelle les systèmes énergétiques sont dominés par le charbon correspond à des phases de hiérarchisation déséquilibrée (augmentation de la primatie) en France, en Espagne et en Suède, et concerne des phases de hiérarchisation équilibrée (diminution de la primatie) en Grande-Bretagne et aux Pays-Bas. Malgré l'absence de bassins houillers, l'Italie évolue également dans une phase de hiérarchisation équilibrée avec une diminution de la primatie. Cela s'explique par une part importante des ressources traditionnelles dans le système énergétique pendant la transition vers le charbon.

Le temps est un facteur majeur de variabilité dans la relation entre l'évolution de la consommation et la dynamique de structuration des systèmes de villes. La période à laquelle se sont déroulées les transitions différencie des dynamiques précoces ou tardives de hiérarchisation et de concentration urbaine. La soudaineté et la rapidité des transitions ainsi que la durée pendant laquelle une ressource reste dominante sont des éléments d'explication supplémentaires de cette

variabilité. La précocité du passage au charbon a impliqué une évolution plus rapide du système de villes britannique vers un état hiérarchisé. Si les systèmes énergétiques ont été dominés par le charbon pendant plus d'un siècle, les transitions qui lui succèdent (pétrole, gaz et électricité nucléaire) sont beaucoup plus rapides (Smil, 2010 ; Grubler, 2012). La transition vers le pétrole s'effectue au cours des années 1960 et se traduit par un renforcement de la hiérarchisation et une diminution de la primatie, excepté en Suède où la primatie de Stockholm continue de s'accroître. Les systèmes de villes évoluent dans une dynamique de hiérarchisation équilibrée (France, Espagne) ou la conservent (Grande-Bretagne, Italie, Pays-Bas), mais la diminution de la primatie n'est pas attribuable cette fois à l'exploitation de ressources nationales. Elle est l'effet d'une croissance des agglomérations liée à l'étalement urbain, à l'évolution des modes de transport permise par cette nouvelle ressource et à la baisse de son prix relativement à celui du charbon. Enfin, la transition vers l'énergie nucléaire en France dans les années 1980-1990 ne semble pas avoir d'influence sur la trajectoire suivie par le système de villes français. La transition vers le gaz dans les années 2000 en Grande-Bretagne, en Espagne et aux Pays-Bas s'accompagne en revanche d'une augmentation de la dynamique de hiérarchisation et d'une augmentation de la primatie. L'utilisation du gaz favorise en effet une logique de minimisation des coûts de transport au consommateur et ne contribue pas à l'évolution des systèmes de transport pouvant induire une croissance des agglomérations de taille moyenne. Si l'évolution et la composition des systèmes énergétiques dépendent d'une combinaison de facteurs socio-économiques, et en particulier le taux de pénétration d'un type d'énergie et des innovations dans un marché de consommation, elles ont des implications sur l'évolution des systèmes de villes. Les ruptures et discontinuités dans les dynamiques de hiérarchisation et d'agglomération du peuplement sont le reflet de ces évolutions complexes et variées en fonction des contextes historiques et économiques des pays.

Le passage d'une énergie basée sur des ressources locales et dispersées à des vecteurs énergétiques plus aisément transportables et à moindre coût a fortement contribué à la croissance des grandes agglomérations et à la mise en place d'un système hiérarchisé proche du modèle de Zipf. Le passage aux énergies fossiles était une condition nécessaire à la croissance des grandes agglomérations. Le transport sur de longues distances des ressources fossiles permet une puissance thermique accessible et bon marché favorisant l'émergence de systèmes de villes dont la population se distribue selon le modèle de la loi rang-taille. Ces observations appuient en partie l'hypothèse de Zipf, mais s'appliquent dans des situations énergétiques particulières. Ce type d'organisation n'est pas systématique et peut être amené à évoluer selon les évolutions des systèmes énergétiques. L'observation d'une distribution rang-taille des villes américaines par Zipf dans les années 1940 n'était peut-être que le reflet du passage au pétrole, précoce aux États-Unis. Il ne s'agit pas d'apporter ici une réponse à l'interprétation de la loi rang-taille ou de proposer une loi d'évolution des systèmes urbains (Pumain, 2006), mais de s'interroger sur l'évolution des systèmes de villes dans un contexte de crise énergétique.

2.3.2 Évolution des systèmes de villes et loi d'entropie, quelles implications ?

Les changements énergétiques passés montrent que chacun d'eux représente une intensification de l'utilisation de l'énergie (Smil, 2008) et une augmentation de la consommation, malgré les innovations technologiques d'efficacité énergétique. Chaque nouveau système énergétique a été plus énergivore que le précédent, se traduisant par une augmentation de la demande. La maximisation de l'entropie est donc nécessaire à l'efficience de nos systèmes, y compris pour minimiser les besoins énergétiques à une échelle micro. Ils révèlent aussi la complexité croissante des systèmes énergétiques. Les premiers systèmes reposaient sur des ressources de proximité, des réseaux d'approvisionnement de courte distance et une gestion simplifiée des ressources. Les systèmes énergétiques suivants ont élargi leur portée géographique aux espaces régionaux, puis nationaux et continentaux, exigeant une organisation plus sophistiquée des réseaux d'approvisionnement, jusqu'à la gestion en temps réel des réseaux électriques. La maximisation de l'entropie permet donc bien aux systèmes spatiaux de produire des changements qualitatifs et quantitatifs qui s'expriment aussi dans des changements scalaires.

L'évolution et le degré de hiérarchisation des systèmes de villes reflètent l'évolution des systèmes énergétiques. Certains chercheurs affirment que la distribution de la taille des villes selon la loi de Zipf est l'illustration d'une auto-organisation des systèmes de villes en structures dissipatives (Sanders, 1992 ; Bak, 1999 ; Roddier, 2012). Les corrélations mesurées ici entre la distribution de la taille des villes et la production effective d'entropie de ces systèmes ne peuvent que confirmer et illustrer davantage les hypothèses de ces chercheurs. De plus, le coefficient de hiérarchisation est une mesure de la complexité du système de villes, à un niveau macro, issue d'interactions locales (Dauphiné, 2003). Nos travaux confirment en ce sens l'analyse d'Helmut Haberl qui a montré comment les systèmes sociaux augmentent en taille et en complexité proportionnellement à l'augmentation de la consommation globale d'énergie (Haberl, 2002). Les systèmes urbains suivent aussi cette dynamique. Nos résultats confirment notre hypothèse et permettent de dire que les systèmes de villes sont des structures dissipatives qui nécessitent un approvisionnement constant en énergie pour croître, se maintenir et produire un changement qualitatif d'organisation, des sociétés rurales à la métropolisation en passant par des phases d'urbanisation centripète et centrifuge. Si les évolutions énergétiques passées correspondent à une phase de structuration des systèmes de villes en réseaux hiérarchisés, l'objectif actuel est de maintenir le fonctionnement de ces structures. Mais ces systèmes ont atteint un niveau de complexité tel qu'une augmentation significative de la consommation d'énergie sera nécessaire uniquement pour les maintenir (Tainter, 1988). Par ailleurs, la relation statistique entre la structuration hiérarchique des systèmes de villes et la consommation d'énergie est d'essence logarithmique : la consommation d'énergie augmente plus rapidement que la dynamique de structuration hiérarchique. Non seulement cette relation logarithmique est conforme à l'entropie définie par Boltzmann (qui précise que la relation entre l'entropie (dans notre cas : consommation globale d'énergie des systèmes de villes) et l'état macroscopique d'un système (dans notre cas : la pente rang-taille) est logarithmique), mais elle entre aussi parfaitement en

résonnance avec la loi de production maximale d'entropie qui stipule que les structures dissipatives maximisent la vitesse à laquelle l'énergie se dissipe.

Que peut-on conclure sur l'avenir des systèmes énergétiques et des systèmes de villes ? Comme dans les systèmes antérieurs, nous pouvons identifier un certain nombre de contraintes et de facteurs de changement futur. Dans les pays développés, les défis actuels comprennent la raréfaction des combustibles fossiles, le vieillissement des infrastructures de production et les préoccupations concernant le changement climatique. De nombreuses recherches portent sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et la conception de systèmes optimisés et automatisés. Mais ces technologies nécessitent du temps et des mesures d'incitation politique pour pénétrer les marchés comme dans le cas des outils connectés (Smart Grids et compteurs communicants). Tout comme dans le passé, où l'évolution du prix du bois a conduit à un passage aux combustibles fossiles, un coût croissant des combustibles fossiles actuels peut conduire à l'adoption accrue des technologies des énergies renouvelables et/ou du nucléaire. Certains effets de l'évolution des coûts, des prix et des politiques incitatives sont déjà visibles notamment dans le secteur du photovoltaïque et des appels d'offres sur l'éolien. Mais d'autres facteurs sociaux peuvent être impliqués dans l'adoption de ces technologies, telles que des considérations sur le changement climatique ou l'évolution dans les représentations de l'énergie et de son utilisation. Certaines analyses rétrospectives considèrent aussi que les évolutions énergétiques passées ont renforcé le changement climatique. Mais la représentation actuelle de l'énergie est différente de celle que nous avions dans la période industrielle. Elle est devenue immatérielle et les utilisations de l'énergie se tournent aujourd'hui bien davantage vers le confort résidentiel, le transport et l'économie de services, que vers la production industrielle. L'espoir de changements dans le comportement individuel est légitime, mais cette étape est encore difficile à franchir car les flux d'énergie deviennent presque aussi immatériels et instantanés que les flux d'informations.

Une baisse significative des énergies fossiles à plus ou moins longue échéance interroge sur l'évolution possible des systèmes de villes et des hiérarchies urbaines.

L'utilisation accrue de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables à grande échelle (éolien off-shore, etc.) correspond bien au système existant et s'inscrit dans la continuité des évolutions passées basées sur un processus de substitution des ressources, en laissant aux villes un rôle de marché de consommation plutôt passif. Ce modèle garantit le transport de l'électricité sur de longues distances et, dans ce cas, les hiérarchies urbaines pourraient soit se stabiliser, soit continuer de se renforcer. Ce type de situation consiste à substituer une nouvelle source de basse entropie aux énergies fossiles afin de maintenir le niveau de complexité atteint par nos systèmes dans une logique de maximisation de l'entropie produite.

Mais les innovations liées aux productions d'énergie décentralisées suggèrent par ailleurs un retour à un modèle de proximité comparable à celui de la fin du XIX^{e} siècle. Si les systèmes énergétiques à venir s'appuient en effet sur de petites unités dispersées et décentralisées, dans ce cas, les hiérarchies urbaines pourraient s'effacer pour minimiser les coûts à la production et à la distribution. Cette situation viserait en définitive à limiter la production d'entropie externe des systèmes à la quantité et au type d'énergie libre disponible dans l'environnement local. La

conséquence en serait donc une augmentation de l'entropie interne des systèmes, une diminution de leur degré de complexité, et donc une diminution de leur capacité à générer des organisations spontanées. De fait, une diminution de la consommation globale d'énergie pourrait remettre en cause l'organisation spatiale en lieux centraux attractifs et en réseaux de villes hiérarchisés.

On peut en effet considérer que les régimes énergétiques sont des éléments à l'origine des différenciations spatiales et donc de l'hétérogénéité de l'espace géographique. La maximisation de la dissipation d'énergie dans les structures spatiales a permis aux systèmes spatiaux d'évoluer au travers de phases et de ruptures qualitatives. Cela maximise la vitesse à laquelle l'énergie se dissipe mais accélère aussi le rythme des changements sociétaux et spatiaux. Nous pouvons illustrer cela en nous appuyant sur le modèle des trois « a » développé par François Moriconi-Ebrard (2000). Il y a fort à penser que les phases décrites dans ce modèle (territoriale, militaro-industrielle et financière) dont les transitions sont marquées par des crises (guerres, crises économiques, crises de subsistance) sont en interaction avec la maximisation de la dégradation entropique des systèmes sociaux et spatiaux. L'exploitation de ressources fossiles nécessaires au développement des grandes agglomérations nécessite d'importants investissements militaires pour sécuriser les approvisionnements et assurer leur disponibilité permanente. Les conflits militaires et les tensions géopolitiques liés aux approvisionnements en ressources fossiles sont nombreux. Les pics pétroliers engendrent aussi des crises économiques et la dérégulation du marché de l'électricité a favorisé les bulles spéculatives.

La première industrialisation peut être décrite comme une « phase territoriale » marquée par un déséquilibre entre l'offre et la demande qui se cristallise dans le phénomène de l'urbanisation et de la conquête de nouveaux espaces par les voies de chemin de fer. Peu à peu, il faut sécuriser la ressource et la phase territoriale laisse la place à une « phase militaro-industrielle » marquée par la course aux armements rendue possible par les progrès de la sidérurgie. Cette phase débouche sur une réorganisation importante du système, la Première Guerre mondiale. Suite à ces événements, on assiste à un renforcement des pouvoirs centraux. C'est le temps de la reconstruction et du passage à la « phase financière » qui engendrera la grande dépression de 1929 et plongera une grande partie des États dans la crise jusqu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale, nouvelle réorganisation systémique. La fin de la Seconde Guerre mondiale marque le début de la deuxième industrialisation et d'une nouvelle phase territoriale, l'exploitation massive du pétrole. La phase militaro-industrielle annonce l'abondance et l'avènement de la société de consommation au prix de nombreux conflits armés. Puis une phase financière aboutit à la crise financière mondiale de 2007 (Figure 6).

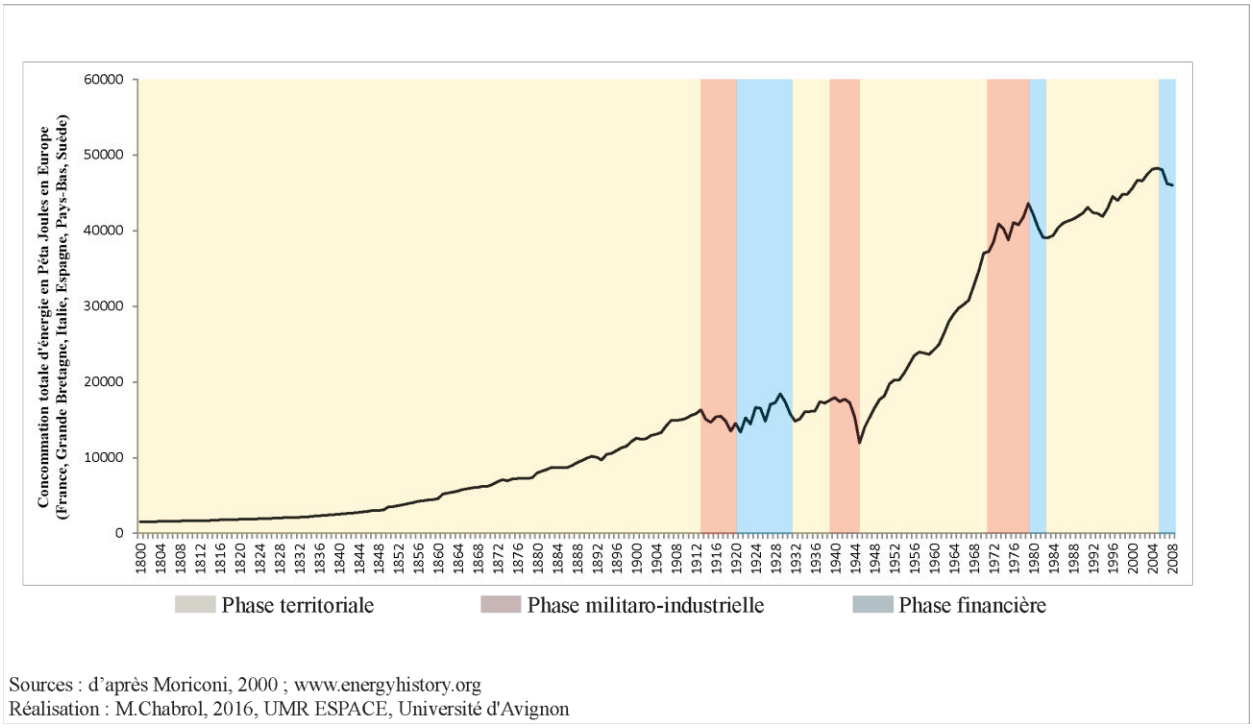


Figure 6. Phases d'évolution de l'espace géographique et croissance entropique au cours des XIX^e^ et XX^e^ siècles

Chacune de ces phases s'accompagne d'un changement qualitatif de l'espace géographique (sociétés rurales, urbanisation, métropolisation) et d'une modification des rapports scalaires (rapports locaux, régionaux, bipolaires et multipolaires jusqu'à la mondialisation). La complexité des systèmes socio-spatiaux et la production d'entropie augmentent proportionnellement selon une relation logarithmique (Figure 7).

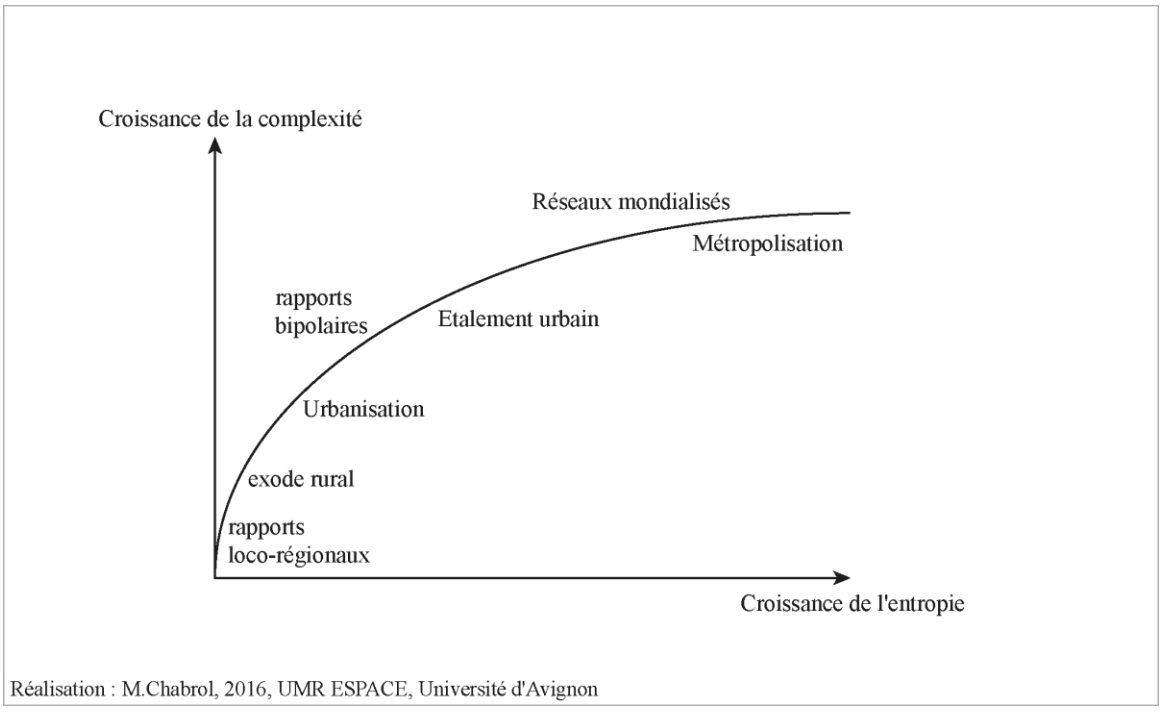


Figure 7. Évolutions sociétales, entropie et changement qualitatif de l'espace géographique

On peut dès lors envisager au moins deux trajectoires d'évolutions différentes à ce modèle. La plupart des modèles prospectifs opposent des visions optimistes à des visions pessimistes, des visions basées sur le progrès technique à des visions basées sur la notion de sobriété (Durand, 2008), ou encore des analyses qui opposent l'homéostasie des systèmes sociaux à leur effondrement (Rudolf, 2015). Les deux trajectoires suivantes ne prennent pas position d'un point de vue idéologique ou philosophique. Il se s'agit pas de déterminer si notre civilisation doit ou non s'émanciper d'un prétendu dogme du progrès, ou si elle est condamnée à disparaître, mais bien de s'interroger sur l'avenir possible des organisations spatiales des sociétés humaines selon deux hypothèses fortes.

Tout d'abord, si les systèmes spatiaux suivent la loi de maximisation de production d'entropie (MEP), on peut considérer qu'un seuil de complexité a été atteint ou presque atteint. Dans ce cas, une augmentation de la consommation d'énergie reste un phénomène irréversible et surtout indispensable au maintien et à l'optimisation de nos systèmes. Mais cette optimisation devra passer par les innovations nécessaires à l'utilisation de nouvelles sources d'énergie non fossiles. Le progrès technologique tient une place importante dans ce type d'évolution à condition qu'il soit mis au service de l'efficience et de la réversibilité des systèmes énergétiques (Figure 8).

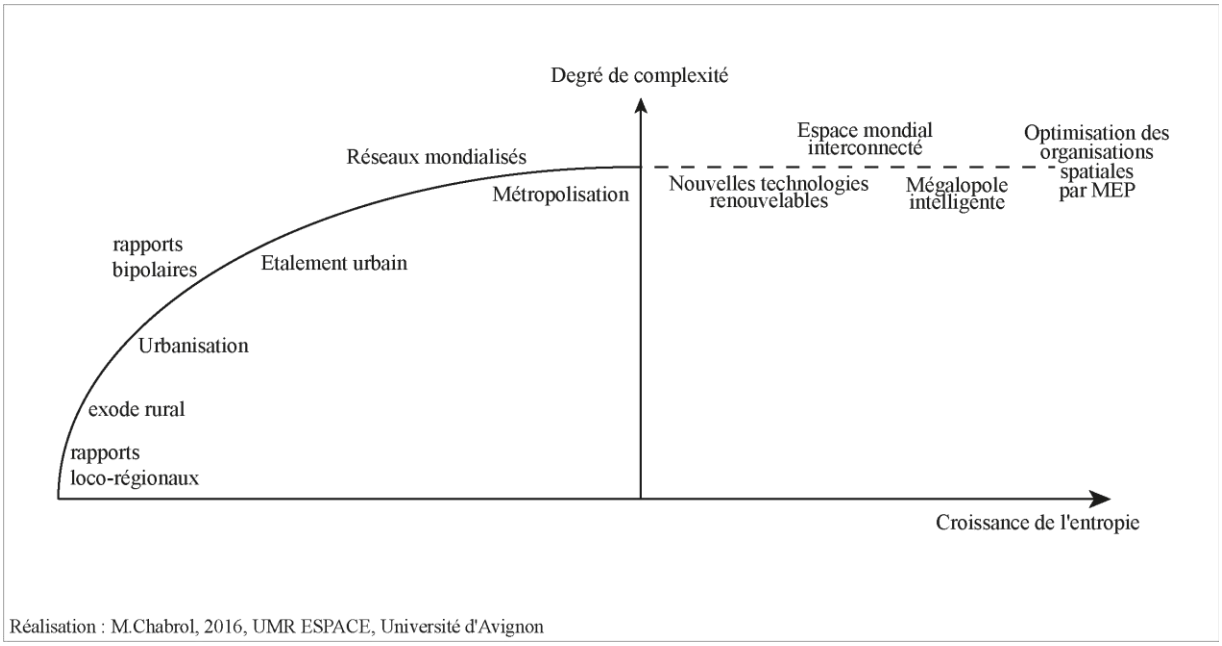


Figure 8. Hypothèse de trajectoire d'évolution selon un principe d'optimisation par production maximale d'entropie (MEP)

En revanche, une évolution basée sur une réduction massive de la production d'entropie externe de nos systèmes conduirait nécessairement à une trajectoire de nature différente. L'innovation technologique est également fondamentale mais dans ce cas pour redimensionner les systèmes énergétiques. Une diminution conséquente de la consommation globale d'énergie peut réorienter l'évolution des systèmes spatiaux vers une sorte de rééquilibrage qui passe par une nouvelle phase de concentration urbaine, mais cette fois-ci au profit des petites et moyennes villes.

Selon cette hypothèse, l'approvisionnement énergétique n'est alors plus pensé dans un monde interconnecté. Il adapte la demande locale aux capacités locales de réponse. Le niveau de complexité des organisations spatiales devra ainsi décroitre pour diminuer les besoins énergétiques de leur fonctionnement et de leurs dynamiques (Figure 9). Cette hypothèse implique donc d'optimiser les systèmes par le ralentissement de leur rythme d'évolution.

Ces modèles sont par définition des représentations simplifiées des trajectoires possibles d'évolution. Ils ne sont pas représentatifs des seules évolutions possibles mais permettent de définir quelques éléments essentiels à la poursuite de ce travail de thèse :

- La loi d'entropie est une loi d'évolution de l'espace géographique.
- Le maintien du niveau actuel de complexité dans le fonctionnement de l'espace géographique nécessite un apport énergétique.
- Un changement dans les modes d'approvisionnement énergétique peut impliquer des changements de l'espace géographique.

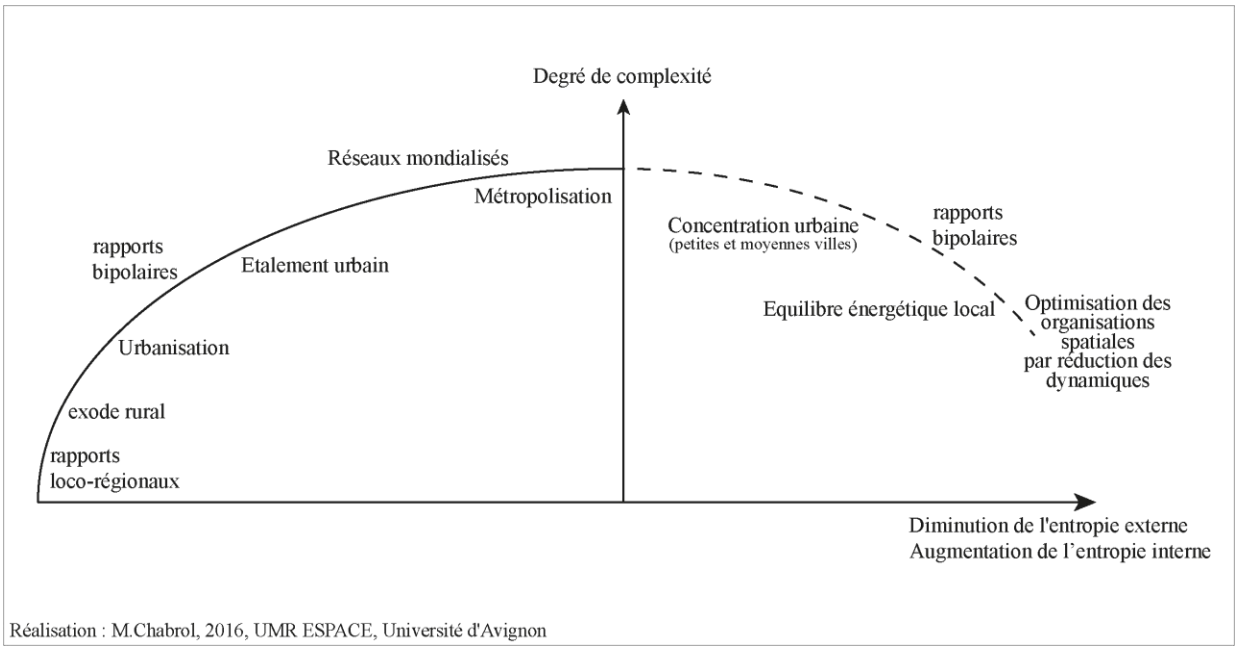


Figure 9. Hypothèse de trajectoire d'évolution selon un principe de réduction de l'entropie externe

La loi d'entropie questionne donc les limites du modèle de développement qui a contribué à construire les organisations spatiales actuelles des activités humaines. La maximisation de la dissipation de l'énergie a permis aux sociétés humaines de produire des structures spatiales qui optimisent leur fonctionnement, accélèrent leur évolution et maximisent le potentiel d'interaction sociale entre les individus. Mais les externalités négatives induites amènent aujourd'hui les sociétés à reconsidérer les interactions qui les relient à l'environnement dans un dilemme évolutif.

Cette question de l'avenir énergétique et des alternatives possibles s'institutionnalise de plus en plus. L'heure des choix a sonné et avec elle, son lot d'ambiguïtés.

Chapitre 2
Transition énergétique et énergies renouvelables : ambiguïtés d'un nouveau modèle énergétique

La transition énergétique est un projet normatif et institutionnalisé en réponse aux préoccupations sociétales évoquées précédemment. Son objectif est de tendre vers un modèle énergétique qualifié de durable. Ce nouveau modèle implique donc la transition entre un fonctionnement socio-économique fondée sur l'utilisation d'énergies fossiles largement disponibles et à coût faible ou modéré, et un fonctionnement socio-économique moins énergivore prenant appui sur un mix énergétique renouvelable garantissant un niveau de performance économique au moins équivalent à celui d'aujourd'hui, l'économie bas-carbone. À la différence des transitions énergétiques historiques mêlées à l'évolution générale des sociétés, essentiellement liées à l'évolution des technologies (moteur à vapeur, dynamo…), la transition énergétique contemporaine est un processus engagé par les pouvoirs publics, particulièrement en Europe. Ce changement institutionnalisé cherche à définir un nouveau modèle énergétique impliquant le développement des productions d'énergie renouvelable et l'adaptation des territoires à des modes de fonctionnement moins énergivores. Les limites des systèmes énergétiques actuels basés sur les énergies fossiles sont questionnées et d'autres modèles possibles d'approvisionnement sont envisagés pour répondre aux enjeux de l'économie bas-carbone.

Ce second chapitre s'attache à définir la transition énergétique à travers ses dimensions historique, économique et politique, et resitue les problématiques liées au développement des énergies renouvelables et à la production d'électricité.

1 Définir la transition énergétique

Si la transition énergétique est aujourd'hui proposée comme une réponse de long terme au défi environnemental soulevé par le changement climatique et l'épuisement à plus ou moins longue échéance des ressources fossiles, il n'en existe pas pour autant de définition universelle. Cela s'explique à la fois par une appréhension encore limitée et un déficit de connaissance sur les processus qu'elle engage (Dubois, 2009), mais aussi par les caractères contradictoires, ambigus et incertains qui la composent et révèlent sa nature fondamentalement complexe. La transition énergétique repose en effet sur l'interrogation et la remise en cause de multiples aspects des évolutions sociale, économique, politique et technologique alimentées par la croissance mondiale depuis plusieurs siècles. Cet examen des fondamentaux à la base de l'activité sociale et économique n'avait jamais été envisagé à une telle échelle jusqu'à aujourd'hui, même si les externalités négatives des modes de développement des sociétés sont connues et largement diffusées depuis plusieurs décennies (Meadows, 1972). De plus, les difficultés pour évaluer avec précision les contraintes climatiques, et par conséquent les actions à entreprendre en matière d'adaptation, plongent la question de la transition énergétique dans un bain d'incertitude dont les remous projettent des visions multiples du devenir du monde et de l'humanité.

1.1 Sémantique de la transition et de la transition énergétique

Le terme de *transition* désigne le passage d'un état à un autre. Cela sous-entend donc des processus de transformation et de changement mais dont les éléments sont identifiables, voire mesurables (Charles, 2015). La notion de *transition* implique ainsi la connaissance de chacun de ces deux états qui suppose que le passage d'une réalité à une autre s'effectue dans la maîtrise des processus en jeu. Ce terme s'inscrit alors dans une perspective de contrôle du changement. Il fait référence à un événement et une trajectoire (Gras, 2015). Il rassure ainsi d'un point de vue communicationnel sur les transformations à venir et favorise l'acceptabilité du changement, au regard d'autres termes aux connotations parfois anxiogènes comme *réforme* ou encore *révolution*. De ce point de vue, l'état qui suit une transition apparaît comme un objectif atteignable, tout du moins les processus pour l'atteindre sont connus. On note ici une forte contradiction avec les dynamiques récentes de changement auxquelles les sociétés font face et qui semblent hors de contrôle comme la crise financière ou la crise climatique et environnementale.

L'expression *transition énergétique* exprime alors une opération de changement appliqué à un domaine, celui de l'énergie. Elle élude de ce fait tout caractère aléatoire et suggère que cette transformation est a priori maîtrisable et que l'état post-transition est connu, sans donner toutefois d'indications sur la nature précise du changement invoqué. Ce vocable donne alors une image a priori rassurante et positive d'une opération d'envergure qui concerne pourtant le domaine vaste et complexe de l'énergie. Notons par ailleurs que si la traduction littérale existe en anglais (*Energy transition*), l'expression allemande *Energiewende* dont le

radical *wende* signifie le virage (ou le tournant) est beaucoup plus explicite. Cette formule évoque en effet plus clairement un changement de direction et intègre davantage un caractère incertain. La question de l'image est en effet importante car d'un point de vue sémantique, la formule *transition énergétique* est une représentation sécurisante et contrôlable d'une réalité future mais qui occulte tout autant les difficultés pour construire cette réalité que ce qu'elle recouvre vraiment (Rudolf, 2015) (Figure 10 et 11).

crédits photo : Photon et N-Media images - Fotolia

Figure 10. Die Energiewende, virage énergétique allemand et métaphore routière

crédit images: www.actu-environnement.com ; www.consoglobe.com

Figure 11. La transition énergétique en France, métaphore du choix

1.2 Des transitions passées à l'économie bas-carbone

La transition énergétique qualifie donc le passage d'un système énergétique à un autre. Smil la définissait en 2010 comme un changement dans la structure de l'approvisionnement énergétique marqué par le passage progressif d'un modèle spécifique d'approvisionnement à un nouvel état du système énergétique. Araujo la définit en 2014 comme un changement majeur dans la nature ou le modèle de système énergétique qu'elle définit comme une constellation d'intrants et d'extrants énergétiques impliquant des fournisseurs, des distributeurs et des utilisateurs, ainsi que des institutions de régulation.

Les sociétés ont connu plusieurs transitions énergétiques dans l'histoire. Si la transition énergétique est en effet une préoccupation politique majeure du XXI^{e} siècle, elle n'est cependant pas un fait nouveau.

La première transition énergétique moderne s'est produite lors du passage des vecteurs d'énergie traditionnels[13] aux combustibles fossiles (Kander et *al.,* 2013). La capacité d'exploitation des terres cultivables face à la croissance démographique a imposé une limite à partir de laquelle les sources d'énergie se sont trouvées en situation de concurrence, en particulier en raison de l'augmentation du coût de transport du bois (Allen, 2012 ; Rutter, Keirstead, 2012). La capacité à répondre à cette contrainte grâce à la mécanisation de l'agriculture pose les fondements des transitions énergétiques modernes. La transition aux combustibles fossiles marque le début des transitions énergétiques modernes qui opèrent autant dans l'exploitation de nouvelles ressources comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel que dans le développement de nouveaux vecteurs, le plus important étant l'électricité (Kander *et al.,* 2013). Cette histoire des transitions énergétiques est en partie une histoire des dynamiques de substitution animée par un déplacement de la demande des consommateurs entre différentes sources d'énergie en fonction de leur prix (Marchetti, Nakicenovic, 1979 ; Fouquet, 2010 ; Kander *et al.,* 2013). La substitution d'une source d'énergie par une autre résulte d'une compétition pour pénétrer un marché de consommation selon le modèle classique de croissance logistique, courbe en *S* (Kuznets, 1930 ; Bass, 1969 ; Young, 2009). Mais il existe aussi une forte complémentarité entre les vecteurs d'énergie et les technologies qui leur sont associées. L'électricité est nécessaire pour le fonctionnement d'une large gamme d'équipements (ordinateurs, machines industrielles) et les véhicules sont jusqu'à présent plus performants en fonctionnant à partir de vecteurs d'énergie sous formes liquides. Les changements les plus importants dans les systèmes énergétiques dépendent en effet des grandes innovations et évolutions technologiques, mais aussi sociétales qui permettent leur diffusion et leur intégration dans les usages. Ces changements proviennent de l'évolution des connaissances techniques et des innovations qui en découlent (Mumford, 1950), mais ces progrès ne se produisent pas seulement dans les techniques de production d'énergie et l'invention de nouveaux processus (puissance de la vapeur, moteur à combustion). Ils s'intègrent aussi dans un cadre socio-économique plus large favorable à l'utilisation de ces nouvelles technologies (Allen, 2012).

[13] Force humaine et animale de travail, moulins à eau et à vent, tourbe et surtout le bois

Le niveau de développement économique est une condition essentielle et justifie un décalage dans le temps entre l'invention d'une technique ou d'un procédé et son adoption généralisée qui nécessite des capitaux et des investissements pour en permettre une large diffusion (Fouquet, Pearson, 2012 ; Grubler, 2012 ; Rühl et *al.,* 2012). De nouvelles entreprises doivent être créées et les anciennes doivent s'adapter. De nouvelles infrastructures sont nécessaires et, sur ce point, les institutions publiques ont un impact par leurs investissements, leur planification ou l'ajustement des lois pour faciliter le développement de nouveaux systèmes sociotechniques (Kander et *al.,* 2013).

1.2.1 Les moteurs historiques des transitions énergétiques

Si le processus de croissance économique au cours du temps est plutôt régulier et continu, il se réalise par des processus sous-jacents faits de ruptures et de discontinuités impliquant des changements structurels majeurs et qui nécessitent parfois du temps pour se produire. La temporalité des transitions énergétiques est donc due à un ensemble de facteurs socio-économiques et technologiques : la croissance démographique, la présence de ressources, le prix et le coût de l'énergie, mais aussi ceux des services énergétiques, le niveau de vie, le niveau de développement économique, les conditions d'émergence d'innovations technologiques et le temps d'adoption de ces technologies. Ces facteurs s'imbriquent et agissent de façon systémique. Si les coûts impliquent de se tourner vers l'énergie la moins chère, l'évolution du niveau de vie active la demande, mais favorise aussi les conditions d'émergence des innovations (alphabétisation, progrès des sciences et techniques…). Dans le même temps, les innovations répondent aussi à une demande sociale (éclairage, confort, mobilité…) et industrielle (performance des procédés, augmentation de la productivité) (Allen, 2012). Aussi la rapidité à laquelle se sont déroulées les transitions énergétiques de la seconde moitié du XX^{e} siècle est liée au faible coût du pétrole par rapport à celui du charbon, à l'activation de la demande en services énergétiques liée à l'amélioration des conditions de vie, à la croissance démographique, à la baisse des prix des services énergétiques, et donc à la rapidité d'adoption des nouvelles technologies, en particulier celles liées aux modes de transports individuels et à l'usage de l'électricité domestique (Rutter, Keirstead, 2012). Cette combinaison de facteurs a eu pour conséquence d'augmenter très rapidement la demande énergétique (Rühl et *al.,* 2012).

1.2.2 Transition énergétique actuelle et économie bas-carbone

La transition énergétique contemporaine est de nature différente. Si les transitions passées étaient intégrées à l'évolution systémique des sociétés industrielles et post-industrielles, la transition qui s'amorce de nos jours émane de choix politiques et de volontés institutionnelles, en réponse à des préoccupations sociétales profondes. C'est une transition décidée et provoquée qui s'appuie sur un nouvel objectif assigné aux systèmes énergétiques (Defeuilley, 2014). Alors que par le passé, l'énergie était au service d'une croissance économique dans une logique productiviste, au profit d'une société de consommation, elle doit aujourd'hui contribuer à la mise en place d'une économie bas-carbone (*low carbon economy*). La transition énergétique qualifie de ce point de vue une transformation des systèmes énergétiques capable de répondre aux enjeux

de l'économie bas-carbone ; c'est-à-dire une décarbonisation de l'économie, jusqu'alors basée sur l'utilisation des ressources fossiles, afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre, le secteur énergétique étant responsable de 26% des émissions au niveau mondial (World Bank, 2012). Cette transition est déjà en marche dans de nombreux pays européens. Même si elle n'en est qu'aux balbutiements et qu'il est très probable qu'elle s'inscrive dans un temps long, cette transition commence à impacter le secteur électrique et les modèles d'activités des principaux groupes énergéticiens (Defeuilley, 2014). Ces groupes adaptent leurs stratégies et modifient le paysage concurrentiel du secteur de l'énergie. Les objectifs de l'économie bas-carbone introduisent dès lors une rupture et une contradiction dans les principes qui animent le système énergétique et son implication dans la croissance économique : produire de l'énergie et augmenter les rendements pour alimenter les besoins en croissance d'autres secteurs de l'économie (industrie, agriculture, transport…). Le nouvel objectif assigné aux systèmes énergétiques est aujourd'hui de contribuer à une limitation des émissions de gaz à effet de serre tout en redynamisant l'économie. Ce double objectif se traduit par une articulation entre deux axes forts, le déploiement des énergies renouvelables et la recherche d'une maîtrise de la demande énergétique, et par la définition d'un cadre normatif qui fixe le périmètre d'intervention de l'action publique.

L'économie bas-carbone semble donc correspondre à la trajectoire d'évolution proposée dans le modèle de la figure 8 (Cf. Chapitre 1, 2.3.2), c'est-à-dire conserver le niveau de complexité atteint par nos systèmes en optimisant leurs rendements et en augmentant leur efficacité énergétique.

1.3 L'institutionnalisation de la transition énergétique

La transition énergétique est présentée aujourd'hui comme un projet normatif dont l'objectif est de tendre vers un modèle énergétique qualifié de durable. La transition énergétique est désignée de ce point de vue par les institutions politiques comme une nécessité, comme un changement inévitable et impératif dans un contexte où les tensions liées aux évolutions climatiques et aux énergies conventionnelles sont croissantes. Elle est affichée comme une solution nécessaire qui passe par une modification des systèmes énergétiques, mais aussi des systèmes sociotechniques dépendants de l'énergie. C'est un processus engagé par les pouvoirs publics, particulièrement en Europe. Elle s'inscrit donc dans le cadre d'une volonté politique cherchant à définir un nouveau modèle énergétique. La plupart des pays européens ont institutionnalisé cette transition énergétique par le vote de lois spécifiques et la prise de mesures économiques et financières favorables au développement de filières de production d'électricité d'origine renouvelable. Des incitations, voire des obligations, de maîtrise des consommations sont également appliquées.

1.3.1 Les orientations de la politique énergétique nationale française

La France a récemment redéfini sa politique énergétique et proposé sa vision de la transition énergétique par l'adoption de la loi pour la Transition Énergétique et la Croissance Verte le 17 août 2015 (TECV). Cette loi s'inscrit essentiellement dans la continuité de deux lois

précédentes : la loi de programme des orientations de politique énergétique de 2005 (loi POPE)[14] qui encadre la politique énergétique nationale, et la loi de mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.[15] Elle redéfinit et modifie certaines injonctions contenues dans ces lois ainsi que des éléments contenus dans le code de l'énergie, le code de la construction et de l'habitat, le code de l'urbanisme. Cette loi a pour finalité de conjuguer deux champs d'action qui peuvent paraître contradictoires. Elle se compose en effet à la fois de mesures qui s'inscrivent dans le champ de la contrainte et de la réduction des consommations, de la dépense et des coûts, et de mesures qui relèvent du champ du dynamisme et de l'investissement économiques.

Les objectifs généraux décrits par cette loi sont clairement de mettre en place une économie bas-carbone, c'est-à-dire de diminuer l'empreinte carbone des activités sociales et économiques, de renforcer l'indépendance énergétique de la France et de relancer la croissance économique. Cette volonté de réduction de l'empreinte carbone s'inscrit dans la continuité du programme *Facteur 4* qui définissait en 2005 un objectif de diminution par 4 des émissions de gaz à effet de serre en France à l'horizon 2050 (Cf. loi Grenelle).

Une Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), instituée par la loi pour la Transition Energétique et la Croissance Verte, a été adoptée en Conseil des ministres le 18 novembre 2015. Elle fixe des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour chaque secteur sur la base des émissions de 2013 (Tableau 3).

La loi pour la Transition Energétique et la Croissance Verte prévoit aussi une réduction de la consommation énergétique nationale de 50% par rapport à 2012 à l'horizon 2050 et de porter la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie à 32% pour 2030. Les principales mesures législatives, politiques et budgétaires s'articulent essentiellement autour du développement des filières des énergies renouvelables, de la mobilité électrique ou hybride, de l'économie circulaire, et de normes destinées à favoriser une réduction de la consommation d'énergie dans le secteur de l'habitat et du bâtiment. Mais cette loi définit aussi le périmètre d'action des pouvoirs publics pour sa mise en œuvre. La nature des mesures contenues dans cette loi impliquera nécessairement un rôle important des élus locaux et une mise en application par une planification locale, c'est-à-dire en grande partie par les plans locaux d'urbanisme, situés en bout de chaîne des documents de planification dans une logique descendante.

[14] Loi n°2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique, Journal officiel du 14 juillet 2005.
[15] Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement.

Secteurs	Part actuelle des émissions de GES (2013)	Objectifs	Orientations
Transports	28%	Réduction de 29% à l'horizon 2024-2028, de deux tiers pour 2050	Norme de 2 litres/100 km en moyenne pour les véhicules vendus en 2030. Quotas de véhicules à faibles émissions dans les flottes publiques et stratégies de développement des infrastructures de recharge. Télétravail, covoiturage. Incitations fiscales pour les mobilités alternatives à la voiture. Développement du fret.
Bâtiments	20%	Réduction de 54% à l'horizon 2024-2028, de 87% pour 2050 Réduction de 28% de la consommation énergétique pour 2030 par rapport à 2010.	RT 2012 Rénovation totale du parc aux normes BBC pour 2050. Ecoconception, compteurs communicants
Agriculture et foresterie	19%	Réduction de 12% à l'horizon 2024-2028, de 50% pour 2050. Stockage de carbone dans les sols et la biomasse.	Projet *agroécologique*. Valorisation des effluents, Agroforestrerie Produits biosourcés.
Industrie	18%	Réduction de 24% à l'horizon 2024-2028, de 75% pour 2050	Efficacité énergétique Économie circulaire
Énergie	12%	Maintenir les émissions en dessous du niveau de 2013 à l'horizon 2024-2028, réduction de 96% pour 2050 par rapport à 1990	Développer les énergies renouvelables Améliorer la flexibilité du système électrique
Déchets	4%	Réduction de 33% à l'horizon 2024-2028	Réduction du gaspillage alimentaire, Écoconception Valorisation des déchets Supprimer l'incinération sans valorisation énergétique.

Sources : MEDDE, 2015

Tableau 3. Stratégie Nationale Bas-Carbone

1.3.2 Une logique descendante dans la mise en œuvre de la transition énergétique

En France, la planification énergétique n'est pas la seule compétence de l'État. L'action de l'État passe par des structures relais, en dehors de ses services déconcentrés en région. L'Agence pour l'Environnement et la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) a été créée par l'État pour impulser et appuyer les politiques nationales en matière d'énergie et d'environnement. Mais aujourd'hui, le rôle des collectivités territoriales en matière de planification énergétique est croissant. La dimension territoriale de la question énergétique est ainsi reconnue depuis 1999 dans la législation à travers le dispositif de Schéma de Services Collectifs de l'Énergie (SSCE) contenue dans la Loi d'Orientation pour l'Aménagement et le Développement Durable du Territoire (LOADDT). Les collectivités, de la commune à la Région, sont invitées à s'engager pour l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables (EnR) et décentralisées. « *Les collectivités territoriales sont invitées à mettre en œuvre des actions propres à développer les EnR dans leurs propres patrimoines […] à procéder à un inventaire des zones favorables à l'implantation de moyens de production d'énergie à partir d'EnR.* » (LOADDT, 1999). Le SSCE révèle qu'il est « *indispensable de s'appuyer sur les acteurs locaux dans l'élaboration d'une politique énergétique régionale […] le niveau régional paraît à ce stade le niveau le plus pertinent pour définir, décider, développer, évaluer les actions d'économie d'énergie, et valoriser les EnR* » (Bailly, Rosenstein, 2003).

Les collectivités territoriales s'engagent dans la mise en œuvre de la transition énergétique à travers les documents de planification introduits dans la loi Grenelle. Les Schémas Régionaux Climat, Air, Énergie (SRCAE) et les Plans Climat Air Énergie Territoriaux (PCAET) engagent les territoires français dans une démarche de mise en œuvre de la transition énergétique. Les SRCAE sont désormais intégrés dans les Schémas Régionaux d'Aménagement de Développement Durable et d'Egalité des Territoires (SRADDET) et deviennent prescriptifs. L'importance de ces documents et le rôle de la Région, définie comme « *l'échelon pertinent pour coordonner les études, diffuser l'information et promouvoir les actions en matière d'efficacité énergétique* », ont été réaffirmés et la loi pour la transition énergétique demande à l'ensemble des politiques publiques d'intégrer les objectifs qu'elle contient. La mise en œuvre de la transition énergétique s'effectue donc dans une logique descendante en déclinant les objectifs nationaux aux échelons inférieurs (Figure 12). Les collectivités territoriales ont ainsi aujourd'hui pour rôle de définir et réguler la ressource énergétique, de définir la production d'énergie renouvelable, de limiter les consommations liées au bâti ou aux transports, de lutter contre la précarité énergétique et de structurer les filières économiques (Cf. loi TECV). Les Régions doivent fixer les objectifs et un cadre général de stratégie. Les intercommunalités doivent, quant à elles, coordonner et mettre en œuvre les actions de transition énergétique à travers les PCAET qui relèveront dorénavant exclusivement de l'échelon communautaire. Elles doivent aussi intégrer dans les documents d'urbanisme (Schéma de Cohérence Territoriale – SCoT et Plan Local d'Urbanisme – PLU), les orientations du SRADDET et du SRCAE, dans une relation de prise en compte (Figure 12). Les acteurs de l'aménagement du territoire et de la planification locale ont aujourd'hui à repenser la manière d'intégrer les questions énergétiques dans les

territoires. Si l'exercice de planification constitue, depuis les orientations données par la loi Grenelle, un cadre pour intégrer les problématiques de l'énergie et du climat dans les politiques publiques territoriales, la loi pour la Transition Energétique et la Croissance Verte renforce le rôle de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire (FNAU, 2015).

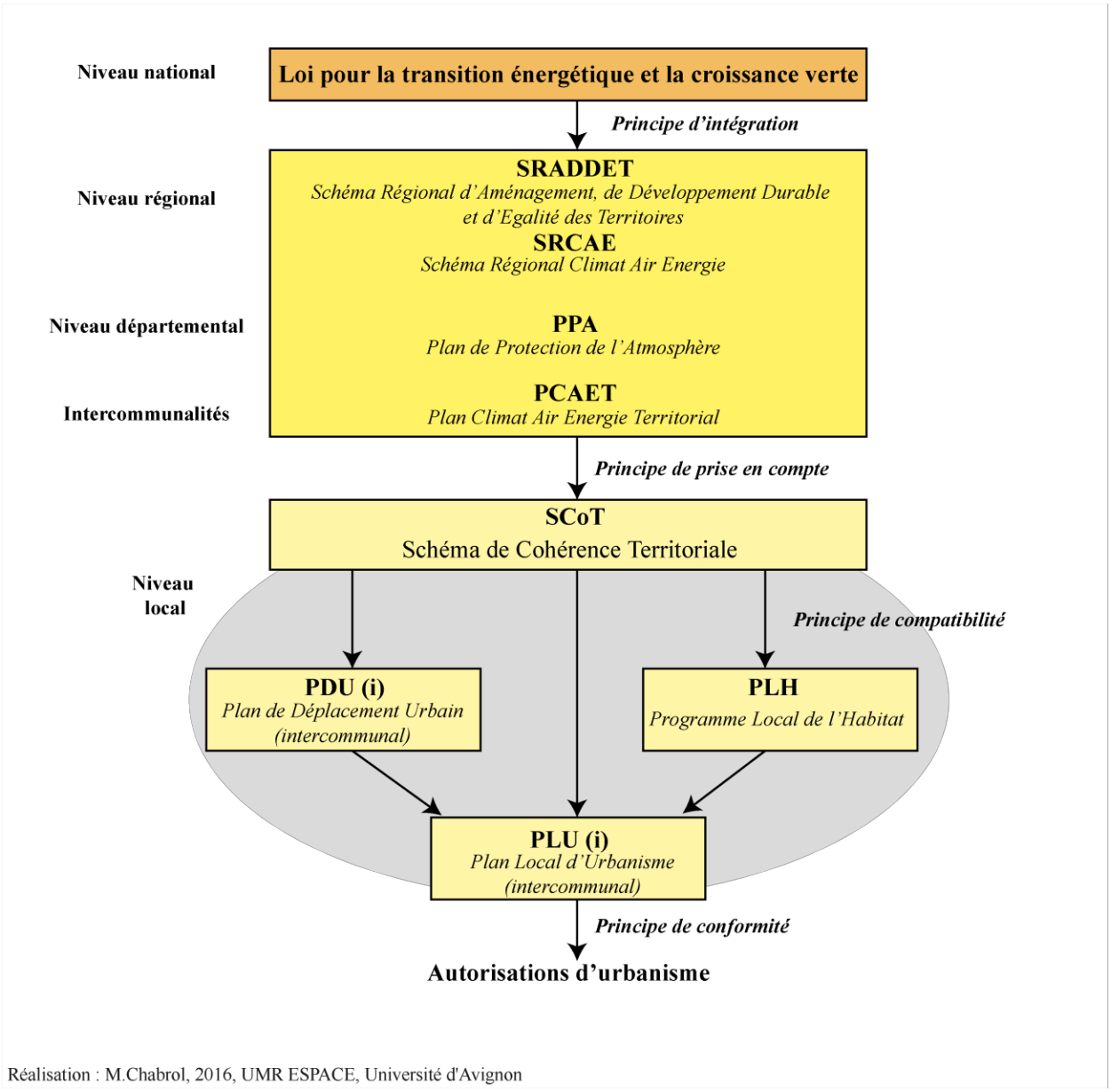


Figure 12. Déclinaison territoriale de la transition énergétique dans les documents d'urbanisme

La nature des mesures contenues dans la loi pour la transition énergétique impacte directement les démarches de planification locale, particulièrement les plans locaux d'urbanisme, communaux ou intercommunaux, situés en bout de chaîne des documents de planification dans une logique descendante (Figure 13). La loi pour la transition énergétique révèle alors une intervention forte de l'État comme vecteur majeur d'intervention au niveau collectif par le recours à la planification sur un projet d'intérêt général (Charles, 2015). Le fait d'identifier l'habitat et les mobilités comme les sources principales de consommation d'énergie conduit à

placer l'aménagement du territoire et l'urbanisme parmi les moyens d'action privilégiés d'une transition énergétique. Mais la logique top-down de la démarche adoptée par l'État interroge sur le risque d'arbitraire que peut susciter la mise en application de cette loi et sur les disparités potentielles qu'elle peut générer entre les territoires.

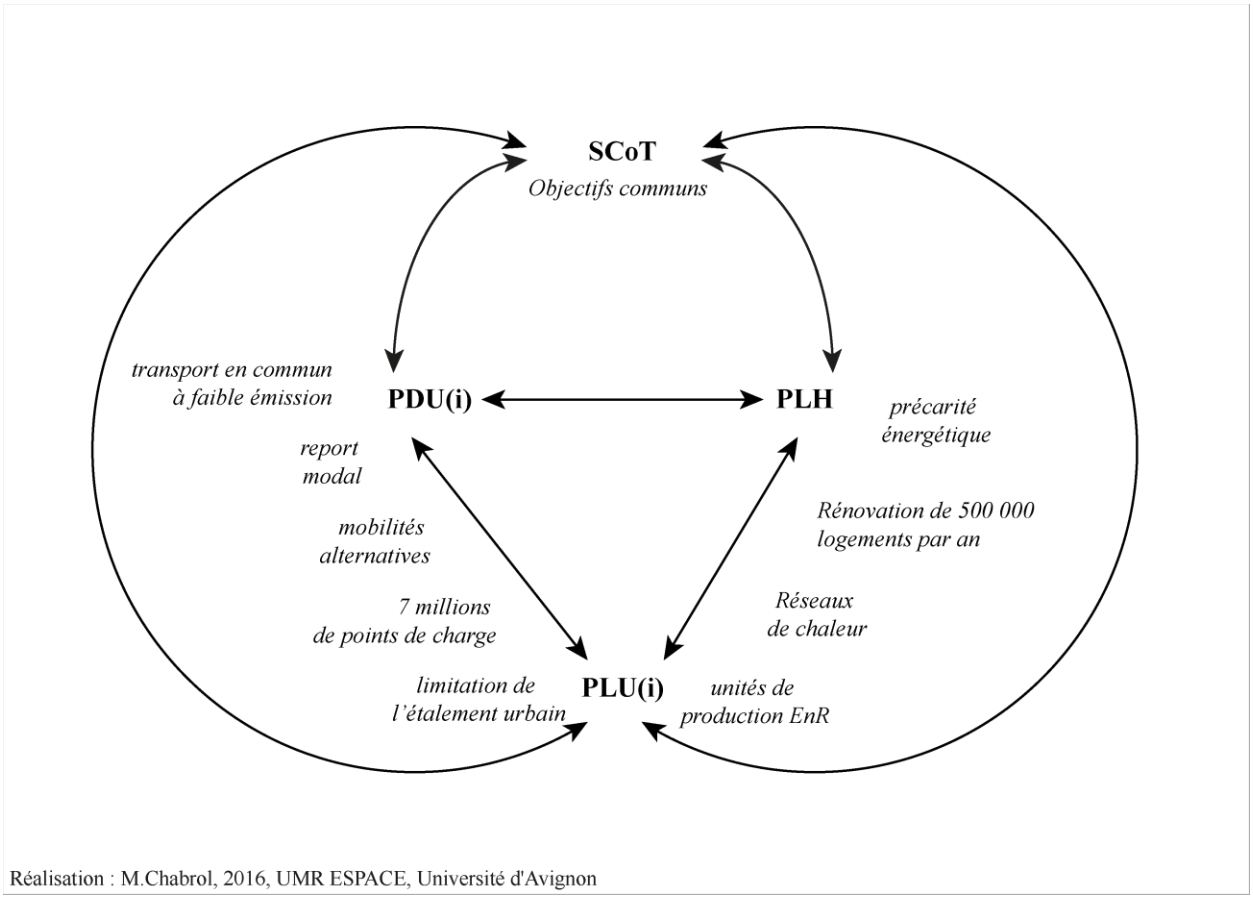


Figure 13. Objectifs de transition et documents de planification locale

La loi de transition énergétique encourage et accompagne par ailleurs les « Territoires à Énergie Positive » (TEPos). Le réseau TEPos a été l'un des premiers collectifs à élaborer des expériences rurales de mise en œuvre de la transition énergétique à l'échelle locale. Ce réseau a été mis en place en 2011 par une ONG française engagée dans le développement des énergies renouvelables, le Comité de Liaison pour les Energies Renouvelables ou le « CLER réseau pour la transition énergétique ». Il regroupe les autorités locales rurales, des coopératives agricoles et énergétiques, des petites et moyennes entreprises, des ONG, des bureaux d'études, qui travaillent ensemble pour une mise en œuvre de la transition énergétique dans les territoires ruraux. Les territoires « TEPos » s'engagent à se diriger vers l'autonomie énergétique, c'est-à-dire vers une couverture annuelle moyenne de la consommation d'énergie par une production d'énergie renouvelable locale (électricité, chaleur et mobilité). Ils s'engagent en outre à partager tout éventuel surplus de production avec les territoires proches, notamment urbains, pour des raisons de cohésion territoriale. Les territoires « TEPos » adoptent des approches économiques, sociales, environnementales, politiques et démocratiques spécifiques dans une perspective de

développement local. En avril 2014, le réseau TEPos comptait 50 membres. Si les initiatives portées par ces territoires ruraux sont encore marginales, ces derniers représentent en quelque sorte un laboratoire d'expériences d'innovations sociales pour une mise en œuvre locale de transition énergétique. Dans ce type de démarche, les infrastructures de production d'énergie renouvelable constituent un élément de développement local qui passe par une mobilisation coordonnée des acteurs locaux pour valoriser ces ressources dans le cadre de projets de territoires (Nadaï *et al.*, 2015). Ces expériences aujourd'hui limitées à des territoires spécifiques dont l'histoire et le contexte économique et socio-spatial favorisent l'émergence d'une mobilisation collective (Nadaï *et al.*, 2015) pourraient être amenées à se multiplier, d'autant plus que la loi pour la transition énergétique s'est inspirée de cette démarche par la création du dispositif « Territoires à Énergie Positive pour la Croissance Verte » (TEPCV).

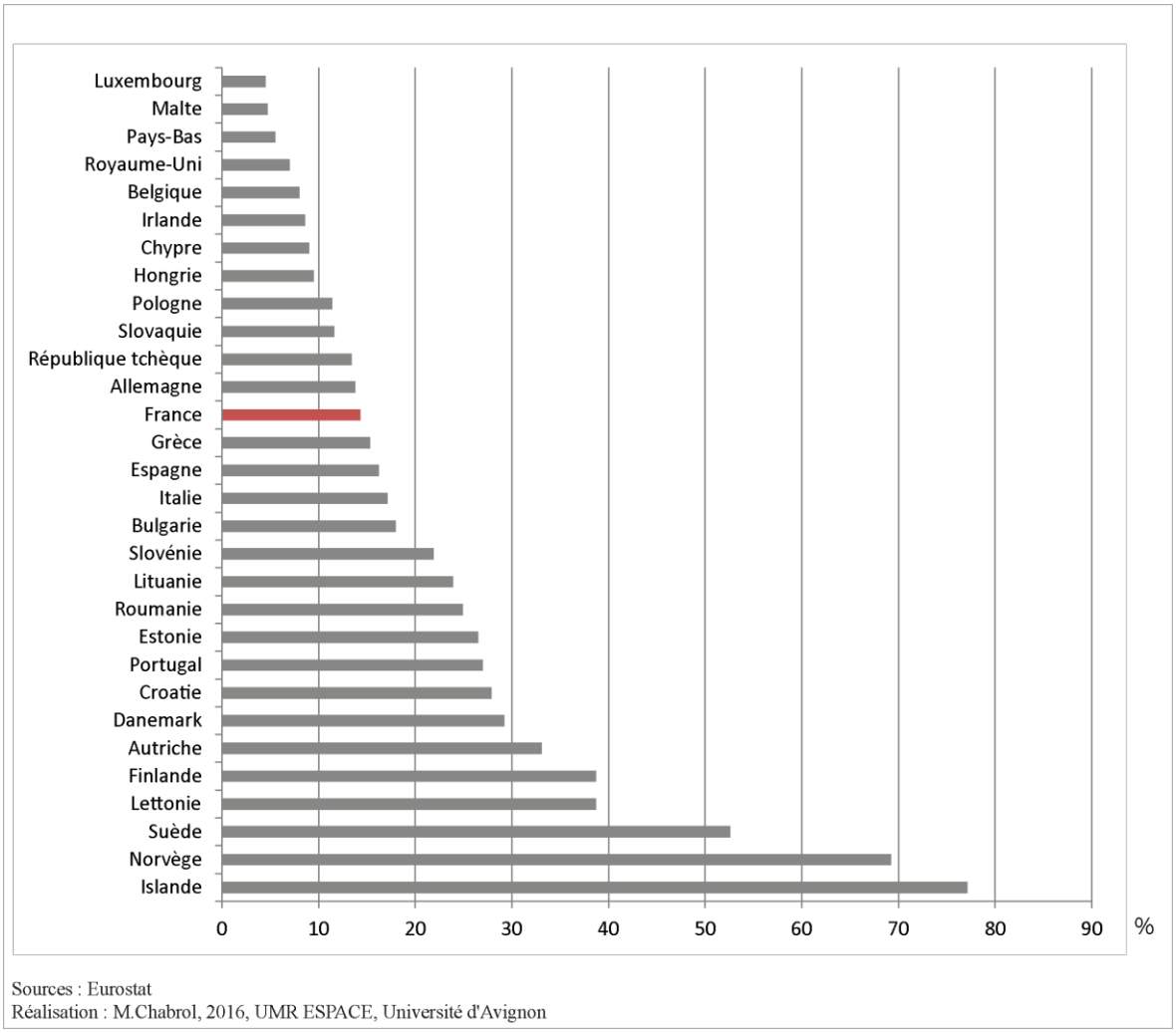
2 Le développement des énergies renouvelables, une transition électrique

2.1 Mix énergétique et intégration des énergies renouvelables

Le mix énergétique représente la répartition des différentes énergies primaires dans la production totale d'énergie d'un pays, d'une région ou de l'ensemble de la planète. Le mix énergétique mondial est composé à plus de 80% d'énergies fossiles, 6% de nucléaire et 13% d'énergie renouvelables dont moins de 1% pour les nouvelles énergies renouvelables (solaire et éolien) (Barré, Mérenne-Schoumaker, 2011). Les déclinaisons à différentes échelles du mix énergétique constituent un élément de base pour la réalisation de scénarios énergétiques visant à anticiper les capacités futures de production. La composition des mix énergétiques a une dimension territoriale forte car elle reflète les disparités en termes de disponibilité des ressources naturelles et des politiques énergétiques nationales, disparités aujourd'hui accentuées par l'introduction croissante des énergies renouvelables. Les contextes climatiques et énergétiques évoqués précédemment (Cf. chapitre 1) impliquent des travaux de scénarisation et de prospective énergétique basés autour de la maîtrise de la demande énergétique, de l'amélioration de l'efficacité des procédés énergétiques et de l'intégration massive des nouvelles énergies renouvelables (IEA, 2015). Les énergies renouvelables ne dépassent cependant pas 50% de la consommation mondiale dans la plupart des scénarios à l'horizon 2050. Mais la part future des énergies renouvelables varie selon les lieux. Aussi dans des situations insulaires comme sur l'île d'el Hierro aux Canaries, des mix énergétiques 100% renouvelables sont possibles (Gioda, 2014). Ceci étant, quelle que soit la part atteinte par les énergies renouvelables, celle-ci est et sera en augmentation à condition que, d'une part, elles deviennent suffisamment compétitives et que, d'autre part, elles soient accompagnées par des politiques volontaristes, mais aussi qu'un certain nombre d'enjeux techniques soient maîtrisés et résolus.

2.1.1 État des lieux des énergies renouvelables en France

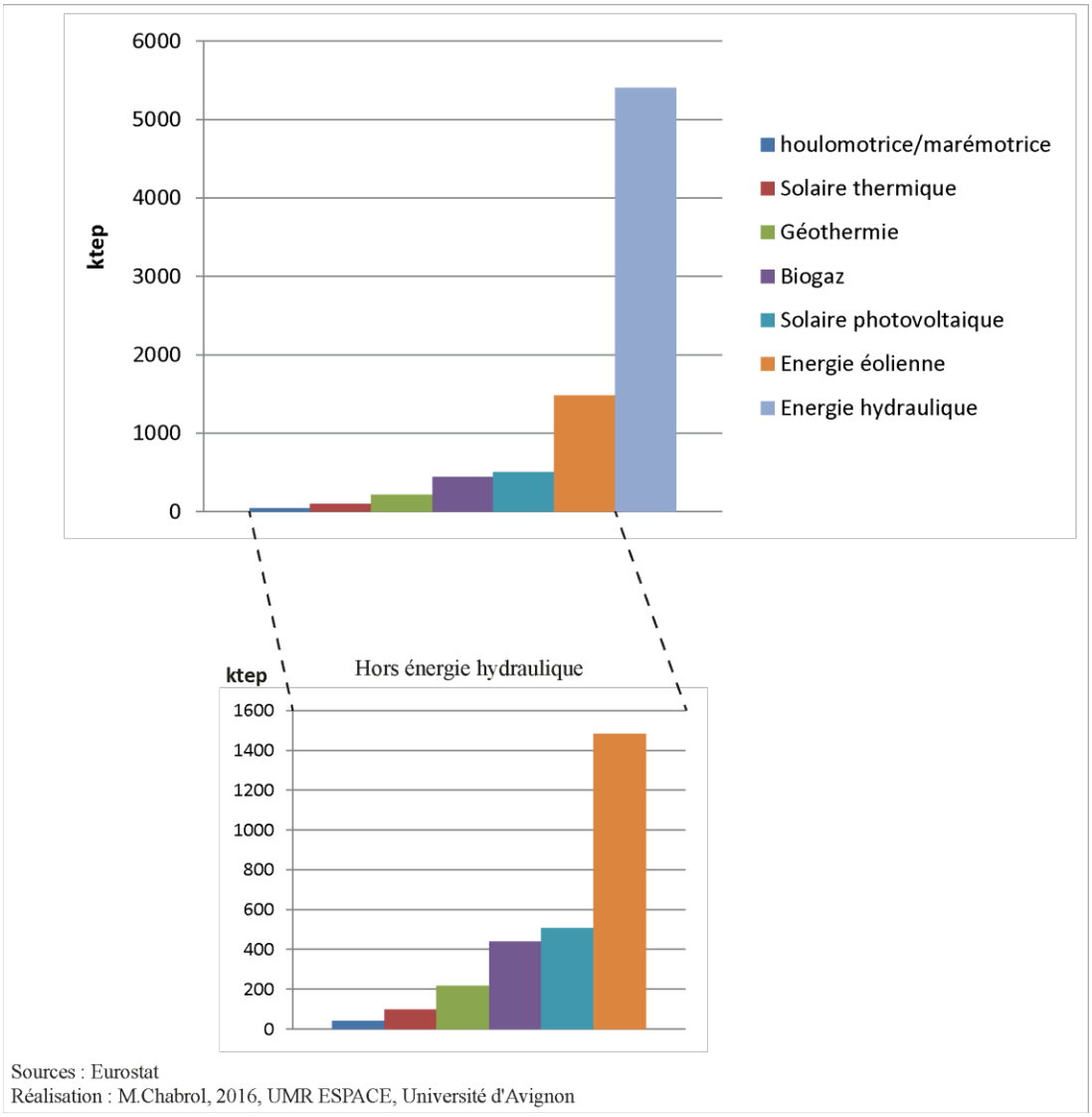
La France apparaît parfois en retard dans le développement des énergies renouvelables en raison de l'investissement de l'État dans le développement de l'énergie nucléaire dans les années 1980-1990. Cependant, si la production d'énergie renouvelable ne représentait que 14% de la consommation totale finale d'énergie en 2014 (Graphique 8), la France occupe la seconde position, derrière l'Allemagne en termes de milliers de tonnes équivalents pétrole produits par des sources renouvelables, grâce à la part importante de surface forestière et aux investissements très importants dans le secteur de l'énergie hydraulique. De plus, elle a été pionnière dans le développement de l'énergie marémotrice, mais aussi celui de la géothermie grâce aux gisements des territoires d'outre-mer notamment la Guadeloupe.



Graphique 8. Part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en % dans les pays de l'Union européenne en 2014

Cependant, le mix énergétique national est composé à près de 82% de production d'énergie nucléaire en 2014. Les 18% restant sont constitué d'énergies renouvelables (14%) et d'une faible production de gaz et de produits pétroliers.

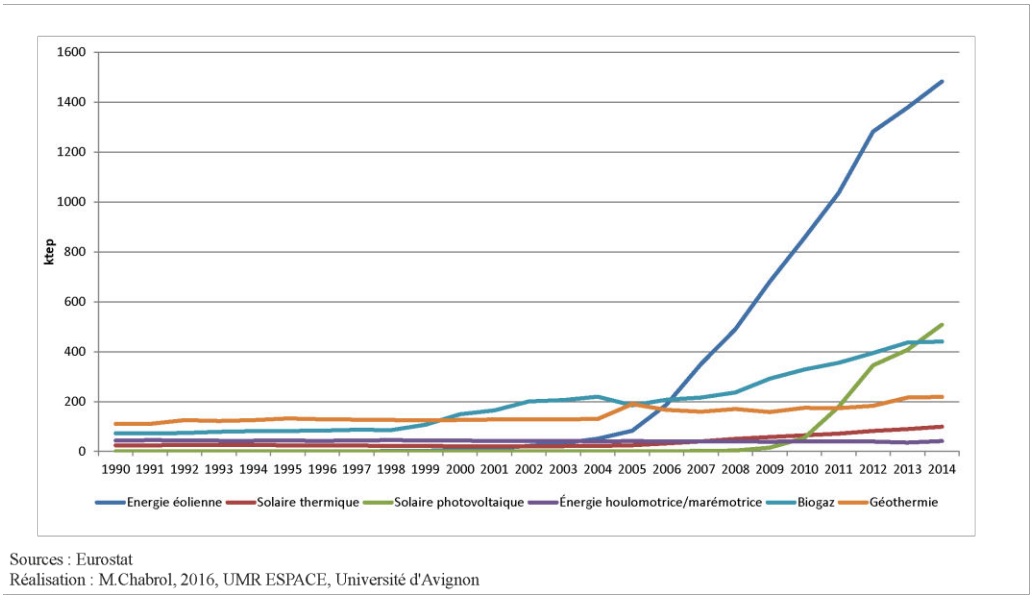
Parmi les 14% d'énergies renouvelables, l'énergie hydraulique est de loin la source d'énergie la plus importante, suivie par l'énergie éolienne (Graphique 9). Mais les nouvelles sources d'énergie renouvelables ont progressé relativement vite, encouragées par les appels d'offres nationaux au début des années 2000 pour l'éolien et en 2008 pour la filière solaire (Graphique 10).



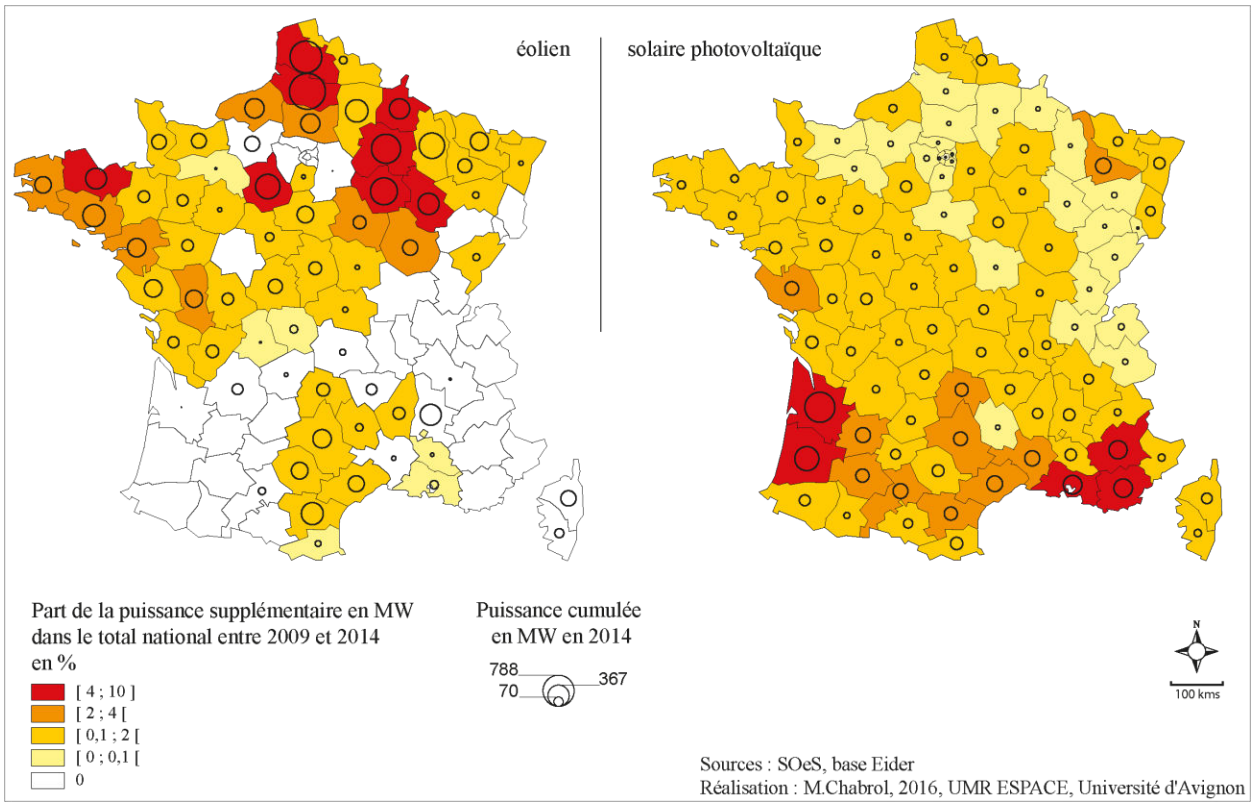
Graphique 9. Production primaire d'énergies renouvelables en France en 2014

L'évolution rapide de l'éolien et du solaire photovoltaïque s'inscrit dans une opposition nord-sud conforme aux gisements. Les plus fortes progressions en éolien se situent dans le nord et l'espace de l'ex-région Champagne-Ardenne, alors que le solaire se développe le long d'un axe Aquitaine-Provence (Carte 2).

Des mesures ont été prises par les pouvoirs publics pour favoriser les énergies renouvelables, notamment suite au protocole de Kyoto pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. La France envisageait alors un développement des énergies renouvelables à hauteur de 23% en 2020, objectif qu'elle conserve dans la loi pour la transition énergétique en ajoutant un objectif de 32% en 2030.



Graphique 10. Évolution de la production primaire d'énergie renouvelable en France de 1990 à 2014



Carte 2. Puissance installée en éolien et en photovoltaïque en France

Les grands groupes industriels comme Électricité De France (EDF) se sont positionnés sur ce nouveau marché. D'ailleurs, EDF a récemment annoncé une augmentation de ses tarifs pour couvrir les frais d'investissement en recherche et développement sur les énergies renouvelables. Du point de vue des entreprises productrices d'électricité en France, le développement des énergies renouvelables représente surtout un secteur en plein essor dans lequel il est bon d'investir pour

gagner des parts de marché et se positionner dans un contexte de libre concurrence, plutôt qu'une démarche visant à réduire l'impact sur le changement climatique. EDF a créé une filiale « *énergie nouvelle* ». Historiquement précurseur dans le domaine de l'éolien, EDF tente aujourd'hui de se positionner sur l'énergie solaire. La Compagnie Nationale du Rhône (CNR) reste le deuxième producteur national d'électricité et leader dans la production hydroélectrique. Elle développe également une production éolienne par une filiale dédiée, CN'Air. Le groupe industriel ENGIE, anciennement GDF-Suez, se positionne également comme un acteur majeur du développement des énergies renouvelables. Désormais majoritaire au capital de la CNR, ENGIE a acquis la société Solaire Direct en juillet 2015 et se place aujourd'hui comme leader du solaire photovoltaïque au sol. La société allemande E-ON qui a racheté la SNET (Société Nationale d'Electricité et de Thermique) a la particularité de se positionner sur un large panel de ressources (charbon, nucléaire, éolien, solaire, biomasse, gaz naturel) et se trouve face au défi de produire de l'énergie propre depuis l'arrêt de l'extraction du charbon en France en 2003 (E.ON, 2011) (Tableau 4).

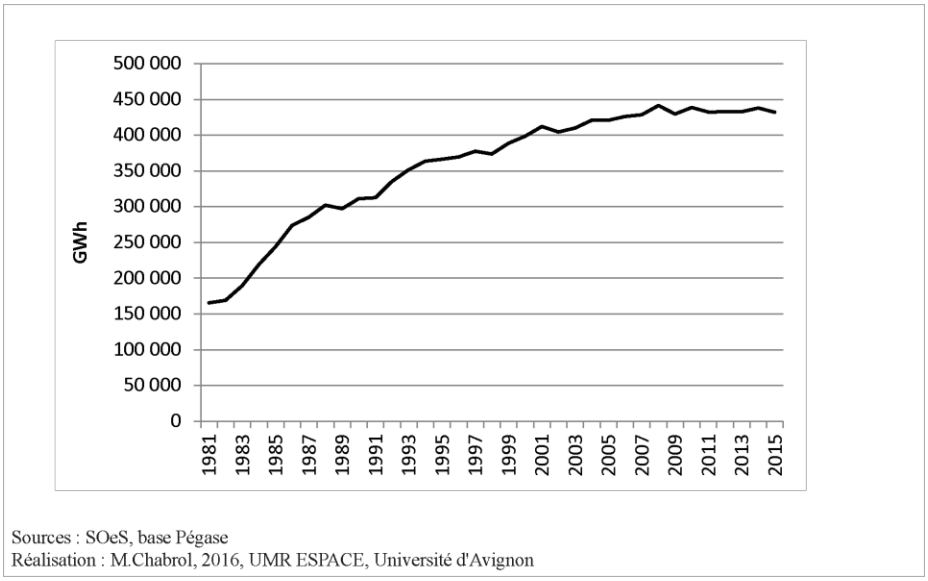
Régulateur	Commission de Régulation de l'Énergie (CRE)
Producteurs	EDF (Electricité De France) et filiale Energie Nouvelle ENGIE (ex-GDF-Suez) et filiales Compagnie du Vent, Solaire Direct CNR (ENGIE actionnaire majoritaire) et filiale CN'Air, E.ON France (Uniper, depuis le 1er janvier 2016) Direct Énergie Alpiq UEM (Usine d'Électricité de Metz) PME des EnR (Voltalia, Quantum, Aeorowatt, Eco Delta …)
Gestionnaires de réseaux	RTE (Réseau de Transport d'Électricité) filiale à 100% d'EDF Les réseaux de distribution sont la propriété des communes, concédés généralement à ERDF ou gérés en régie locale (environ 160 en France)
Fournisseurs	EDF ENGIE Direct Énergie Électricité de Strasbourg (EDF actionnaire majoritaire) Alterna (groupement d'entreprises locales de distribution) Proxelia Energem (UEM) Enercoop, Lampiris et Planète OUI (contrats 100% EnR)

Tableau 4. Les principaux acteurs du marché de l'électricité en France

2.2 Enjeux techniques, économiques et sociaux d'une transition électrique

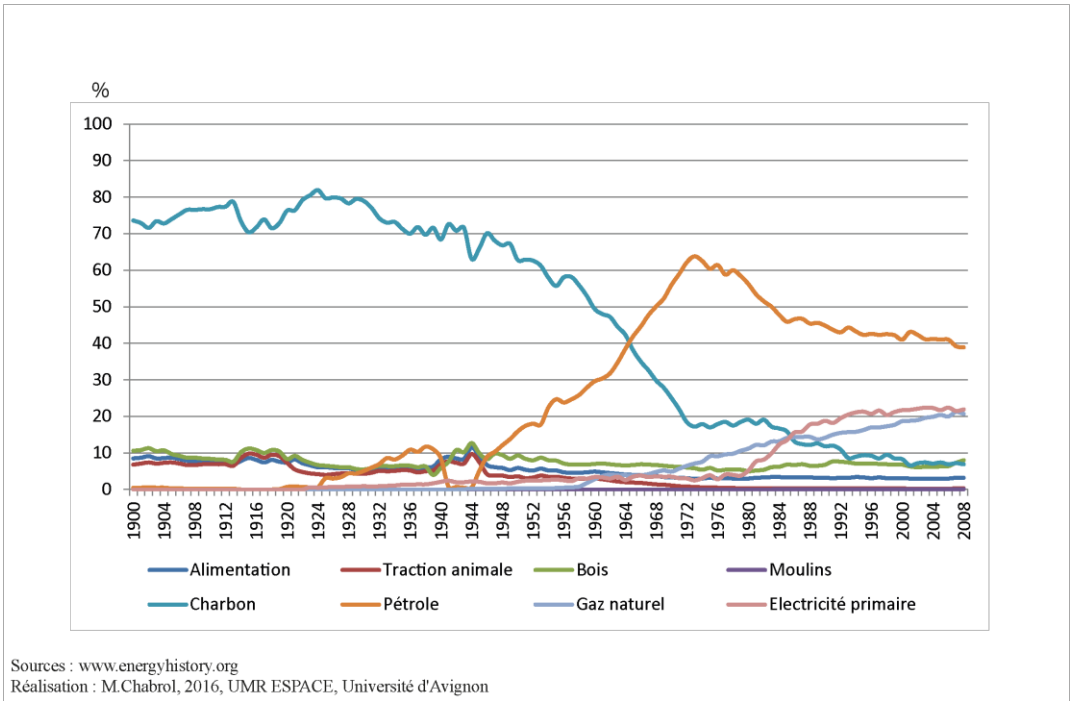
La dépendance de plus en plus forte à l'électricité des modes de vie modernes et la croissance de la demande en électricité liée à l'émergence d'une société du numérique permettent de dire que, si transition énergétique il y a, celle-ci sera sans doute électrique. Même si la

consommation nationale d'électricité tend à se stabiliser ces dix dernières années, elle a toutefois été multipliée par 2,6 en vingt-cinq ans (Graphique 11).



Graphique 11. Consommation primaire d'électricité corrigée du climat[16] en France de 1981 à 2015

L'observation au cours du XX^{e} siècle de la part des types de ressources énergétiques dans la consommation nationale montre bien la possibilité d'une transition du pétrole vers l'électricité primaire et le gaz (Graphique 12), transition qui s'est en réalité amorcée avec les investissements dans l'énergie nucléaire au cours des années 1980.



Graphique 12. Évolution du mix énergétique français au cours du XX^{e} siècle

[16] La consommation corrigée du climat consiste à extraire les hausses de consommations uniquement liées aux variations climatiques et qui ne traduisent donc pas un changement dans les comportements.

Cet élément d'analyse pose au moins trois problèmes. Le premier réside dans le fait que l'électricité est un vecteur d'énergie et que cette énergie peut être produite à partir d'une variété de ressources et de techniques de transformation. Le second est ancré dans le défi technologique du stockage de l'électricité qui n'est pas encore totalement résolu. Et le troisième s'inscrit dans le caractère instantané et immatériel des formes d'usages de l'électricité et des services qu'elle alimente, qui augmentent notre dépendance à ce vecteur d'énergie.

2.2.1 Le problème du coût de production de l'électricité

Comme l'électricité peut être produite à partir de différentes sources, l'aspect financier est un facteur essentiel pour appréhender la question de la rentabilité des énergies renouvelables pour produire de l'électricité par rapport à d'autres types de ressource. L'augmentation du prix des énergies fossiles et les tensions sur les marchés ont conduit à un intérêt croissant pour les énergies renouvelables. Mais le prix du baril est aujourd'hui encore trop bas pour inciter mécaniquement un développement des énergies renouvelables sans les aides publiques.

Pour la production d'électricité, le coût du charbon sert de référence puisque plus de 40% de l'électricité mondiale est produite à partir de cette ressource. Le développement des renouvelables coûte encore beaucoup trop cher en France pour générer des dynamiques fortes de filières (Tableau 5). Mais au coût d'installation s'ajoute le coût de production. L'équilibre entre coût d'installation et coût de production permet d'appréhender la compétitivité des sources d'énergie (Tableau 6).

	Coût d'installation €/kW	facteur de charge[17]	Ci/f en €/kwef[18]
Charbon	1 700	0,85	2 000
Hydraulique	1 500	0,44	3 400
Éolien terrestre	1 500	0,26	5 800
Éolien off-shore	2 500	0,35	7 000
Solaire thermodynamique	5 000	0,4	12 500
Solaire photovoltaïque	5 000	0,25	20 000

Source : d'après Acket C., Vaillant J., 2011.

Tableau 5. Coûts d'installation et facteur de charge des sources productrices d'électricité

[17] Facteur de charge = énergie annuelle produite / énergie potentielle à puissance maximale
[18] Ci/f en €/kwef = coût d'installation par puissance efficace

	Coût de production en Euros/MWh
Nucléaire	49,5
Hydroélectricité	15-20
Éolien terrestre	82
Éolien off-shore	220
Photovoltaïque	230-370 selon dimensionnement
Thermique nouvelle génération (charbon supercritique, cycle combiné gaz)	70-100

Source : Cour des comptes, 2012a, 2012b.

Tableau 6. Coût de production de l'électricité en France

Les énergies renouvelables apparaissent donc peu compétitives et ont nécessité la mise en place de tarifs d'achat spécifiques bien au-dessus du prix du marché pour lancer ces filières. Mais l'Agence Internationale de l'Énergie a récemment montré que le coût de production de l'électricité produite à base d'énergies renouvelables comme le solaire ou l'éolien a considérablement diminué au cours des cinq dernières années, réduisant ainsi l'écart avec les coûts de production des combustibles fossiles et des réacteurs nucléaires (IEA, 2015). De son côté, le coût de l'énergie nucléaire est resté stable. Les coûts devraient par ailleurs changer considérablement dans les décennies à venir en raison de l'évolution rapide des nouvelles technologies qui sont déployées. Les centrales à charbon par exemple devraient coûter 70% plus cher dès lors qu'elles seront équipées des nouveaux équipements de captage et de stockage des émissions de CO_2, alors que les coûts de l'éolien off-shore et du solaire devraient diminuer. Le solaire notamment pourrait descendre en dessous des 100 euros par MWh avant 2025 dans les régions les plus ensoleillées (IEA, 2015). Par ailleurs, les coûts de rénovation des centrales nucléaires en fin de vie et les coûts de construction des centrales nucléaires nouvelles générations devraient également réduire l'écart de compétitivité entre les différentes sources de production d'électricité.

Cependant, malgré une forte augmentation prévisible dans l'avenir, le seul développement des énergies renouvelables ne pourrait pas répondre au problème de la fourniture électrique. Les problèmes techniques n'ont pas tous été résolus (intermittence éolien, solaire, stockage de l'électricité…) et tant que les énergies fossiles ont un coût très inférieur à celui des énergies renouvelables, leur développement reste difficile sans investissement public important, d'autant plus que l'exploitation des hydrocarbures non conventionnels a contribué à faire baisser les prix. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, la production actuelle d'énergie produite à partir de ressources renouvelables pourrait augmenter significativement, soit une multiplication par 4. Cependant, les besoins sont aussi appelés à croître. C'est pourquoi la part mondiale des renouvelables, aujourd'hui de 13%, ne pourra vraisemblablement pas dépasser les 25% à la fin du siècle. Il semblerait que pour répondre aux questions de la limitation des rejets de gaz à effet

de serre, de la fourniture électrique et de la réponse à la demande en énergie, un équilibre doive être trouvé entre économies d'énergie, énergies renouvelables et énergie nucléaire. Au regard de la situation actuelle et des progrès techniques, il est impossible a priori de couvrir à long terme l'ensemble des besoins de l'humanité par les seules énergies renouvelables (Acket, Vaillant, 2011).

2.2.2 Les enjeux techniques liés à la planification du réseau de transport de l'électricité

Le problème du stockage de l'électricité pose un double enjeu aux réseaux électriques. D'une part, le raccordement des nouvelles unités de productions d'énergie renouvelable dispersées dans l'espace constitue un enjeu technique et une contrainte forte pour la mise en valeur des ressources locales. Il s'agit de relier au réseau existant les productions décentralisées d'énergie. Cette problématique ne constitue pas cependant un défi technique hors normes et les gestionnaires de réseaux sont en mesure de répondre à cette demande (RTE, 2012). Ces nouvelles productions doivent cependant se situer à moins d'environ dix-sept kilomètres d'un poste de transformation ou poste source (RTE, 2012).

Le deuxième enjeu réside dans l'objectif que l'on accorde aux productions complémentaires que sont les productions décentralisées d'énergies renouvelables. En effet, jusqu'à présent, on place ces nouvelles productions au même niveau que les autres productions en cherchant à les intégrer au reste du flux d'électricité. Deux systèmes coexistent, le système traditionnel et le système basé sur les énergies renouvelables, c'est la première étape de la transition énergétique. Cependant, la législation donne une priorité à l'électricité renouvelable sur le réseau. Cette conception a des limites. Le dimensionnement des infrastructures de transport de l'électricité dépend de la pointe maximale de la demande. Cela signifie que les infrastructures actuelles devront être redimensionnées en fonction de la croissance à venir de la demande et des nouveaux flux à y intégrer. Cela soulève une double question d'échelle, l'échelle spatiale permettant une adéquation entre la production et la consommation et l'échelle liée au dimensionnement des réseaux et des unités de production.

Le développement des énergies renouvelables remet donc en cause l'organisation réticulaire du réseau électrique actuel. Il remet également en cause le fonctionnement du marché de l'électricité et annonce un bouleversement du secteur économique sur lequel il s'appuie. Il accroît le rôle des gestionnaires de réseaux par rapport aux producteurs dans le système énergétique. Cette nouvelle répartition des rôles est une conséquence de la question de l'intermittence et du caractère asynchrone de la production d'électricité issue des énergies renouvelables (éolien et solaire). Lorsque les productions sont importantes, elles doivent être impérativement envoyées sur le réseau, même dans une période où la demande sur le réseau est limitée. Ceci peut entraîner une baisse de production significative des centrales thermiques et poser des problèmes de gestion, mais aussi avoir des répercussions sur les chiffres d'affaires et les cotes boursières. De plus, certaines centrales peuvent voir basculer leur rôle de production de masse vers une production de pointe et poser question en termes de rentabilité.

Cette modification du système énergétique s'accompagnera bien d'un changement majeur dans le secteur de l'électricité et annonce certainement l'âge d'or des réseaux. La construction et la mise en fonctionnement d'un réseau électrique européen totalement interconnecté et intelligent en sont le premier indicateur (Commission Européenne, 2011 ; Cruciani, 2015). Deux solutions sont actuellement développées pour répondre à cet enjeu. Tout d'abord, des recherches constantes sont menées sur le stockage de l'électricité via l'hydrogène et l'électrolyse, ce qui pourrait à terme modifier considérablement la donne en transformant une énergie de flux en énergie de stock. Mais ces technologies sont encore très coûteuses et n'offrent pas de solution à court terme (Odru, 2010), et ce d'autant plus que les techniques de stockage devront être connectées aux réseaux de distribution. C'est dans ce sens que sont développés les réseaux intelligents qui utilisent les technologies informatiques pour optimiser production, distribution et consommation, c'est-à-dire optimiser l'ensemble des mailles du réseau d'électricité pour en améliorer l'efficacité. Les productions décentralisées d'énergie intermittentes interrogent en effet sur de nouveaux modèles de gestion et de distribution de l'énergie basés sur une synergie entre réseaux d'énergie autour de deux piliers : l'électricité renouvelable et le gaz (Figure 14), les technologies numériques permettant d'optimiser cette synergie.

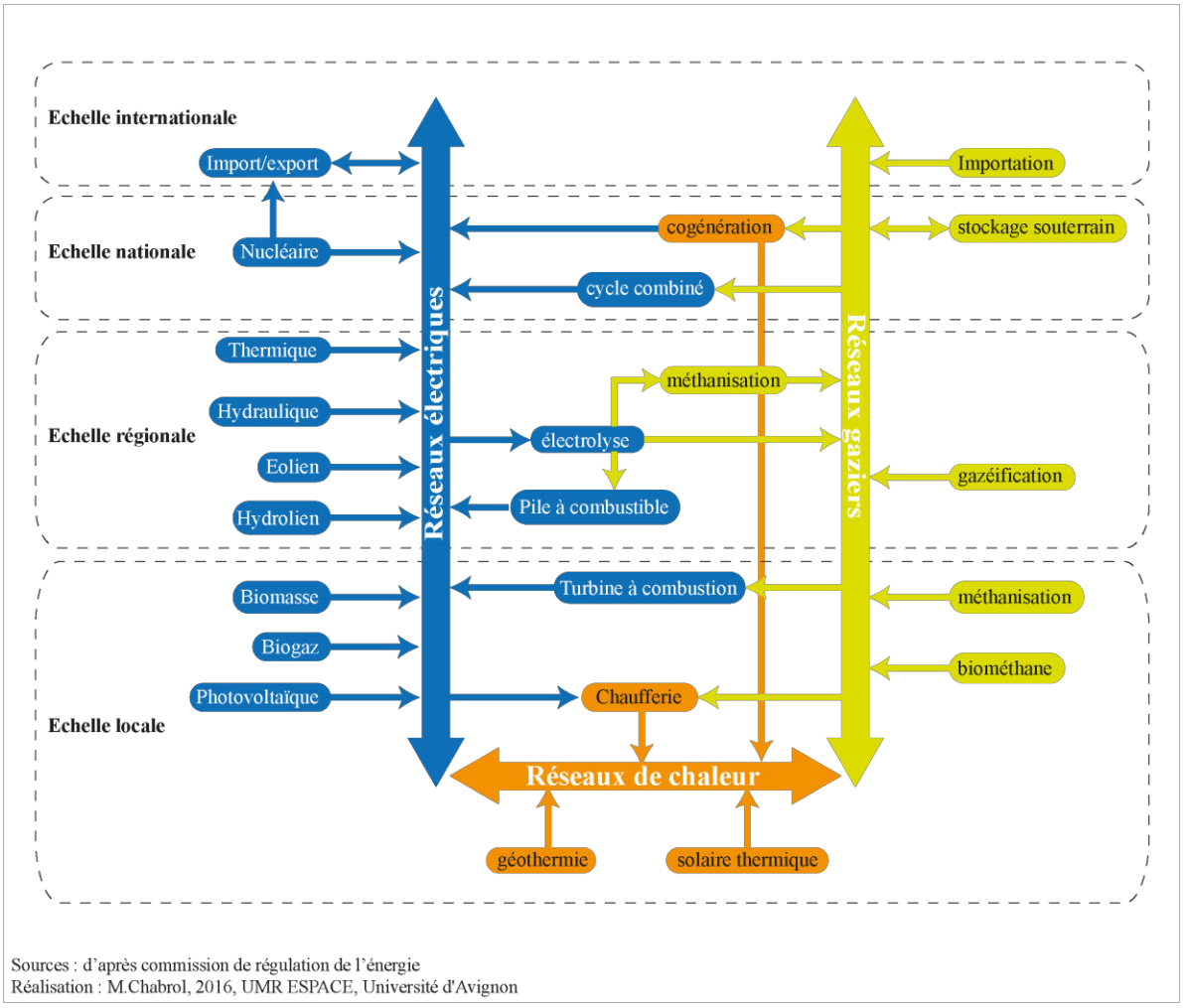
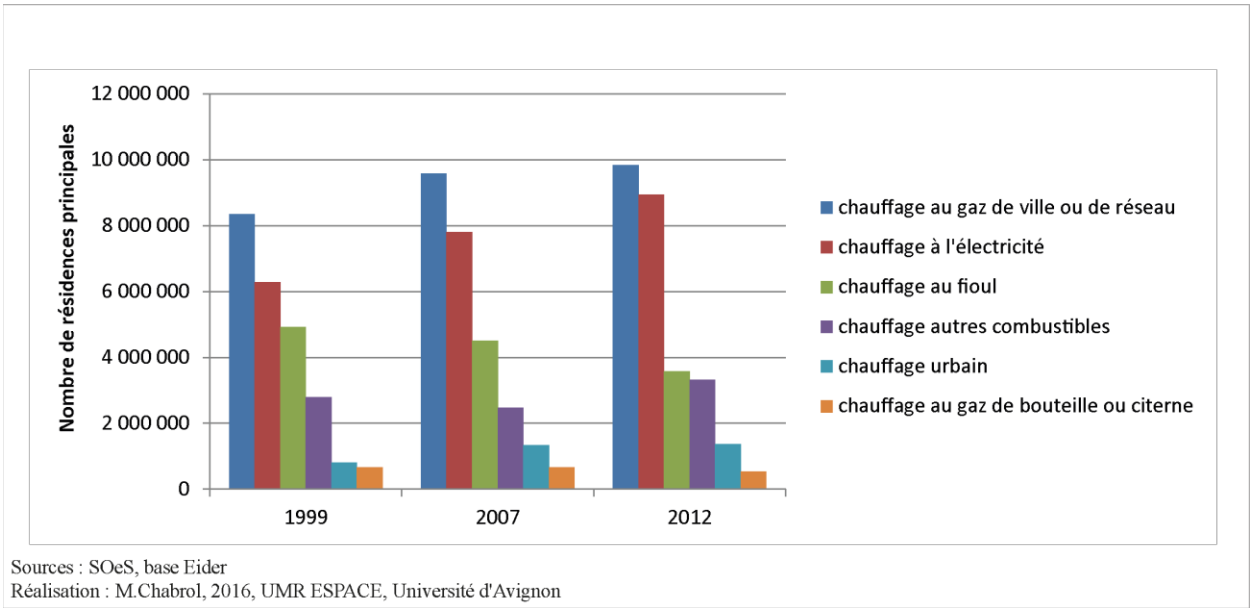


Figure 14. Synergie et articulation scalaire entre réseaux d'énergie

2.2.3 Une forme d'énergie dématérialisée et omniprésente

Si le pétrole est clairement représentatif de la mobilité de nos sociétés, l'électricité l'est tout autant de notre société moderne. L'électricité est aujourd'hui au service du quotidien dans un rapport à l'énergie qui s'inscrit dans l'immédiateté des services qu'elle permet. L'éclairage, l'électroménager, les outils numériques, le chauffage sont autant de services ancrés dans notre quotidien et pour lesquels la production d'énergie et la chaîne de transformation sont invisibles, si ce n'est sur la facture des ménages. L'omniprésence de l'électricité dans les modes de vie accroît autant la dépendance à ce vecteur d'énergie que les difficultés pour en réduire la consommation. Le développement des énergies renouvelables vise également à diminuer le recours aux énergies fossiles pour ces besoins du quotidien, particulièrement pour le chauffage. Si le recours au fioul est en diminution, le recours à l'électricité et au gaz est en revanche en augmentation constante (Graphique 13).



Graphique 13. Modes de chauffage des résidences principales en France métropolitaine

L'augmentation du recours à l'électricité dans le secteur résidentiel s'explique autant par un prix de l'électricité peu élevé en France (en dessous de la moyenne européenne soit environ 115 euros par MWh), que par la généralisation des pompes à chaleur air-air (climatisation réversible) dont l'usage est favorisé pour répondre aux injonctions des normes thermiques des bâtiments. L'augmentation de l'usage du gaz semble s'expliquer par la prédominance de cette ressource dans les réseaux urbains (69% en 2008 ; source : base Eider).

L'émergence de l'économie numérique est aussi une autre source importante d'augmentation des besoins en électricité. À l'échelle de l'Union, la Commission européenne estimait la consommation des Data Center (Centres de stockage des données) à 56 milliards de kilowatts en 2008 (soit 2% de la consommation électrique européenne) et projette une consommation de 104 milliards en 2020. Mais le développement de la mobilité électrique, souhaité par les pouvoirs publics et inscrit dans la loi de Transition Energétique pour la

Croissance Verte, est aussi une source possible d'augmentation des besoins nationaux en électricité. Aussi le déploiement des énergies renouvelables, en particulier les sources intermittentes qui produisent de l'électricité, ne pourra être massif que si une demande associée à des besoins nouveaux de nouvelles technologies (mobilité, électrolyse, économie numérique) est suffisamment élevée pour justifier une logique de substitution des ressources.

La transition énergétique est donc un objet politique, économique et environnemental qui révèle un certain nombre d'ambiguïtés et de contradictions. La volonté d'inscrire normativement la transition énergétique dans un projet de relance d'une croissance économique par le développement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique représente sans doute la contradiction la plus forte dans la mesure où le modèle économique actuel basé sur la croissance implique une augmentation des besoins énergétiques mondiaux qui ne pourront pas être totalement couverts par les seules énergies renouvelables.

Tant que l'économie mondialisée est dépendante du pétrole, il semble difficile d'imaginer un changement radical de modèle économique lié à l'intégration des énergies renouvelables. En revanche, un développement massif des énergies renouvelables peut impliquer des mutations plus profondes dans le secteur de l'électricité. Les enjeux liés à l'électricité sont très importants. La difficulté du stockage de l'électricité, le raccordement au réseau des énergies intermittentes, la libéralisation du marché, mais aussi la dépendance croissante des pays développés à l'électricité liée au développement d'une économie de service et du numérique, font avant tout de la transition énergétique annoncée une transition électrique. Autrement dit, si changement de modèle économique il y aura, il concernera le passage d'une économie basée sur les énergies fossiles, c'est-à-dire sur des ressources, à une économie basée non plus sur des ressources énergétiques mais sur un vecteur énergétique, l'électricité, qui peut être produit par des sources variées.
C'est pourquoi l'évolution du mix énergétique demeure la clé de voûte du processus de transition énergétique qui présente de ce point de vue une dimension sociotechnique, entre enjeux technologiques et évolutions socio-économiques, mais pose par ailleurs des questions de nature spatiale et scalaire. Les sources possibles pour alimenter le mix énergétique sont multiformes, multi-situées et impliquent des structures multi-scalaires, les réseaux. Il n'existe pas d'électicité « verte », mais une électricité « multicolore ».

L'ensemble des interactions entre dimensions économiques, politiques, sociales, sociotechniques, spatiales et scalaires favorise un intérêt croissant des sciences humaines et sociales pour la question de la transition énergétique, et particulièrement celles qui analysent l'espace et les territoires.

Chapitre 3
Enjeux spatiaux et territoriaux de la transition énergétique

Garantir un accès universel aux services énergétiques et une sécurité d'approvisionnement par les énergies renouvelables représentent un défi énergétique majeur du XXI^{e} siècle. De nouvelles façons de produire, de transformer et de transporter l'énergie seront nécessaires, dans un monde sous contrainte carbone, pour maintenir ou développer le niveau de performance économique des territoires.

Ce nouveau *paradigme énergétique* suggère toutefois des implications spatiales et territoriales qui ne sont pas bien définies, et une large gamme de modèles peut être envisagée. La production d'électricité peut se réaliser par exemple autant par de grandes infrastructures (nucléaire, éolien off-shore ou solaire à échelle « industrielle ») et un transport sur de longues distances par de vastes réseaux interconnectés, que par des « mini-réseaux » régionaux ou locaux, ou encore par l'intermédiaire de systèmes hautement décentralisés (micro-production, autonomie et boucle locale). De même, les éléments d'une politique de transition énergétique, de la maîtrise de la demande au déploiement des technologies renouvelables, reposent sur des hypothèses divergentes ou sur des modèles de gestion différents quant au niveau d'échelle ou au niveau territorial auquel devraient être développés et régis les systèmes énergétiques de demain (Union européenne, politiques nationales, collectivités territoriales, entreprises multinationales, microentreprises, coopératives, citoyens…).

Ce troisième chapitre examine comment les sciences humaines et sociales, et plus particulièrement la géographie, s'approprient ces problématiques en révélant leur dimension territoriale.

1 La transition énergétique, une question socio-matérielle

La mise en œuvre de nouveaux modèles énergétiques suggère des évolutions sociales et territoriales importantes. L'évolution des systèmes énergétiques interroge ainsi de plus en plus les sciences humaines et sociales qui cherchent à mettre en évidence les changements sociaux et politiques induits par ces mécanismes et processus de transition. Les sciences humaines analysent la transition énergétique comme une question sociale en reliant la matérialité des systèmes énergétiques (flux, ressources, infrastructures) à des questions sociales et politiques (dispositifs d'acteurs, choix dans les politiques urbaines, conflits d'usage, accès à l'énergie, structures sociales, etc.) et développent leurs observations à des niveaux d'échelles variés (Labussière, Nadaï, 2015). Cette approche de la transition énergétique s'appuie sur l'analyse des processus de territorialisation de l'énergie, des systèmes énergétiques et donc de leur transition supposée.

1.1 Un domaine de recherche émergeant en sciences humaines et sociales

Qu'il s'agisse de la maîtrise de la demande en énergie ou de l'émergence de nouveaux potentiels énergétiques, la transition énergétique implique le territoire et ravive l'intérêt pour cet objet transdisciplinaire aux dimensions technique, juridique, politique, culturelle, économique, environnementale, sociale et spatiale. Elle amène les territoires à repenser leurs organisations dans une perspective de sobriété énergétique, entre contraintes de structure (topologie, urbanisation…) et organisation fonctionnelle (attractivité, économie, emploi…), mais implique aussi de reconsidérer les rapports production/consommation d'énergie et de responsabiliser l'ensemble des acteurs locaux dans les décisions d'investissement, d'exploitation, et aussi de recherche de solutions innovantes. Dans cette question plurielle et hétérogène qu'est la transition énergétique (Rutherford, 2013), le territoire devient une instance déterminante de réflexion, et la question de son étendue spatiale et de son échelle reste ouverte.

Les débats récents autour du changement climatique et plus particulièrement sur ce qui constitue le cœur de notre sujet, la transition énergétique, ont créé une demande sociale forte et des commandes institutionnelles envers les sciences sociales pour proposer des visions, des analyses critiques, des modèles, des diagnostics, des expertises, des outils d'aide à la décision.

Ce contexte a récemment redynamisé la recherche en sciences humaines et sociales sur l'énergie comme en témoigne la tenue récente de plusieurs colloques et journées d'étude[19] ainsi qu'une production scientifique internationale toute aussi récente ayant pour cible l'énergie ou la transition énergétique (Bridge *et al.,* 2013 ; Lejoux, Ortar, 2013 ; Christen, Hamman, 2015 ; Scarwell, Leducq, Groux, 2015 ; Zélem, Beslay, 2015) et la parution de numéros spéciaux de revues comme le numéro 3 du volume 14 de la revue *VertigO* en décembre 2014, le numéro

[19] Citons entre autres « *Transitions énergétiques : quelles dynamiques de changement ?* » à Lille en janvier 2015, « *Sciences sociales et énergie* » à Grenoble en mai 2015, « *Approches Critiques de la Transition Energétique dans les Sciences Humaines et Sociales* » en juin 2016 à Strasbourg, « *La fabrique de l'autonomie énergétique* » à Paris et Champs-sur-Marne en juin 2016.

78/2015 de la revue *Energy Policy*, jusqu'à la création par Benjamin Sovacool en 2014 de la revue *Energy Research and Social Science* exposant spécifiquement le regard porté par les sciences sociales sur la question énergétique.

Dans cette recherche en mouvement, une géographie des transitions énergétiques émerge en prenant principalement appui sur des démarches maintenant anciennes relatives à l'aménagement durable et à l'analyse des systèmes sociotechniques. Dans une perspective interdisciplinaire sur l'énergie et à la lumière des volontés politiques pour parvenir à une économie bas carbone, des géographes se sont penchés sur la question des implications géographiques de la transition vers les énergies renouvelables (Juisto, 2009 ; Calvert, Simandan, 2010 ; Bridge *et al*., 2013).

Mais si la dernière décennie a vu un intérêt académique croissant pour les transitions énergétiques (Markard *et al.,* 2012), leurs dimensions spatiales ont été cependant jusqu'à récemment largement ignorées (Coenen *et al.,* 2012 ; Smith *et al.,* 2010). Les influences des lieux et des différents contextes géographiques, l'importance et le rôle des relations entre acteurs à différentes échelles spatiales dans les processus de transition sont des questions essentielles dans une perspective géographique (Scott, 2000), mais sont restées plus ou moins à l'écart des premiers travaux sur la transition énergétique, bien que les contributions initiales majeures aient été apportées dans les domaines spécifiques de la durabilité urbaine, des infrastructures de la ville et des transitions bas carbone (Bulkeley *et al.,* 2011 ; Hodson, Marvin, 2009), et que certains chercheurs aient lancé un appel pour « *ré-énergiser* » les études urbaines (Rutherford, Coutard, 2014).

La recherche en sciences sociales et en géographie sur la transition énergétique se développe avec des travaux issus de nombreux domaines et utilisant des approches variées. Cette hétérogénéité offre des avantages et des inconvénients. Elle favorise d'une part la pluridisciplinarité et le renouvellement conceptuel, en particulier en tenant compte de l'héritage interdisciplinaire portant sur le concept même de transition. Un grand nombre de démarches prennent en effet appui sur des concepts développés par la géographie économique ou par des approches issues de l'étude des systèmes d'innovation technologique, comme le concept de perspective multi niveaux (Multi Level Perspective ou MLP), même si l'importation de ce cadre conceptuel en géographie peut par ailleurs poser problème et aboutir à des confusions. Lagendijk (2006) a en effet montré comment en science régionale différentes approches attribuent des significations différentes à des termes similaires ou des significations semblables à des termes différents. Ceci peut être illustré par diverses connotations géographiques présentes dans le cadre conceptuel du MLP, comme la notion de *paysage*, et la distinction entre un niveau local et un niveau global dans la dynamique de développement des niches (Geels, 2011), mais qui n'ont pas en réalité dans ce contexte de signification spatiale explicite (Bridge *et al*., 2013).

On peut donc se demander ce qu'une *géographie des transitions énergétiques* peut signifier et en quoi une analyse des aspects spatiaux et territoriaux de la transition énergétique est significative. En cela, en accord avec Bridge *et al.* (2013), nous considérons que la géographie

des transitions énergétiques capte la répartition des différents processus de transition à travers l'espace. La transition énergétique est fondamentalement un processus géographique (Bridge *et al*., 2013) qui implique de remettre en cause les configurations spatiales actuelles de l'activité économique et sociale. Dans le même temps, les structures spatiales et territoriales en place réduisent les marges de manœuvre et les potentialités de changement.

1.2 Multi Level Perspective et analyse des transitions, un cadre analytique dominant amené à évoluer

Le concept de *paysage énergétique* évoqué précédemment illustre bien l'incompatibilité qui peut exister entre l'existant et le souhaité, autant dans la forme des paysages que dans leurs fonctions. La résistance sociale face au changement ou à l'évolution des paysages a tendance à être plus prononcée là où les niveaux de consultation locale et/ou de redistribution des coûts et des bénéfices tirés des infrastructures énergétiques sont faibles (Zelem, 2010 ; Fast, 2013). La transition énergétique peut s'élaborer dans le cadre de systèmes locaux de gouvernance de l'énergie qui impliqueraient une multiplicité des points de vue des acteurs et des systèmes de valeurs différenciés (Nadaï, Labussière, 2013). Un tournant dans les stratégies d'acceptabilité des installations renouvelables et de leurs expressions dans les paysages reste cependant nécessaire dans un contexte de concurrence spatiale entre les différents modes d'occupation du sol (Späth, Rohracher, 2010). La transition énergétique est donc une question socio-matérielle car elle implique en plus de l'intégration de nouvelles infrastructures énergétiques, les institutions de gouvernance locale, mais aussi les utilisateurs des services énergétiques. En d'autres termes, la disponibilité des ressources et l'efficacité technologique pour les exploiter sont des éléments insuffisants pour expliquer l'évolution des systèmes énergétiques, particulièrement dans les pays du Sud (Taylor, 2005). C'est pourquoi la géographie peut s'appuyer sur le concept de système sociotechnique pour analyser les façons dont les politiques locales, les contextes économiques, culturels et écologiques agissent sur les différentes formes d'adoption des technologies liées à l'énergie afin de mieux comprendre les conditions géographiques dans lesquelles les transitions énergétiques sont susceptibles de se réaliser. Le cadre théorique dominant dans l'étude de la transition énergétique s'appuie alors sur le concept de Multi Level Perspective (MLP) (Rip, Kemp, 1998) ou perspective multi-niveaux des transitions sociotechniques.

Le concept de Multi-Level Perspective conçoit les transitions comme un processus résultant d'interactions multidimensionnelles agissant entre trois niveaux (Rip, Kemp, 1998 ; Geels, 2010 ; Smith *et al*., 2010).

La niche est le niveau micro où se situent les innovations et les acteurs innovants. Les niches sont constituées des laboratoires de recherches et de développement, des projets subventionnés de démonstration et d'expérimentation de techniques innovantes, ou encore de petites niches de marché où les utilisateurs ont des exigences particulières et sont prêts à soutenir des innovations émergentes (Geels, 2011). Les acteurs de niche (entrepreneurs, start-up, filiales et spin-off) travaillent sur des innovations radicales qui peuvent dévier des régimes existants. Les

acteurs de niche espèrent que leurs innovations seront utilisées au point de pénétrer les régimes, voire même les remplacer. Mais cela est difficile en raison des mécanismes de verrouillage des régimes qui leur confèrent une grande stabilité. Les innovations sont aussi contraintes par les caractéristiques des régimes existants (manque d'infrastructures appropriées, de dispositifs règlementaires, etc.). Dans ce cadre analytique, les niches sont essentielles pour provoquer des transitions systémiques.

Le régime est un niveau méso auquel sont établies les configurations sociotechniques dominantes. Le régime sociotechnique rend compte de la stabilité du système sociotechnique existant et fait référence à l'ensemble des règles qui orientent et coordonnent les activités des groupes sociaux (Geels, 2011). Ces règles du régime sont à la fois le moyen et le résultat de l'action. Les acteurs les adoptent dans leurs pratiques locales mais peuvent aussi les reconfigurer. Les habitudes, les croyances, les modes de vie, les pratiques sociales, les règlements institutionnels et les contraintes juridiques sont autant d'exemples de ces règles. Les régimes sont caractérisés par une forte inertie. L'innovation s'y produit progressivement par de petits ajustements qui débouchent sur des trajectoires stables. Ces trajectoires concernent les dimensions technologiques, culturelles, politiques, scientifiques, industrielles et de marché. Ces dimensions peuvent avoir leur propre régime (ou sous-régime), mais elles interagissent de façon systémique et co-évoluent.

Le paysage ou landscape représente le niveau macro du contexte exogène (Coenen *et al.*, 2012 ; Coenen, Truffer, 2012), le contexte plus large qui influence la niche et le régime (Rip, Kemp, 1998). Il est constitué de la toile de fond technique et matérielle qui soutient la société, mais il inclut également les tendances démographiques, les idéologies politiques, les valeurs sociales et les modèles macro-économiques. Il forme donc un contexte externe difficilement modifiable à court terme par les acteurs au niveau des niches et des régimes. Ce niveau évolue habituellement lentement.

La figure 15, adaptée de la représentation proposée par Geels en 2011, montre comment les trois niveaux interagissent dans le déroulement des transitions sociotechniques. Ce modèle décrit le processus de transition sociotechnique comme résultant de l'interaction entre des processus à différents niveaux : le niveau de la niche d'innovations crée une dynamique interne, des changements au niveau du paysage créent une pression sur le régime, et la déstabilisation du régime ouvre des fenêtres d'opportunité pour les innovations (Figure 15).

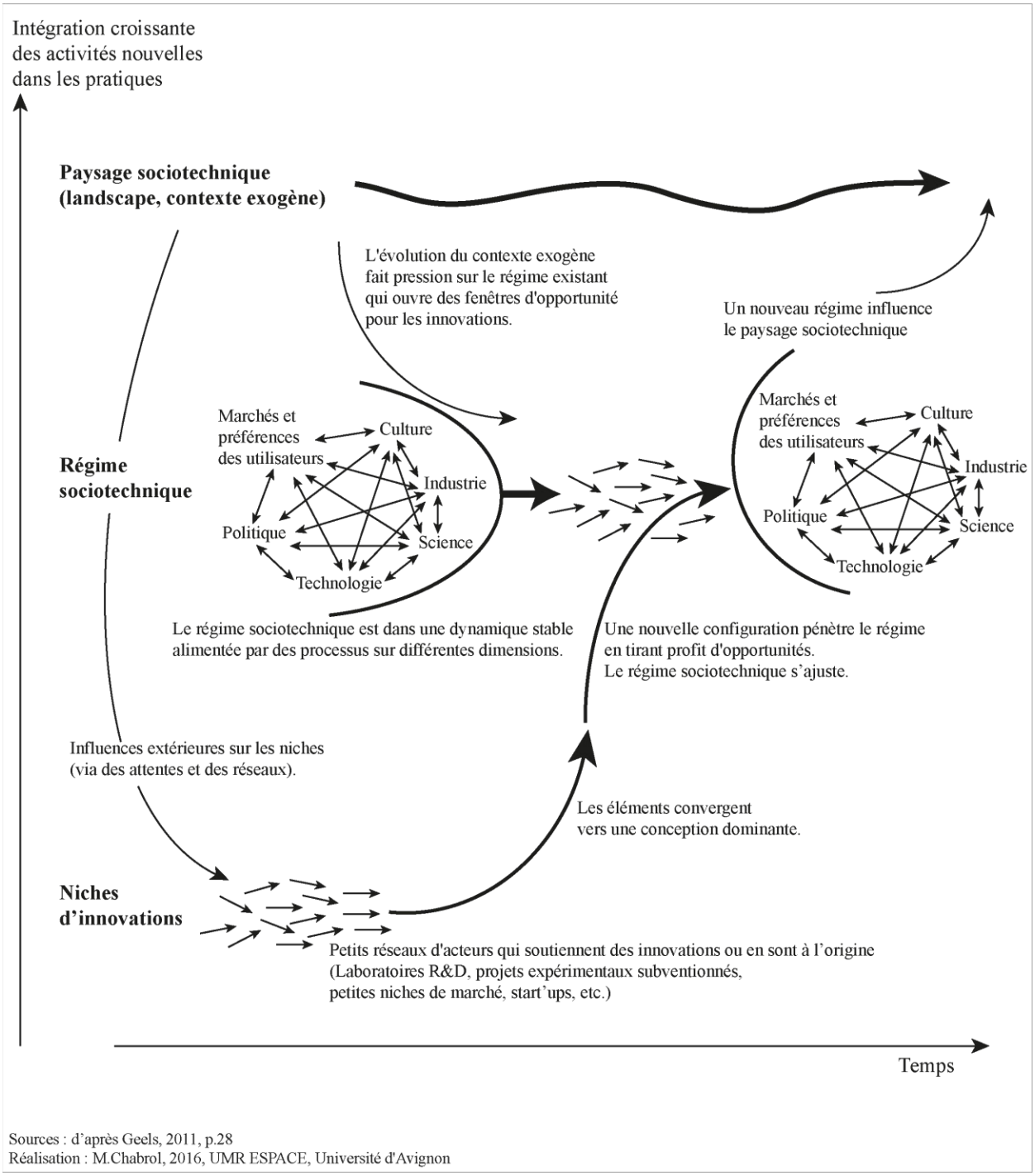


Figure 15. Perspective multi-niveau et transition des systèmes sociotechniques

Coenen *et al*. (2010) ont étudié par exemple les avantages et les inconvénients d'une proximité géographique et institutionnelle dans la constitution d'une vision partagée des normes de marché de niche et des pratiques commerciales dans des agglomérations d'attractivité économique régionale. Späth et Rohracher (2010) ont aussi montré que l'existence d'identités territoriales communes peut être un facteur favorable à l'acceptabilité et l'appropriation des nouvelles technologies par les acteurs et les individus. Ils ont par la suite également identifié des régimes sociotechniques spatialement différenciés et trans-scalaires qui peuvent influencer la

trajectoire d'une transition énergétique potentielle à une échelle très locale (Späth, Rohracher, 2012). Ce cadre conceptuel et analytique a nettement enrichi la compréhension de l'émergence des innovations, mais souffre de certaines lacunes pour analyser la transition énergétique actuelle. Certaines critiques ont été argumentées par Smith *et al*. (2010) qui affirment que les relations entre les trois niveaux proposés par le MLP sont en réalité beaucoup plus complexes, et que ce modèle sous-estime le rôle du pouvoir politique. Ils mettent également en doute l'opérationnalité empirique de ce modèle. Essletzbichler (2012) précise que la question de l'échelle spatiale doit être mieux intégrée à ce concept dans lequel les trois niveaux établis (micro, méso et exogène) ne correspondent pas nécessairement à des échelles spatiales comme le suggèrerait le vocabulaire employé. De plus, le modèle MLP est clairement a-spatial et sous-estime le rôle des structures spatiales dans lesquelles les systèmes sociotechniques s'inscrivent.

2 De la spécificité des territoires à la multiplicité des transitions énergétiques

Les approches sociotechniques s'inscrivent largement dans les champs de l'analyse économique, politique et sociologique et ont parfois tendance à conférer aux structures spatiales et territoriales, et plus largement à l'espace, le simple rôle de support. Pourtant les systèmes énergétiques sont intégrés dans des contextes spatiaux et territoriaux spécifiques. Ceci est particulièrement évident pour l'infrastructure énergétique et l'inscription spatiale des réseaux de transport et de distribution d'électricité. Ce manque, ou ce biais, a été relevé à plusieurs reprises par Coenen, Benneworth et Truffer (2011) et Coenen et Hansen (2015) qui ont démontré la nécessité d'intégrer les spécificités des lieux, des espaces et des territoires dans l'analyse des transitions énergétiques et dans leur mise en politique. L'analyse des transitions énergétiques "*requires analysis of the particular settings (places) in which transitions are embedded and evolve, while at the same paying attention to the geographical connections and interactions within and between that place and other places*" (Coenen, Hansen, 2015, p. 95).

Pourquoi des transitions se produisent-elles dans un lieu et pas dans un autre ? Comment se réalisent les transitions dans des contextes géographiques différents ? Quels sont l'importance et le rôle des relations multi-scalaires dans les processus de transition ? Ces questions, essentielles dans une perspective géographique, expliquent pourquoi les villes et les grandes régions urbaines sont devenues des cas d'étude importants dans les travaux portant sur la transition énergétique (Coutard, Rutherford, 2010 ; Essletzbichler, 2012 ; Rocher, 2013 ; Bolzon *et al*., 2013 ; Rutherford, Coutard, 2014). Les réalités quotidiennes des différents contextes urbains dans le monde rappellent que le sujet de la transition énergétique doit être abordé d'un point de vue pluriel et hétérogène (Rutherford, 2013).

2.1 Différenciation spatiale et transitions énergétiques multiples

Les transitions énergétiques sont des processus géographiques qui ne sont pas omniprésents. Le développement des technologies renouvelables n'est pas homogène. Il se produit en effet dans des lieux qui ont des spécificités et une matérialité propres. Les premières recherches sur les transitions énergétiques ont donné peu d'importance aux spécificités des lieux. Mais les recherches actuelles intègrent maintenant largement cette question qui justifie le caractère multiple des transitions énergétiques (Rutherford, 2013). Shove et Walker (2007) signalent l'importance des facteurs contextuels tels que l'environnement politique dans les processus de transition, alors que Labussière et Nadaï soulignent l'influence de contextes historiques et culturels spécifiques. Généralement, ces travaux se concentrent sur les échelles locales, régionales et urbaines, tandis qu'une attention plus limitée est accordée à l'échelle nationale (Berkhout *et al.,* 2009). Une identification commune à un territoire et à son histoire a également été présentée comme des facteurs favorables à l'acceptation et à l'appropriation des infrastructures de production d'énergie renouvelable par les acteurs et les individus (Späth, Rohracher, 2010). En d'autres termes, les normes et les valeurs spécifiques des lieux impliquent des inégalités et des temporalités différentes, mais aussi des conséquences différentes dans la

mise en œuvre de la transition énergétique. Späth et Rohracher (2010, 2012) ont mis en évidence un processus de transition énergétique reposant sur des valeurs intégrées à différents échelons territoriaux dans le district autrichien de Murau, mais aussi l'intérêt accordé par les Autrichiens à l'objectif d'autosuffisance énergétique, et l'importance qu'ils donnent localement à l'utilisation de la biomasse. De même, Wirth *et al.* (2013) montrent de façon convaincante l'influence de la différenciation spatiale des cultures et des pratiques professionnelles agricoles entre agriculteurs autrichiens sur les différences régionales dans l'étendue et la nature de la diffusion de la technologie du biogaz. De la même façon, Nadaï *et al.* (2015) ont démontré que la mise en œuvre des projets de Territoire à Énergie Positive (TEPos) en France (Cf. chapitre 2, 1.3.2) s'observe dans des lieux où l'histoire et le contexte économique et socio-spatial favorisent l'émergence d'une mobilisation sociale sur la question énergétique (reconversion de bassins miniers dans le cas de Loos-en-Gohelle, redynamisation d'une coopérative agricole en perdition dans le cas de Figeac, réactivation de la régie locale d'électricité dans un contexte de libéralisation du marché pour la commune de Montdidier). Ils montrent ainsi que les processus de transition énergétique s'appuient aussi sur une culture énergétique préexistante et sur l'héritage de pratiques et de structures préindustrielles (Emelianoff, Mor, 2013). La nature des institutions locales de gouvernance conditionne en partie le potentiel de changement de différentes configurations sociotechniques. Les institutions locales peuvent également jouer un rôle dans le développement et la diffusion des innovations environnementales.

Ainsi Coenen *et al.* (2010) analysent les cadres institutionnels locaux, y compris les normes et les valeurs, pour comprendre les contextes qui favoriseraient des expériences locales de transition. Comme le précisent Bridge *et al.* (2013), la diffusion spatiale des technologies énergétiques est subordonnée à la culture. La répartition spatiale des nouvelles technologies de l'énergie dépend souvent de la façon dont ces technologies sont intégrées dans les systèmes de représentation et les habitudes culturelles. À titre d'exemple, les attentes concernant le coût et la fiabilité de l'approvisionnement énergétique, et les pratiques sociales associées à la consommation d'énergie ont une influence importante sur le potentiel d'adoption des technologies renouvelables. Lagendijk et Boertjes (2013) ont aussi montré par l'analyse de la diffusion du concept de *Light Rail* dans la planification des transports urbains aux Pays-Bas, qu'il existe une différenciation spatiale dans la façon dont les décisions d'investissement dans de nouveaux projets d'infrastructure de transport sont prises et légitimées. Dans le cas de la diffusion de la climatisation dans le monde, Shove *et al.* (2014) ont montré que les pratiques locales et leur développement au fil du temps sont essentielles pour comprendre la diffusion de cette technologie. En outre, avec le temps, la technologie évolue également et s'intègre peu à peu dans les pratiques. L'analyse des pratiques sociales et de leur différenciation dans l'espace fournit donc des renseignements utiles sur les possibilités de favoriser ou non la diffusion des technologies renouvelables et des pratiques économes en énergie. Mais les processus de mise en œuvre locale des énergies renouvelables ne sont cependant pas nécessairement porteurs d'innovations et ne débouchent pas toujours sur des avancées sociales. Boucher-Hedenström et Rutherford (2007) ont montré comment la libéralisation du marché de l'énergie en Suède a

entraîné la perte de pouvoir et de contrôle des municipalités sur les services énergétiques urbains à Stockholm, et placé un grand nombre de ménages dans une situation de précarité. Si dans certains lieux, des projets locaux de mise en œuvre des énergies renouvelables peuvent inciter les acteurs publics locaux à se saisir de la question énergétique, ces derniers peuvent tout autant en être dessaisis.

2.2 Matérialité spatiale de la transition énergétique

Ces approches géographiques des transitions énergétiques ont soulevé des questions importantes. Comment les facteurs sociaux et physiques expliquent-ils la dispersion géographique des technologies renouvelables ? Quels nouveaux réseaux d'acteurs s'expriment au cours du processus de transition énergétique, à quelles échelles géographiques et avec quelles conséquences ? De quelles manières les systèmes basés sur les énergies renouvelables s'adaptent-ils aux paramètres régionaux et locaux ? Quelle est l'importance des différences régionales ou locales dans l'explication du rythme, de l'échelle, et potentiellement de l'issue des transitions énergétiques ? Comment conceptualiser la perception de l'espace au regard des formes de production et d'utilisation de l'énergie ? Comment et avec quels effets l'espace est-il politisé dans la construction et la négociation de nouvelles visions énergétiques ? Quel sera le paysage énergétique durable, quel impact sur l'évolution morphologique des paysages et sur leur perception ? De quelles façons les changements énergétiques sont-ils impliqués dans des changements plus larges des systèmes sociotechniques ? Est-il possible d'ajuster l'organisation spatiale des activités sociales, économiques et des institutions pour accélérer l'adoption de technologies d'énergies renouvelables ? À quelle échelle spatiale et temporelle les transitions énergétiques seraient-elles le mieux analysées et gérées ?

Les géographies complexes de la production, de la distribution et de l'utilisation de l'énergie suggèrent que les transitions énergétiques sont plus qu'un simple changement dans les technologies et les ressources à travers lesquelles les services énergétiques se réalisent. Les facteurs « *politico-économiques et culturels co-évoluent avec les changements dans la qualité, la localisation et l'impact environnemental des ressources énergétiques* » (Juisto, 2009, p. 548). Mais au-delà des reconfigurations sociales et politiques, la transition énergétique s'exprime aussi par une forte matérialité spatiale. Elle implique de remettre en cause les modes de répartition des hommes et des activités dans l'espace, c'est-à-dire les formes spatiales de l'activité sociale et économique.

2.2.1 Au-delà des recompositions sociales, observer la matérialité spatiale du changement

Les recherches récentes en sciences humaines et sociales développant une approche territoriale de l'énergie décrivent avec pertinence les recompositions sociales et politiques mises en jeu par la transition énergétique (Rocher, 2013 ; Rumpala, 2013 ; Rutherford, Coutard, 2014). Elles mettent aussi en évidence la nécessaire prise en considération des contextes territoriaux parfois complexes dans l'évaluation des possibilités de transition et de développement des énergies renouvelables (Coenen *et al.*, 2012). L'enjeu territorial ne se résume pas à l'exploitation

de nouveaux gisements énergétiques. Gisement d'énergie et potentiel énergétique ne sont pas synonymes. Les organisations socio-spatiales héritées, l'acceptabilité, les conflits d'usage, les enjeux patrimoniaux sont aussi des éléments déterminants (Labussière, 2013). Tous les gisements ne peuvent pas être systématiquement exploités car les enjeux techniques, mais aussi patrimoniaux et paysagers peuvent avoir un poids déterminant. De plus, les formes d'organisation spatiale locales jouent un rôle fondamental dans la quantification des potentiels énergétiques (orientation des bâtiments, dispersion et agrégation du bâti, distance aux réseaux d'infrastructures majeures). La transition énergétique n'est donc pas seulement un processus politique qui peut affecter les lieux. Elle peut être considérée comme un objet et un processus spatial (Bridge *et al.,* 2013) qui s'expriment par des changements potentiels dans les structures spatiales de l'activité de production d'énergie et dans celles des espaces urbanisés.

2.2.2 Distribution différenciée des ressources locales et dynamiques spatiales

L'impossible prise de recul actuelle sur les conséquences spatiales d'une transition énergétique vers les énergies renouvelables ne permet qu'une approche par anticipation. Cependant, un élément majeur soulève la question d'une possible réorganisation spatiale des systèmes énergétiques : l'exploitation de nouvelles ressources renouvelables qui modifierait la répartition géographique des potentiels énergétiques. Les ressources sont alors multiformes et spatialement diluées.

Paradoxalement, peu de contributions géographiques traitent explicitement de l'importance des disponibilités de ressources naturelles locales pour alimenter les transitions énergétiques. Cela s'explique peut-être parce que le rôle central de la localisation des ressources paraît simplement trop évident. Le potentiel de l'énergie marémotrice est plus grand dans les régions côtières avec de grandes marées, celui de l'énergie solaire dans les régions avec de nombreuses heures d'ensoleillement, etc. La répartition spatiale des gisements renouvelables exploitables est donc un facteur important de mise en œuvre différenciée de la transition énergétique. L'influence de la disponibilité en ressources naturelles est soulignée par Carvalho *et al.* (2012) qui expliquent comment la grande production régionale des cultures de soja à Curitiba, au Brésil, a influencé la décision de se concentrer sur le biodiesel plutôt que sur d'autres technologies, tandis que Späth et Rohracher (2010, 2012) décrivent l'importance d'une ressource en bois abondante pour le processus de transition énergétique à Murau en Autriche. Par ailleurs, de nombreux types de ressources naturelles sont concentrés dans des régions périphériques où l'insuffisance des infrastructures est un obstacle important à leur mobilisation (Murphy, Smith, 2013). En outre, alors qu'ils soulignent l'influence des caractéristiques naturelles du paysage, Bridge *et al.* (2013) mettent aussi en évidence la façon dont les représentations sociales peuvent empêcher les transformations de ces paysages qui accompagnent les transitions énergétiques, par exemple dans le cas de la mise en place d'éoliennes. En plus de conditions naturelles favorables à la production d'énergie renouvelable, la rareté, l'absence ou la difficulté d'accès aux ressources traditionnelles (par exemple des combustibles fossiles) peut également stimuler les investissements dans les transitions

énergétiques, comme en témoigne Essletzbichler (2012) dans le cas de la région espagnole de Navarre. En substance, cela signifie « *qu'un désavantage de facteur sélectif peut stimuler une transition plus rapide vers des pratiques innovantes* » (Essletzbichler, 2012, p. 813). Ainsi, les régions avec peu ou pas de ressources fossiles peuvent aussi avoir une grande propension à s'engager dans un processus de transition énergétique.

Ces éléments soulèvent des questions de nature fondamentalement spatiale. L'exploitation de ressources renouvelables peut-elle contribuer à fixer de nouvelles localisations ? Le développement des énergies renouvelables peut-il modifier les distances entre espaces de production et de consommation au point d'engager un changement de niveau dans l'organisation spatiale, des changements dans les hiérarchies urbaines, un rééquilibrage des réseaux de villes, et de modifier les centralités et les structures existantes ? En effet dans le cas de la valorisation des déchets par exemple, les dynamiques spatiales sont essentiellement urbaines (nouvelles localisations en périphérie de grandes agglomérations, augmentation des phénomènes de centralité, attractivité renforcée en termes d'emplois...). Dans le cas de la biomasse d'origine forestière, les modifications de l'organisation spatiale se font davantage en bordure des espaces naturels et en milieu rural. Pour l'éolien et le solaire, les espaces concernés sont fonction de la carte des vents, terrestres et maritimes, et de l'ensoleillement. On peut donc envisager des phénomènes de spécialisation de l'espace et voir apparaître de nouvelles disparités régionales dans les modes d'approvisionnement énergétique.

Quel peut être en effet l'impact spatial d'une production décentralisée d'énergie par les énergies renouvelables ? Le développement des énergies renouvelables peut-il modifier les rapports entre territoires ou renforcerait-il l'organisation actuelle de l'espace ? Deux éléments forts apparaissent. Tout d'abord, le projet de décentraliser la production semble répondre à un besoin géographique. En effet, il accompagne en réalité le processus de desserrement urbain. Multiplier le nombre de petites unités de production locale signifie en fait un nouveau maillage du territoire. Il s'agit de répondre localement à de faibles besoins par de faibles productions. On peut en déduire une multiplication de courtes interrelations et donc une extension et une densification des réseaux. D'autant plus que les énergies renouvelables ne nécessitent pas de lignes à haute tension dont l'entretien est très coûteux. On peut faire ici une comparaison avec les réseaux routiers et ferroviaires. Le réseau ferroviaire relie des espaces importants dans la hiérarchie urbaine et entraîne une forte dépendance des usagers aux lieux. Il faut être proche d'un nœud, alors que le réseau routier avec l'usage de l'automobile a permis un maillage plus large du territoire et a augmenté l'accessibilité des lieux. La localisation des différentes ressources est donc importante. « *La mise en valeur de l'espace est en partie liée aux ressources naturelles* » (Brunet, 1992, p. 433). De ce point de vue il est possible en théorie d'attendre du développement des énergies renouvelables une modification de l'attractivité des territoires liée à l'offre énergétique : elle peut favoriser des économies d'échelle et l'implantation d'entreprises, notamment dans le tertiaire, « *la qualité de la desserte électrique étant l'un des critères retenus par de nombreuses entreprises dont la compétitivité dépend de plus en plus de procédés à haute*

technologie » (Bailly, Rosenstein, 2003, p. 32). Effectivement, en fonction des potentialités d'énergie renouvelable des territoires et des nouvelles inégalités qu'elles peuvent entraîner, on devrait voir émerger une géopolitique régionale basée sur des phénomènes de concurrence entre territoires, concurrence liée au coût de production et au prix de l'énergie locale. Dans le cas d'une ouverture totale à la concurrence du marché de l'électricité, l'attractivité des espaces se mesurerait aussi par les facilités techniques et économiques d'accès à l'énergie. Mais il est encore difficile aujourd'hui de concevoir une telle hypothèse en France dans la mesure où la politique d'achat de l'électricité permet pour l'instant d'éviter cette forme de concurrence entre territoires (Sablière, 2014).

2.2.3 Reconsidérer les formes urbaines et l'aménagement des territoires

Dans la perspective d'un développement urbain soutenable, la contribution possible de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme à la diminution des consommations d'énergie est une idée aujourd'hui largement répandue (Cf. Loi Grenelle). Mais si les bénéfices d'une amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments sont indiscutables, il n'en est pas de même pour les effets de la planification territoriale. L'enjeu énergétique est aujourd'hui intégré aux projets d'aménagement du territoire sans pour autant que leur rôle réel en termes de diminution des consommations d'énergie puisse être déterminé avec précision. Ces projets se cristallisent pour beaucoup autour du contrôle et de la limitation de l'extension spatiale des villes et des agglomérations. La transition énergétique convoque en effet une réévaluation de la forme, de la fonction et de la valeur de certaines structures socio-spatiales en particulier celles des espaces urbains et périurbains. L'attention accrue portée à l'efficacité énergétique ravive les débats sur la morphologie urbaine, la densité des villes et leurs effets énergivores (Newman, Kenworthy, 1989 ; Orfeuil, Massot, 2007 ; Wiel, 2009). De nombreux rapports préconisent la densification et la compacité des villes pour minimiser les dépenses énergétiques et maximiser l'accessibilité des lieux. Une ville compacte permettrait théoriquement de réduire les distances des déplacements individuels, de favoriser les transports collectifs et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. La modification de la morphologie urbaine par le comblement des vides et la densification sont évoquées aujourd'hui comme des solutions. Ce discours s'appuie sur des travaux mettant en évidence un lien inverse entre densité urbaine et consommation énergétique. Beaucoup concluent qu'une ville dense est moins énergivore (Newman, Kenworthy, 1989 ; Pouyanne, 2004 ; Le Néchet, 2011 ; Desjardins, 2011). Mais il apparaît que beaucoup de ces études « *ne mettent pas bien en évidence la part strictement liée à la forme urbaine dans les différences constatées en matière de consommation énergétique* » (Desjardins, 2011, p. 11).

Dans ce contexte, de nombreux travaux portant sur l'aménagement durable, et plus spécifiquement sur le modèle de la *ville durable*, trouvent une résonnance forte avec les enjeux de la transition énergétique plaçant souvent au centre des débats la planification urbaine et les modes de transport. Les villes se développent en interaction avec les systèmes de transport. L'apparition de nouveaux modes de déplacement permet l'urbanisation de nouveaux territoires et intensifie les relations entre les centres et les zones périphériques. La vitesse de déplacement est

un élément essentiel du développement urbain. Les sociétés contemporaines se caractérisent par la contraction du temps et la dilatation du territoire (Asher, 2005). Orfeuil et Massot (2007) ont démontré empiriquement que la croissance des vitesses permise par la généralisation de l'automobile, par l'aménagement de réseaux rapides et l'abondance d'offres de stationnement permettaient la constitution de territoires de vie plus étendus et plus individualisés. L'augmentation continue de la vitesse de déplacement depuis la révolution industrielle jusqu'à nos jours a permis d'atteindre des espaces toujours plus éloignés des centres urbains favorisant ainsi l'étalement des formes urbaines. Le double caractère énergivore de ce mode de développement urbain a été signalé à de très nombreuses reprises. La consommation d'espace des villes étalées où l'habitat individuel domine s'accompagne d'une mobilité basée sur l'automobile individuelle qui implique une consommation d'énergie importante (Criqui, Allaire, 2007). Les modes de développement urbain sont donc réinterrogés dans une perspective de durabilité qui s'inscrit dans les politiques urbaines autour de trois axes (Emelianoff, 2007) : la réduction de l'émission de CO_2 dans l'habitat, le développement des énergies renouvelables et la recherche d'une mobilité durable. Les villes développent aussi des approches intégrées qui consistent à optimiser le métabolisme urbain, c'est-à-dire le système de circulation de matières et d'énergie (Barles, 2007). Si les initiatives sont aujourd'hui nombreuses en Europe, des plus courantes aux plus innovantes (écoquartiers, autonomie énergétique, smart cities, etc.), l'impact réel de l'aménagement urbain et de l'urbanisme sur la maîtrise des consommations énergétiques reste encore aujourd'hui difficilement démontrable. Le caractère systémique du fonctionnement des territoires montre aussi que toute la difficulté réside dans la mono-fonctionnalité des espaces résidentiels qui multiplient les déplacements et augmentent la dépendance à l'automobile (Raux *et al*., 2006 ; Raux, Traisnel, 2007). Le modèle de la ville durable tarde à être un modèle efficace de référence et révèle de fortes contradictions entre des politiques locales de durabilité et les grands mouvements de fond comme la métropolisation qui s'observe partout (Grenier, 2007). La planification urbaine est-elle un outil suffisant face la puissance de mécanismes économiques qui dépassent la stricte échelle urbaine et qui pèsent sur les marchés foncier et immobilier ?

2.3 Reconfiguration des modes et des échelles de gouvernance

Alors que les villes sont des lieux de consommation énergétique très élevée et que de nombreux aspects du fonctionnement urbain dépendent des flux d'énergie, les acteurs urbains intervenaient jusqu'alors généralement peu dans la gestion des systèmes énergétiques. Cette situation tend aujourd'hui à évoluer et les acteurs urbains s'investissent en effet de plus en plus dans la production ou la distribution de l'énergie (Rutherford, 2013), comme ils se sont emparés de la question économique dans les années 1970 avec la première crise pétrolière.

Le déploiement de systèmes énergétiques renouvelables basés sur une production répartie et distribuée peut en théorie transformer les zones urbaines, d'espaces de consommation en espaces de production, ce qui nécessitera de repenser les modes de gestion et de gouvernance des réseaux énergétiques urbains. Par analogie avec des observations de l'activité industrielle ou financière, Coenen *et al.* (2010) mettent en avant le rôle que les villes seraient amenées à prendre

dans l'adoption de nouvelles technologies énergétiques et de nouveaux modes de distribution de l'énergie, du fait de leur proximité sociale et spatiale. Une place croissante est en effet accordée au rôle que les villes et les régions pourraient jouer dans la maîtrise de la consommation d'énergie et le déploiement des énergies renouvelables. Les villes et les régions apparaissent comme des sites potentiels importants pour l'action politique autour de la transition énergétique (Bulkeley *et al*., 2011). Avec une certaine proximité institutionnelle, les villes et les régions pourraient être les espaces d'une conception partagée de planification énergétique. Elles n'ont cependant pas de réelle autonomie politique. Si l'avenir énergétique est fondé sur de nouvelles ressources et technologies, il dépend aussi de logiques de pouvoir politique et économique. Cela prévaut autant à l'échelle nationale qu'urbaine et s'inscrit dans un jeu de définition des propriétés, de l'accès et de redistribution des coûts et des avantages. Les territoires qui tentent de développer une compétence énergétique communautaire sont parfois confrontés à une série de résistances politiques et institutionnelles inhérentes à la redistribution des pouvoirs entre structures territoriales (Rocher, 2013) ou à la crainte de ne pas pouvoir assumer la responsabilité de l'approvisionnement en énergie dans un contexte où les services énergétiques sont encore largement considérés comme relevant de l'intérêt national. Certaines collectivités territoriales se trouvent aussi démunies face aux efforts à produire en matière de changements, considérés parfois comme trop importants, trop techniques ou trop coûteux (adoption de nouvelles technologies, changement d'opérateur, prise de risque politique et financier…) (Zélem, 2007). Ces éléments rappellent qu'il y a des limites à une vision locale de la transition énergétique (Newell, Mulvaney, 2013) et que les modèles de production énergétique hautement décentralisés pourraient ne pas être une caractéristique majeure des systèmes sociotechniques de l'énergie à venir, mais des éléments influençant à la marge des modèles intermédiaires dérivés de modèles centralisés.

Si par le passé la géographie révélait le rôle central des institutions nationales dans les processus d'organisation de l'espace, un très grand nombre d'études examinent aujourd'hui le rôle central des visions et des politiques urbaines et régionales (Bulkeley *et al*. 2011 ; Bulkeley *et al*., 2014). En effet si les modèles énergétiques alternatifs mettent l'accent sur les niveaux urbains et régionaux, l'importance des connexions avec d'autres niveaux d'échelle de gouvernance est évidente (Hodson, Marvin, 2010, 2012 ; Späth, Rohracher, 2010, 2012 ; Uyarra, Gee, 2013). Hodson et Marvin (2009) soulignent par exemple que la vision des instances de gouvernance urbaines peut être largement partagée par des acteurs exogènes tels que les entreprises multinationales, qui recherchent des lieux spécifiques pour tester leurs projets, comme dans le cas des réseaux intelligents et des compteurs communicants (smart grids). Des réseaux d'acteurs industriels puissants peuvent conduire à l'exclusion des stratégies urbaines et régionales, faisant écho à ce que Shove et Walker (2007, p. 766) qualifient de « *jeu de puissance* ».

L'importance des visions et des politiques urbaines et régionales reflète la nécessité de mobiliser le groupe hétérogène des acteurs locaux pour les transitions énergétiques (Essletzbichler, 2012). La gouvernance des transitions énergétiques englobe des domaines politiques multiples. En cela elle peut être contestée et se négocie entre des acteurs territoriaux

multiples, publics et privés (Coutard, Rutherford, 2010 ; Monstadt, 2007). Ainsi, l'analyse des politiques et des visions urbaines et régionales met en évidence les luttes et les conflits liés à la gouvernance des transitions énergétiques. L'hétérogénéité des acteurs impliqués dans l'élaboration des politiques de transition est révélatrice de l'articulation entre les politiques publiques et la gestion des infrastructures matérielles. La gestion de ces infrastructures a souvent été privatisée, ce qui implique que la gouvernance des transitions se construit de plus en plus dans une logique de collaborations entre acteurs publics et privés ayant des intérêts variés et parfois divergents (Lagendijk, Boertjes, 2013). Il en résulte des processus complexes inscrits dans une concurrence entre des visions différentes qui concernent autant le choix des technologies renouvelables, que le niveau d'ambition dans les objectifs de transition, mais qui comprennent également des désaccords sur l'échelle géographique envisagée pour développer des initiatives favorisant les transitions énergétiques (Monstadt, 2007 ; Hodson, Marvin, 2012 ; Faller, 2014). Mais les désaccords peuvent concerner aussi uniquement les niveaux de gouvernance territoriale et conduire à des divergences entre ces différents niveaux, comme l'ont démontré Coutard et Rutherford (2010) à propos de la région Île-de-France, où les autorités locales et nationales se sont accordées, conduisant à un front uni contre les autorités régionales. Cela met en évidence la nature fondamentalement politique du processus de transition énergétique.

2.3.1 Spatialité des acteurs, entre proximité géographique et relations multi-scalaires

La proximité géographique dans les relations entre acteurs industriels et acteurs institutionnels peut stimuler le marché des innovations environnementales et des technologies renouvelables (Coenen *et al*., 2010), favorisant une régionalisation du processus d'industrialisation des énergies renouvelables (Asheim *et al*., 2011 ; Boschma, Frenken, 2012). La proximité géographique permettrait une interaction continue, en face à face, facilitant les liens sociaux et la mise en réseau (Coenen *et al.,* 2010 ; Dewald, Truffer, 2012 ; Ornetzeder, Rohracher, 2013). La proximité géographique exercerait une influence positive sur les relations inter-organisationnelles (McCauley, Stephens, 2012), faciliterait la mise en place de réseaux d'acteurs aux échelles locale et régionale (Späth, Rohracher, 2010, 2012) et favoriserait les collaborations entre des acteurs hétérogènes (Hansen, 2014). Mais la mise en œuvre de la transition énergétique ne s'inscrit pas uniquement dans un rapport de proximité entre acteurs. La gouvernance des transitions énergétiques passe aussi par des interactions entre des décideurs de différentes échelles, et les relations entre acteurs mondiaux peuvent impacter les processus de transition locale (Coutard, Rutherford, 2010 ; Hodson, Marvin, 2009, 2010 ; Späth, Rohracher, 2012), d'autant plus que les grands groupes énergéticiens sont positionnés sur un marché mondialisé de l'énergie très concurrentiel. Aussi des approches relationnelles de l'espace considèrent que la géographie de la transition énergétique suit les réseaux d'acteurs (Binz, Truffer, 2011 ; Coenen *et al.,* 2012 ; Raven *et al,*. 2012 ; Truffer, Coenen, 2012). Cette conception considère donc que la transition énergétique est socialement construite à travers les réseaux d'acteurs et que sa dimension spatiale est d'ordre relationnel et dépend de la structuration des réseaux d'acteurs entre différents niveaux d'échelle spatiale (Raven *et al.,* 2012, p. 69).

2.3.2 Perspectives de développement économique régional

Une autre caractéristique des politiques de transition énergétique urbaine et régionale réside dans la combinaison entre les objectifs écologiques et la compétitivité économique, combinaison souvent qualifiée de *croissance verte* (Hodson, Marvin, 2009 ; Späth, Rohracher, 2010 ; MEDDE, 2015). Ce double objectif se matérialise par des politiques visant à stimuler le développement industriel des technologies renouvelables (Carvalho *et al*., 2012 ; McCauley, Stephens, 2012). Comme l'a noté Smith (2007), le niveau régional s'affiche comme un levier d'action pour le développement de ces technologies et des filières innovantes par le biais du soutien à la recherche et par des programmes de financement de projets. Cela reflète une suggestion faite entre autres par Asheim *et al.* (2011) qui émettent l'idée que les acteurs régionaux conçoivent des politiques publiques d'innovation plus efficaces que les acteurs nationaux, en raison de leur connaissance des conditions spécifiques de leur territoire et de leur capacité à affiner leurs politiques par rapport à ces spécificités. Cette conception défend le fait que chaque région possède un potentiel d'innovation, mais que la nature de ce potentiel diffère en raison de spécialisations industrielles et technologiques. De cette façon, on peut considérer que le potentiel de transition énergétique diffère qualitativement selon les régions, et que les politiques doivent en tenir compte. Alors que les politiques gouvernementales peuvent être considérées comme une composante principale des politiques environnementales, les institutions de gouvernance locales sont tout aussi importantes dans la mise en œuvre de la transition énergétique.

Des recherches soulignent par ailleurs l'importance des processus de spécialisation spatiale industrielle et technologique. La proximité géographique peut susciter le développement des innovations nécessaires à la mise en œuvre de la transition énergétique et au déploiement des énergies renouvelables, conduisant à des spécialisations industrielles dans certains espaces (Bridge *et al*., 2013 ; McCauley, Stephens, 2012). Comme pour d'autres technologies, le développement et la mise en œuvre des technologies renouvelables sont stimulés par des économies d'agglomérations telles que l'accès à un bassin de main-d'œuvre qualifiée, à des instituts et des centres de recherche et à des universités (McCauley, Stephens, 2012). Les politiques urbaines et régionales combinent parfois leurs objectifs écologiques avec une volonté de développement industriel des technologies correspondantes. Ainsi, la présence de concentrations industrielles dans les territoires favorise souvent les agendas politiques en faveur de projets innovants. Smith (2007) montre comment, en Angleterre, les différents plans régionaux pour le développement des énergies renouvelables ont été influencés par les stratégies régionales des acteurs industriels du secteur. De la même façon, des programmes de développement des énergies renouvelables s'effectuent dans le sud de la France en partenariat avec les opérateurs énergétiques historiques implantés en région, mais aussi en lien avec les centres de recherches comme le Centre d'Étude Atomique (CEA) de Cadarache et les pôles de compétitivité, comme le pôle CAPENERGIES par exemple. Le cas de la Région Champagne-Ardenne qui s'est positionnée dès 2002 sur la filière éolienne constitue un autre exemple. Le Conseil régional y a adopté une politique de développement de filière très volontariste

accompagnée par un plan de formation professionnelle[20] du Bac +2 au Bac +5 allant de la maintenance des sites à l'informatique industrielle et l'électrotechnique, en partenariat avec les établissements de formation du lycée professionnel à l'université (Région Champagne-Ardenne, 2015). Monstadt (2007) révèle également comment le lien avec le milieu de la recherche dans le secteur photovoltaïque a par exemple été un préalable important pour l'orientation de la politique sur l'énergie solaire photovoltaïque à Berlin. Carvalho *et al.* (2012) ont aussi souligné le rôle des spécialisations industrielles et technologiques locales dans le choix des technologies de transport urbain durable à Curitiba, Göteborg et Hambourg, et indiquent aussi que les politiques publiques locales et la spécialisation industrielle peuvent se renforcer mutuellement. Ils montrent que la proximité géographique influence les échanges de connaissances entre sphère industrielle et sphère politique, et peut favoriser le soutien des politiques publiques au développement des énergies renouvelables.

[20] Rappelons que la formation professionnelle et le développement économique sont des compétences centrales qui incombent aux Régions.

3 Transition énergétique et *Path dependence* : le point de vue du *Space lock-in*

La transition énergétique est fondamentalement un processus géographique (Juisto, 2009 ; Bradshaw, 2010 ; Bridge *et al.*, 2013 ; Coenen, Hansen, 2015) susceptible de remettre en cause les configurations spatiales actuelles de l'activité économique et sociale, c'est-à-dire l'un des objets scientifiques des géographes. La transition énergétique implique des investissements massifs pour repenser les infrastructures, l'habitat, l'équipement – c'est-à-dire les modalités de l'organisation spatiale des sociétés – dans une perspective de durabilité, mais aussi de faire des choix dans une gamme d'échelles spatiales possibles de gouvernance (Bridge *et al.*, 2013). L'implication des ressources énergétiques et l'évolution de leur part dans les mix énergétiques nationaux, dans les changements sociétaux tels que l'industrialisation, l'urbanisation, la croissance économique et l'émergence de la société de consommation, ont largement été démontrées dans les études historiques sur la transition énergétique (Gales *et al.,* 2007 ; Fouquet, 2010 ; Smil, 2010 ; Kander, Malanima, Warde, 2013). L'utilisation et la transformation des ressources énergétiques par les sociétés exercent une influence sur leur développement économique et l'évolution de leurs structures spatiales et territoriales. Les systèmes énergétiques ont souvent contribué à des changements spatiaux et territoriaux. Une transition énergétique, par l'intégration massive des énergies renouvelables dans les mix énergétiques, est donc *en théorie* susceptible d'impliquer des changements aussi importants que le passage du bois au charbon, ou l'électrification des zones urbaines et rurales de la fin du XIX^{e} siècle, aussi difficile qu'il soit d'imaginer actuellement ces changements d'ordre sociétaux, technologiques et territoriaux. Ces changements possibles sont toutefois confrontés à une série de résistances et de verrous qui favorisent plutôt une continuité d'évolution que des changements radicaux de trajectoires.

3.1 Le poids des structures spatiales, un manque dans les approches *mainstream* de la transition énergétique

La question de la transition énergétique ouvre depuis quelques années des perspectives renouvelées de recherche en géographie et plus largement en sciences sociales (Calvert, 2015 ; Sovacool *et al.,* 2015). La question de la transition énergétique permet de réinterroger des démarches théoriques relevant de l'analyse de l'évolution des systèmes sociotechniques, de la géographie économique, des théories de la diffusion des innovations, la théorie du MLP, ou encore de la *Path dependence* (Araujo, 2014). Les travaux récents en sciences sociales sur la transition énergétique contribuent largement à la compréhension de la façon dont les transitions peuvent se produire en analysant et en identifiant les facteurs qui freinent ou favorisent ces mutations dans les systèmes sociotechniques (Jaglin, Verdeil, 2013 ; Rutherford, Coutard, 2014), en particulier les interactions entre acteurs et les gisements d'innovation sociale (Nadaï, Labussière, 2010 ; Zelem, 2010). Ces approches sociotechniques s'inscrivent largement dans les champs de l'analyse économique, politique et sociologique et ont parfois tendance à conférer aux structures spatiales et territoriales, et plus largement à l'espace, le simple rôle de support. Pourtant les systèmes énergétiques sont intégrés dans des contextes spatiaux et territoriaux

spécifiques. Si cette intégration de la dimension spatiale par la prise en compte des spécificités des lieux est en effet de plus en plus présente dans les recherches (cf. *supra*), l'évaluation du rôle et du poids exercé par les structures spatiales et territoriales sur les capacités de changement et d'évolution n'est pas toujours très explicite. Si on considère en effet que l'espace est en partie construit et organisé par des interactions sociales, nous ajoutons qu'en retour, les structures spatiales et territoriales produites réduisent les marges de manœuvre et les potentialités de changement. La deuxième partie de cette phrase est l'idée fondamentale de la partie qui va suivre. Nous considérons en effet que les structures spatiales et territoriales ont acquis au cours du temps un poids considérable, une inertie, qui peut ralentir ou empêcher tout changement radical dans l'évolution des modes d'organisation des sociétés dans leur espace, et donc dans l'évolution des systèmes énergétiques, en dehors d'événements rares et imprévisibles comme les *Cygnes Noirs* (Taleb, 2007).

Si les spécificités locales commencent à être prises en compte dans l'analyse des transitions énergétiques (Coenen, Bennworth, Truffer, 2011 ; Coenen, Hansen, 2015), nous défendons le fait que ces transitions ne sont pas qu'une question économique et politique et que l'espace des sociétés n'est pas seulement un facteur de différenciation spatiale de ces transitions. L'espace des sociétés a aussi acquis ses principes d'évolution qui impliquent une logique de *Path dependence*. Toute la complexité de la transition énergétique réside dans la complexité spatiale et territoriale qui l'encadre et la détermine, celle de l'organisation des hommes dans l'espace.

3.2 La *Path dependence* comme cadre conceptuel

D'une manière générale, le concept de *Path dependence* correspond à une situation où les décisions passées impliquant une direction donnée induisent des dynamiques ultérieures allant dans la même direction. Ce concept a été initialement développé en économie pour expliquer les processus d'adoption des technologies, d'évolution de l'industrie et de développement économique régional. Il s'intègre plus largement dans un tournant épistémologique en économie qui a introduit une perspective évolutionniste en s'inspirant des cadres théoriques de la biologie évolutionniste (processus de sélection, de compétition, équilibres ponctués, etc.). Défendu à l'origine et popularisé essentiellement par les économistes Paul David (1985, 1993, 1994, 2005) et Brian Arthur (1988, 1994) qui utilisent ce concept comme un moyen de caractériser l'évolution des technologies et des normes technologiques, la *Path dependence* a depuis été adoptée et appliquée dans d'autres disciplines des sciences sociales comme un modèle de développement social, culturel, institutionnel, organisationnel et politique, économique et technologique. Dans un certain sens, cette diffusion du concept peut être considérée comme faisant partie d'un plus large « *tournant évolutionniste* » dans les sciences sociales (Daviet, Monge, 2010), d'un intérêt croissant pour l'étude de l'évolution des systèmes socio-économiques en puisant des concepts et des modèles en biologie et dans les théories de la complexité (Gunderson, Holling, 2002 ; Garnsey, McGlade, 2006 ; Wimmer, Kössler, 2006). Ron Martin, Ron Boschma et Koen Frenken sont parmi les principaux représentants du paradigme

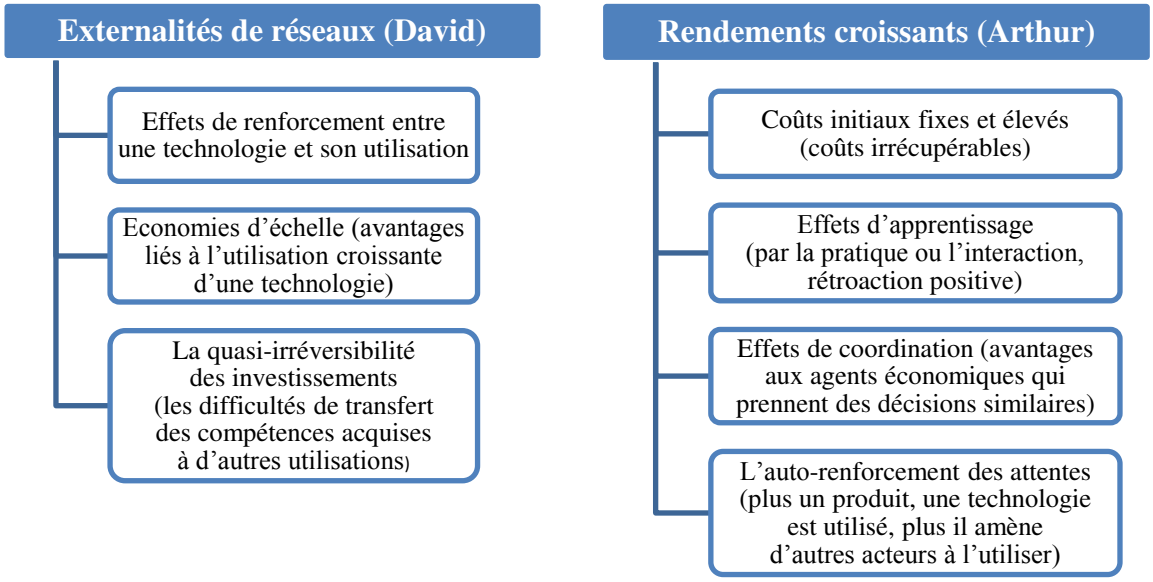
évolutionniste en géographie économique et ont aujourd'hui largement intégré le concept de *Path dependence* dans leurs approches. Ces auteurs considèrent en effet que « *l'état actuel des activités économiques ne peut être seulement dérivé de conditions actuelles, car l'état actuel de ces activités a émergé et a été contraint par les états des activités précédentes. La théorie évolutionniste traite des processus de Path dependence dans lesquels les événements précédents affectent la probabilité d'occurrence des événements futurs* » (Boschma, Frenken, 2006, pp. 280-281).

La notion de *lock-in* est un concept de base du modèle de *Path dependence*. Cette notion implique que la combinaison de la contingence historique et de l'apparition d'effets d'auto-renforcement dirige une technologie, l'industrie ou l'économie régionale le long d'une trajectoire plutôt qu'une autre. D'après Page (2006), un processus de *Path dependence* peut être modélisé de la façon suivante. Soit x (t) le résultat économique ou le résultat du phénomène étudié, par exemple la part d'un produit ou la part d'une technologie sur le marché, le nombre d'entreprises d'un type particulier d'industrie dans une région, ou encore la part d'une industrie nationale dans une région.
Ensuite, la *Path dependence* peut être exprimée sous la forme générale suivante :

$$x(t+1) = Fx\ (t)\ (h(t)\ x)$$

où : h(t)x = {x(t), x(t-1)… x(0), y(t+1), y(t), y(t-1)…} est la succession des résultats passés de *x* jusqu'au temps initial (t = 0) lorsque l'activité en question est apparue, jusqu'à l'instant présent *t*, et d'autres facteurs *y* qui contribuent également au développement de *x* au cours du temps. *Fx* (t) est alors une fonction basée sur l'histoire *h(t)x* du phénomène étudié. Cette fonction détermine donc dans quelle mesure et de quelle manière les antécédents de *x* conditionnent sa trajectoire future.

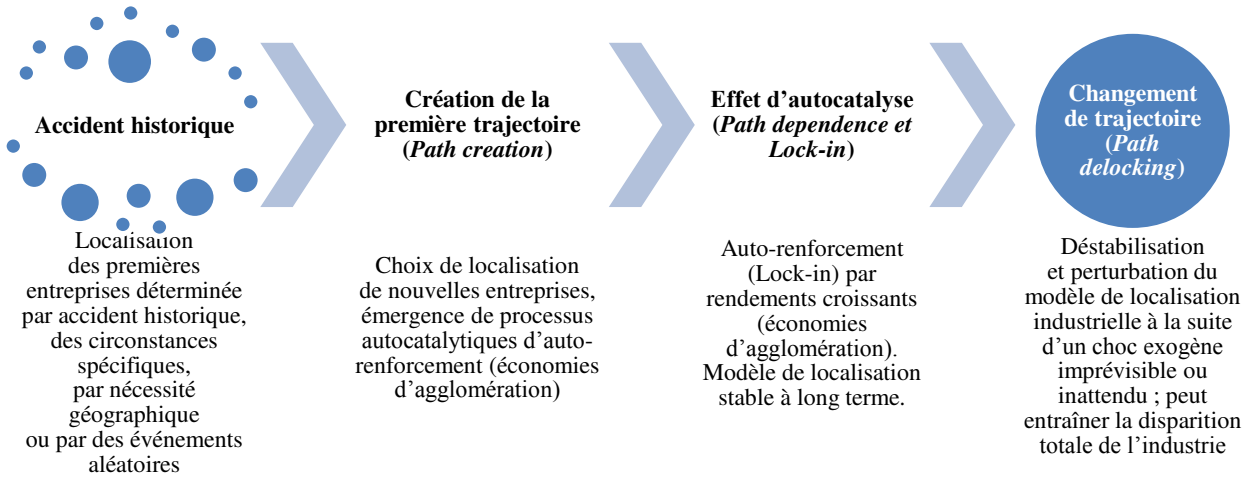
À partir des travaux de Paul David et de Brian Arthur, Ron Martin (2010, p. 5) définit un modèle canonique de la *Path dependence*. Tout d'abord, la *Path dependence* est considérée comme un processus stochastique dans lequel une légère modification des conditions initiales par de petits événements aléatoires ou par des « accidents historiques » peut avoir des effets importants à long terme sur la structure d'une économie. Ensuite, un processus de *Path dependence* se produit si cet événement accidentel initial se *verrouille* (lock-in) par l'émergence de processus auto-catalytiques « *d'externalités de réseau* » (selon Paul David) ou « *de rendements croissants* » (selon Brian Arthur) (Figure 16). Enfin, la caractéristique essentielle du modèle de *Path dependence* consiste à considérer qu'une fois que le système est entré dans un processus d'autocatalyse, une technologie, un type d'industrie, ou un modèle de localisation industrielle persiste dans le temps jusqu'à ce qu'il soit perturbé par un choc externe.



Source : d'après Martin, 2010, p. 5.

Figure 16. Processus auto-catalytiques dans le modèle canonique de la *Path Dependence*

De nombreux géographes ont fait appel à ce modèle et au concept de *lock-in* pour caractériser l'évolution des districts industriels, des clusters, et d'autres formes localisées de spécialisation industrielle (Lagerholm, Malmberg, 2009). La figure 17 présente la version de Brian Arthur du modèle de *Path dependence* appliquée aux localisations industrielles.



Source : d'après Martin, 2010, p. 5.

Figure 17. Le modèle canonique de *Path dependence* dans l'évolution des localisations industrielles

Storper (1997) s'appuie aussi sur ce concept pour expliquer la résurgence des économies régionales en Europe dans les années 1980 et 1990. Bode (2001) l'a, quant à lui, utilisé pour mettre à l'épreuve la théorie de la croissance endogène en montrant que les activités innovantes

dans une région suivaient ou ne suivaient pas un processus de *Path dependence* selon le type de variable prise en compte pour décrire ces activités. Hassink (2005) a aussi interprété le déclin des anciens districts industriels comme résultant de la manière dont une situation de *lock-in* peut restreindre les capacités d'adaptation face à des chocs externes.

Le concept de *lock-in* a été cependant récemment reconsidéré. Martin (2010) rappelle en effet que le modèle canonique de *Path dependence* issu des travaux de David et Arthur (Cf. *supra*) s'applique surtout aux trajectoires historiques liées aux grandes évolutions technologiques *radicales* qui ont marqué l'histoire du développement économique et transformé l'économie tout entière. La plupart des technologies dites à usage général telles que l'électricité et l'ordinateur par exemple entrent dans cette catégorie. Mais le modèle de base de *Path dependence* ne tient pas compte selon Ron Martin de l'hétérogénéité qui caractérise les économies locales et régionales. Il met en avant le fait que les trajectoires industrielles locales ou régionales peuvent évoluer même si le contexte industriel ou économique général se trouve dans une situation de *lock-in*. Il rajoute également que même au sein de districts industriels locaux très spécialisés, chaque activité peut avoir sa propre trajectoire d'évolution et que les trajectoires propres à chaque activité peuvent être plus ou moins liées les unes aux autres de sorte à produire parfois une coévolution (Martin, Sunley, 2006). Il propose ainsi un modèle alternatif de *Path dependence* décrit dans la figure 18.

Martin part du principe que l'émergence d'une nouvelle industrie locale n'est pas nécessairement due à un accident historique ou un événement aléatoire, mais peut être aussi stimulée, au moins en partie, par la préexistence de ressources, de compétences, d'expériences héritées des trajectoires d'évolution locales antérieures. Ces conditions héritées façonnent d'une part l'environnement dans lequel l'expérimentation, l'action et la compétition émergent chez des agents locaux, mais rendent d'autre part l'environnement attractif pour des agents extérieurs. Une fois qu'une industrie locale commence à émerger, elle peut stimuler un processus auto-catalytique d'externalités de réseau qui oriente une trajectoire de *Path dependence*. Cette trajectoire peut alors prendre deux directions distinctes. Une première direction s'inscrit dans le modèle canonique de *Path dependence* (convergence vers une forme d'auto-reproduction stable, renforcement de la technologie existante, peu ou pas d'innovation, peu de changement endogène). Cette situation expose l'industrie aux fluctuations des marchés et à la concurrence avec les entreprises plus productives, ou moins chères. Elle peut aussi rendre l'environnement économique local hostile à l'expérimentation entrepreneuriale et à des innovations industrielles locales. Le deuxième type de trajectoire est plus ouvert et permet un changement endogène.

Dans cette situation l'industrie évolue lentement au fil du temps et trace une trajectoire de développement inscrite autant dans un processus de *Path dependence* qu'évolutif. Martin précise que dans la réalité la vitesse ou le rythme d'adaptation varie d'une industrie locale à l'autre et peut changer au cours du temps. Les capacités d'adaptation d'une industrie peuvent aussi diminuer et orienter cette industrie vers une forme de stabilité qui la renvoie sur une trajectoire de *Path dependence* selon le modèle canonique.

Avec ce modèle, Martin permet d'insister sur le fait que la *Path dependence* n'est pas seulement une contrainte qui favorise l'inertie des systèmes existants. On peut aussi lui attribuer un rôle clé en tant que mécanisme d'évolution économique (Figure 18).

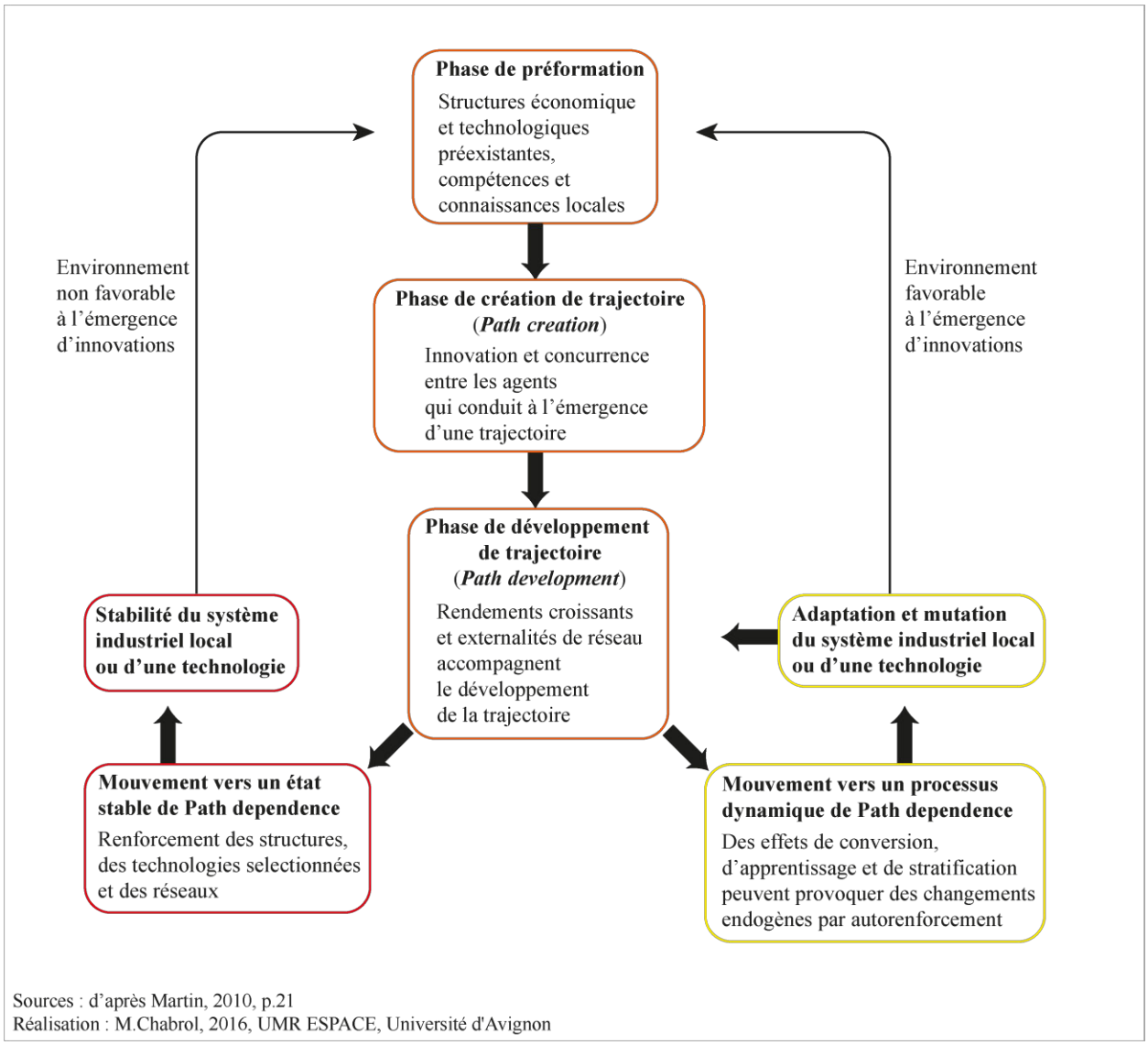


Figure 18. Modèle alternatif de *Path dependence* dans l'évolution des localisations industrielles

Au cours des deux dernières décennies, le modèle de *Path dependence* a été aussi appliqué en sciences politiques pour caractériser et expliquer l'évolution des institutions, des systèmes juridiques et d'autres cadres règlementaires (Pierson, 2000). Mais là aussi des recherches récentes sur la place et l'évolution des institutions visent à élargir et à réviser le modèle de *Path dependence* de manière à se concentrer plus sur les processus d'évolution par des mécanismes d'auto-renforcement et moins sur les effets d'inertie. Alexander (2001) a par exemple mis en évidence que si la persistance dans le temps des grandes institutions démocratiques relève d'un processus de *Path dependence*, ce n'est pas nécessairement le cas des modes de comportement individuel qui les accompagnent. Ces approches estiment en effet que le

modèle canonique de *Path dependence* surestime le degré d'inertie dans les institutions politiques et sociales. Les institutions sont en effet régulièrement contestées et révisées. Boas (2007) insiste sur le fait que si le modèle de *Path dependence* est pertinent dans l'analyse de la continuité institutionnelle, il rend difficilement compte du changement. Il existe donc une tendance actuelle à retravailler et à reconstruire ce cadre conceptuel (*Path dependence et lock-in*) pour en obtenir une version plus riche qui intègre davantage les mécanismes de changement. Autrement dit, même dans un système qui relève d'une situation de *Path dependence* et présente un degré élevé de continuité dans son évolution, il est possible que les éléments au niveau micro de ce système évoluent indépendamment les uns des autres, de sorte qu'un changement progressif du système peut se produire alors qu'il continue au niveau macro à éviter des changements brusques et radicaux (Martin, 2010).

3.3 Dimensions spatiales de la Path dependence et transition énergétique

De notre point de vue, les structures spatiales et territoriales relèvent de la *Path dependence* dans la mesure où elles sont le produit de processus sociaux qui s'inscrivent dans un temps long et résultent de contraintes spatiales, de choix, de conflits et de négociations entre différents groupes sociaux. Elles sont un résultat systémique d'interactions issues de stratégies individuelles et/ou collectives qui organisent et modifient l'espace dans toute la complexité des actes sociaux. Si l'émergence de dynamiques spatiales peut être due à un accident historique ou un événement aléatoire (catastrophe climatique, etc.), ces dynamiques peuvent être aussi stimulées et orientées par la nature et le type d'organisation des structures spatiales préexistantes. Les organisations spatiales héritées façonnent d'une part l'environnement dans lequel les dynamiques s'inscrivent, mais le rendent aussi d'autre part favorable à des dynamiques nouvelles (Daviet, Monge, 2010). Une fois qu'une structure commence à émerger, elle peut stimuler un processus auto-catalytique qui oriente une trajectoire de *Path dependence*. Par exemple, l'attractivité d'une ville dans un réseau de villes favorisé par un statut administratif, une activité économique ou une localisation optimale dans un système d'échanges peut s'amplifier jusqu'à conférer à cette ville un statut primatial. Cette trajectoire peut alors prendre deux directions distinctes.

Une première direction s'inscrit dans le renforcement de la structure spatiale existante (sur la gauche du diagramme de la figure 19). Selon le même exemple, la même ville conserve son attractivité sur le long terme, et cette dernière se renforce. Cette situation s'exprime par une trajectoire d'évolution dominante dans laquelle s'inscrivent les dynamiques ultérieures.
Le deuxième type de trajectoire (sur la droite du diagramme de la figure 19) est plus ouvert et permet un changement endogène des systèmes spatiaux. Dans cette situation, les structures spatiales produisent des effets de seuils (par exemple : saturation, congestion urbaine, coût de transport, etc.) qui amènent les systèmes spatiaux à s'adapter. Des décisions normatives peuvent aussi impliquer une mutation de ces systèmes (interdiction de construire dans certains espaces, etc.). La vitesse ou le rythme d'adaptation varient dans le temps et l'espace. Les capacités d'adaptation des systèmes spatiaux peuvent aussi diminuer et orienter la trajectoire vers une forme de stabilité qui la renvoie sur une trajectoire de *Path dependence* par renforcement des structures (Figure 19).

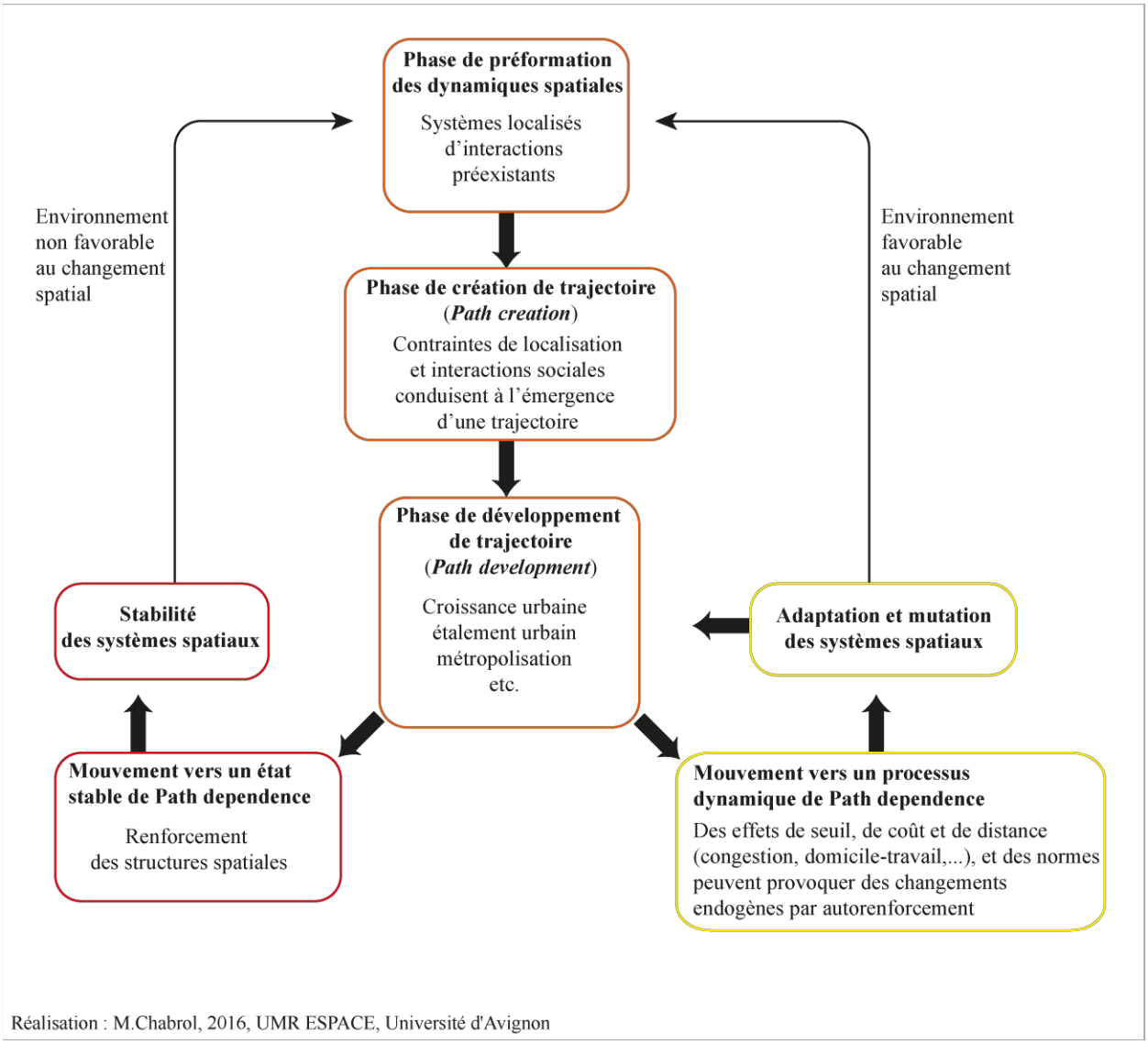


Figure 19. Modèle de *Path dependence* dans l'évolution des structures spatiales

Ce concept de *Path dependence* a trouvé sa place dans l'étude des transitions énergétiques. Si Unruh (2000), Aklin et Urpelainen (2013) ont démontré l'intérêt du concept de *Path dependence* dans l'analyse des transitions énergétiques, ils affirment cependant que la question de la transition énergétique reste essentiellement politique. Pourtant la dimension spatiale de la *Path dependence* dans les transitions énergétiques a été soulignée entre autres par Boshma et Martin (2010) et a été récemment réaffirmée par Hansen et Coenen (2014, p. 6) qui démontrent que, dans le développement des énergies renouvelables, la combinaison de contingences historiques et l'émergence d'effets d'auto-renforcement, mais aussi les spécificités locales orientent une technologie, une industrie ou une économie régionale sur une trajectoire plutôt qu'une autre. Le rôle des structures socio-spatiales héritées, de l'historicité et des cultures énergétiques locales préexistantes dans l'entrée en transition des collectivités territoriales, évoqué par Emelianoff et Nor (2013) et plus récemment par Nadaï *et al.* (2015), nous encourage aussi à orienter notre recherche dans cette direction.

On peut donc affirmer que les structures spatiales et territoriales sont dotées d'une forte inertie et évoluent au travers de mécanismes d'auto-renforcement. Elles contraignent et orientent par conséquent les interactions sociales et spatiales, ainsi que leurs propres potentialités de changement et d'évolution. L'évolution des territoires a été alimentée par des choix anciens privilégiant les technologies basées sur les combustibles fossiles, ce que Unruh nomme *carbon lock-in* (Unruh, 2000). Les coûts de sortie de ce modèle ont augmenté avec le temps. Nous entendons à la fois les coûts irrécupérables liés à la structuration de l'espace par les sociétés, l'environnement bâti, les réseaux, et plus particulièrement les infrastructures de production et de distribution d'énergie, mais aussi les cultures au lieu de consommation exprimées par des attentes et des normes concernant le coût et la fiabilité de l'approvisionnement ou encore les pratiques sociales associées à la consommation de l'énergie. Le concept de *carbon lock-in* a été bien argumenté dans le champ de l'économie et de la politique (Unruh, 2000 ; Aklin, Urpelainen, 2013). Mais l'analyse de la dimension spatiale du *lock-in* reste rare même si certains auteurs mettent en avant l'idée que la *place dependence* est une dimension importante de la *Path dependence* (Martin, Sunley, 2006 ; Martin, 2010).

Notre approche s'inscrit donc dans la continuité de ces travaux en s'intéressant davantage aux processus d'auto-renforcement liés à l'existence même des structures spatiales et socio-spatiales, ce que nous appelons ici *Space lock-in*, en écho au concept de *carbon lock-in* (Unruh, 2000). Nos modes de vie modernes et les modes d'organisation des sociétés dans l'espace sont issus d'un modèle énergétique basé sur les énergies fossiles, modèle aujourd'hui remis en cause (Cf. chapitre 1). Si la dimension spatiale de la *Path dependence* interroge les géographes économiques (surtout anglophones revendiquant une approche évolutionniste de la géographie économique), l'espace est surtout présent au travers des spécificités locales ou régionales dans les tentatives empiriques pour aborder, mesurer et appréhender la spatialité de ce phénomène. C'est pourquoi nous proposons d'analyser le résultat matériel issu des mécanismes de production de l'espace, de construction des territoires par le jeu de contraintes spatiales et d'interactions entre acteurs, c'est-à-dire d'observer le résultat spatial, les structures spatiales en tant que systèmes localisés de lieux en interaction les uns avec les autres. Ces structures sont le résultat de contraintes spatiales, de décisions, d'actions et d'interactions passées, dans des lieux qui ont leurs spécificités (industrielles, démographiques, culturelles, etc.). Ces structures sont amenées aujourd'hui à s'adapter, à être modifiées dans une démarche d'aménagement durable et une perspective de mise en œuvre de la transition énergétique (nouveaux lieux de production d'énergie renouvelable, densification urbaine, systèmes de transport propres, diminution des consommations dans l'habitat, etc.).

Dans ce contexte, les structures spatiales et territoriales peuvent être considérées comme un obstacle potentiel à la transition énergétique et aux changements qu'elle implique. Il s'agit alors de déterminer ce que la transition énergétique signifie pour l'organisation spatiale et en quoi les composantes spatiales et territoriales peuvent exercer des influences sur les potentialités de changement et d'évolution inhérentes à ce projet de transition.

Mais une analyse qui se limiterait au concept de *Path dependence*, uniquement comme un élément de blocage serait à bien des égards trop restrictive (Martin, 2010, cf. *supra*). Si la notion de *lock-in* est bien une dimension importante, la *Path dependence* désigne en effet un processus d'évolution qui s'inscrit dans la continuité d'une trajectoire dominante, elle décrit également les processus de dynamiques émergentes qui peuvent aboutir à des structures nouvelles par auto-renforcement. La notion de *degré de liberté* sera ainsi mobilisée pour différencier les éléments à effet d'inertie ou difficilement modifiables, des espaces de changements possibles.

Les dynamiques spatiales peuvent être stimulées par la nature du système énergétique préexistant. Mais la localisation des ressources, leurs coûts d'exploitation et la demande en énergie stimulent un processus auto-catalytique qui oriente une trajectoire vers un type de système énergétique et une source dominante d'énergie. Les effets de coordination et l'auto-renforcement des attentes (Cf. Figure 17) catalysent une évolution qui s'amplifie autour d'un modèle dominant (Carbon lock-in) peu favorable à une dynamique de transition et qui s'inscrit dans le renforcement des structures spatiales existantes (Space lock-in). Mais cette situation peut produire des effets de seuils et des externalités négatives (coût de l'énergie, état des réserves fossiles, changement climatique, pollution, etc.) qui amènent les systèmes spatiaux à s'adapter. Cette situation ouvre des degrés de liberté dans l'évolution des systèmes spatiaux. Une logique de substitution de la ressource dominante par une autre renvoie le système sur une trajectoire de *Path dependence* par renforcement de l'existant. Une logique d'innovation débride au contraire le champ des possibles et favorise les dynamiques de transition (Figure 20).

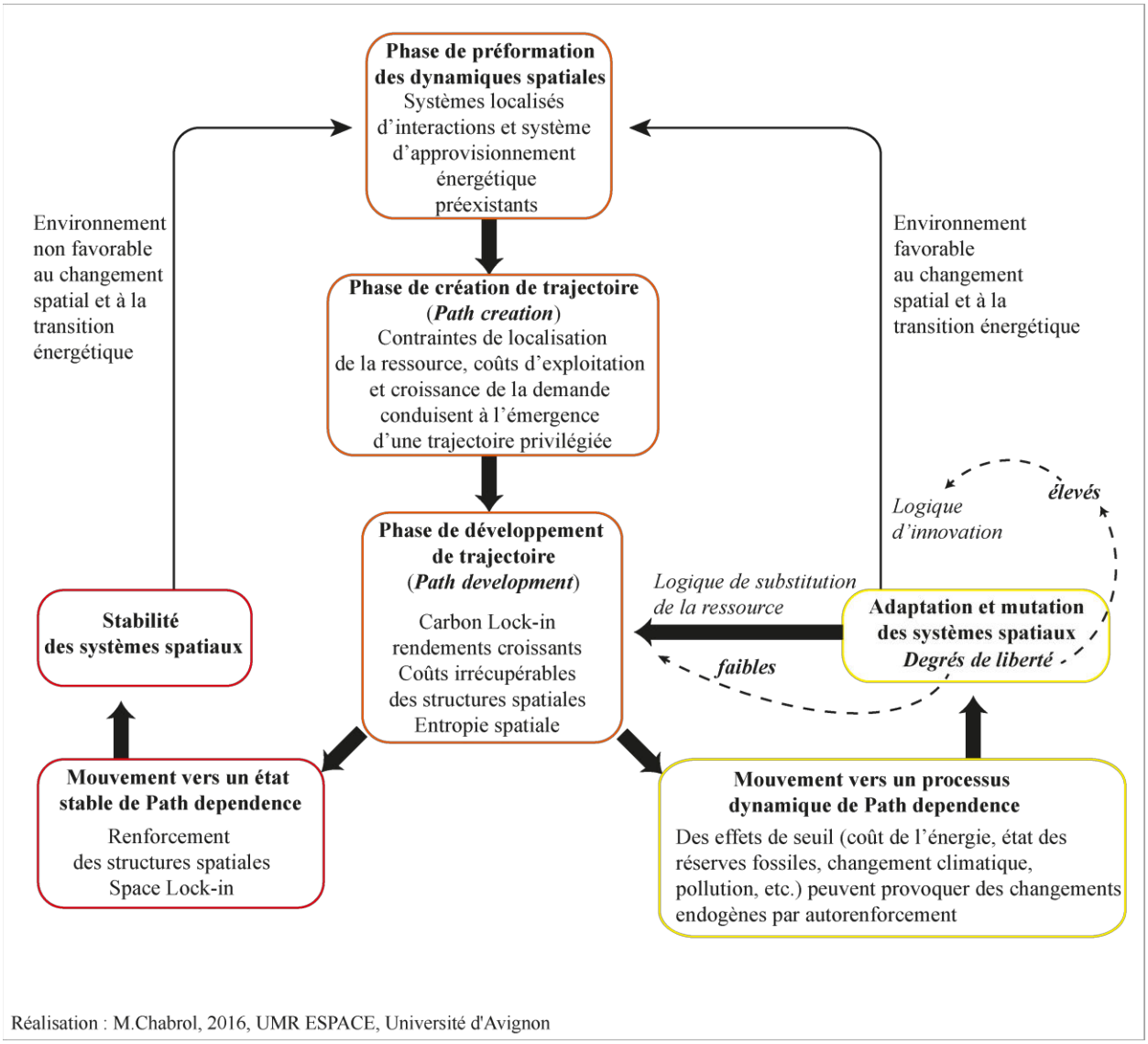


Figure 20. Dimension spatiale de la *Path dependence* dans la transition énergétique

Conclusion de la première partie

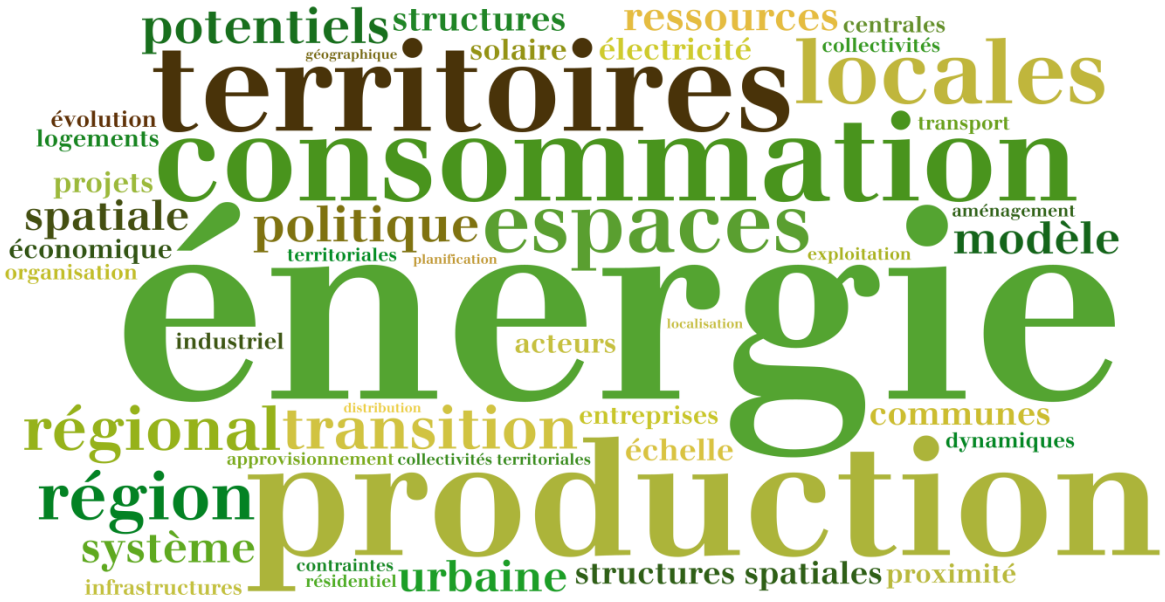
Cette recherche s'inscrit dans une démarche exploratoire et cherche à éclaircir autant la relation entre énergie et territoire que l'implication du fait énergétique dans la structuration et la dynamique d'évolution de l'espace géographique.

La prise en compte de la dimension spatiale dans l'étude de la transition énergétique met ainsi en évidence la relation entre l'organisation spatiale des territoires et leurs dynamiques, c'est-à-dire le rapport entre leurs formes et leur fonctionnement. La mise en œuvre de la transition énergétique se traduit en effet par une volonté affirmée des acteurs d'agir sur l'organisation spatiale des territoires. Qu'il s'agisse de contrôler l'étalement urbain, de modifier les réseaux de transports, d'exploiter de nouveaux gisements de ressources, ou encore de valoriser un habitat durable, une évaluation des niveaux d'adéquation des structures et des configurations spatiales actuelles avec les objectifs de transition fixés apparaît nécessaire. Une meilleure connaissance des configurations spatiales, de leurs dynamiques et des contraintes qu'elles peuvent exercer sur les politiques de mise en œuvre de la transition énergétique semble indispensable pour répondre à ces enjeux.

Comme toutes les activités humaines, la consommation et la production d'énergie contribuent à construire l'espace et à l'organiser. Mais le fonctionnement et l'organisation de l'espace géographique exercent aussi une influence sur ces activités et par conséquent jouent un rôle dans l'évolution vers une économie bas carbone. Les décisions d'aménagement qui ont conduit aux configurations actuelles et les choix dans les ressources et technologies énergétiques, orientent l'évolution de l'inscription spatiale des sociétés dans un processus de *Path dependence*. Ce processus alimenté par une succession de rétroactions positives révèle une propension à la production croissante d'entropie.

La question est donc multiple. Il s'agit autant d'interroger la possibilité d'orienter l'évolution des territoires sur une trajectoire nouvelle en prenant appui sur un nouveau modèle énergétique plus efficace, c'est-à-dire permettant de continuer d'optimiser le fonctionnement des territoires avec moins d'énergie, que d'évaluer les conséquences d'un changement de système énergétique et d'une diminution de la consommation d'énergie sur l'organisation et le fonctionnement de ces derniers.

PARTIE 2
La transition énergétique sous contraintes spatiales et territoriales, entre potentialités de changement et *Path dependence*



Introduction de la deuxième partie : Positionnement et hypothèses de recherche

La prise en compte de la dimension spatiale et territoriale de la *Path dependence* dans l'étude de la transition énergétique permet d'ouvrir sur une analyse critique de ce projet sociétal. La lecture de la transition énergétique comme un processus géographique modifie la façon dont on peut aborder les questions qui la sous-tendent par l'analyse des rapports de position, du poids des structures spatiales existantes, des processus de différenciation spatiale associés à de nouvelles infrastructures énergétiques, de la configuration spatiale de la demande et de la variété d'échelles d'organisation possibles. La dimension spatiale des territoires, les règles d'interactions spatiales et les modèles d'organisation sont aussi des éléments susceptibles de perturber, contraindre ou déterminer les politiques de mise en œuvre de la transition énergétique.

Une première hypothèse consiste donc à dire qu'il est très probable que la transition énergétique n'annonce pas de changement radical dans l'évolution des structures spatiales et territoriales, mais plutôt une optimisation marginale de celles-ci, une optimisation progressive des infrastructures énergétiques (en théorie jusqu'à la substitution des énergies fossiles par les énergies renouvelables), une optimisation des politiques énergétiques, une optimisation marginale de la consommation. Ces optimisations marginales relèveraient donc de mécanismes d'évolution auto-renforçants qui s'inscrivent dans la durée et dans l'espace (Martin, 2010 ; Essletzbichler, 2012). Si elles ne sont pas, selon cette hypothèse, susceptibles de dessiner de nouvelles trajectoires fortes, elles nécessitent cependant pour se produire d'ouvrir des degrés de liberté, c'est-à-dire de déverrouiller des situations actuelles (*unlock*). Ces espaces de déverrouillage possible pourraient en théorie générer des trajectoires de changement plus radicales, mais ils présentent des coûts et des risques tels qu'ils ne paraissent pas pouvoir s'ouvrir en totalité.

C'est pourquoi une seconde hypothèse, ou plutôt une sous-hypothèse à la première, consiste à dire qu'il existe une probabilité que ces situations évoluent soit radicalement si les coûts sont acceptés, soit marginalement si une partie seulement de ces coûts est acceptée.

Trois domaines d'analyse de la dimension spatiale de la transition énergétique comme élément relevant de la *Path dependence* seront abordés : l'influence des structures spatiales et la dépendance au lieu ou *material lock-in*, la territorialisation et le développement durable inégal ou *territorial lock-in*, et le poids des structures socio-spatiales héritées ou *socio-spatial*

lock-in. Il ne s'agit pas de cas exclusifs, mais de trois entrées possibles pour observer la dimension spatiale, socio-spatiale et territoriale de la *Path dependence* dans un contexte de transition énergétique.

Material lock-in, l'influence des structures spatiales et la dépendance au lieu

Les modèles de transition énergétique proposés s'appuient sur un déplacement relatif d'une production qualifiée de centralisée vers une production distribuée (Unruh, 2000 ; Labrousse, 2006). La transition du secteur de la production énergétique vers des mix intégrant les énergies renouvelables peut être associée à des changements dans la nature et la localisation des éléments des systèmes énergétiques, mais la structure spatiale actuelle des systèmes énergétiques exerce une contrainte forte sur l'exploitation de nouvelles ressources. Comme le précise justement Essletzbichler, « *how regions plug into and transform the existing energy system will depend on regional characteristics* » (2012, p. 796).

Les analyses menées dans le chapitre 4 montreront comment la localisation de la production actuelle d'électricité et du réseau existant de transport de l'électricité a un effet d'attraction sur les nouvelles productions d'électricité renouvelable (surtout les centrales PV et les fermes éoliennes on-shore) en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Le fait que les nouvelles productions se développent à proximité du réseau existant et des lieux historiques de production conduit à penser que les productions d'énergies renouvelables relèvent d'un processus de *place dependence* ou dépendance au lieu. La préexistence d'infrastructures de production relevant du modèle centralisé favorise l'implantation de nouveaux sites qui bénéficient alors d'économies d'échelle et de l'apprentissage des entreprises anciennes.

Les structures spatiales existantes convoquent un phénomène de dépendance au lieu qui verrouille les dynamiques ultérieures dans un état stable de *Path dependence*. Il s'agit d'une situation de *Space lock-in* liée à l'ancrage territorial des structures spatiales (*material lock-in).* Dans cette situation, le degré de liberté se situe à l'interface des systèmes d'approvisionnement et de consommation. La transition énergétique implique dans ce cas de réduire cette interface par une fusion de ces deux systèmes spatialement ancrés. Cela suppose la création de nouvelles infrastructures spatiales techniquement réalisables, mais dont le coût matériel peut être très élevé (démantèlement des centrales nucléaires, extension des réseaux, raccordements off-shore, nouvelles technologies…).

Territorial lock-in, la territorialisation et le développement durable inégal

La territorialisation de l'énergie en France a représenté un projet politique et économique majeur de modernisation de la nation (Bouneau, 2006). Ce projet qui a su prendre en compte le dimensionnement de l'infrastructure énergétique nationale, mais aussi la diffusion des technologies émanant des projets politiques s'est réalisé à travers un système de gestion centralisé et hiérarchisé. Cet héritage est aujourd'hui contesté par la transition énergétique qui supposerait de le remettre en cause par une territorialisation moins hiérarchisée et basée sur

l'interaction entre la puissance politique nationale, les entreprises, l'Union européenne et les collectivités territoriales (Chanard, 2011). La territorialisation du système français de l'énergie est dotée d'une très forte inertie liée à l'oligopole historique d'entreprises comme Électricité De France (EDF), Gaz De France (GDF) ou la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), entreprises qui, par ailleurs, se positionnent fortement sur le marché des énergies renouvelables par la création de filiales dédiées, positionnement encouragé par le système des appels d'offres nationaux. Le système énergétique français est également soumis au contexte des politiques de l'Union européenne sur la libéralisation des marchés de l'énergie, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, le développement des énergies renouvelables et la volonté de mettre en place une stratégie énergétique communautaire. En d'autres termes, les systèmes territorialisés de l'énergie dépendent de plus en plus de décisions prises par l'Union européenne et par de grandes entreprises énergétiques. Dans ce contexte, la territorialisation de l'énergie conserve une forte dimension hiérarchique et ne constitue pas en cela une rupture avec un mode de territorialisation de l'énergie qui s'inscrit dans une logique descendante et impose aux collectivités territoriales de décliner dans leur espace d'action la politique énergétique nationale. Le chapitre 5 montrera comment l'analyse de ce processus dans l'espace régional Provence-Alpes-Côte d'Azur révèle des capacités et des opportunités de mise en œuvre locale de la transition énergétique différenciées susceptibles de générer ce qu'on peut qualifier de développement durable inégal.

Les choix passés dans les modes de gestion et de planification énergétique ont rigidifié les modes de territorialisation de l'énergie. Dans cette situation de *territorial lock-in*, la transition énergétique implique une remise en cause d'un modèle territorialisé de l'énergie descendant et hiérarchique. Une refonte de ce modèle invite à une ouverture vers des modèles locaux qui implique la disparition d'un oligopole constitué des grands groupes industriels et de l'État, mais serait aussi susceptible de générer un développement inégal. En cela la transition énergétique peut présenter un coût politique élevé.

Socio-spatial lock-in, le poids des structures socio-spatiales héritées

L'inscription spatiale des sociétés résulte de contraintes spatiales, de choix, de règles, de conflits et de négociations entre différents groupes sociaux. Elle est le résultat systémique d'interactions issues de stratégies individuelles et collectives qui organisent et modifient l'espace dans toute la complexité et la diversité des actes sociaux. Les formes de l'emprise bâtie sont des conséquences durables d'inscriptions spatiales structurées (ordonnées ou désordonnées) des sociétés, appelées aussi structures socio-spatiales. Elles résultent en effet de choix stratégiques individuels, libres ou contraints (localisation de l'habitat, accessibilité des zones d'emploi, etc.), de règles et de stratégies collectives (planification, aménagement, Plan Local d'Urbanisme, etc.) et d'interactions entre différents groupes sociaux (ségrégation socio-spatiale). Les structures socio-spatiales sont dotées d'une forte inertie et contraignent en retour les interactions sociales et spatiales (réseaux de transport, dynamiques foncières, etc.), ainsi que leurs propres potentialités de changement et d'évolution.

Le chapitre 6 analyse comment la transition énergétique convoque une réévaluation de la forme, de la fonction et de la valeur de certaines structures socio-spatiales en particulier celles des espaces urbains et périurbains. L'exemple de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur permet de s'interroger sur la capacité réelle de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme à agir dans le domaine de la maîtrise de la consommation d'énergie, face à des dynamiques territoriales maintenant anciennes et dont le résultat dans l'organisation des territoires est devenu une contrainte.

Sortir de cette situation du *socio-spatial lock-in* peut impliquer des coûts matériels élevés liés à l'urbanisme et à l'aménagement de l'espace. Mais le coût social peut l'être tout autant car reconsidérer les structures socio-spatiales nécessite de reconsidérer les modes de vie et de consommation dont le degré de liberté se situe dans les normes, et donc dans la contrainte.

La figure 21 présente comment les trois dimensions du *Space lock-in* décrites ci-dessus s'imbriquent. Si nous avons choisi d'aborder ces trois éléments l'un après l'autre, leur caractère systémique reste fondamental. Chaque dimension du *Space lock-in* n'intervient pas indépendamment des autres. En conséquence, la mise en œuvre de la transition énergétique nécessite tout autant la prise en considération de ces éléments de blocage et des degrés de liberté qu'ils suggèrent, que d'en assumer pleinement les coûts matériels, sociaux et politiques.

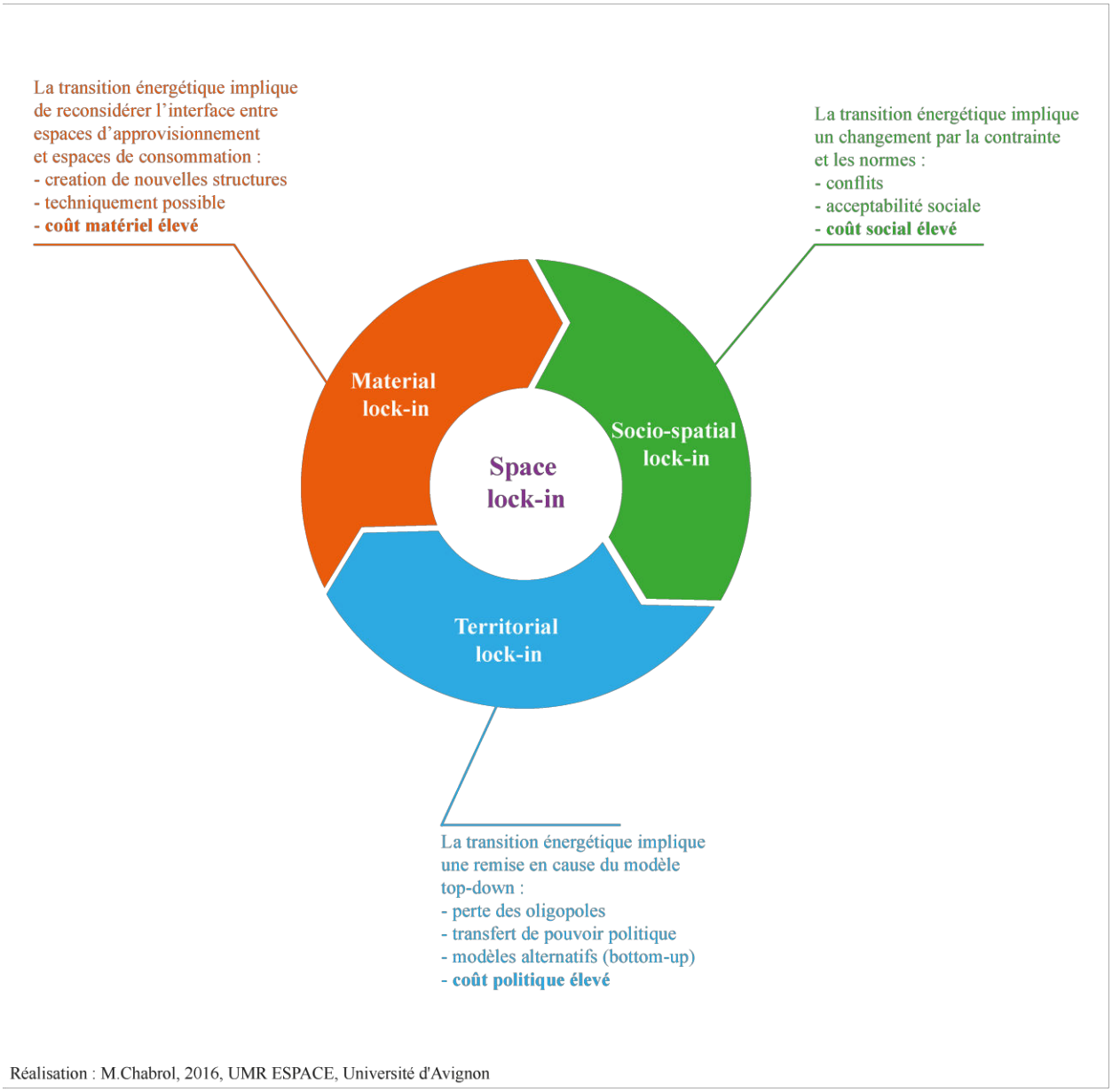
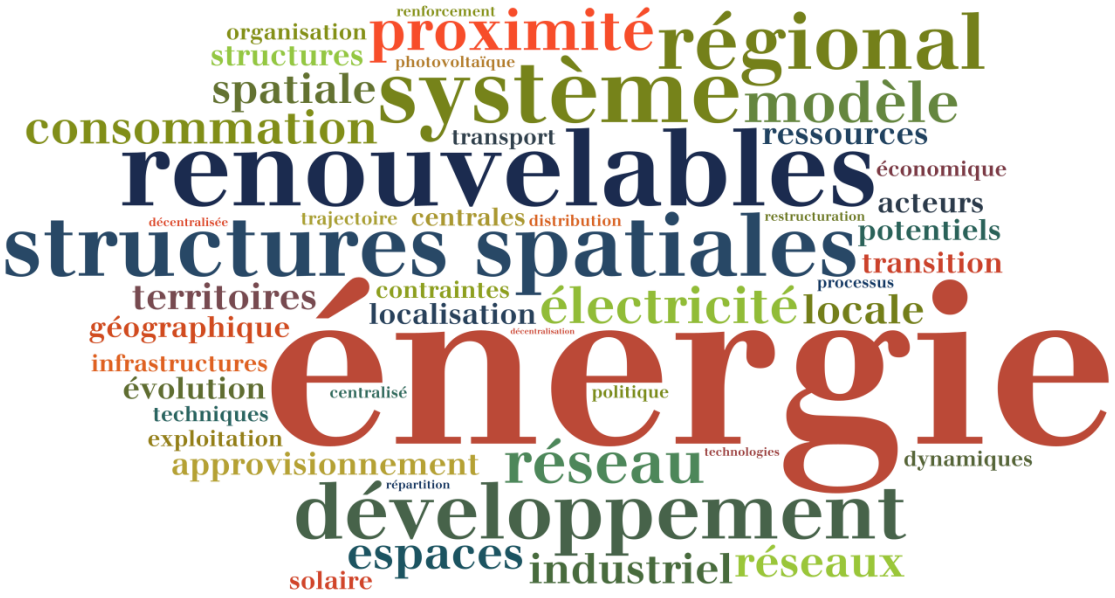


Figure 21. Space lock-in et transition énergétique

Chapitre 4
Material lock-in : l'influence des structures spatiales et la dépendance au lieu



La transition énergétique se traduit en premier lieu par l'exploitation de nouvelles ressources pour la production d'énergie renouvelable. Ces ressources sont omniprésentes mais leur mise en valeur énergétique est située et inscrite dans les structures spatiales des systèmes de production et d'approvisionnement. Ces structures relèvent d'un modèle d'organisation centralisé, hiérarchisé et arborescent, aujourd'hui questionné, voire remis en cause par le développement des énergies renouvelables. Les modèles de transition énergétique proposés s'appuient en effet sur un déplacement relatif d'une production centralisée vers une production distribuée (Unruh, 2000 ; Labrousse, 2006). Des changements dans la nature et la localisation des éléments des systèmes énergétiques peuvent donc résulté d'une transition du secteur de la production énergétique vers des mix intégrant les énergies renouvelables. Mais la structure spatiale actuelle des systèmes énergétiques exerce des contraintes sur l'exploitation des nouvelles ressources ; contraintes qui nécessitent d'être comprises et évaluées. La mise en valeur de nouvelles ressources modifie la répartition géographique de l'offre énergétique dont l'activation peut aussi dépendre des caractéristiques régionales des structures existantes.

Ce quatrième chapitre cherche à montrer, illustrer et évaluer le rôle des structures spatiales actuelles dans l'évolution des systèmes énergétiques en prenant l'exemple de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Une présentation du terrain d'étude et de son profil énergétique illustre des éléments de contexte spécifiques à ce cadre régional et constitue la base d'une analyse spatio-temporelle du développement récent des énergies renouvelables. Cette analyse montre que les productions d'énergies renouvelables relèvent d'un processus de *place dependence* ou dépendance au lieu, et de *path dependence*. L'influence des structures spatiales est donc présentée dans ce chapitre comme un élément de *Space lock-in* qui détermine en partie la localisation de nouveaux sites potentiels de production d'énergie d'origine renouvelable.

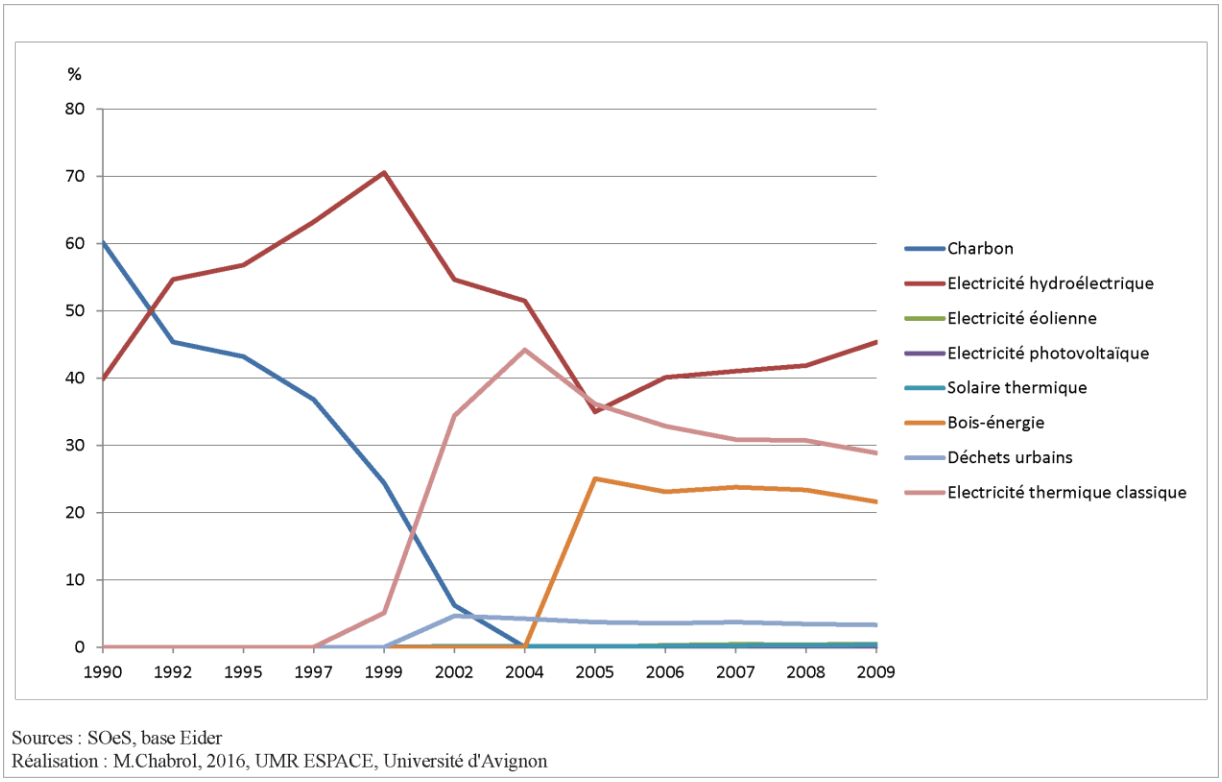
1 L'approvisionnement en énergie en Provence-Alpes-Côte d'Azur : profil énergétique régional et grands principes d'organisation spatiale

1.1 Un territoire largement dépendant des approvisionnements extérieurs

La consommation régionale d'énergie finale en Provence-Alpes-Côte d'Azur s'établit en moyenne depuis 10 ans autour de 13 millions de tonnes équivalents pétrole (MTep), ce qui représente 8,5% de la consommation nationale. Elle s'élevait en 2014 à 12,85 MTep. La région Provence-Alpes-Côte d'Azur témoigne d'un déséquilibre élevé entre production régionale et approvisionnements extrarégionaux. Elle ne produit en effet en moyenne que 10% de sa consommation, soit environ 1,5 million de tonnes équivalent pétrole (MTep).

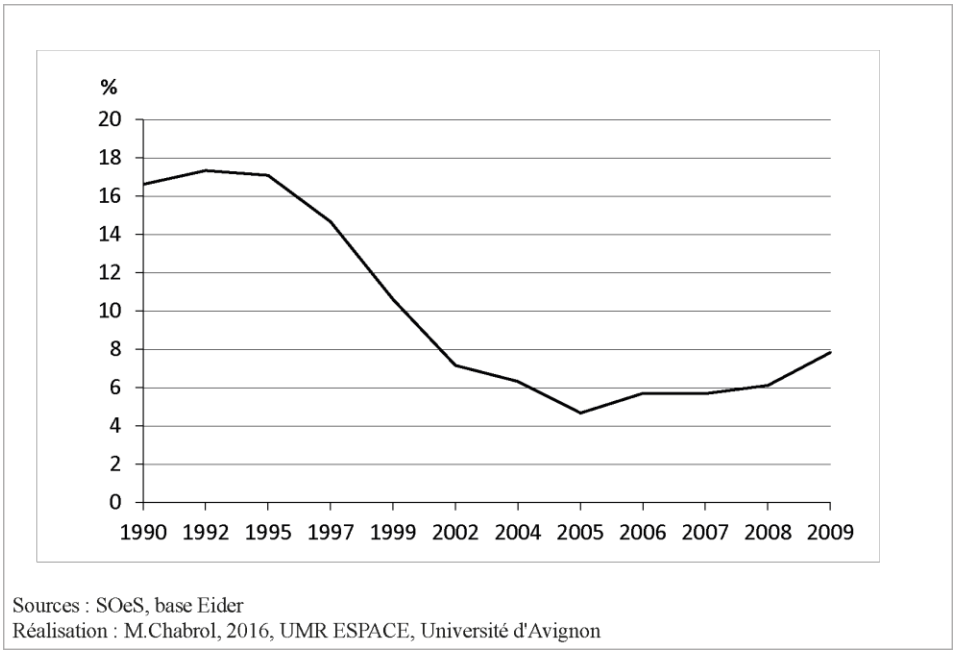
Les sources de production d'énergie primaire en région Provence-Alpes-Côte d'Azur sont assez peu diversifiées puisque les deux principales ressources que sont l'énergie hydraulique et le bois représentaient à elles seules 95% de la production régionale en 2014. L'hydroélectricité demeure la première source de production d'énergie primaire de la région principalement grâce aux grandes installations de la Durance, du Rhône et du Verdon, ce qui donne un poids très important aux énergies renouvelables dans la répartition des différents types de production d'électricité. L'énergie hydraulique représente plus de 98% de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables (ORECA, 2012). Des centrales thermiques à cycle combiné gaz viennent compléter cette production. Il faut toutefois préciser que la part de bois-énergie dans la production d'énergie primaire est amenée à augmenter en raison d'un projet en cours de conversion à la biomasse d'une tranche au charbon de la centrale de Gardanne-Meyreuil (Bouches-du-Rhône) à l'initiative du leader allemand EON (EON, 2011).

L'évolution du mix énergétique dans la production de 1990 à 2009 se caractérise par la variabilité de la part annuelle de l'hydroélectricité en fonction de la pluviométrie, par l'arrêt définitif du charbon en 2004, par une augmentation des énergies issues de la valorisation des déchets grâce à l'ouverture de l'incinérateur de Fos-sur-Mer, et par la mise en service des centrales thermiques à cycle combiné Cycofos et Combigolf au cours des années 2000 (Graphique 14). À partir du début des années 2000, la part des nouvelles énergies renouvelables (solaire photovoltaïque et éolien) s'est accrue. Malgré un dynamisme important, le solaire photovoltaïque et l'éolien ne représentent que 1,5% du mix énergétique en 2010. La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est cependant devenue la première région solaire de France avec environ 300 Mégawatts crête (MWc) de puissance photovoltaïque raccordée et une surface installée de plus de 160 000 m^2 de capteurs solaires thermiques à la fin de l'année 2011. La région PACA reste toutefois très dépendante d'un apport extrarégional. La part de la production d'énergie primaire régionale dans la consommation dépasse timidement les 10% en 2014. Son évolution est clairement liée à l'arrêt du charbon. La production régionale d'énergie couvrait plus de 16% de la consommation finale en 1990 alors que le charbon représentait 60% du mix énergétique régional, pour n'en couvrir que 5% en 2005, un an après l'arrêt définitif du charbon en France (Graphique 15).



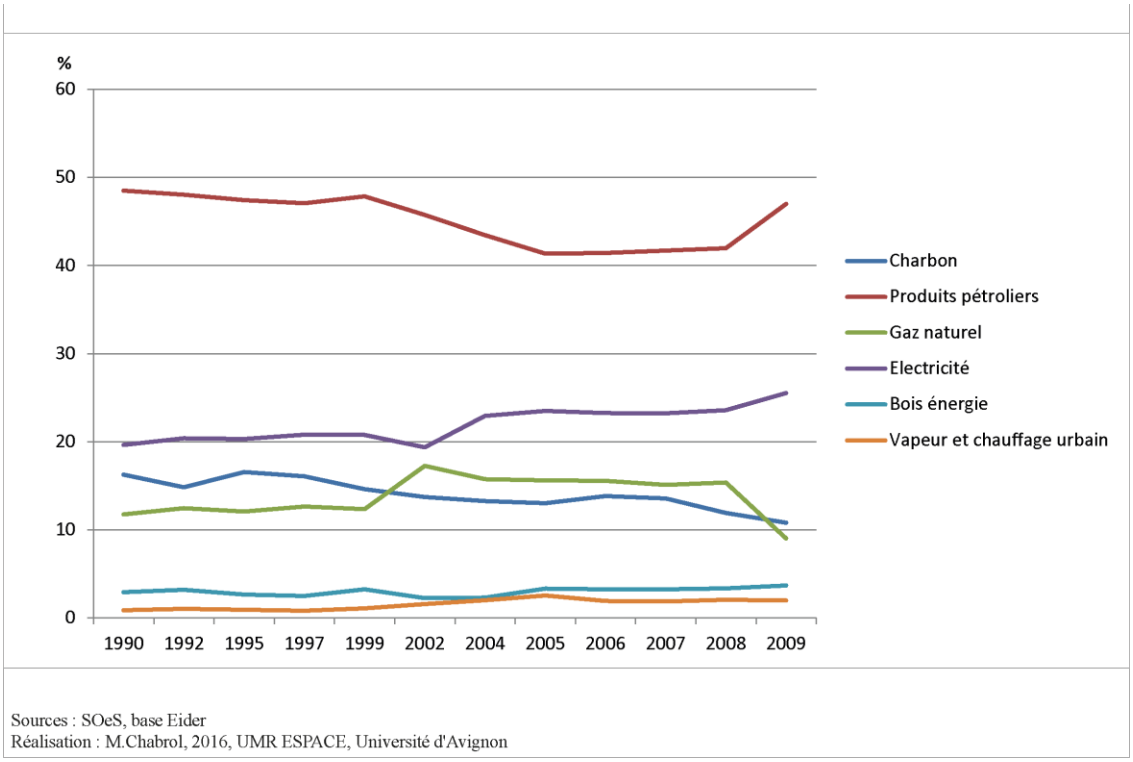
Graphique 14. Evolution du mix énergétique dans la production en région PACA de 1990 à 2009

La part élevée du charbon dans la consommation finale d'énergie différencie la situation de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur de la structure nationale de la consommation. L'activité industrielle dans l'ouest de la région autour de l'étang de Berre se traduit par une consommation du secteur industriel comprise entre 30% et 40% de la consommation régionale (33% en 2014), soit bien au-dessus de ce qu'elle représente à l'échelle nationale (19% en 2014) (Graphiques 16 et 17).

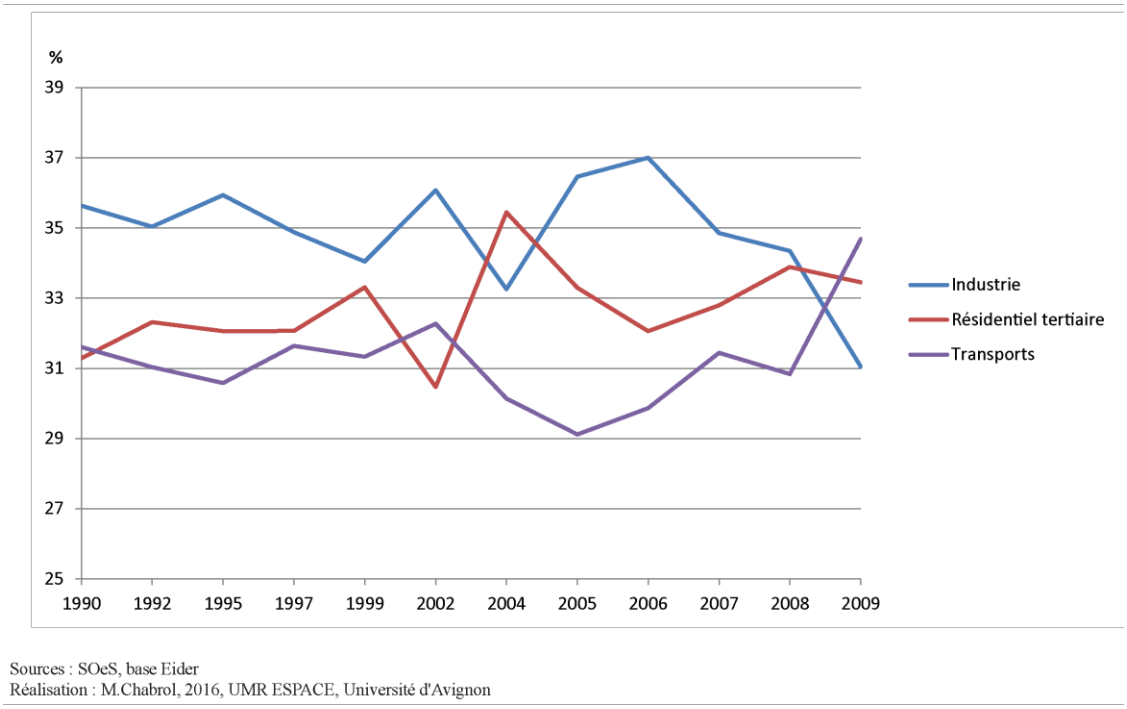


Graphique 15. Evolution de la part de production régionale d'énergie primaire dans la consommation finale de 1990 à 2009 en région PACA

Cela s'explique par la présence d'infrastructures industrielles fortement consommatrices d'énergie (métallurgie, cimenterie, papèterie). La situation stratégique entre le Rhône, l'Espagne et l'Italie, la présence d'un fort réseau autoroutier et du Grand Port Maritime de Marseille contribuent au maintien d'une industrie lourde qui a toutefois tendance à décliner depuis plusieurs années.



Graphique 16. Évolution du mix énergétique dans la consommation en région PACA de 1990 à 2009



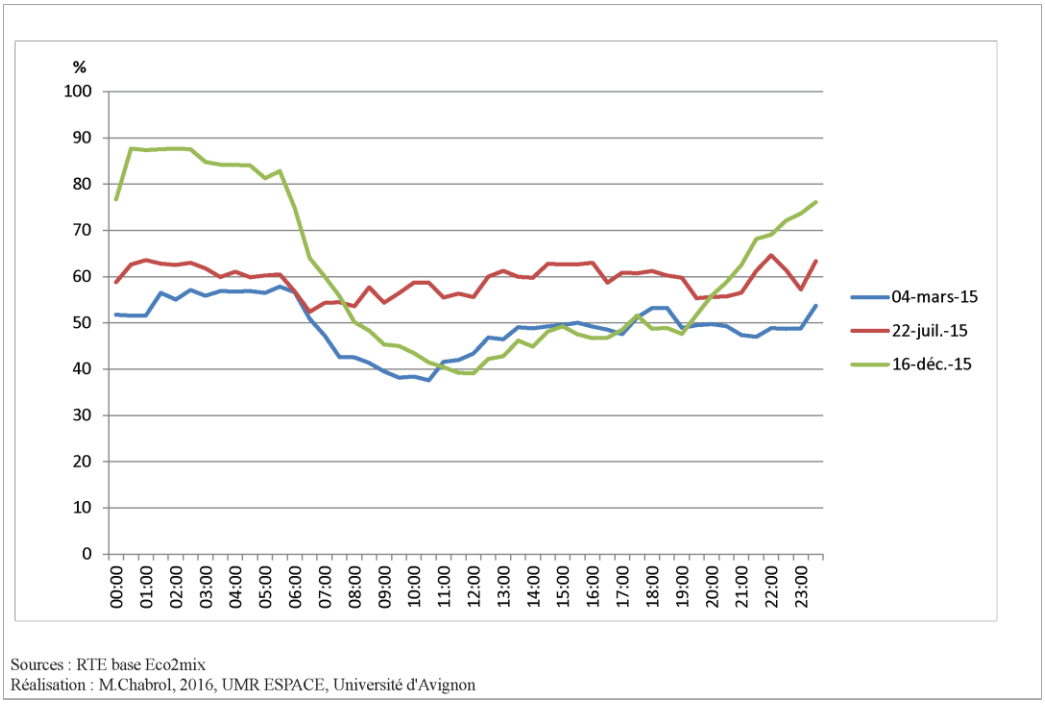
Graphique 17. Évolution de la consommation d'énergie par secteur en région PACA de 1990 à 2009

Présent sur le territoire régional depuis 1974 avec ses 3 000 employés, le site de production sidérurgique de Fos-sur-Mer, aujourd'hui propriété d'Arcelor-Mittal, est un acteur majeur de l'économie en Provence-Alpes-Côte d'Azur, en particulier pour ce qui concerne ses besoins énergétiques. Les installations de ce site industriel consomment près de 2 millions de tonnes équivalents pétrole (MTep) chaque année, soit 15% de la consommation totale de la région. Arcelor-Mittal-Méditerranée, qui produit entre quatre et cinq millions de tonnes d'acier par an, utilise annuellement entre deux et trois millions de tonnes de charbon pour assurer son activité. Ceci étant, une baisse de l'activité industrielle se traduit nécessairement par une baisse de la consommation d'énergie, comme cela s'est produit pendant la crise de 2008 (Graphique 17).

Cette surreprésentation industrielle explique que les secteurs résidentiel et tertiaire pèsent moins dans le panorama régional de la consommation d'énergie en Provence-Alpes-Côte d'Azur qu'au niveau national. Les consommations liées à l'habitat et aux activités tertiaires représentent un peu plus du tiers de la facture énergétique régionale en 2014 (45% au niveau national). Les secteurs de l'habitat et du tertiaire se caractérisent par une prédominance du chauffage dans la consommation (75%) et une surreprésentation de l'équipement en chauffage électrique par rapport au reste de la France, ce qui accentue la situation d'insécurité électrique, notamment pour les départements du Var et des Alpes-Maritimes (ORECA, 2012). La structure du réseau de distribution d'électricité en Provence-Alpes-Côte d'Azur est en effet liée aux grandes disparités régionales évoquées. Le littoral est très consommateur, globalement déficitaire dans sa moitié ouest, et présente une fragilité structurelle significative dans sa moitié est et son arrière-pays. C'est ce qu'on appelle l'insécurité électrique de l'est de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, fragilité qui place cet espace parmi les plus à risque de France, à l'instar d'une grande partie de la Bretagne. La totalité du littoral dépend en effet pour son approvisionnement en électricité, d'une unique ligne à haute tension partant de Tavel (à proximité d'Avignon) et desservant les grandes métropoles de Marseille, Toulon et Nice. En cas d'incident majeur (incendie, orage, surconsommation…), tout le littoral régional subit un risque de coupure généralisée (Dutozia, 2013). Le Var et les Alpes-Maritimes sont les départements les plus exposés, ce qui explique la mise en place d'actions regroupées dans un contrat d'objectifs signé par différents acteurs (dont RTE, EDF, Départements, Région) visant à maîtriser la consommation électrique pour réduire le risque de coupure. En parallèle, Réseau de transport d'électricité (RTE) a lancé de nombreux chantiers de renforcement du réseau afin de permettre une plus grande sécurité face à une demande toujours croissante.

En Provence-Alpes-Côte d'Azur, l'approvisionnement électrique extrarégional dépasse 50% de la consommation régionale. Le bilan est donc déficitaire. Un quart de l'alimentation propre à la région est assuré par l'hydroélectricité. Puis vient le cycle combiné gaz (10%), qui a fait un bond récent grâce à l'ouverture de deux centrales distinctes pour une puissance installée totale de 900 Mégawatts (MW). Le charbon reste assez présent, avec plus de 4% de l'alimentation électrique régionale, à travers son utilisation sur le site de la Centrale de Provence à Meyreuil, dans les Bouches-du-Rhône. Il est toutefois important de préciser que, bien qu'aucune centrale nucléaire ne soit active sur le territoire régional, les centrales localisées en

périphérie immédiate, et notamment en Rhône-Alpes (dont celle de Tricastin) entrent pour une part non négligeable dans les 53% d'apport national. Selon la structure saisonnière de la demande et les pointes quotidiennes d'appel sur le réseau, la part d'apport extrarégional peut varier de 35% à près de 90% (Graphique 18).

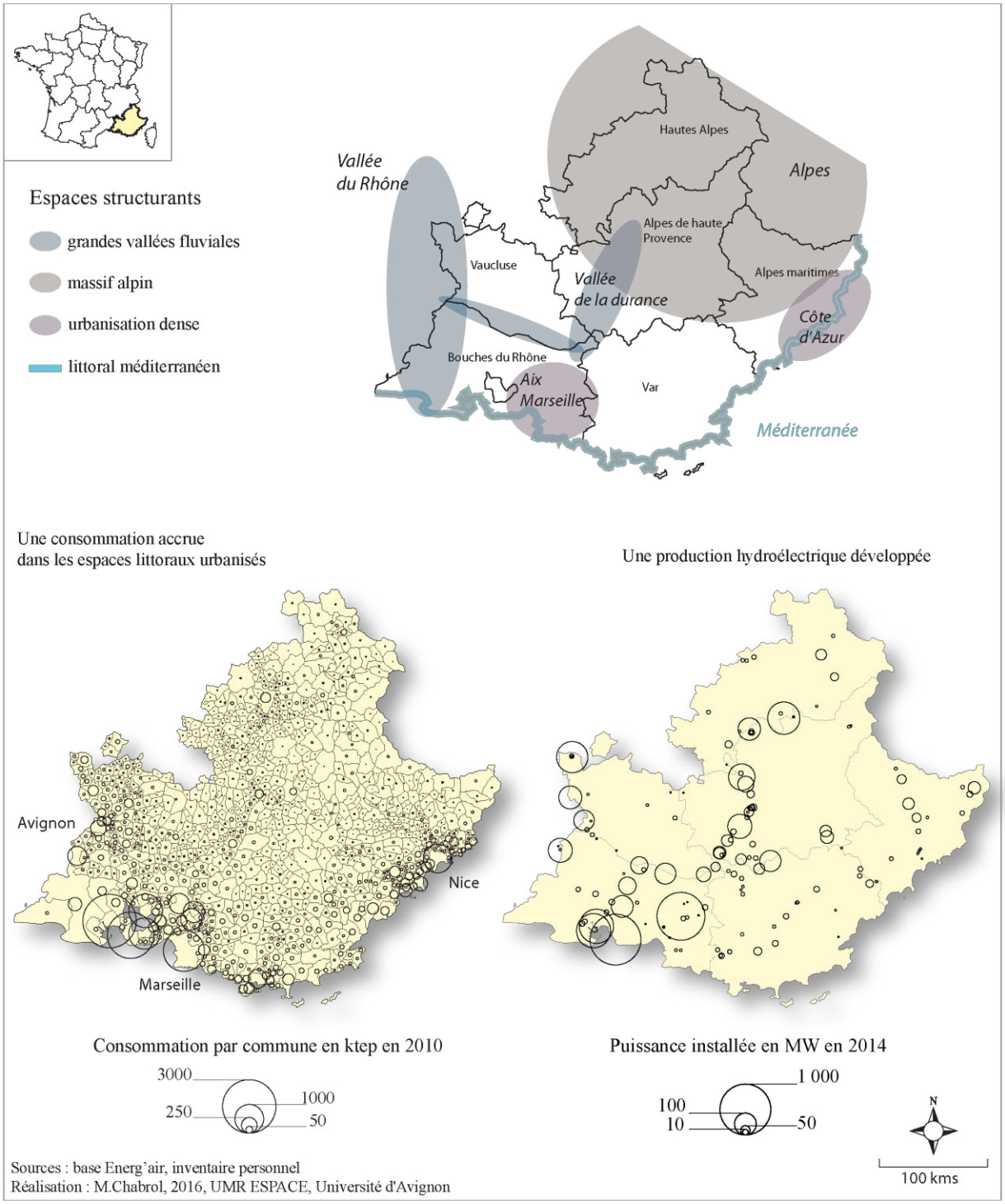


Graphique 18. Part d'approvisionnement extrarégional dans le réseau électrique en PACA au cours de trois journées types en 2015

1.2 Organisation spatiale du système d'approvisionnement énergétique en région PACA

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est un territoire contrasté, entre grands sommets alpins, côte littorale, plaines et vallées fluviales. Cette diversité a favorisé une hétérogénéité spatiale du peuplement, concentré majoritairement près du littoral et le long de la basse vallée du Rhône, mais aussi, une répartition des ressources énergétiques qui s'inscrit dans cette géographie spécifique. Ces caractéristiques ont introduit des déséquilibres à l'origine de problématiques énergétiques particulières, autant dans la production, que dans l'approvisionnement ou dans la consommation (Carte 3).

Les espaces urbanisés du littoral méditerranéen et de la basse vallée du Rhône concentrent des consommations énergétiques élevées et le potentiel hydroélectrique des grandes vallées fluviales a été exploité de longue date.



Carte 3. Répartition spatiale de la consommation d'énergie en 2010 et des puissances électriques installées supérieures à 1 MW en région PACA en 2014

La production d'énergie en région Provence-Alpes-Côte d'Azur s'inscrit dans les grandes structures spatiales du territoire régional. La répartition des sites de production est déterminée autant par les grandes contraintes physiques que par la localisation des grands centres de consommation.

La figure 22 modélise l'organisation spatiale du système d'approvisionnement énergétique de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Elle ne présente pas en cela l'ensemble des éléments constitutifs de ce territoire, mais s'attache à révéler les éléments le structurant du point de vue de l'énergie.

La combinaison des structures élémentaires simples que sont le gradient et l'interface (Brunet, 1986) détermine en grande partie les possibilités d'exploitation des ressources. Le gradient altitudinal alpin et le réseau hydrographique ont été favorables au développement d'une production hydroélectrique maintenant ancienne. Les cartes des vents et de l'ensoleillement suivent un gradient similaire et sont propices au développement des filières solaire et éolienne.

Les effets d'interface, de couloir et de barrière (interface maritime, couloir rhodanien et barrière alpine) induisent l'organisation d'un réseau urbain excentré vers l'ouest et les façades maritimes marseillaise et azuréennes, et introduisent de fortes dissymétries.

La répartition spatiale de la demande énergétique suit par conséquent cette organisation et présente un gradient décroissant de l'avant vers l'arrière-pays. Les interfaces et les couloirs connectent aussi les sites de production aux espaces de consommation. Le bassin industriel de Fos/Mer au Sud est un pivot des approvisionnements en énergies fossiles du pays, alors que le complexe nucléaire du Tricastin au Nord, situé dans la région voisine de Rhône-Alpes-Auvergne, assure plus de 50% en moyenne des approvisionnements en électricité de la région. Le réseau urbain décentré et la localisation de ces deux points majeurs d'approvisionnement ont orienté également dans ce sens le réseau de transport de l'électricité et illustrent la forte dépendance de Provence-Alpes-Côte d'Azur aux approvisionnements extrarégionaux (Figure 22).

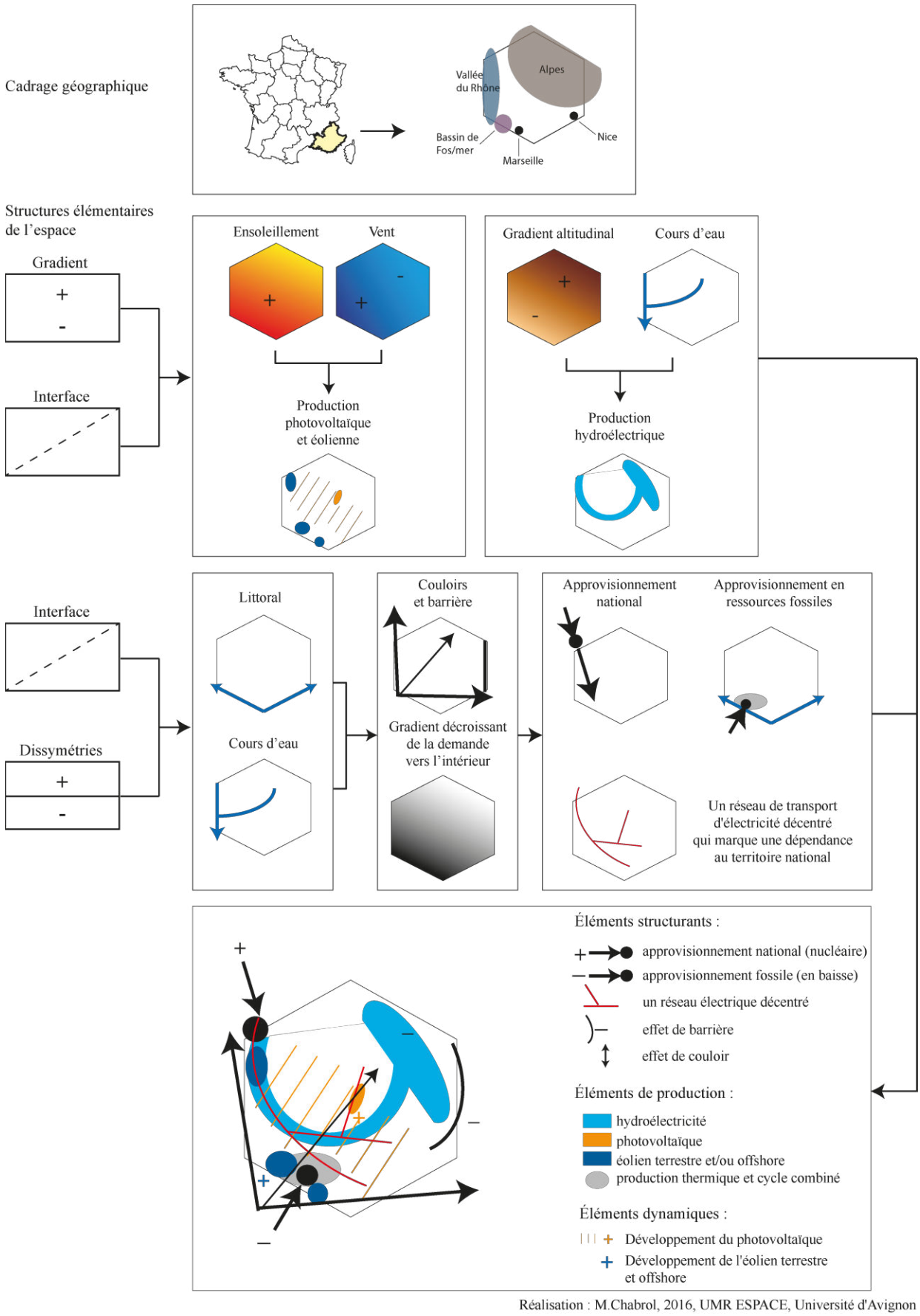


Figure 22. Éléments structurants et modèle d'organisation spatiale du système d'approvisionnement énergétique de la région PACA

Répondre à l'augmentation des besoins électriques devient un enjeu majeur en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, auquel il est possible de répondre par une sécurisation du système d'approvisionnement extrarégional et l'augmentation de la production énergétique régionale. Des projets et des dynamiques en cours traitent de ces enjeux. Ils sont présentés dans la figure 23 et sont à même de modifier à l'avenir le modèle d'organisation décrit précédemment. La sécurisation du réseau électrique haute tension répond à la vulnérabilité de l'est de la région dans les approvisionnements électriques. Le développement de la filière renouvelable s'inscrit dans une démarche de valorisation des potentiels énergétiques solaires et éoliens. La conversion à la biomasse de la centrale de Gardanne-Meyreuil répond au double enjeu de la production d'énergie d'origine renouvelable et de la sécurisation des approvisionnements (Figure 23).

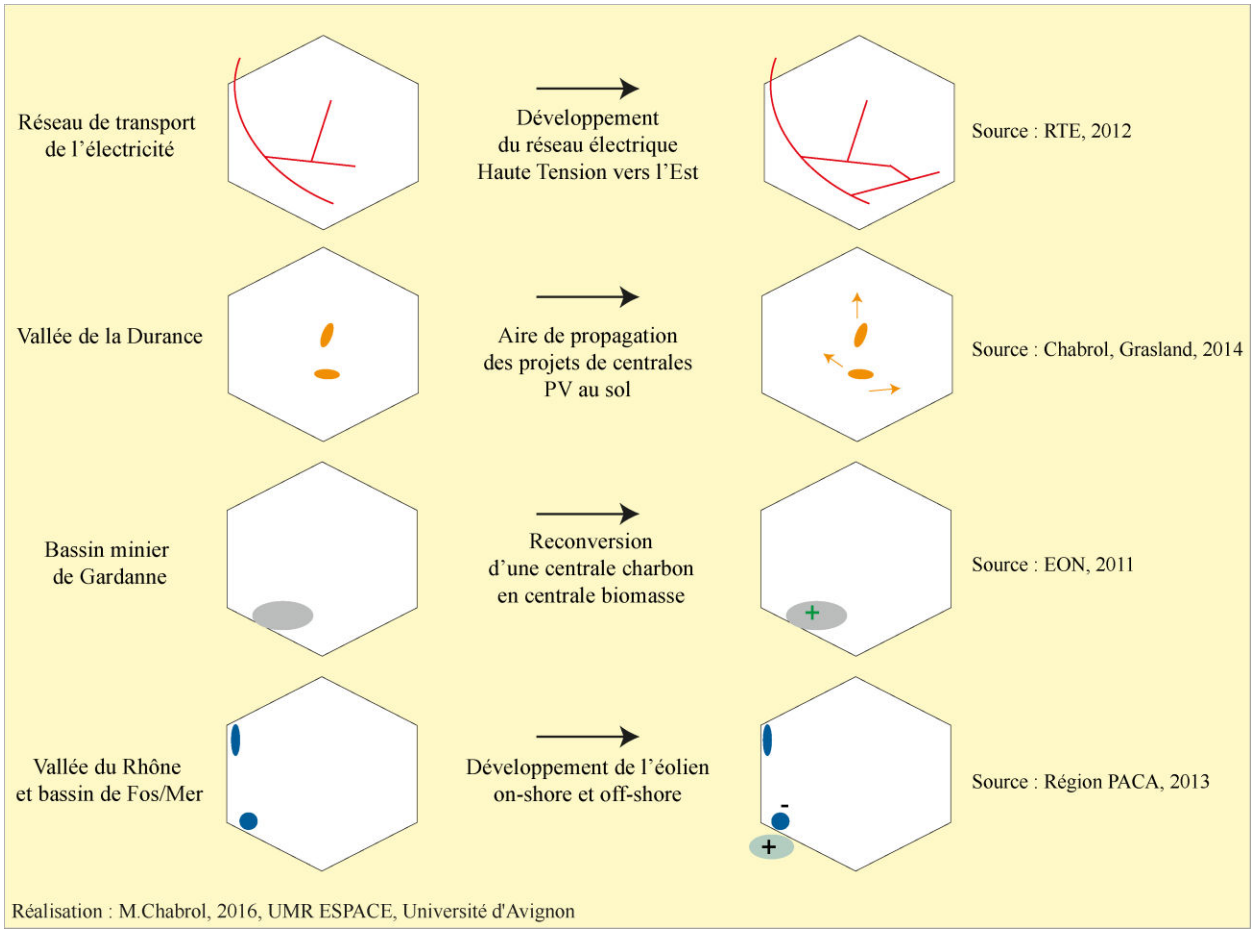


Figure 23. Dynamiques récentes du système d'approvisionnement énergétique de la région PACA

Ces dynamiques s'inscrivent dans les structures en place et renforcent une organisation que l'on peut qualifier de centre-périphérie. La figure 24 décrit quatre espaces de production structurant le territoire régional.

L'espace alpin se caractérise par la présence d'une production hydroélectrique maintenant ancienne. Le nord-ouest de la région compte des productions multi-sources (hydroélectricité, solaire et éolien) polarisées et concentrées autour du site nucléaire du Tricastin. Le centre de recherche de Cadarache (fusion nucléaire-projet ITER) est le pôle d'un espace de production caractérisée par l'hydroélectricité de la vallée de la Durance et une production de solaire photovoltaïque au sol en expansion. Le bassin industriel de Fos/Mer polarise enfin la production éolienne d'une part, et les centrales au gaz d'autre part. C'est également un espace tourné vers les énergies marines (éolien off-shore, géothermie marine) (Figure 24).

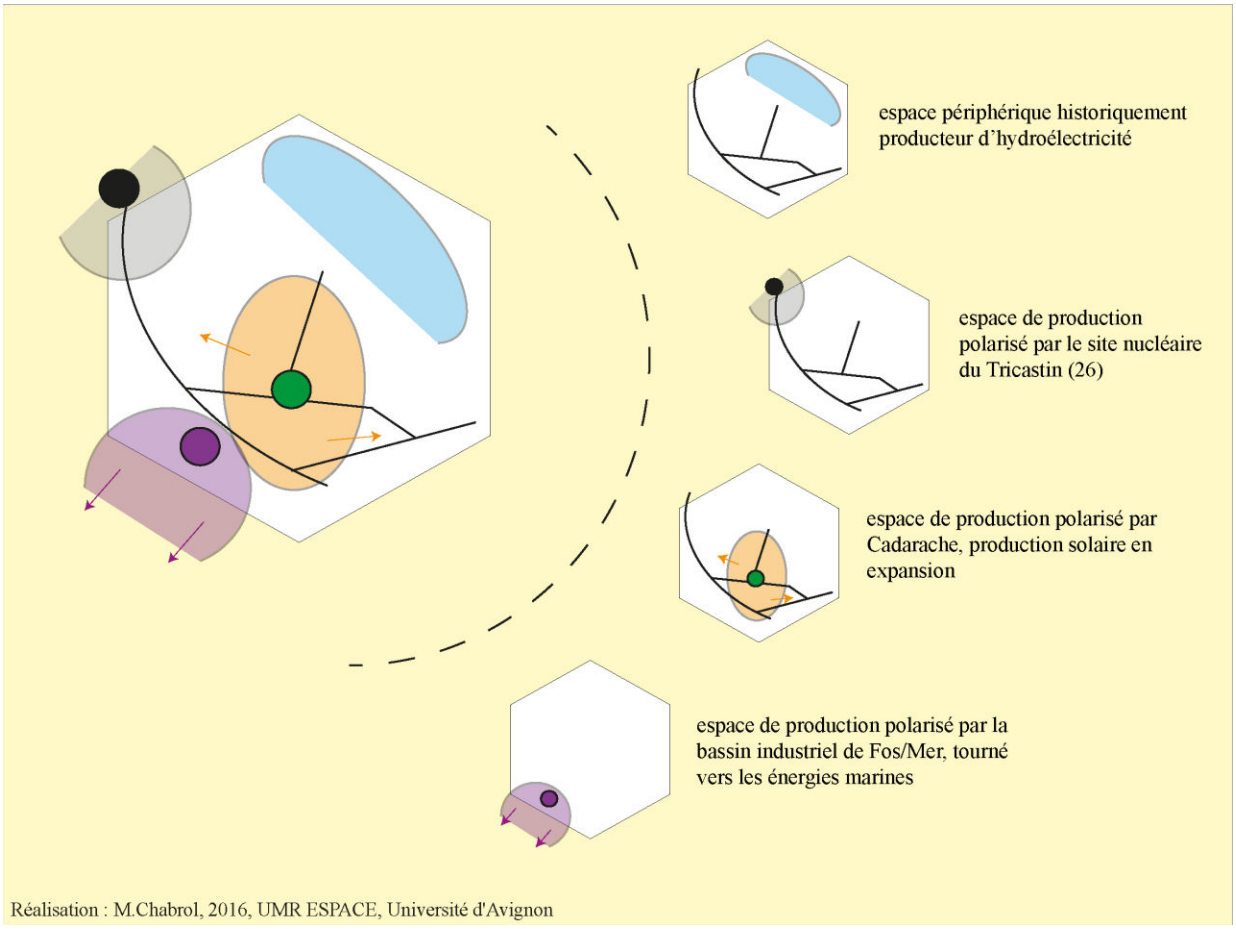


Figure 24. Centres et périphéries dans le système d'approvisionnement énergétique de la région PACA

Les grands principes d'organisation spatiale du système d'approvisionnement en énergie de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur constituent les conditions initiales à partir desquelles la transition énergétique devrait s'établir. Il s'agit dès lors d'identifier dans quelles mesures ces structures peuvent ou non évoluer dans cette perspective.

2 *Place dependence* et *Path dependence* dans le développement des énergies renouvelables

L'organisation spatiale actuelle de la production d'énergie garantit un approvisionnement abondant, fiable et à moindre coût pour les sociétés et leur économie. Les changements actuels dans la structure de l'économie mondiale et des économies nationales, particulièrement en Europe, et les volontés de tendre vers une économie bas carbone remettent théoriquement en question une partie de ces logiques de localisation. Les modèles énergétiques proposés en réponse à ces évolutions s'appuient en effet sur le déplacement relatif d'une production qualifiée de centralisée vers une production distribuée et décentralisée, termes qui suggèrent un rapprochement au local et à la proximité géographique. Ce nouveau *paradigme énergétique* (Criqui, 2009) implique de questionner, voire de remettre en cause les configurations spatiales actuelles de l'activité énergétique. Le développement des énergies renouvelables (EnR) supposerait une modification des logiques de localisation de la production énergétique. L'essence même de l'efficacité économique dans le domaine énergétique voudrait en effet que l'économie porte aussi sur le transport et la distribution d'énergie par un rapprochement géographique des lieux de production et des lieux de consommation. Les énergies renouvelables devraient modifier la répartition géographique de l'offre énergétique et interrogent sur de nouveaux modes de production, de transport et de distribution de l'énergie dans une logique de proximité spatiale.

Cette partie propose d'observer et d'analyser le processus récent de localisation de la production d'électricité renouvelable en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. L'objet central est de questionner l'existence ou non d'un nouveau paradigme énergétique lié au déploiement des énergies renouvelables et de se demander jusqu'à quel point émerge un modèle de proximité et dans quelle(s) mesure(s) il remettrait ou non en cause le modèle centralisé et les structures spatiales actuelles de l'activité énergétique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Pour cela une analyse spatio-temporelle du système régional de production d'électricité permet d'évaluer comment les infrastructures anciennes de production et de transport de l'électricité exercent une contrainte sur l'exploitation de nouvelles ressources. L'observation de ces dynamiques spatio-temporelles interroge ensuite sur les stratégies des opérateurs énergétiques dans la localisation de cette activité nouvelle de production d'énergie. La proximité d'opérateurs énergétiques historiques, d'un centre de recherche et d'un pôle de compétitivité semble avoir stimulé l'émergence de nouveaux acteurs de l'énergie cherchant à se positionner sur un marché régional des énergies renouvelables, questionnant en cela le rôle d'une proximité « géographique et/ou organisée » (Torre, 2004) dans le développement régional des énergies renouvelables.

2.1 Le modèle du réseau centralisé en débat

Si dans les sociétés industrielles et post-industrielles, l'évolution des mix énergétiques était impulsée par des facteurs économiques, celle qui s'amorce aujourd'hui est de nature différente. C'est une évolution qui émane de choix politiques et de volontés institutionnelles en assignant aux systèmes énergétiques l'objectif de contribuer au développement d'une économie bas-carbone (MEDDE, 2015). De ce point de vue, leur transformation paraît nécessaire pour répondre aux enjeux d'une *décarbonisation* de l'économie, jusqu'alors basée sur l'utilisation des ressources fossiles, afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre, le secteur énergétique étant responsable de 26% des émissions au niveau mondial (World Bank, 2012) (Cf. chapitre 2, 1.2.2).

Bien qu'émergente, cette évolution impacte depuis quelques années le secteur de l'électricité et les modèles d'organisation des activités des principaux groupes énergéticiens (Defeuilley, 2014). Ces groupes adaptent leurs stratégies et modifient le paysage concurrentiel du secteur de l'énergie. Le développement des énergies renouvelables implique en effet des mutations dans le secteur de l'électricité. Le stockage de l'électricité, le raccordement au réseau de productions intermittentes, la libéralisation du marché, mais aussi la dépendance croissante des pays développés à l'électricité pour le développement d'une économie de services et du numérique, sont autant d'enjeux majeurs pour ce secteur industriel.

Le développement des énergies renouvelables questionne autant l'organisation réticulaire du réseau électrique actuel que le fonctionnement du secteur de l'électricité. Le caractère intermittent de la production d'électricité issue des énergies renouvelables (surtout l'éolien et le solaire) se traduit par une asynchronie entre offre et demande. Ceci peut entraîner des difficultés de régulation de la production des centrales thermiques (délais de mise en route). De plus, certaines centrales peuvent voir basculer leur rôle de production de masse vers une production de pointe et poser des problèmes de rentabilité. Le raccordement des productions décentralisées d'électricité d'origine renouvelable constitue par ailleurs un enjeu technique et une contrainte forte pour la mise en valeur des ressources locales même si cette problématique ne constitue pas un défi hors normes (RTE, 2012) (Cf. chapitre 2, 2.2.2). De plus, la législation actuelle donne une priorité à l'électricité renouvelable sur le réseau (Sablière, 2014). Ces productions nouvelles sont donc intégrées aux flux d'électricité. Deux systèmes coexistent et nécessitent d'être bien articulés. Mais cette conception présente des limites. Le dimensionnement des infrastructures de transport de l'électricité dépend de la pointe maximale de la demande. Cela signifie que les infrastructures actuelles doivent être redimensionnées en fonction de l'évolution de la demande et des nouvelles quantités à produire.

Dans ce contexte, de nouvelles façons de produire, de transformer et de transporter l'énergie sont questionnées, et une large gamme de modèles peut être envisagée. L'électricité peut être réalisée par exemple autant par de grandes infrastructures (nucléaire, éolien off-shore ou solaire à échelle « industrielle ») et transportée sur de longues distances par de vastes réseaux interconnectés que par des « mini-réseaux » régionaux ou locaux, ou encore par l'intermédiaire

de systèmes très décentralisés (micro-production, autonomie et boucle locale). De même, la gestion des technologies renouvelables repose aussi sur des bases divergentes quant à leurs modalités de développement et de gestion par les acteurs (collectivités territoriales, entreprises multinationales, microentreprises, coopératives, citoyens…). Des systèmes alternatifs aux grands réseaux apparaissent et se multiplient aujourd'hui (Souami, 2009 ; Lopez, Bouton, 2015). Ils questionnent l'efficacité réelle du modèle du réseau technique centralisé comme étant « *la forme la plus performante de fourniture des services urbains, aux plans économiques, socio-spatial et environnemental ; la performance du réseau croît avec sa taille […] ; et la solution aux problèmes créés par les réseaux réside dans les réseaux eux-mêmes, dans leur extension plus grande, leur gestion plus centralisée, leur sophistication technique accrue* » (Coutard, 2010). La compatibilité des grands réseaux avec un fonctionnement plus durable est mise en doute et mise en opposition avec un modèle écosystémique qualifié de durable (Tableau 7).

Réseau	Écosystème urbain
Solidarité, solidarisation	Autonomie, autonomisation
Ingénierie, mécanique, systèmes techniques, cybernétique	Écologie, systèmes organiques, écosystèmes
Étanchéité, écoulement, flux, cinétique, modèles de flux	Porosité, stase, stock, lenteur, modèles de stocks
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	Cycle court
Logique d'offre et de satisfaction de la demande	Logique de maîtrise de la demande
Modèle technico-économique d'expansion de grands systèmes : économies d'échelle, d'envergure, de variété ; effets de club ; moindres coûts de transaction	Modèle écologique de conservation ou de préservation des ressources et des milieux
Consommation non bornée ; croissance continue de l'urbanisation, de la richesse matérielle, de l'usage des services urbains	Consommation modérée, sobriété ; dissociation entre croissance et développement, décroissance
Irréversibilité, inflexibilité	Réversibilité, adaptabilité

Sources : Coutard, Rutherford, 2009 ; Coutard, 2010

Tableau 7. Réseau et écosystème urbain

Coutard et Rutherford (2009, 2011) ont montré à plusieurs reprises comment ces modèles émergents n'annoncent pas nécessairement la fin des grands réseaux, mais plutôt « *la fin du dogme selon lequel leur extension serait toujours avantageuse et performante* » (Coutard, 2010, p. 192). En effet, les réseaux techniques ne sont pas neutres d'un point de vue politique et économique. Bulkeley *et al*. (2014) considèrent les infrastructures énergétiques

comme l'expression spatiale des idéologies politico-économiques et industrielles. Le choix des types et des localisations d'infrastructures énergétiques peut produire (ou reproduire) selon Bouzarovski *et al*. (2012) un développement économique inégal à l'échelle régionale. La production et la distribution d'énergie sont des outils de contrôle de l'espace et de contrôle social. Nous ajoutons que les infrastructures et les réseaux énergétiques sont des outils de territorialisation de l'espace : le déploiement de réseaux façonne et organise les territoires. La façon dont le pouvoir économique et politique se manifeste dans l'espace résulte de stratégies de partage, d'intégration économique et/ou de gestion de l'espace par les acteurs (État, collectivités, entreprises) dans l'exercice de l'autorité politique ou commerciale et industrielle (Brenner, 1999). Les systèmes énergétiques déterminent en partie la nature de l'organisation et de la répartition des activités économiques et des échanges, et la façon d'exercer le pouvoir politique. Aussi, même si en France le développement des productions locales d'énergie éolienne ou solaire est une réalité, les dispositifs règlementaires qui l'accompagnent ont permis à EDF (Electricité De France) et à RTE (Réseau de Transport de l'Électricité) de préserver leur position dominante dans le réseau (Petitet, 2011).

L'analyse proposée dans cette partie s'inscrit dans la continuité de ce débat en cherchant à déterminer si le développement des énergies renouvelables en région Provence-Alpes-Côte d'Azur remet ou non en cause le modèle dominant du réseau centralisé.

2.1.1 Système énergétique décentralisé et autonomie énergétique, des notions à relativiser

Le déploiement des énergies renouvelables dans les territoires suffit généralement à affirmer que les systèmes énergétiques se décentralisent (Laponche 2002 ; Labrousse 2006). Les systèmes énergétiques se décentraliseraient ainsi par l'intégration des énergies renouvelables. L'organisation actuelle de ces systèmes est en effet qualifiée de centralisée car « *les flux d'énergie sont dirigés du centre, les centrales de production, vers la périphérie, le client. Cette architecture résulte d'une évolution historique marquée par l'éloignement progressif des lieux de production et de transformation de l'énergie des espaces de consommation, allant jusqu'à la mondialisation des grandes filières énergétiques. Aujourd'hui, le progrès des technologies au niveau de la consommation comme de la transformation et de la production d'énergie permet de décentraliser les systèmes énergétiques et de favoriser l'éclosion d'une énergie « répartie », ce dans de bonnes conditions économiques* » (Laponche, 2002). Une décentralisation est donc caractérisée par la possibilité d'un point du réseau à être à la fois producteur et consommateur. Ce rapprochement de la production vers la consommation serait donc un processus primordial dans la transition.

Cette nouvelle conception des systèmes énergétiques modifie la répartition géographique de l'offre énergétique et conduit à envisager de nouveaux modes de production, de transport et de distribution de l'énergie. La production décentralisée, notamment d'électricité, est un élément essentiel, mais n'est pas la seule caractéristique d'un système énergétique décentralisé. Le volet organisationnel des acteurs de la production, de la distribution et du transport, distributeurs d'énergie, gestionnaires de réseau, investisseurs et pouvoirs publics compte tout autant. Or l'architecture organisationnelle des systèmes énergétiques en France demeure centralisée.

Une décentralisation complète des systèmes énergétiques n'est possible que si une politique de l'énergie adaptée favorise et accompagne son développement. Sans systèmes de gestion locale, la décentralisation des systèmes énergétiques reste limitée à une déconcentration de la production d'énergie. En effet, la conception d'un réseau totalement décentralisé voudrait que tout point du territoire soit potentiellement un lieu de consommation et de production d'énergie et que les fonctions de production et de consommation soient gérées localement. Cela se traduirait par la mise en réseau locale de tous ces points pour en optimiser les potentiels énergétiques. Une multiplicité de lieux produit et consomme en fonction de besoins et de cycles sans qu'aucun d'entre eux n'ait de poids hégémonique sur les autres (Souami, 2009), ce qui renvoie à une conception « post-networked » de la ville (Coutard, 2010 ; Coutard, Rutherford, 2011). Dans ce cas, la décentralisation serait complète car toutes les entités susceptibles de produire et de consommer sont concernées. Cette vision encourage certains territoires à viser l'autonomie énergétique comme dans le cas des territoires à énergie positive (TEPos). Or ce modèle reste encore théorique et peu opératoire en France car, d'une part, les potentiels mobilisables en énergie renouvelable ne sont pas toujours en mesure de couvrir l'ensemble des besoins locaux notamment en raison de l'intermittence des EnR et, d'autre part, toute production d'électricité est envoyée sur le réseau et ne peut donc pas être considérée comme une production consommée localement, excepté dans le cas de réseaux non interconnectés, cas extrêmement marginal en France.

Par ailleurs, les réseaux énergétiques se structurent autour de lieux importants de production (centrales nucléaires, barrages) et d'axes majeurs (lignes haute tension, gazoducs…). La quête d'autonomie est aussi en contradiction avec l'idée de solidarité énergétique des territoires qui prévaut et garantit un accès à l'énergie pour tous. Une autonomie locale ne peut s'envisager que dans des espaces à la marge pour lesquels la demande reste très faible ou dans des espaces de taille limitée comme dans le cas d'écoquartiers autosuffisants où ladite autonomie repose sur du « *sur-mesure énergétique* » (Souami, 2007, p. 74). Mais, sans nécessairement viser l'autosuffisance totale locale, il est cependant possible d'identifier des possibilités de répondre à une partie des besoins locaux en énergie par des ressources de proximité.

2.1.2 Proximité et développement des énergies renouvelables

Le développement des énergies renouvelables suppose une modification des logiques de localisation de la production énergétique. L'efficacité économique dans le domaine énergétique porterait aussi sur le transport et la distribution d'énergie par un rapprochement géographique des lieux de production et des lieux de consommation. Les énergies renouvelables devraient modifier la répartition géographique de l'offre énergétique et interrogent sur des systèmes alternatifs innovants de production, de transport et de distribution de l'énergie dans une logique de proximité spatiale avec une forte dimension locale.

Le développement des technologies d'EnR n'est pas omniprésent. Il se produit en effet dans des lieux qui ont une matérialité propre (Cf. chapitre 3). Des spécificités territoriales telles que l'environnement politique (Shove, Walker, 2007) ou des contextes historiques et culturels

particuliers (Labussière, Nadaï, 2010) influencent les processus de déploiement de ces techniques. L'existence d'identités spatiales communes favorise la mise en place de contextes sociaux favorable à l'acceptation et à l'appropriation des infrastructures de production d'énergie renouvelable par les acteurs et les individus (Späth, Rohracher, 2010). Les projets de Territoire à Énergie POSitive (TEPos) s'observent en outre dans des lieux où l'histoire et le contexte économique et socio-spatial favorisent l'émergence d'une mobilisation collective pour la question énergétique (Nadaï *et al.*, 2015). Les processus de transition énergétique s'appuient ainsi sur une culture énergétique préexistante et sur l'héritage de pratiques et de structures préindustrielles (Emelianoff, Mor, 2013). La proximité géographique dans les relations entre acteurs industriels et acteurs institutionnels stimule aussi le marché des innovations environnementales et des technologies du renouvelable (Coenen *et al*., 2010), favorisant un caractère régional dans le processus de développement industriel des énergies renouvelables (Asheim *et al*., 2011 ; Boschma, Frenken, 2012). La proximité géographique permettrait une interaction continue, en face à face, facilitant les liens sociaux et la mise en réseau (Coenen *et al.,* 2010 ; Dewald, Truffer, 2012 ; Ornetzeder, Rohracher, 2013). Elle exercerait une influence positive sur les relations inter-organisationnelles (McCauley, Stephens, 2012), faciliterait la mise en place de réseaux d'acteurs aux échelles locale et régionale (Späth, Rohracher, 2010, 2012) et favoriserait les collaborations entre des acteurs hétérogènes (Hansen, 2014). Mais le développement des énergies renouvelables ne s'inscrit pas uniquement dans un rapport de proximité géographique entre acteurs. Les relations entre acteurs mondiaux peuvent impacter les processus de mise en œuvre locale des EnR (Coutard, Rutherford, 2010 ; Hodson, Marvin, 2009, 2010 ; Späth, Rohracher, 2012), d'autant plus que les grands groupes énergéticiens sont positionnés sur un marché mondialisé de l'énergie très concurrentiel.

La proximité géographique suscite par ailleurs le développement des innovations nécessaires au déploiement des EnR conduisant à des spécialisations industrielles dans certains espaces (Bridge *et al*., 2013 ; McCauley, Stephens, 2012). Comme pour d'autres technologies, le développement et la mise en œuvre des technologies du renouvelable sont stimulés par des économies d'agglomérations telles que l'accès à un bassin de main-d'œuvre qualifiée et à des instituts, centres de recherche et universités (McCauley, Stephens, 2012). Monstadt (2007) révèle également comment le lien avec le milieu de la recherche dans le secteur photovoltaïque a été un élément déterminant dans l'orientation de la politique de l'énergie solaire photovoltaïque à Berlin. Carvalho *et al.* (2012) ont aussi souligné le rôle de la spécialisation industrielle et technologique locale dans le choix des technologies de transport urbain durable à Curitiba, Göteborg et Hambourg, et indiquent aussi que les politiques publiques locales et la spécialisation industrielle peuvent se renforcer mutuellement. Ils montrent que la proximité géographique influence les échanges de connaissances entre sphère industrielle et sphère politique, et peut favoriser le soutien des politiques publiques au développement des énergies renouvelables.

Cette proximité « *géographique et/ou organisée* » (Torre, 2004) semble avoir joué un rôle dans le développement régional des énergies renouvelables en Provence-Alpes-Côte d'Azur. La proximité d'opérateurs énergétiques historiques, d'un centre de recherche et d'un pôle de compétitivité semble avoir stimulé l'émergence de nouveaux acteurs de l'énergie cherchant à se positionner régionalement sur le marché des énergies renouvelables.

2.2 Entre adaptation aux modèles existants et émergence d'un modèle de proximité

2.2.1 L'offre de production d'électricité par les EnR : analyse spatio-temporelle

Nous proposons une analyse spatio-temporelle du système régional de production d'électricité sur la base d'un travail préalable de géolocalisation de l'ensemble des unités de production d'électricité supérieures à 1 MW de puissance en 2015. Un inventaire des puissances, du type d'énergie, de l'entreprise exploitante et de la date de mise en service pour chaque unité constituent les variables d'une base de données géo-référencées de la production d'électricité en région Provence-Alpes-Côte d'Azur dont la figure 25 présente le protocole méthodologique. Cette base permet une représentation spatio-temporelle de la localisation de ces unités. L'intégration du réseau de transport de l'électricité (RTE) issu de la BD TOPO 2012 de l'IGN (Base de données topographiques) permet d'évaluer le rôle de cette structure dans ce processus de localisation.

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est caractérisée par une présence importante d'ouvrages hydroélectriques concédés à EDF. L'ensemble de ces ouvrages auxquels s'ajoutent la centrale thermique de Gardanne-Meyreuil (anciennement charbonnages de France) et le réseau RTE constituent la structure d'un modèle centralisé (Carte 4) correspondant à la phase historique d'électrification du pays au cours du XX^{e} siècle confiée à EDF alors entreprise nationale. Infrastructures de production et de transport sont bien les éléments d'une même structure à l'exception d'une partie du sud de la région correspondant au département du Var, exempt de productions supérieures à 1 MW de puissance.

Étape 1

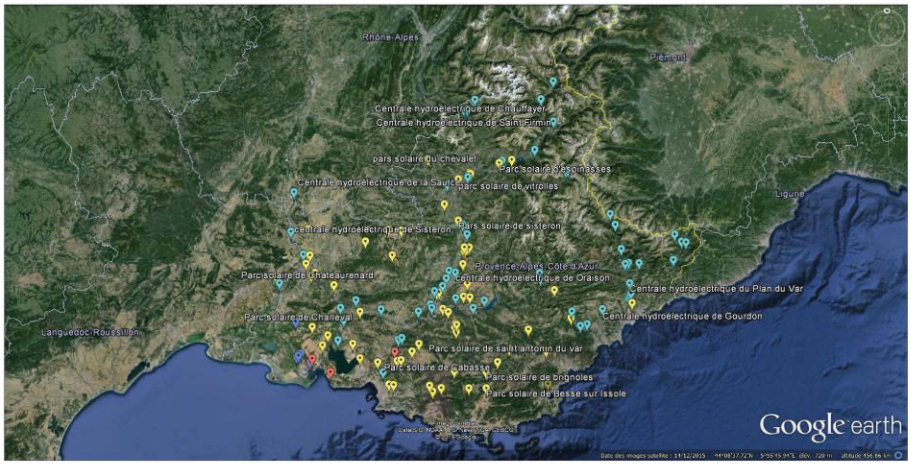
Inventaire des sites de production d'électricité
> à 1 MW de puissance installée
Création d'un fichier tableur
Création d'un identifiant par site

Données sources :
sites internet des producteurs d'énergie
et communiqués de presse
DREAL PACA (déclaration des permis)
Observatoire Régional de l'Energie
du Climat et de l'Air PACA

Étape 2

Géolocalisation des sites de production par image satellite par type d'énergie
Création d'un fichier .kml

thermique hydroélectricité solaire éolien



Vérification et contrôle avec Géoportail (IGN)

Étape 3

Importation du fichier .kml dans QGIS et création d'un fichier .shp

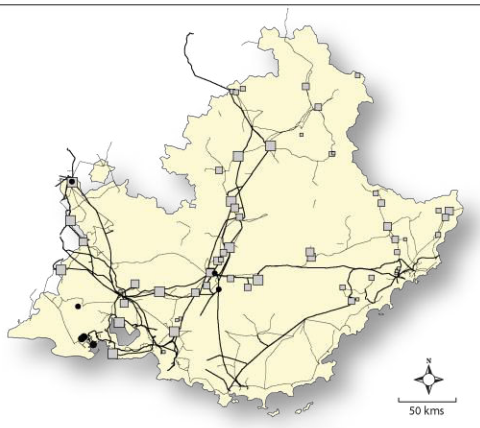
Mise en forme et implémentation de la base de données SIG

Identifiant	Code commune	Nom du site	Type de production	Puissance installée en MW	Nom de l'exploitant	Date de mise en service

Étape 4

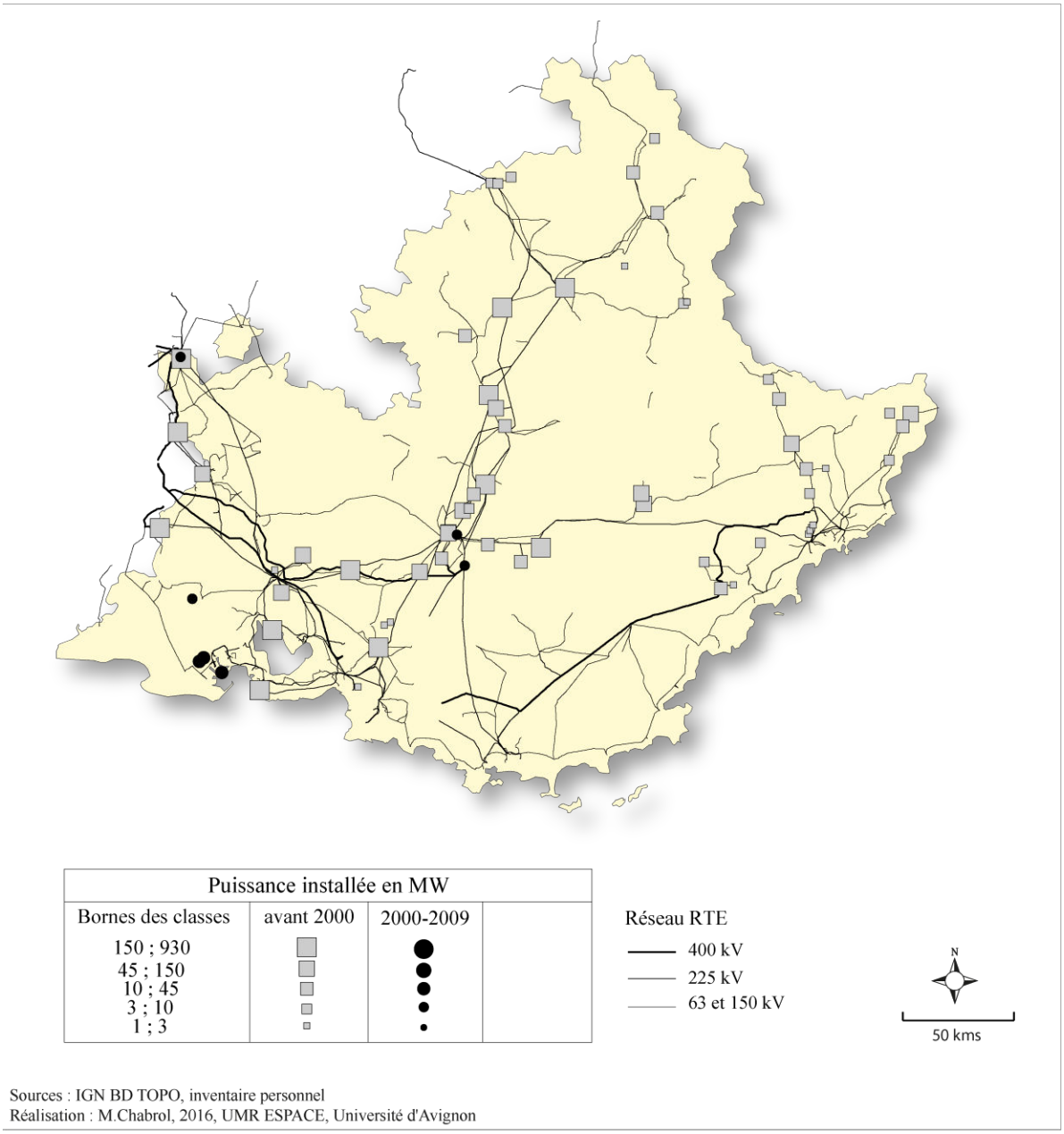
Importation de la couche SIG
du réseau électrique
BD TOPO Réseau 2012

Cartographie
analyse spatio-temporelle



Réalisation : M.Chabrol, 2016, UMR ESPACE, Université d'Avignon

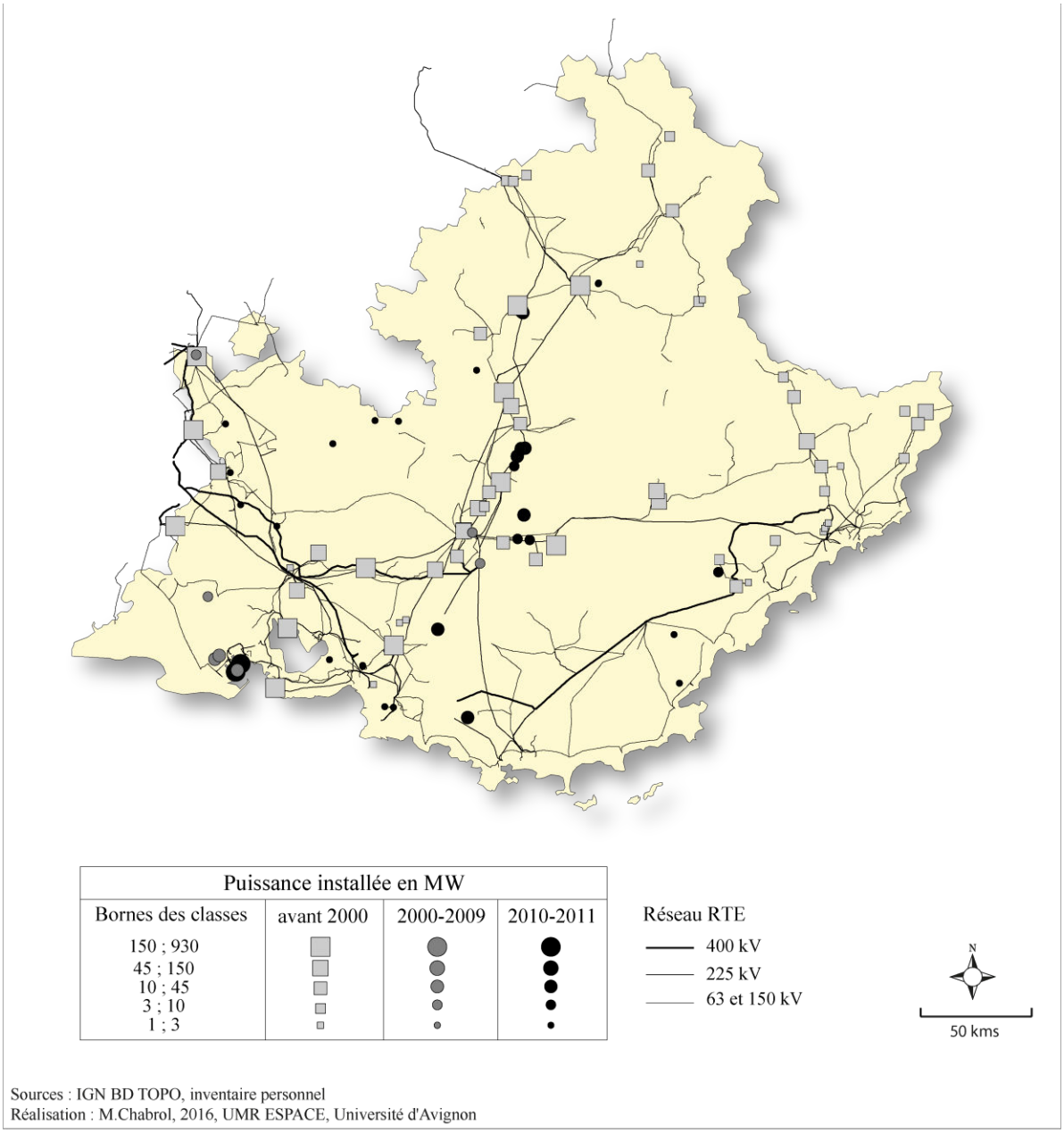
Figure 25. Création d'une base de données géoréférencée des sites de production d'électricité supérieurs à 1 MW de puissance en 2015 en région PACA



Carte 4. Localisation et puissance des sites de production d'électricité supérieurs à 1 MW en région Provence-Alpes-Côte d'Azur avant 2000 et entre 2000 et 2009

De nouvelles infrastructures de production voient le jour dans la première décennie des années 2000, suite à la mise en place des dispositifs règlementaires d'obligation d'achat de l'électricité institués par décret en 2000 et 2001. Cette période a été favorable au développement de l'éolien et à la mise en service de la première centrale photovoltaïque au sol par EDF. À l'exception du parc éolien de la plaine de la Crau (Bouches-du-Rhône), ces nouvelles infrastructures de production sont implantées sur des sites déjà dédiés à l'activité énergétique : bassin de Fos-sur-Mer, à proximité des raffineries de pétrole pour l'éolien et à proximité immédiate de grands barrages hydroélectriques pour le solaire (vallée du Rhône et vallée de la Durance) (Carte 4).

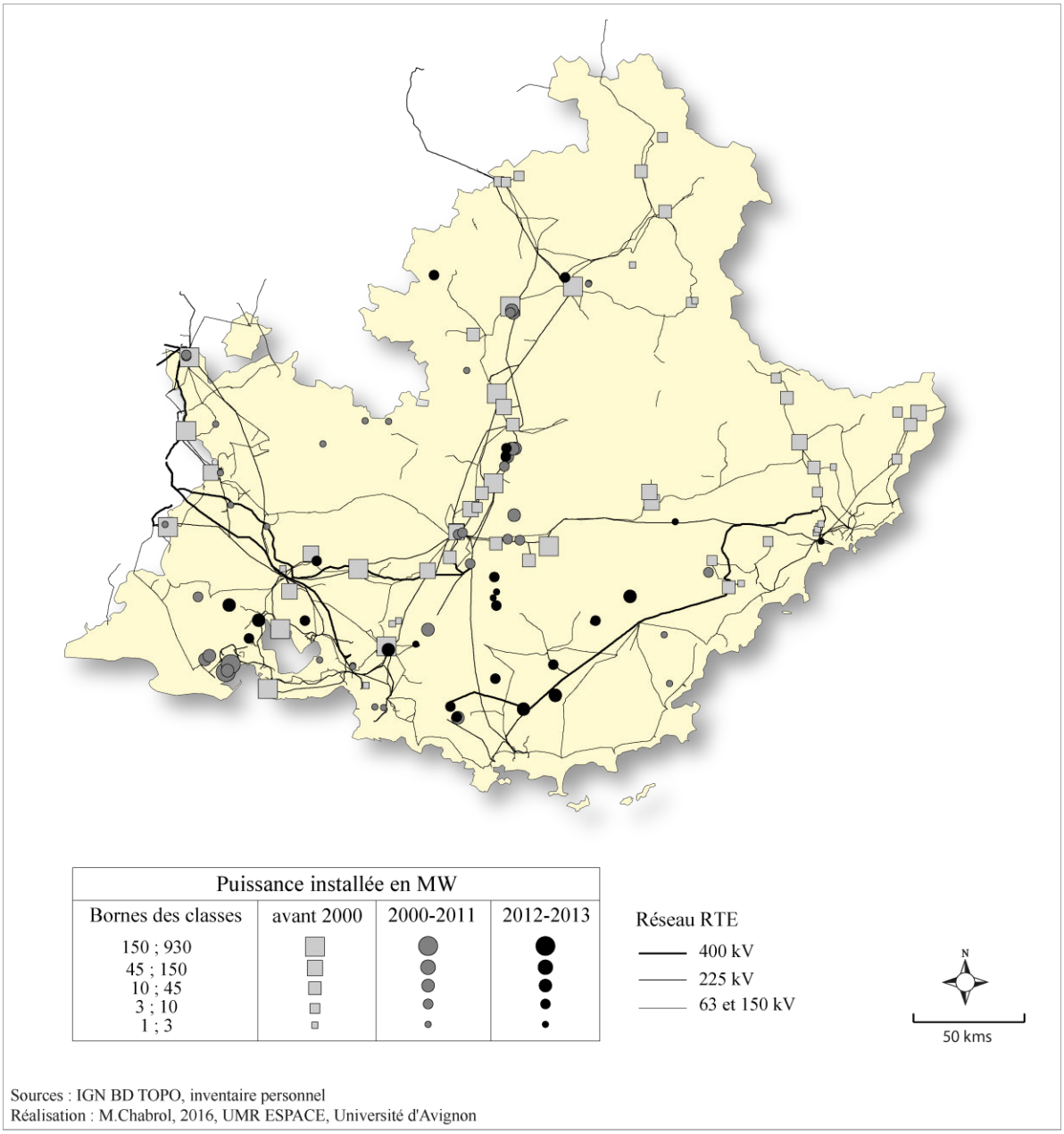
À partir de 2010, la plupart des nouvelles infrastructures s'appuient sur la structure existante et renforcent la fonction énergétique des espaces évoqués plus haut. Cependant, d'autres unités se localisent dans des espaces à proximité du réseau, mais dépourvus jusque-là d'infrastructures de production (Carte 5).



Carte 5. Localisation et puissance des sites de production d'électricité supérieurs à 1 MW en région Provence-Alpes-Côte d'Azur entre 2000 et 2011

Deux logiques de localisation de l'activité énergétique apparaissent en fonction de deux rapports de proximité : la proximité au réseau technique et la proximité à une activité de production d'énergie existante. Ces deux éléments de proximité peuvent intervenir aussi bien simultanément qu'indépendamment l'un de l'autre. De plus, les nouvelles unités de production s'implantent autant dans le voisinage d'infrastructures anciennes que récentes. Les unités de production récentes qui se sont localisées dans des espaces auparavant exempts

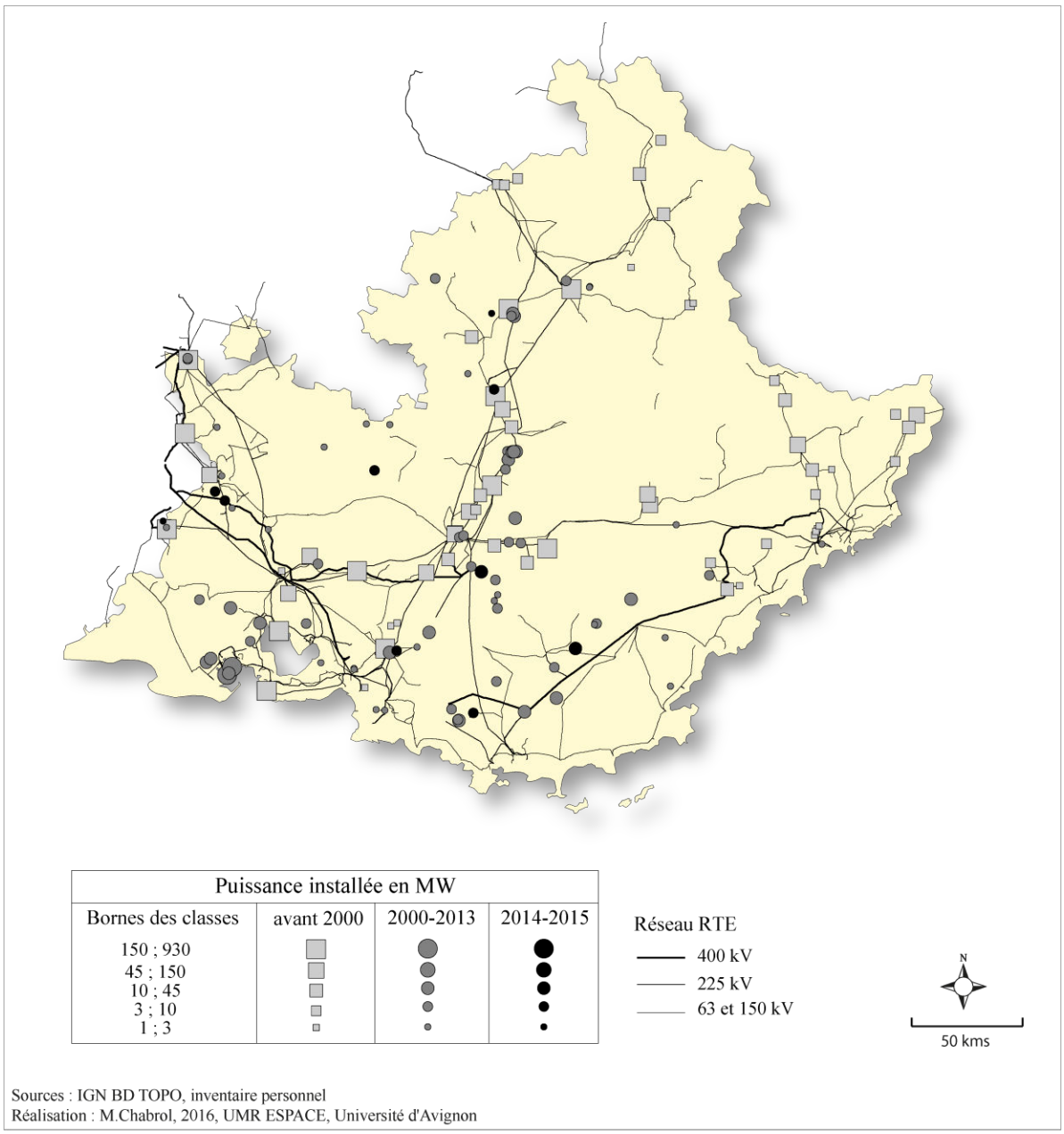
de production apparaissent comme les têtes de pont des implantations des années suivantes, particulièrement dans la partie sud de la région (Carte 6).



Carte 6. Localisation et puissance des sites de production d'électricité supérieurs à 1 MW en région Provence-Alpes-Côte d'Azur entre 2000 et 2013

Le raccordement des énergies renouvelables au réseau est une contrainte majeure qui induit une certaine proximité à cette infrastructure afin d'éviter les coûts que pourrait entraîner la création de nouvelles lignes. Au-delà de cette contrainte technique, l'installation des nouveaux sites de production se fait aussi à proximité des sites existants et montre une tendance au regroupement et à la concentration des sites de production dans certaines zones. Les résultats de l'analyse montrent en effet que les structures actuelles exercent une

contrainte forte sur l'exploitation de nouvelles ressources et polarisent d'un point de vue spatial les nouvelles mises en production (Carte 7).

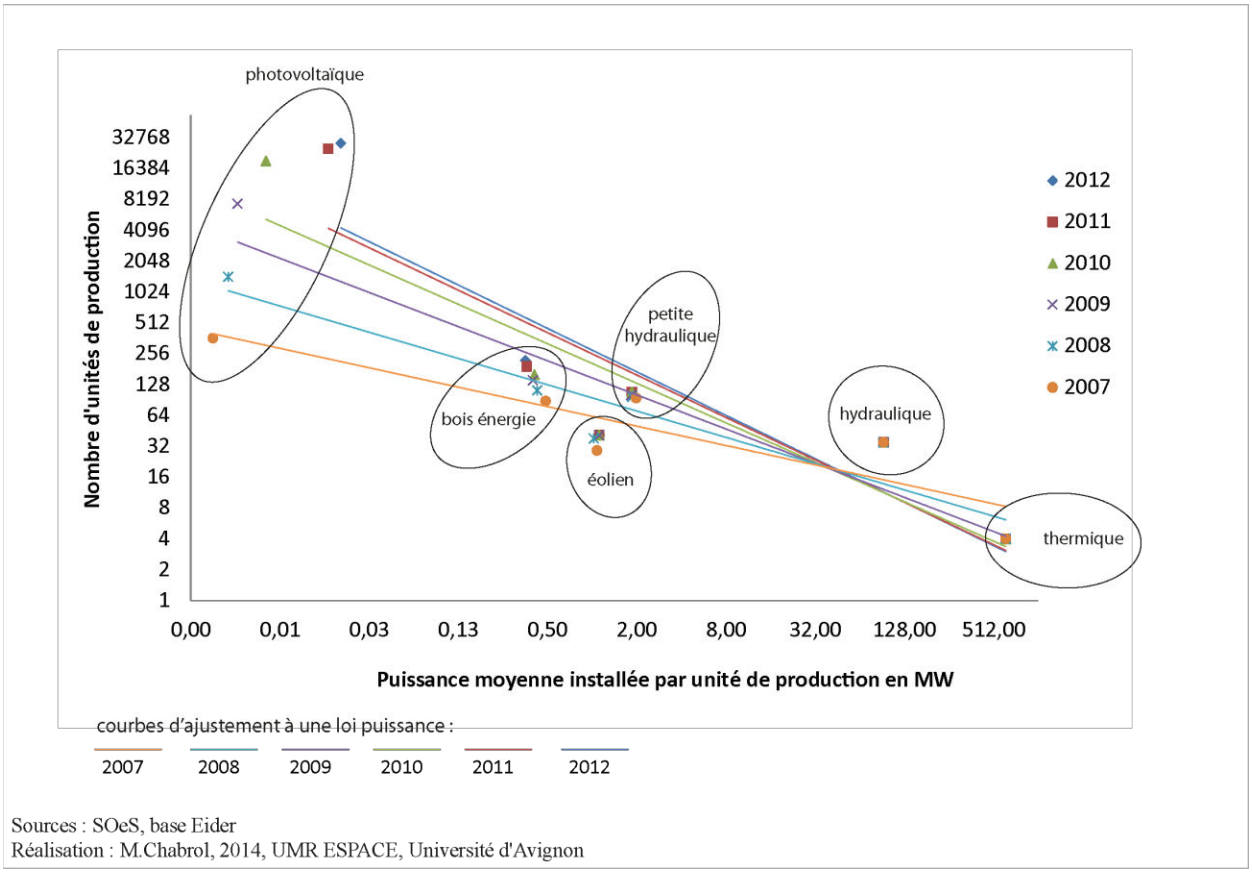


Carte 7. Localisation et puissance des sites de production d'électricité supérieurs à 1 MW en région Provence-Alpes-Côte d'Azur entre 2000 et 2015

Le développement récent de la production d'électricité d'origine renouvelable s'inscrit davantage dans un renforcement du maillage du territoire régional de l'énergie que dans un bouleversement profond des structures existantes. Certaines modalités de localisation des infrastructures renouvelables ne semblent pas contredire le modèle des grands réseaux techniques et leur développement paraît s'inscrire dans une logique « classique » de développement industriel d'une filière. La transition énergétique apparaîtrait alors, au moins en partie, comme une dynamique d'optimisation de l'approvisionnement en énergie des territoires qui ménage les structures en place, voire les conforte. Les réseaux énergétiques demeurent organisés autour de

points nodaux de production et d'axes structurants majeurs à partir desquels émergent des zones de production d'énergie renouvelable révélant une logique de consolidation, mais peut-être plus encore de substitution des ressources et préservant le modèle d'organisation actuel.

Si cela est vrai pour les nouvelles productions énergétiques de dimension industrielle, l'observation des unités de production plus petites montre toutefois une décentralisation de la production. La représentation de la corrélation entre le nombre d'unités de production par type de ressource et leur puissance installée dans un graphe bi-logarithmique de 2007 à 2012, montre une restructuration du système. Le système énergétique se réajuste à chaque intégration d'un nouveau type de ressource. À partir de 2007, les grosses unités de production perdent du poids dans la structure du système au profit d'une déconcentration par dispersion des petites unités (Graphique 19). La représentation des courbes de tendance (ajustement à une loi de puissance) facilite la lecture temporelle du graphique et montre bien l'influence du photovoltaïque individuel dans la dynamique de restructuration du système énergétique régional.

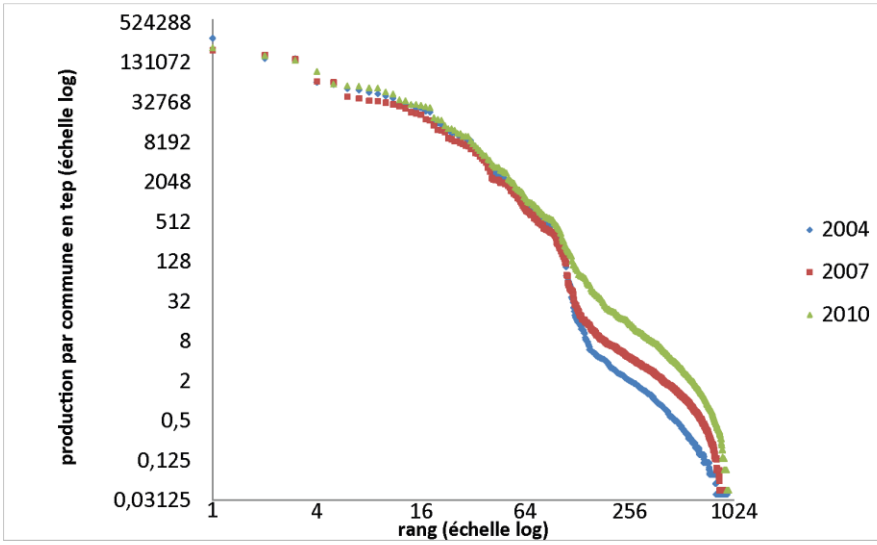


Graphique 19. Dynamique de restructuration du système énergétique en région PACA de 2007 à 2012

Cette dynamique s'observe aussi dans l'évolution de la production d'énergie par commune en 2004, 2007 et 2010. La forme de la distribution des productions d'énergie par commune représentée sur un graphique rang-taille[21] est conservée pour les communes avec une production supérieure à 500 tep par an. En revanche, une discontinuité importante apparaît entre

[21] Les communes sont classées par ordre décroissant de production annuelle d'énergie.

ces communes et celles qui produisent moins de 500 tep par an. Une convexité des courbes de 2004 et de 2007 pour les rangs inférieurs montre un renforcement de ce niveau de production, puis la discontinuité observée s'efface en 2010. Le système se restructure par le bas (Graphique 20).



Sources : base Energ'air
Réalisation : M.Chabrol, 2014, UMR ESPACE, Université d'Avignon

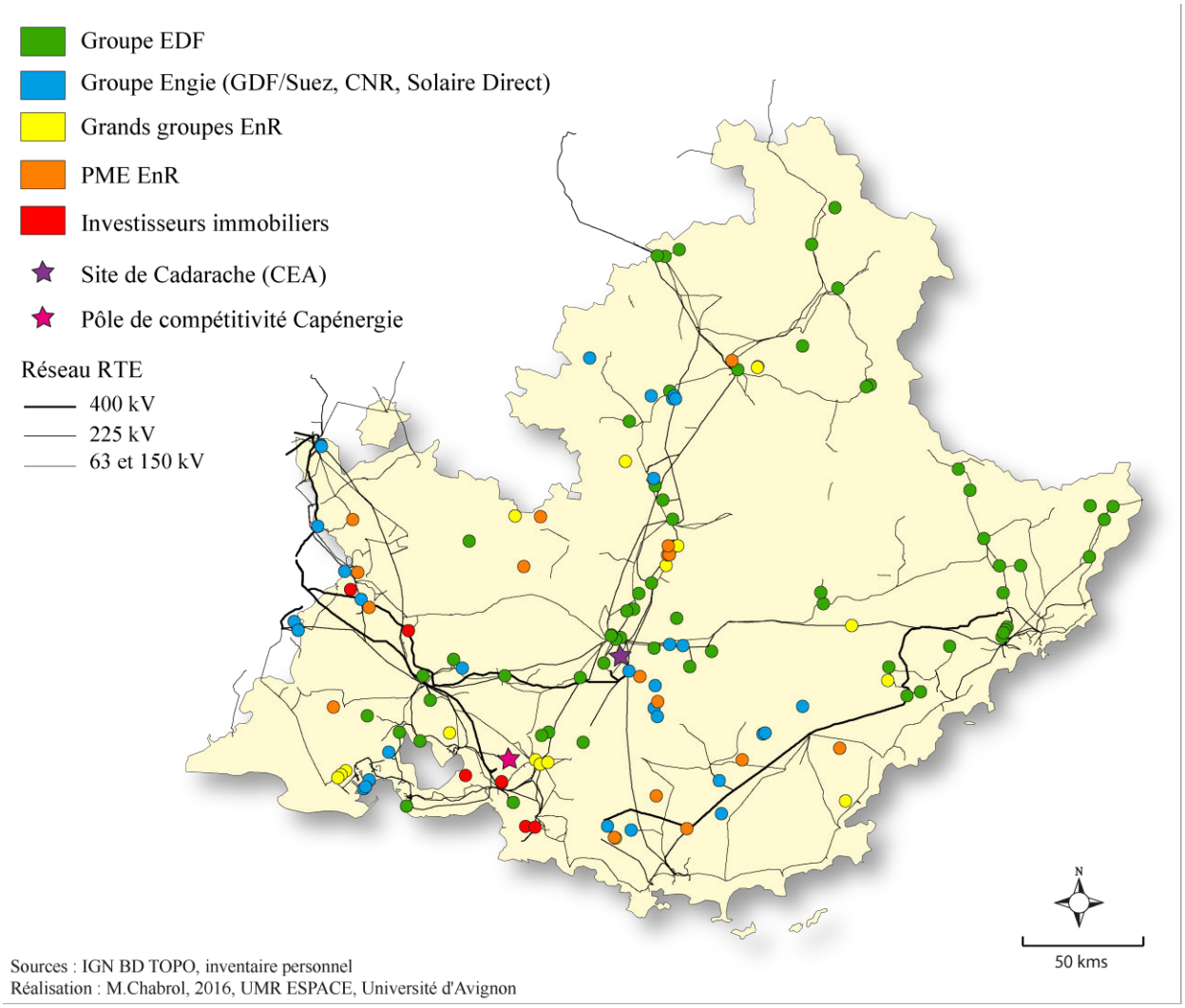
Graphique 20. Évolution de la distribution rang-taille des productions d'énergie par commune en région PACA de 2004 à 2010

Ce processus ne remet pas en cause le modèle des grands réseaux mais interroge sur l'articulation entre les grands réseaux préexistants et de multiples réseaux locaux et multi-échelle. Plusieurs situations se chevauchent à différents niveaux d'échelle. Le système énergétique semble s'adapter et se restructurer dans l'ordre des échelles. Moins il y a d'unités de production, plus leur puissance est élevée.

2.2.2 Le partage du territoire régional de l'énergie par les acteurs, un principe de sélection naturelle ?

L'observation de ces dynamiques spatio-temporelles et la constitution de zones de concentration des sites de production interrogent sur les stratégies des acteurs industriels et des opérateurs énergétiques dans la localisation de nouvelles activités de production d'énergie. La distinction des exploitants de sites de production révèle l'hétérogénéité des zones de concentration. La carte 8 permet d'identifier cinq catégories d'exploitants qui se partagent le marché régional de l'offre électrique. S'il conserve le monopole des sites de production antérieurs à 2000, le groupe EDF a par contre peu développé sa production par la suite avec seulement 7 nouveaux sites. Avec 32 nouveaux sites, le groupe ENGIE exploite en revanche près de 50% des sites implantés entre 2000 et 2015. Cette position dominante s'explique par l'évolution récente de cette grande entreprise (anciennement GDF-Suez, entrée majoritaire au capital de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) au cours des années 2000, puis acquisition

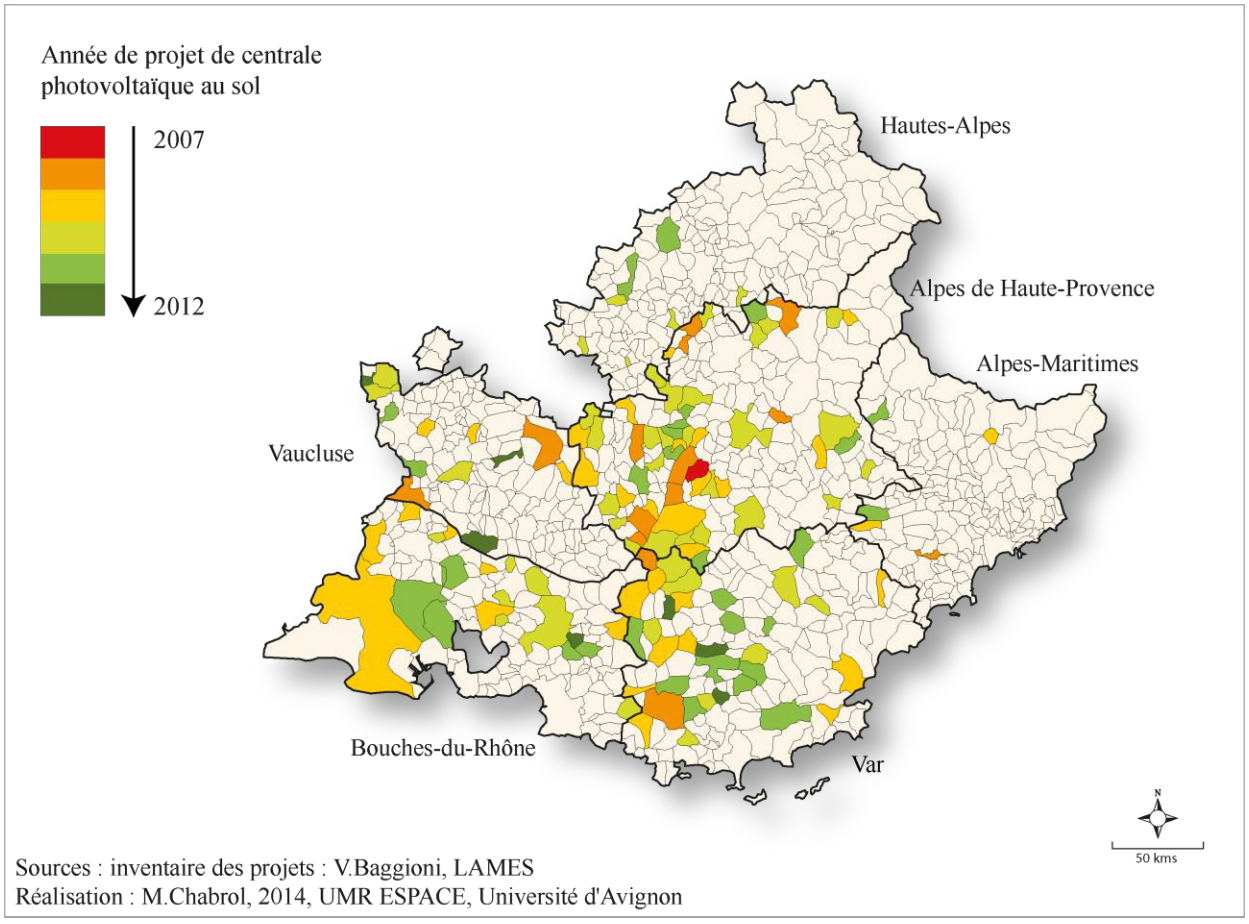
du groupe Solaire Direct en juillet 2015). Les grands groupes européens et les PME françaises spécialisés dans les énergies renouvelables se partagent le reste du marché avec respectivement 16 et 17 sites auxquels viennent s'ajouter 7 sites de production photovoltaïque en toiture exploités par des investisseurs immobiliers (essentiellement des toitures de surfaces commerciales).



Carte 8. Partage du territoire régional de l'énergie entre acteurs du secteur

L'hétérogénéité du type d'exploitant dans les zones de relative concentration de l'activité énergétique ainsi que le processus de localisation à proximité de l'existant mis en évidence précédemment (cf. supra) questionnent le rôle de la proximité « *géographique et/ou organisée* » (Torre, Rallet, 2004 ; Boschma, 2004) dans le développement régional des énergies renouvelables. Faut-il voir dans ces regroupements géographiques d'exploitants de nature différente la simple volonté de saisir des opportunités dans un marché concurrentiel ? Dans ce cas, cette tendance au regroupement spatial s'expliquerait uniquement par la recherche des meilleurs sites de production contraints par un raccordement aux grands réseaux techniques. Ou bien cette tendance au regroupement révèlerait-elle un modèle de proximité organisée nécessaire au développement des énergies renouvelables ?

La co-localisation d'activités peut en effet s'expliquer, selon Torre (voir aussi : Gilly, Torre, 2000 ; Pecqueur, Zimmermann, 2004), par le croisement de deux logiques de proximité (géographique et organisée) qui introduisent une pluralité des formes de développement économique. En outre, si une proximité géographique (ou spatiale) peut favoriser les interactions entre acteurs économiques, cela ne signifie pas pour autant que cette proximité soit suffisante pour générer des synergies. Autrement dit, l'agglomération ou la concentration n'est pas nécessairement synonyme de relations ou d'interactions localisées. Torre et Rallet précisent en effet que « *pour féconder des interactions, la proximité géographique doit être structurée et activée par la proximité organisée* » (Torre, Rallet, 2004), c'est-à-dire relationnelle. L'émergence de nouveaux acteurs sur le marché régional des énergies renouvelables a pu être stimulée par la proximité au centre de recherche du CEA et au pôle de compétitivité CAPENERGIE (Carte 8). Ces spécificités régionales accréditent l'hypothèse de McCauley et Stephens (2012) selon laquelle le développement des technologies renouvelables peut être stimulé par des économies d'agglomération telles que l'accès à un bassin de main-d'œuvre qualifiée et à des instituts et centres de recherche. Elles peuvent être aussi liées à des choix territoriaux et des volontés locales comme dans le cas des centrales photovoltaïques au sol qui sont devenues une spécificité du département des Alpes-de-Haute-Provence et plus particulièrement de la vallée de la Durance, épicentre d'une dynamique de diffusion des projets de centrales photovoltaïques au sol entre 2007 et 2012 (Carte 9) (Dubois, Thomann, 2012).



Carte 9. Diffusion des projets de centrales photovoltaïques au sol en région PACA entre 2007 et 2012

Les déterminants physiques de l'ensoleillement ne suffisent pas à expliquer le développement de parcs solaires le long de la vallée de la Durance, qualifiée par les acteurs locaux de « vallée des énergies ». La mise en place d'une action publique spécifique de soutien à ce secteur d'activités a été un levier pour trouver de nouvelles voies de développement dans un espace périphérique encore marqué par l'exode rural et une désindustrialisation récente (Baggioni, 2014). On peut penser qu'une mise en œuvre de la transition énergétique dépend aussi de l'impulsion suscitée par les collectivités territoriales en partenariat avec les acteurs industriels, associatifs ou encore avec les résidents. Mais cette hypothèse tient difficilement lorsque le contexte national du développement des EnR est considéré. En effet, 30% des nouvelles unités de production ont été mises en service en 2011 pour des contrats d'achat de l'électricité à un tarif attractif lié à l'appel d'offres national de 2009, puis 20% en 2013 suite à l'appel d'offres national de 2012. De ce point de vue, l'émergence de zones de production et la proximité géographique entre les acteurs de l'énergie n'apparaissent pas liées à un besoin de proximité organisée, mais uniquement comme le résultat spatial de stratégies industrielles concurrentielles. La stratégie de rapprochement entre ENGIE et Solaire Direct illustre bien l'inscription du développement des énergies renouvelables dans un marché mondialisé fortement concurrentiel. Le positionnement des énergéticiens demeure largement a-territorial et les décisions d'exploitation et d'investissement relèvent non pas du niveau local, mais de systèmes d'acteurs économiques positionnés sur le marché international et guidés par des arbitrages marchands (Courlet, 2007).

Le développement de l'offre d'électricité en région Provence-Alpes-Côte d'Azur par les énergies renouvelables ne remet pas en cause le modèle centralisé des grands réseaux techniques. Il s'inscrit dans la poursuite du développement industriel d'une filière dynamisée par l'ouverture à la concurrence du marché de l'électricité et les appels d'offres nationaux. Le modèle des grands réseaux techniques domine encore largement dans cette région et détermine la localisation des nouveaux sites de production. De plus, même si de nouveaux acteurs ont émergé, les grands groupes énergéticiens positionnés sur le marché mondial de l'énergie exercent un quasi-monopole et laissent songeurs sur la possibilité de sortir du système centralisé français.

Un processus de restructuration du système énergétique régional existe bien en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Mais il correspond à un renforcement du maillage énergétique du territoire en s'appuyant sur la structure existante : il y a bien restructuration mais sans extension spatiale des réseaux. Cette restructuration passe par une multiplication des sites de production à la condition que le réseau soit en capacité de les intégrer. Cette dynamique est donc une dynamique marginale d'optimisation de l'approvisionnement en énergie des territoires qui ménage les structures en place, voire les conforte.

2.2.3 Un modèle de Place dependence et de Path dependence

Cette analyse régionale permet dès lors de réinterroger le modèle de *Path dependence* présenté dans les figures 18 et 19 (Cf. chapitre 3, 3.3). L'émergence de dynamiques spatiales dans l'évolution du système énergétique de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur est orientée par la nature des structures spatiales préexistantes. Les analyses précédentes ont montré comment la localisation du réseau et des sites de production existants ont un effet d'attraction sur les nouvelles productions d'électricité renouvelable en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Les structures spatiales existantes convoquent un phénomène de dépendance au lieu (*Place dependence*) qui verrouille les dynamiques ultérieures dans un état stable de *Path dependence*. Les nouvelles productions se développent à proximité du réseau existant, des lieux historiques de production et, pour les plus récentes, à proximité d'autres productions récentes. La présence de productions historiques relevant du modèle centralisé favorise le développement d'installations renouvelables qui bénéficie alors d'économies d'échelle et de l'apprentissage des entreprises anciennes. Les sites importants de production (centrales nucléaires, barrages) et les axes majeurs (lignes haute tension, gazoducs…) qui structurent les réseaux énergétiques ne peuvent pas être remis en cause car ils sont une base de développement pour les énergies renouvelables. Cette trajectoire se traduit alors par deux mouvements. L'un s'inscrit directement dans le renforcement de la structure spatiale existante (vers la gauche du diagramme de la figure 26). L'autre est stimulé par un contexte favorable aux changements endogènes (concurrence, appels d'offres, politiques publiques, diffusion des technologies décentralisées) et convoque une adaptation du système énergétique (vers la droite du diagramme de la figure 26). Il apparaît que dans le cas du développement des énergies renouvelables en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, cette adaptation n'aboutit pas à une trajectoire d'innovation vers un modèle énergétique décentralisé, mais à une restructuration du système par optimisation marginale qui renvoie son évolution vers un état stable de *Path dependence* (Figure 26).

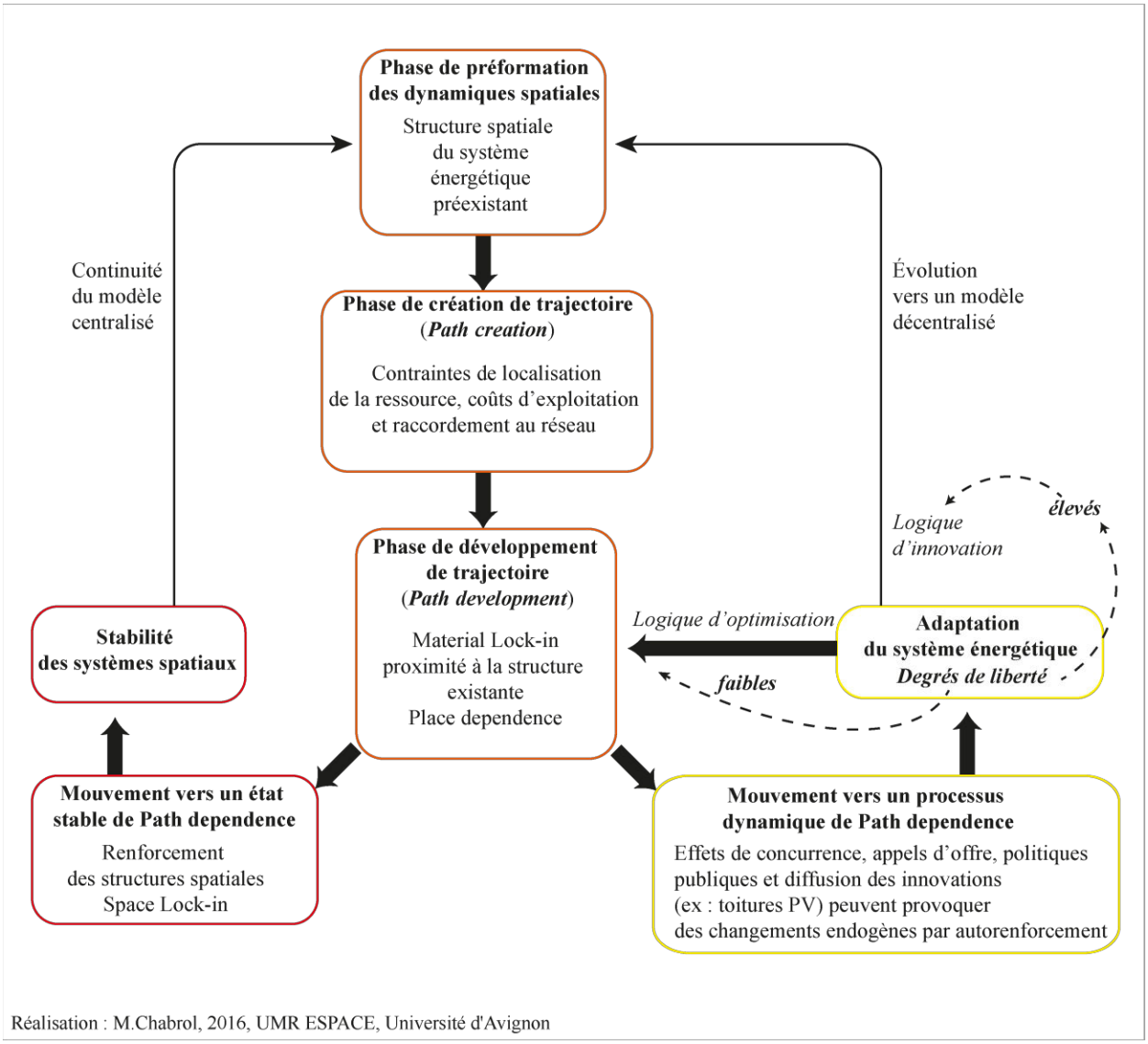


Figure 26. ***Material lock-in*****,** ***Place dependence*** **et** ***Path dependence*** **dans le développement régional des énergies renouvelables en région PACA**

3 Implications du *Material lock-in* dans le développement potentiel des énergies renouvelables

La démarche proposée ici consiste à évaluer les potentiels de production d'énergie renouvelable réels des territoires et d'identifier le poids du *Material lock-in* dans leur localisation et leur mise en œuvre potentielle. Les données concernant les potentiels d'énergie renouvelable mobilisables à court et moyen termes sont issues d'études de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME).

Dans ces études, les données quantifiées de potentiel sont déterminées à partir des gisements physiques desquels ont été soustraites les contraintes de raccordement au réseau, les enjeux paysagers et patrimoniaux et des analyses de faisabilité. Les productions thermiques et de grande hydraulique relevant du système énergétique national sont exclues de notre analyse ainsi que les potentiels en bois-énergie, ressource pour laquelle les rapports sont peu concluants en raison d'une absence de structuration de filière en région PACA et de tensions avec le secteur bois d'œuvre et d'industrie. L'analyse inclut donc le solaire, l'éolien, la petite hydraulique, le biogaz et la récupération de chaleur sur réseau d'assainissement.

Un travail de compilation de données éparses issues des études présentées dans le tableau 8 et des données de production par commune de la base régionale Energ'air a été effectué pour bénéficier d'une base communale harmonisée dans laquelle les données sont exprimées en tonnes équivalent pétrole. La figure 27 synthétise le protocole méthodologique qui a conduit à la réalisation de cette base de données.

Commanditaire	Prestataire	Étude
Région PACA, ADEME, Préfecture PACA	Valorem, Conexia	étude du potentiel de production d'électricité d'origine éolienne terrestre en PACA http://oreca.regionpaca.fr/uploads/tx_egestiondoc/Potentiel_Eolien__2010_.zip
	Axenne	étude du potentiel de production d'électricité d'origine solaire en PACA http://oreca.regionpaca.fr/fileadmin/Documents/Etudes/potentiel_photovoltaique__2009_/Potentiel_Solaire_PV.pdf
	GERES	étude du potentiel régional pour le développement de la petite hydroélectricité http://oreca.regionpaca.fr/uploads/tx_egestiondoc/Filiere_Hydro_GERES__2014_.zip
	Antea	évaluation de récupération d'énergie thermique dans les réseaux d'assainissement de la région PACA http://oreca.regionpaca.fr/uploads/tx_egestiondoc/Rapport_final_VFIN__avec_annexes_.pdf

Tableau 8. Sources des données de potentiels de production d'énergie renouvelable en région PACA

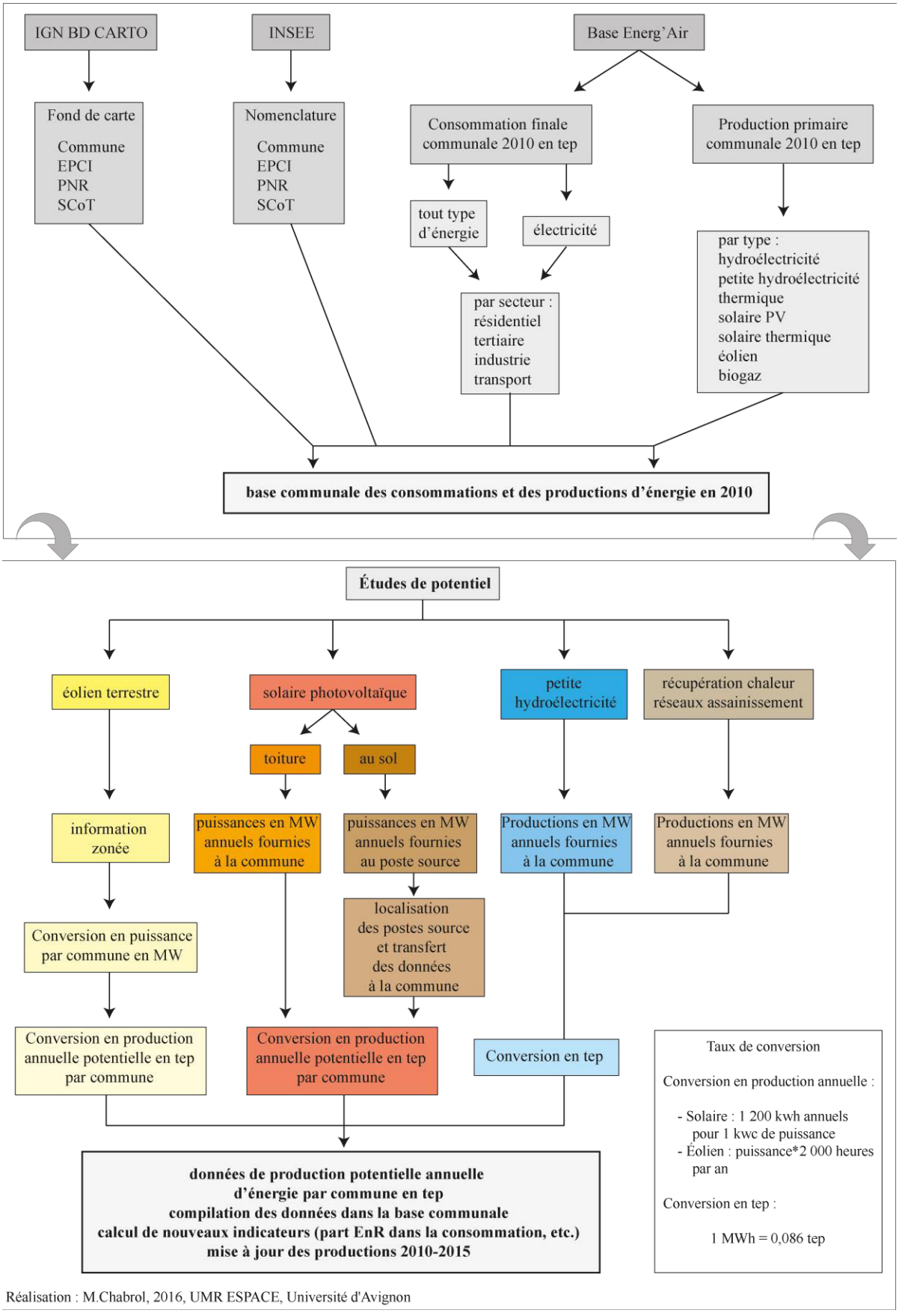
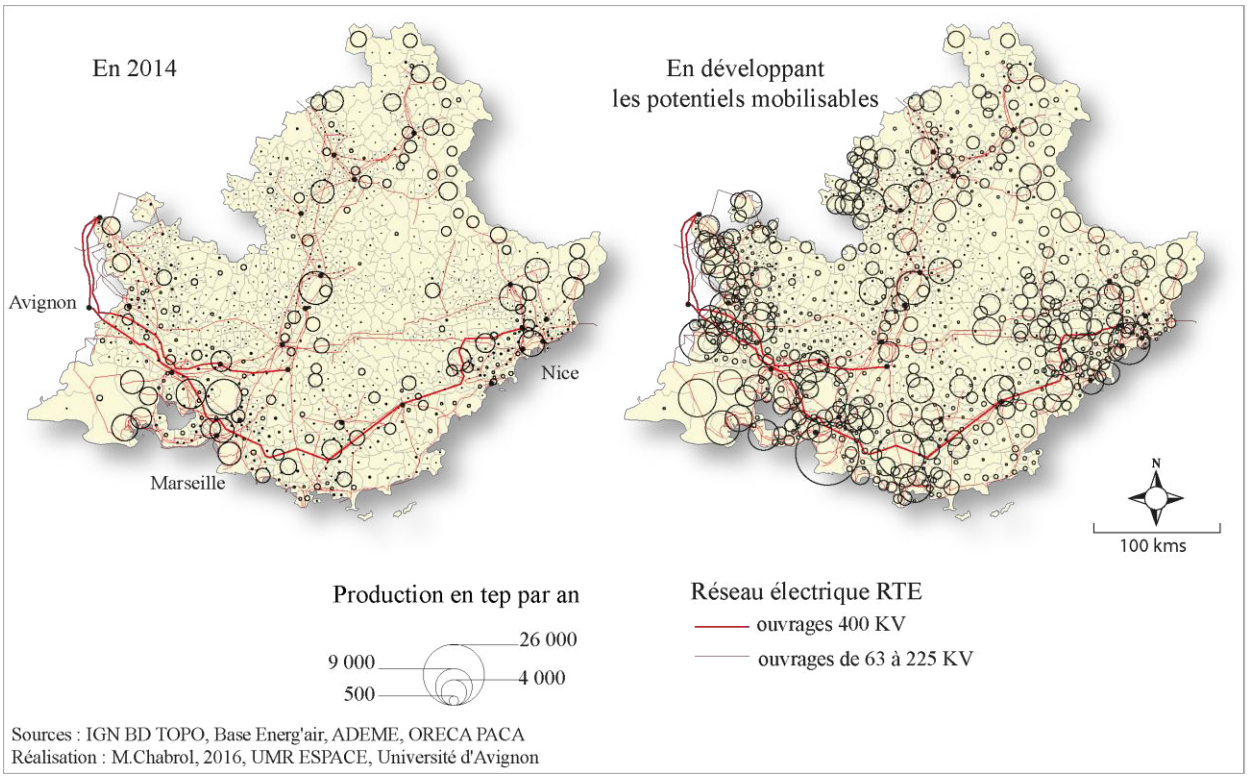


Figure 27. Compilation de données énergétiques et mise en place d'un système d'information géographique multi-niveaux

3.1 Mix énergétique potentiel et *Place dependence*

3.1.1 Localisation des potentiels et effets de spécialisation

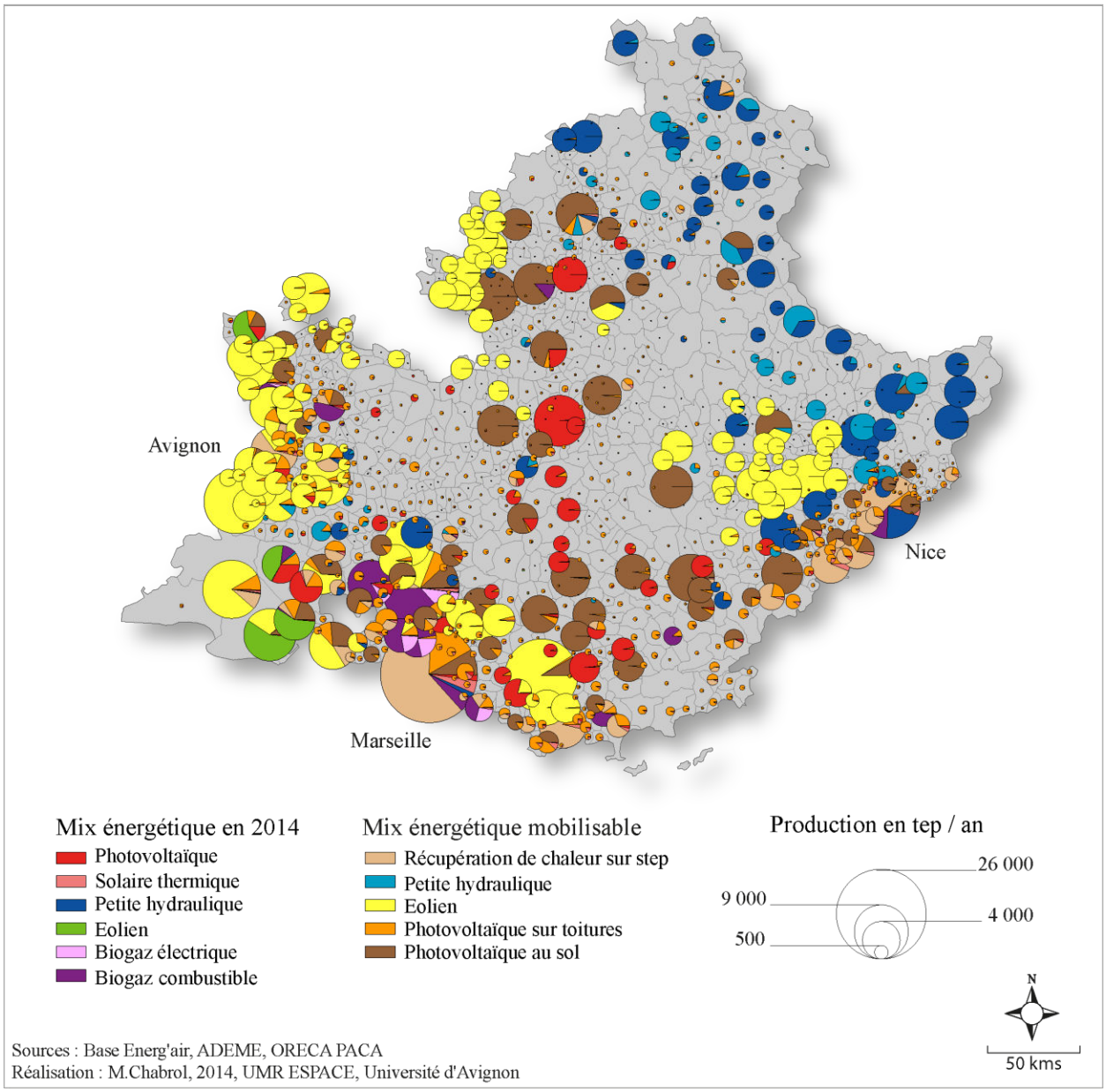
Dans l'hypothèse d'un développement des potentiels mobilisables d'énergie renouvelable, la cartographie des données à l'échelon communal permet tout d'abord d'observer la multiplication possible des espaces de production et leur dispersion dans l'espace régional. La production jusqu'alors concentrée essentiellement autour de l'agglomération d'Aix-Marseille, dans la vallée de la Durance et dans les Alpes se déconcentre sous l'effet de la multiplication des lieux possibles de nouvelle production. Les quantités produites par commune s'en trouveraient évidemment augmentées (Carte 10). Par ailleurs, cette dispersion des espaces possibles de production n'est pas désordonnée. Des zones de concentration relative apparaissent. Elles sont pour partie liées à des types de ressources potentielles particulières déterminées par des conditions physiques (éolien dans la vallée du Rhône, solaire dans les Alpes de Haute-Provence et hydraulique dans les Alpes), et pour partie contraintes par la structure du réseau de transport de l'électricité. Le mix énergétique envisageable en région Provence-Alpes-Côte d'Azur montre bien que la contrainte du raccordement au réseau détermine fortement le calcul des données de potentiels. Presque tous les potentiels sont localisés à proximité immédiate du réseau.



Carte 10. Production 2014 et production potentielle d'énergie renouvelable par commune en région PACA

Ces nouvelles ressources envisageables sont également pour la plupart proches de la demande. C'est particulièrement le cas dans la vallée du Rhône et autour de l'agglomération marseillaise. On note également le cas spécifique de l'arrière-pays niçois situé en bout de réseau et en situation de péninsule énergétique. L'exploitation des potentiels localisés dans cet espace

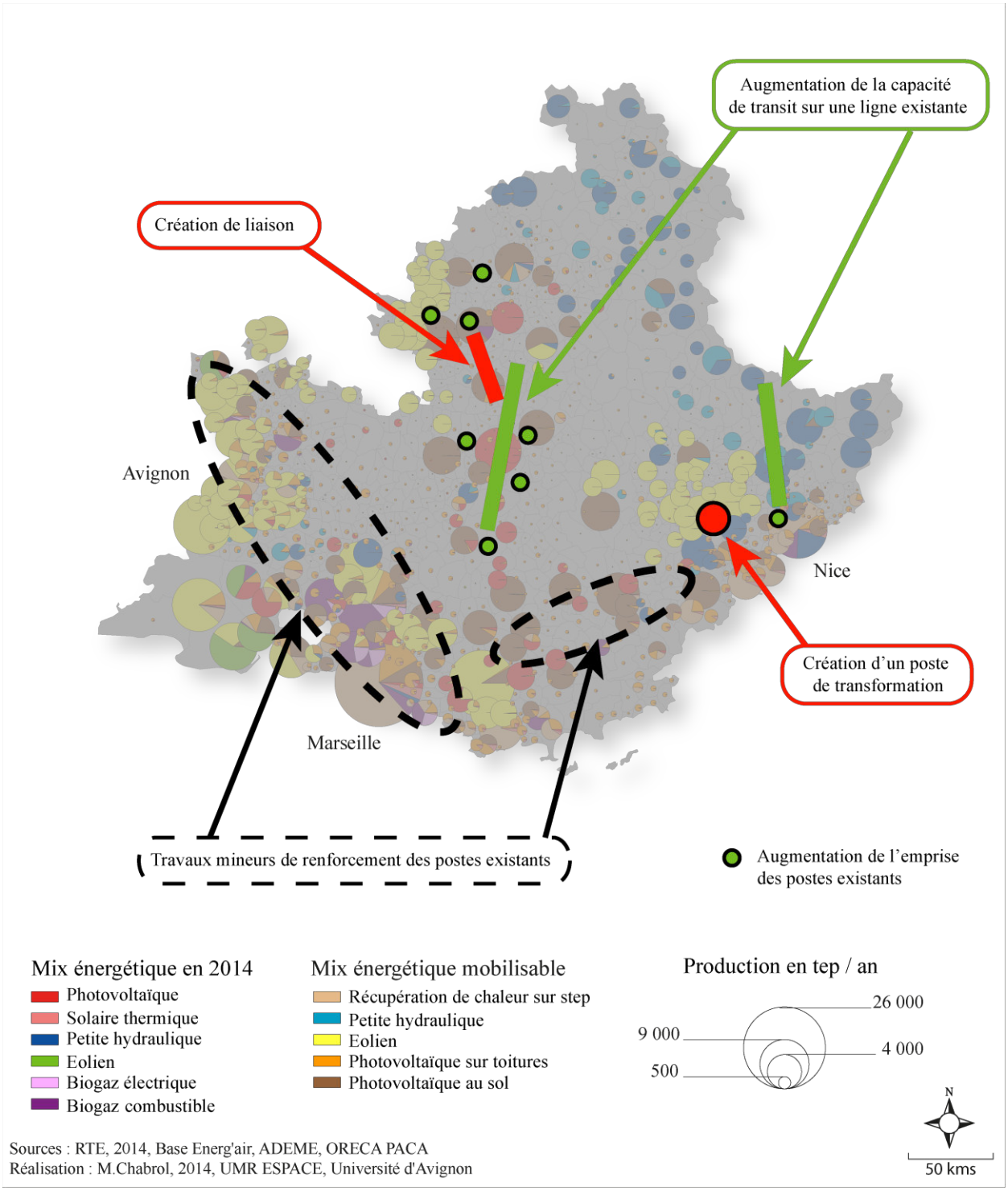
pourrait en augmenter la sécurité énergétique. L'observation territorialisée du mix énergétique permet à la fois d'identifier des spécialisations en fonction du type de ressource, mais aussi de mesurer le poids des énergies dominantes. On retrouve une dichotomie entre vallée du Rhône et région marseillaise d'un côté, et Côte d'Azur et arrière-pays alpin de l'autre. Les conditions physiques déterminent les potentiels éolien et hydraulique. Ces deux espaces distincts sont partagés au centre de la région par un axe Nord Sud qualifiable « d'axe solaire ». Le biogaz et la récupération de chaleur apparaissent comme des ressources urbaines à l'image du photovoltaïque en toiture dont le potentiel est fonction de la surface de toiture, donc de la taille des villes. Ces effets de spécialisation ne permettent donc pas d'observer à l'échelle communale des espaces au mix énergétique équilibré. Tous les espaces ont une source d'énergie dominante (Carte 11).



Carte 11. Mix énergétique en 2014 et mix potentiel à l'échelle communale en région PACA

3.1.2 Raccordement des potentiels EnR et renforcement de la structure existante

Le développement des potentiels énergétiques renouvelables nécessite aussi des aménagements du réseau de transport de l'électricité pour prévenir d'éventuels risques de dysfonctionnements liés à cette nouvelle répartition spatiale des charges électriques sur le réseau. La carte 12 présente les travaux proposés par RTE pour répondre à cet enjeu.



Carte 12. Mix énergétique potentiel et travaux prévus par RTE dans le schéma régional de raccordement au réseau des énergies renouvelables en région PACA

Des renforcements localisés sont en effet nécessaires pour faire face à cette complexification de la géographie des flux électriques. Sur la base des études de potentiels ayant alimenté la définition des objectifs de production d'énergie renouvelable du SRCAE, RTE, en partenariat avec le Conseil Régional et l'ADEME, conformément à la loi Grenelle, a réalisé un Schéma Régional de Raccordement au Réseau des Énergies Renouvelables (RTE, 2014). Cette étude vise à évaluer d'une part les besoins futurs des producteurs d'électricité pour adapter le réseau aux nouveaux flux à venir et, d'autre part, la faisabilité technique du raccordement des objectifs EnR prévus par le SRCAE.
Les travaux d'aménagement prévus permettent principalement de développer de nouvelles capacités de raccordement sur l'ensemble de la vallée de la Durance et dans l'arrière-pays des Alpes-Maritimes. Le Vaucluse, la basse vallée du Rhône et l'arrière-pays varois ne nécessitent pas d'aménagements majeurs. Au total, seules deux infrastructures nouvelles sont à envisager : la création d'une nouvelle ligne et d'un nouveau poste de transformation. Des travaux nécessaires s'inscrivent dans le renforcement des infrastructures existantes : l'augmentation de la capacité de transit d'une ligne haute tension dans la vallée de la Durance et l'arrière-pays Niçois, et l'augmentation de l'emprise de certains postes de transformation (Carte 12).

L'exploitation de nouvelles ressources renouvelables peut modifier la répartition géographique des potentiels énergétiques. La répartition spatiale des charges sur le réseau électrique évolue et nécessite des ajustements pour limiter les dysfonctionnements du système en place. Nos résultats montrent que la structure originelle du système énergétique régional est peu remise en cause. La mise en valeur des potentiels énergétiques est largement contrainte par la structure spatiale existante du système énergétique et les mesures d'ajustement à prévoir sont majoritairement des mesures de renforcement de l'existant. L'idée selon laquelle la transition énergétique et le déploiement des technologies de production et de distribution « décentralisées » de l'énergie annonceraient la fin des grands réseaux (Coutard, 2010) ne semble pas opérante en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Bien qu'une restructuration du système énergétique régional se soit amorcée, ce processus traduit davantage un enjeu d'articulation entre des sources variées d'énergie mais qui s'intègrent dans un système énergétique commun. On peut ainsi parler d'optimisation. Cela soulève par conséquent une double question d'échelle : l'échelle spatiale permettant de maximiser le rapport entre la production et la consommation, et l'échelle liée au dimensionnement des réseaux et des unités de production.

Il peut paraître trivial à première vue de montrer l'inertie exercée par les infrastructures héritées du réseau de transport de l'électricité ; cela n'a rien d'étonnant au regard du cadrage des énergies renouvelables par les politiques publiques qui encourage la continuité du modèle centralisé (tarifs d'achat, objectifs quantitatifs nationaux, recours aux développeurs privés, parcs solaires et éoliens de grande dimension) ; mais cette inertie est tellement présente en région PACA qu'elle questionne en profondeur la possibilité réelle d'une émergence de visions différentes de l'articulation entre énergie et territoire.

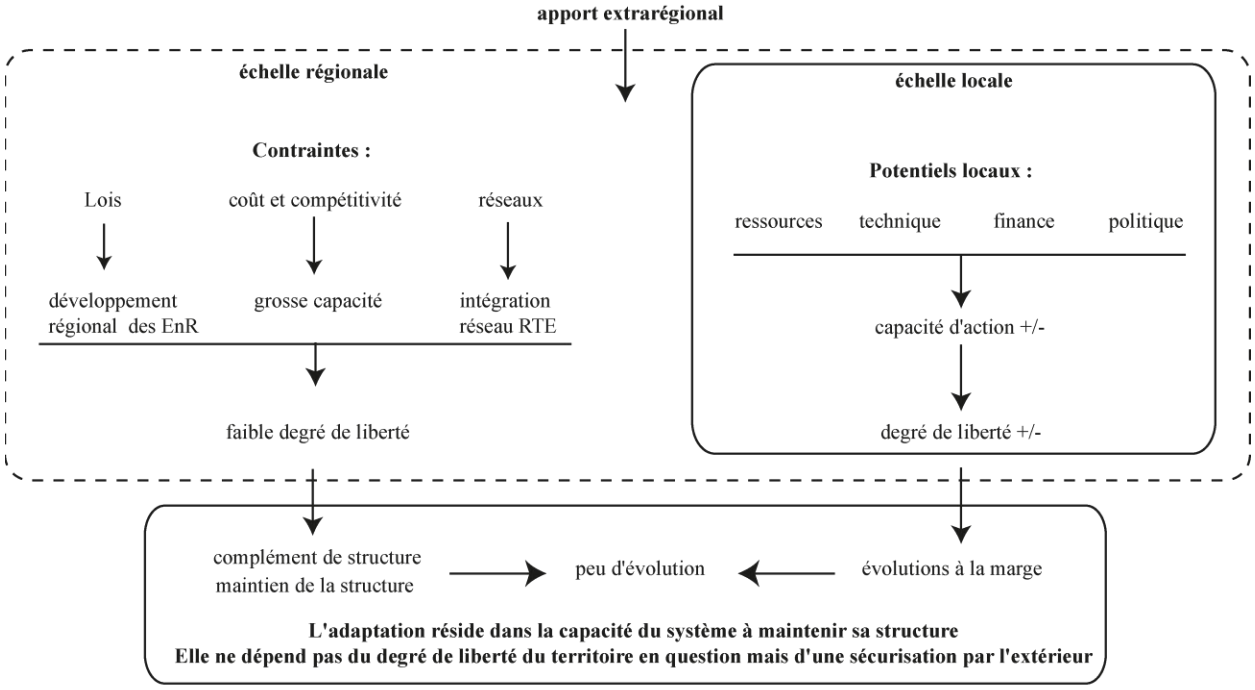
3.2 Modèles spatiaux et modèles de transition

Sur la base des modélisations graphiques proposées dans la première partie de ce chapitre, et à la lumière des analyses présentées dans la seconde, on peut s'interroger sur des trajectoires possibles d'évolution du système énergétique régional. Nous proposons d'explorer trois scénarios de transition. Le premier est décrit comme un modèle de transition tendanciel qui projette les dynamiques le long de la trajectoire dominante actuelle. Le second développe une projection théorique d'une structure spatiale d'un système énergétique distribué et multi-scalaire. Le troisième laisse place à l'incertitude en interrogeant l'impact d'un changement de conjoncture tel que l'exploitation d'hydrocarbures non conventionnels.

3.2.1 Modèle de transition tendanciel

Dans le modèle tendanciel, un certain nombre de contraintes pèsent lourdement sur la capacité d'action. Les injonctions nationales et européennes incitent au développement des énergies renouvelables mais des contraintes techniques de raccordement aux réseaux, et des contraintes en termes de coût d'installation et de compétitivité freinent leurs déploiements dans les territoires. La priorité va vers des infrastructures à forte capacité de production qui complètent les productions nationale et régionale. Dans ce cas, la transition énergétique s'inscrit dans un mouvement stable de *Path dependence* (Cf. 2.2.3) et le degré de liberté dans l'évolution des structures spatiales est faible. La mise en œuvre de la transition passe alors majoritairement par des appels d'offres nationaux auxquels répondent de grands groupes industriels. La structure du territoire n'évolue pas, elle se maintient. On peut considérer dans ce cas que l'adaptation du système énergétique passe par une augmentation de l'offre énergétique globale intégrée aux structures existantes. Les structures ont un effet « attracteur » de dépendance au lieu. La production est augmentée et diversifiée dans des espaces déjà producteurs.

Le schéma conceptuel présenté dans la figure 28 décrit cette trajectoire tendancielle en mettant aussi en évidence qu'à un niveau plus local, des potentiels en termes de ressources, de capacités technique et financière et de volontés locales peuvent faire varier le degré de liberté.



Réalisation : M.Chabrol, 2016, UMR ESPACE, Université d'Avignon

Figure 28. Schéma conceptuel de l'évolution du système énergétique selon une trajectoire tendancielle

Le passage entre la situation initiale et le modèle tendanciel dans la figure 30 montre une représentation spatiale de cette trajectoire en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. La structure spatiale du système énergétique régional se complète par la sécurisation du réseau HT vers l'Est et dans la vallée de la Durance, le développement du gaz dans le bassin industriel de Fos/Mer et le développement de la production photovoltaïque.

On comprend que dans ce scénario, le degré de liberté dans l'évolution des structures se situe à l'échelon local, dans la différenciation spatiale des capacités et des volontés locales de mise en œuvre de la transition énergétique. Il est donc possible de ce point de vue d'envisager une suite à ce modèle qui dépend de l'activation de ces degrés de liberté. Le schéma conceptuel de la figure 29 synthétise donc une trajectoire tendancielle (cf. *supra*) et une trajectoire qualifiée ici d'engageante. Ce modèle admet qu'un développement diffus d'unités de production locales d'énergie est possible en fonction de l'importance des volontés et des capacités techniques et financières locales de mise en œuvre. Le modèle engageant de la figure 30 traduit spatialement cette trajectoire en mettant en évidence la forte inertie de la structure spatiale du système énergétique régional.

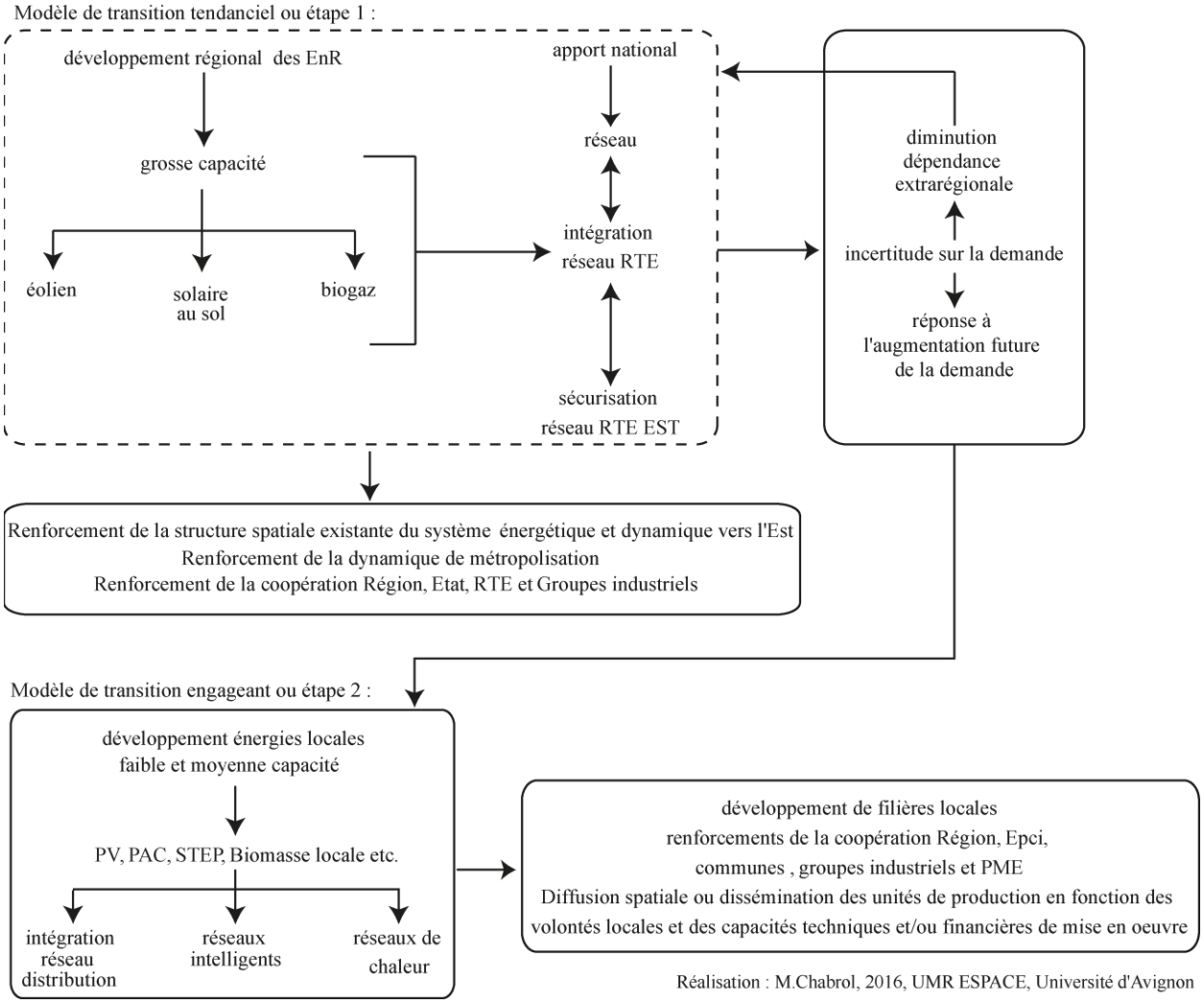


Figure 29. Schéma conceptuel de l'évolution du système énergétique selon une trajectoire tendancielle intégrant la variabilité des capacités d'action locales

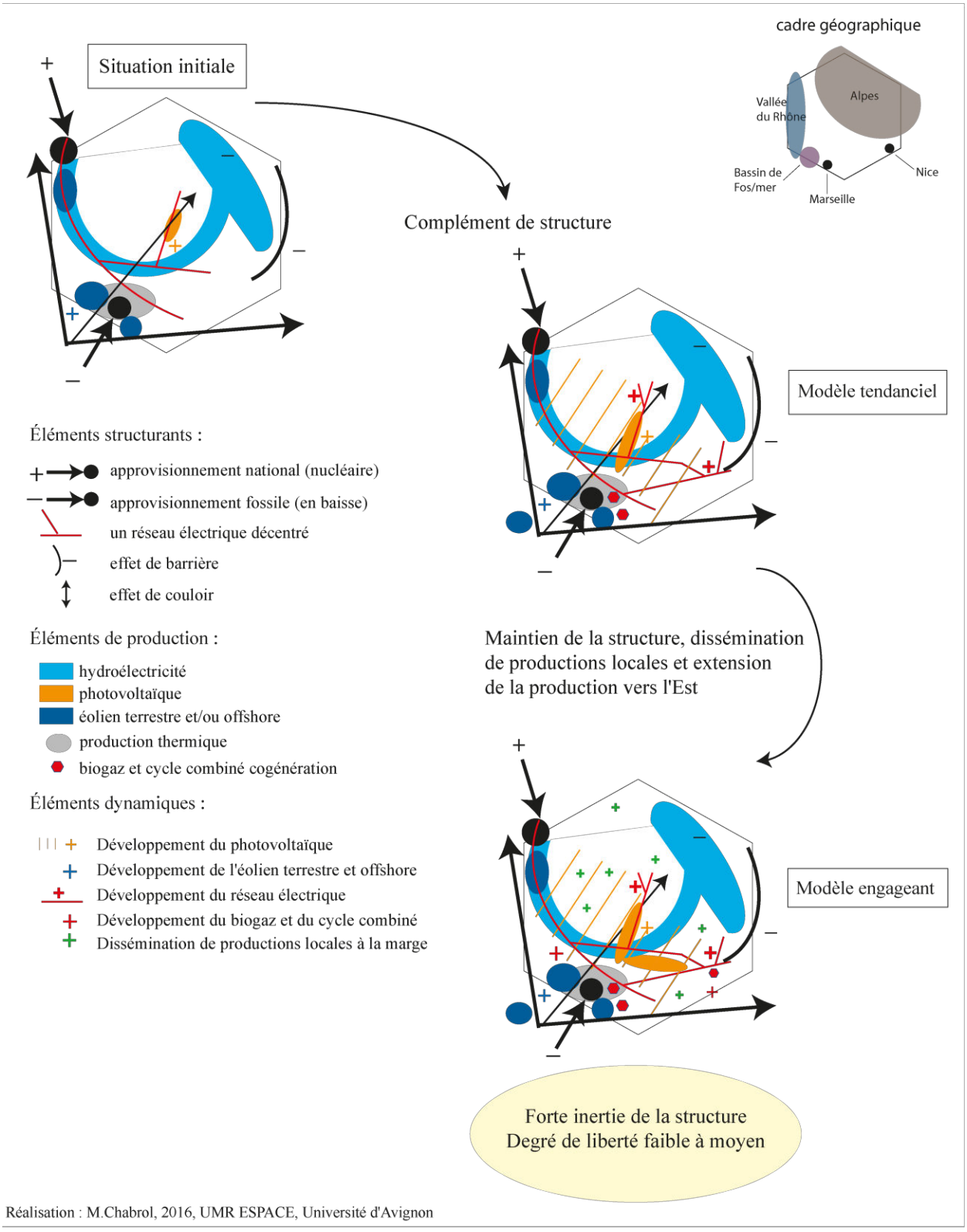


Figure 30. Modèle d'évolution du système énergétique de la région PACA selon une trajectoire tendancielle

3.2.2 Modèle de transition théorique distribué à l'équilibre

Ce modèle considère la contrainte de la demande en énergie comme une potentialité qui ouvre un degré de liberté dans la reconfiguration spatiale du système énergétique.
Il s'agit de concevoir une redistribution spatiale des lieux de production en fonction de la demande. Il en résulte une organisation scalaire et hiérarchisée du système d'approvisionnement. En d'autres termes, ce modèle revient à s'appuyer sur l'organisation des réseaux urbains pour concevoir un système d'approvisionnement qui suit la même structure.

La capacité des unités de production est alors proportionnelle à la demande. Cette distribution équilibrée des lieux de production en fonction de la demande augmente les capacités d'adaptation de l'ensemble du système face à une diminution des apports extrarégionaux. Les espaces de faible et de moyenne demande sont également moins sensibles aux variations de la consommation des espaces où celle-ci est élevée (Figure 31)

La représentation graphique proposée dans la figure 32 décrit cette distribution scalaire des lieux de production en fonction de la demande. La distribution spatiale des lieux de production reste théorique et hypothétique, et n'a d'autre but que de servir cette démonstration. Ce modèle distribué à l'équilibre correspond à une situation théorique optimale dans laquelle l'adéquation entre les capacités locales de production et la consommation est possible. Mais il peut aussi être pensé comme un modèle intermédiaire qui articule un système d'approvisionnement national et régional alimenté par les énergies fossiles et nucléaires et un système d'approvisionnement local et multi-scalaire basé sur les énergies renouvelables. La figure 32 montre en ce sens une déclinaison de ce modèle à deux niveaux d'échelle (régional et local).

De ce point de vue, ce modèle correspond à une étape sur la trajectoire de la transition énergétique vers les énergies renouvelables. Il décrit donc en cela ce que devrait être la trajectoire tendancielle théorique. Or l'analyse précédente a montré comment les structures spatiales préexistantes exercent des contraintes sur ce modèle et augmente les écarts entre les objectifs visés et l'évolution actuelle du système.

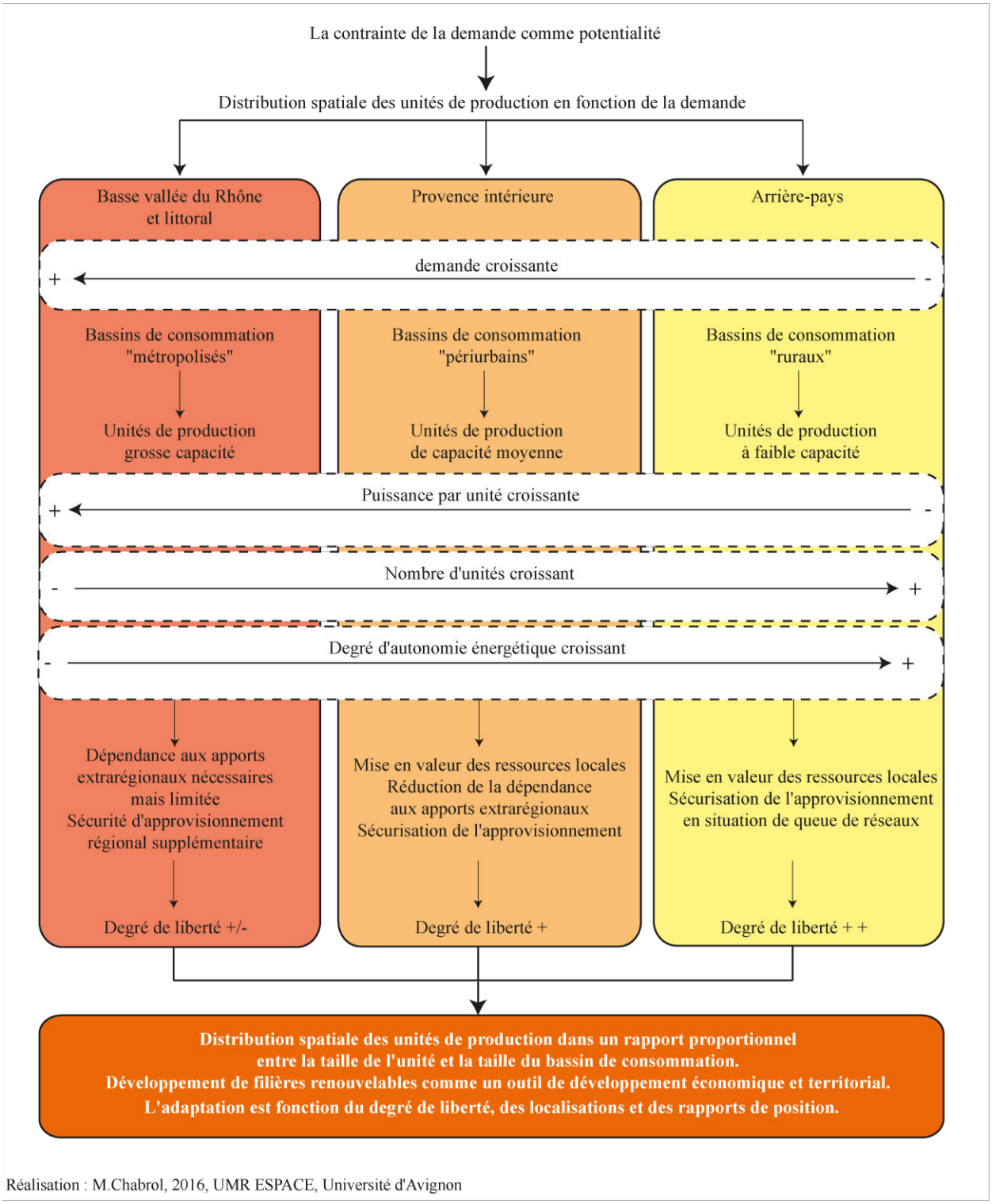


Figure 31. Schéma conceptuel de l'évolution du système énergétique selon une trajectoire théorique de structuration scalaire des approvisionnements

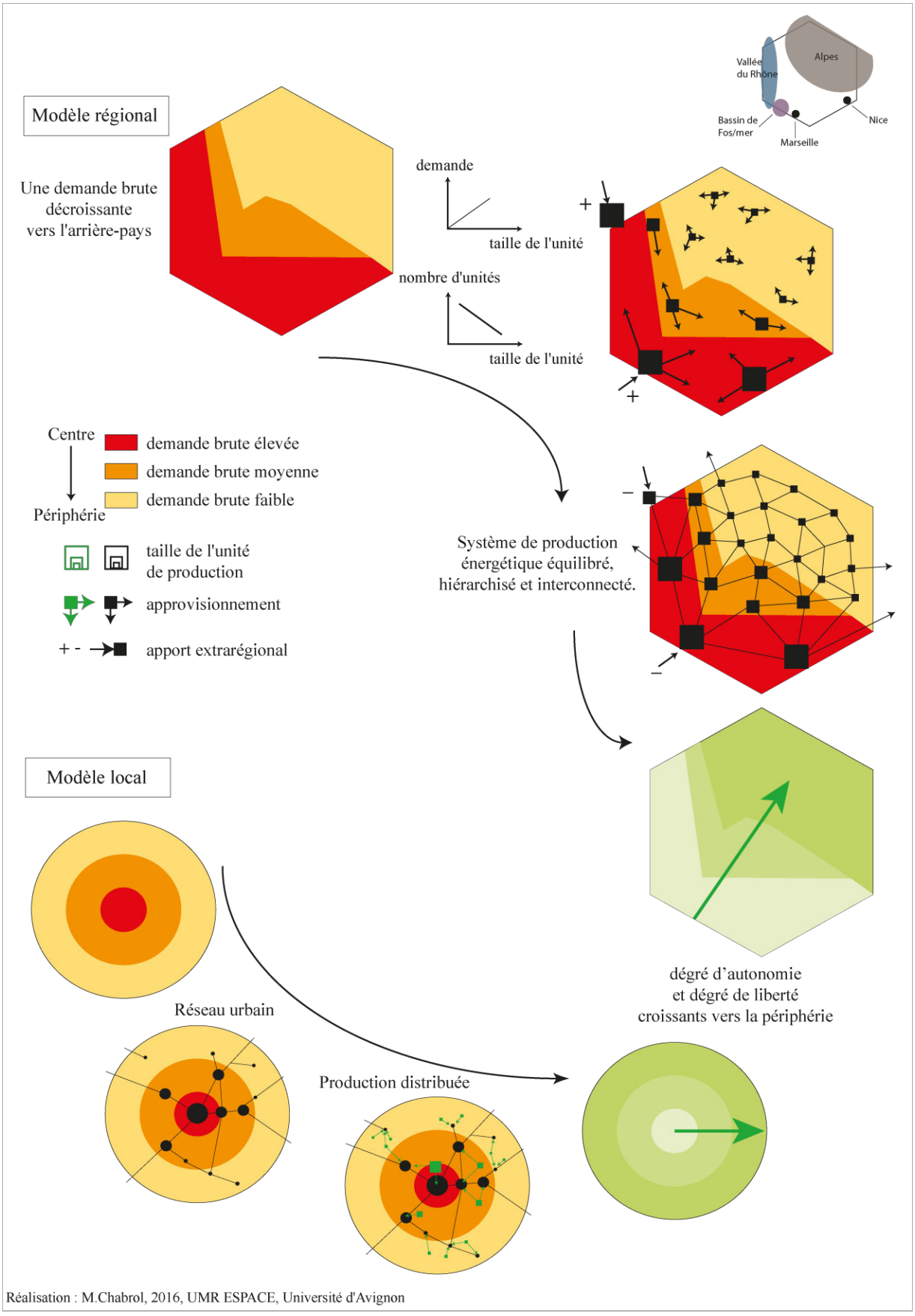


Figure 32. Modèle d'évolution du système énergétique de la région PACA selon une trajectoire théorique de structuration scalaire des approvisionnements

3.2.3 Modèle de transition avec changement de conjoncture

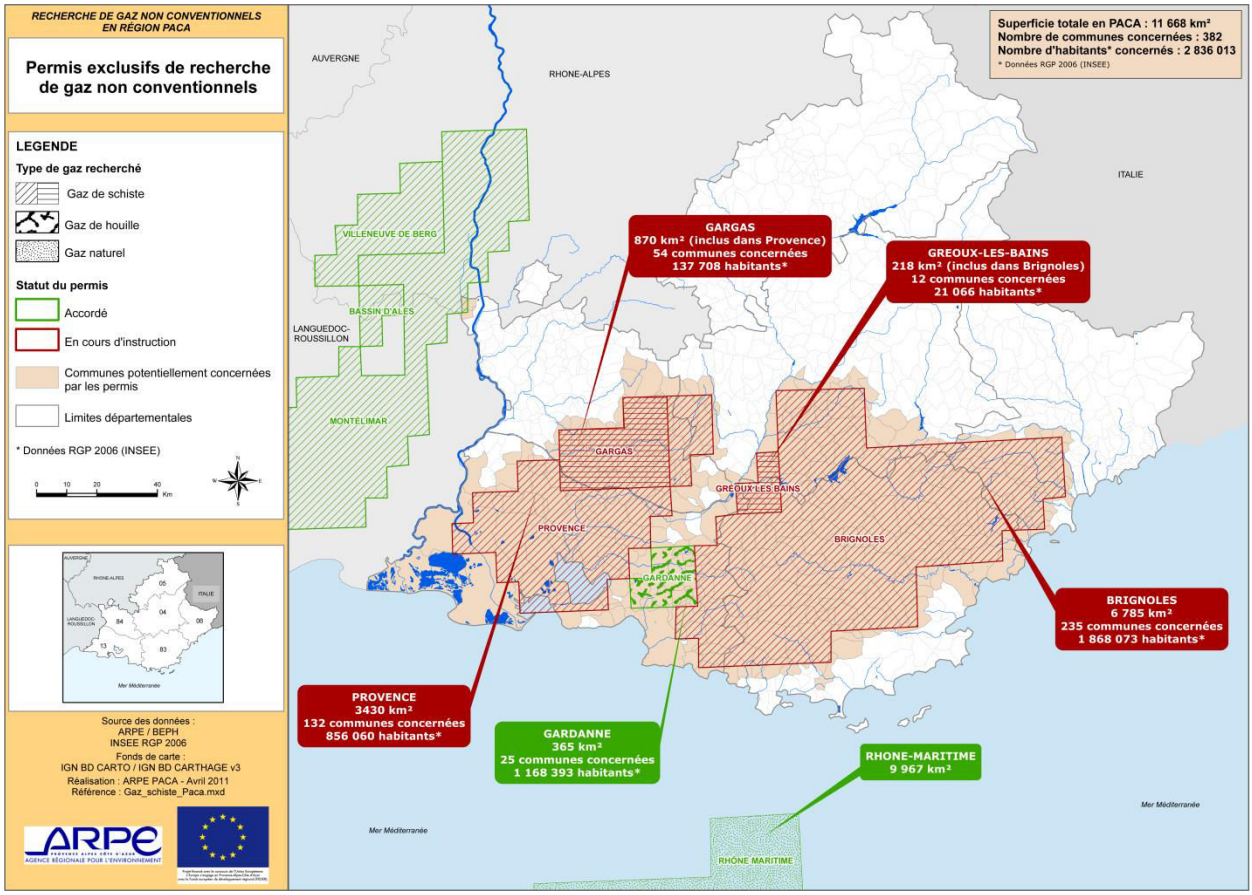
Si les deux modèles précédents acceptent l'hypothèse d'une continuité dans les choix politique et institutionnel de privilégier une transition énergétique par le développement des énergies renouvelables, celle-ci reste soumise à un contexte conjoncturel très fort qui implique une part d'imprévisibilité et d'incertitude. Un changement de conjoncture, à n'importe quelle échelle et de différentes natures (économique, innovation technologique, catastrophe écologique, choix idéologiques), pourrait avoir des répercussions importantes sur les trajectoires de transition énergétique et sur l'évolution des territoires.

Depuis maintenant quelques années, les hydrocarbures non conventionnels prennent une place grandissante dans l'approvisionnement mondial en hydrocarbures[22]. Si l'impact de leur exploitation sur l'évolution des prix du gaz et du pétrole est déjà une réalité qui peut diminuer la compétitivité des formes modernes d'énergies renouvelables, leur mise en valeur peut également influencer les trajectoires de transition énergétique.

En France, la loi 2011-835 du 13 juillet 2011, dite « *loi Gaz de schiste* », promulgue l'interdiction d'explorer et d'exploiter des mines d'hydrocarbures liquides ou gazeux en utilisant la technique de fracturation hydraulique jugée néfaste pour l'environnement. Suite à cette loi, les entreprises ayant déposé une demande de permis de recherche s'engagent à ne pas utiliser cette technique. Une phase d'exploration est donc en cours en France. Elle se réalise dans le cadre des permis exclusifs de recherche délivrés par l'État. Une fois accordés, ces permis ont pour objectif une meilleure connaissance du sous-sol et des gisements potentiels, et des puits de reconnaissance sont réalisés.

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est concernée par quatre demandes de permis exclusifs de recherche qui ont été déposées pour une surface représentant près de 11 300 km^2. Un permis a d'ores et déjà été accordé en 2007 à la société *Heritage Petroleum, European Gas LTD* dans la région de Gardanne dans les Bouches-du-Rhône. Plus d'un tiers de la région PACA est donc concerné par la recherche d'hydrocarbures non conventionnels (Carte 13).

[22] On désigne couramment par hydrocarbures non-conventionnels, les hydrocarbures suivants : sables bitumineux, huiles lourdes et extra-lourdes, pétroles et gaz de réservoirs compacts, schistes bitumineux, pétroles et gaz de schiste (IFPEN, 2012)



Carte 13. Permis exclusifs de recherche de gaz non conventionnels en région PACA (accordé et en cours d'instruction)

L'exploitation d'hydrocarbures dans cette région orienterait par conséquent la structure spatiale du système énergétique régional sur une autre trajectoire. La figure 33 présente une évolution possible en prenant appui sur le modèle correspondant à la situation actuelle. La présence d'un bassin sédimentaire, d'infrastructures industrielles équipées pour le traitement et la transformation des hydrocarbures, d'un bassin minier historique et de l'oléoduc sud-européen constituent un contexte optimal à un changement endogène. Ce changement pourrait se traduire par un renforcement très fort des dynamiques de métropolisation et des éléments structurants l'organisation spatiale du territoire régional, en particulier la dissymétrie Est/Ouest, avec le renforcement de l'effet de couloir de la vallée du Rhône et le renforcement du bassin de Fos/Mer comme place forte de l'industrie (Figure 33).

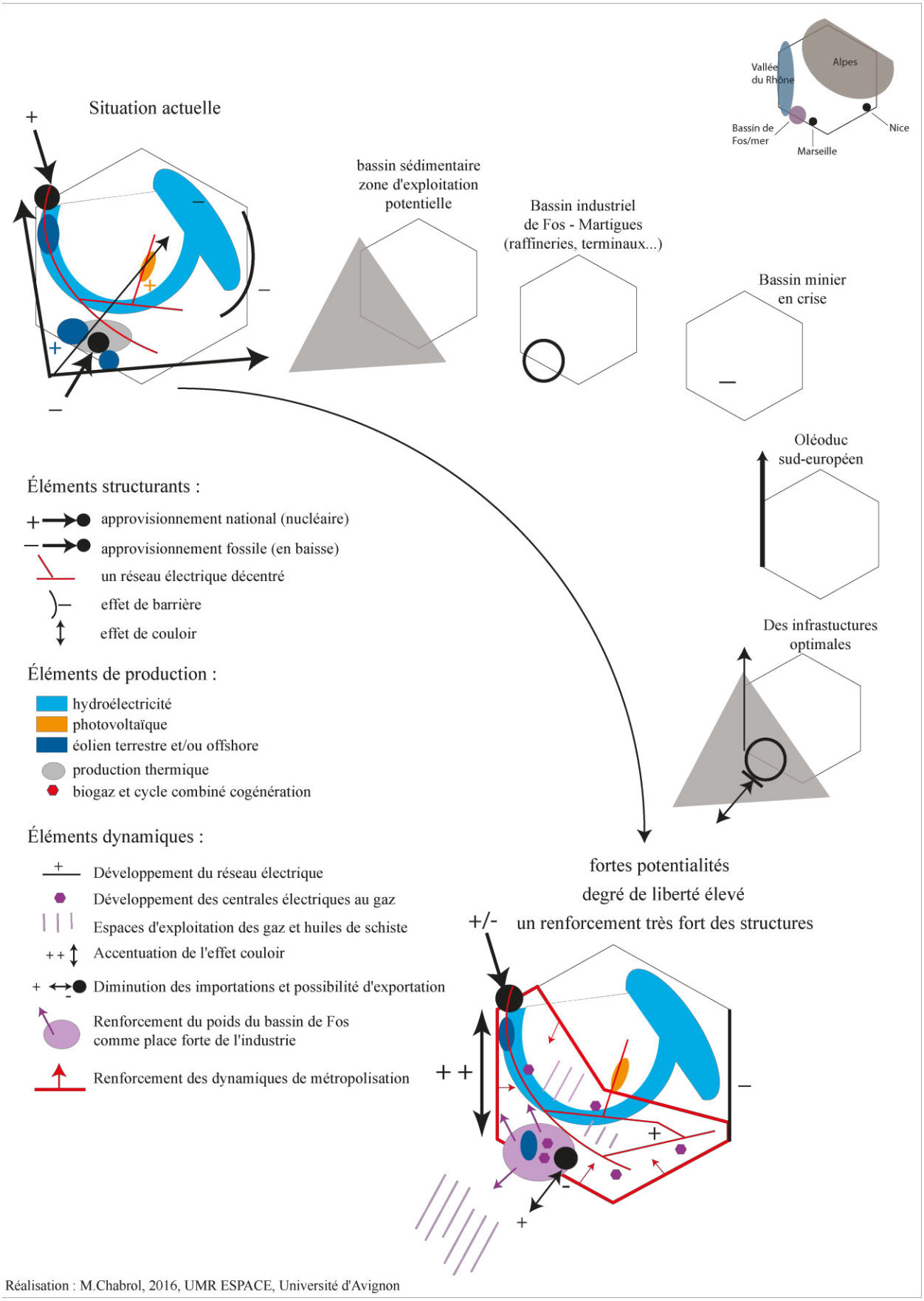


Figure 33. Modèle d'évolution du système énergétique de la région PACA selon une trajectoire de changement conjoncturel : l'exemple des hydrocarbures non conventionnels

Un processus de restructuration du système énergétique régional existe bien en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Il correspond à un renforcement du maillage énergétique du territoire en s'appuyant sur la structure existante : il y a bien une restructuration, mais cette dynamique est une dynamique marginale d'optimisation de l'approvisionnement en énergie des territoires qui ménage les structures en place, voire les conforte.

Le mix énergétique envisageable dans cette région montre une dépendance forte aux structures existantes. Aussi l'enjeu de la transition énergétique se situe davantage dans l'articulation entre les grands réseaux préexistants et de possibles réseaux locaux et multi-échelle. Doit-on en effet considérer le développement des énergies renouvelables comme une production supplémentaire nécessaire pour accroître et sécuriser l'approvisionnement des espaces où la demande est la plus forte ? Ou bien comme une production calibrée pour une demande locale et scalairement structurée (faible production pour faible demande, production moyenne pour une demande modérée, etc.) ?

L'organisation spatiale des territoires pèse sur l'orientation de leur trajectoire. Elle influe sur le degré de liberté dans leur évolution. Ce chapitre a mis en avant le poids des structures spatiales dans l'évolution des territoires, de leur effet « attracteur » et de l'effort nécessaire pour influer sur leur mouvement inertiel. Les espaces où la demande énergétique est faible apparaissent comme ceux où le degré de liberté dans la mise en œuvre de la transition énergétique est le plus important et pourrait donner lieu à des changements endogènes. Mais dans le même temps, la transition énergétique est soumise à un contexte conjoncturel très fort qui implique une part d'imprévisibilité.

Chapitre 5
Territorial lock-in : la territorialisation et le développement durable inégal

La question de la transition énergétique se pose aujourd'hui aux échelles régionale et locale alors que le problème de l'approvisionnement et du transport de l'énergie est encore une responsabilité nationale dans la plupart des pays. La transition énergétique implique alors de reconsidérer les rapports entre production et consommation d'énergie tout en évaluant les potentiels de production et de mise en œuvre des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Le territoire est en ce sens une instance déterminante de réflexion et la question de son étendue est ouverte. Aujourd'hui, le rôle des collectivités territoriales en matière de planification énergétique en France est fortement réaffirmé et passe par l'intégration des enjeux de la transition énergétique dans les documents de planification locale. L'élaboration des Schémas Régionaux Climat, Air, Énergie (SRCAE) et des Plans Climat Air Énergie Territoriaux (PCAET) engage les territoires français dans une démarche de mise en œuvre de la transition énergétique.

Ce cinquième chapitre montre comment l'analyse de ce processus dans l'espace régional Provence-Alpes-Côte d'Azur révèle des capacités et des opportunités de mise en œuvre locale de la transition énergétique différenciées susceptibles de générer ce qu'on peut qualifier de développement durable inégal. La territorialisation est donc présentée dans ce chapitre comme un élément de *Path dependence* où les décisions passées en matière de planification énergétique peuvent induire des trajectoires allant dans le même sens et desquelles il paraît difficile de se détacher.

1 Mise en politique de la transition énergétique et planification régionale de l'énergie en Provence-Alpes-Côte d'Azur

Nous assistons en France, comme dans d'autres pays européens, à une reconfiguration de la gestion de l'énergie qui se traduit par une décentralisation des compétences vers les collectivités territoriales et un effacement relatif de l'État dans ce domaine. La région Provence-Alpes-Côte d'Azur participe de ce mouvement. Cette partie examine les modalités d'une déclinaison régionale d'une politique de transition énergétique.

1.1 Collectivités territoriales et énergie, vers une décentralisation des politiques énergétiques

Si l'énergie reste un domaine relevant largement de la compétence de l'État, tant du point de vue de la production que de la distribution, nous assistons toutefois à une reconfiguration des échelles de gestion et de décision. La libéralisation européenne des marchés du gaz et de l'électricité et le développement des productions d'origines renouvelables en sont les moteurs. Décideurs et gestionnaires locaux sont en effet de plus en plus sollicités et se voient attribuer de nouvelles compétences en matière énergétique. Cette tendance est visible en France, État de tradition centralisatrice. Le Centre d'Étude et de Prospective Stratégique insiste ainsi sur le rôle des collectivités territoriales comme des acteurs majeurs d'une politique énergétique dont nombre de mesures peuvent s'inscrire dans leurs domaines de compétence. Magnin (1995) précise en effet qu'elles sont à la fois productrices d'énergies renouvelables, autorités concédantes du service public de distribution, consommatrices devant être exemplaires, aménageuses de l'espace urbain et du territoire et incitatrices dans la sensibilisation et l'éducation à l'environnement. Si les autorités locales ont joué un rôle historique dans la gestion des ressources du territoire lorsque la proximité aux ressources était indispensable, l'utilisation des énergies fossiles facilement transportables a rendu cette logique obsolète. Mais le développement récent des énergies renouvelables et les injonctions de maîtrise de la consommation d'énergie reposent la question du rôle des collectivités territoriales dans la gestion de l'énergie. La compétence d'aménagement du territoire constitue à l'évidence un élément indispensable pour appréhender et anticiper les consommations énergétiques, en particulier dans le domaine des transports, éminemment lié aux choix d'aménagement et aux structures spatiales qu'ils impliquent ; tout comme celle de développement économique pour les technologies renouvelables. Mais peut-on réellement pour autant parler de politiques énergétiques locales ?

1.1.1 Politiques énergétiques et compétences locales

Les politiques énergétiques coordonnent des actions à différents niveaux. Le contexte international géopolitique, économique et social ainsi que l'organisation générale de l'État déterminent les politiques nationales. En France, les réponses aux enjeux mondiaux sont généralement proposées au niveau national, puis déclinées aux échelons locaux, en fonction des compétences attribuées aux acteurs du secteur (Cf. chapitre 2). Après la Seconde Guerre

mondiale, l'État procède à une vaste campagne de nationalisation et met en place une politique nationale de l'énergie. En 1946, la loi de nationalisation de l'électricité et du gaz donne le monopole à un exploitant pour la production, le transport, la distribution, l'importation et l'exportation d'électricité et de gaz. Les 1 450 entreprises locales de distribution sont nationalisées et leur regroupement donne naissance à Électricité de France et Gaz de France (EDF, 2016). Le système concessif est maintenu et les collectivités continuent à être propriétaires des installations, mais le concessionnaire leur est imposé (EDF pour l'électricité et GDF pour le gaz). Si cette nouvelle organisation permet d'établir la péréquation tarifaire sur l'ensemble du territoire national, elle enlève toute possibilité de négociation de contrat (Long, 2001). Dans la continuité, l'État nationalise l'industrie charbonnière en créant *Charbonnages de France*, entreprise placée sous tutelle du ministère de l'Industrie. La France se tourne ensuite vers l'énergie nucléaire afin de diversifier son bouquet énergétique et de sécuriser ainsi son approvisionnement. Si le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) est créé en 1945, la première production française d'électricité nucléaire ne sera pas réalisée avant 1958. Ces stratégies choisies par les différents gouvernements français après la Seconde Guerre mondiale ont privilégié des énergies nécessitant des stratégies globales sur de larges échelons de gestion. Ces choix ont construit une politique nationale de l'énergie s'inscrivant dans une volonté étatique centralisée qui domine encore aujourd'hui.

Cependant, les lois de décentralisation en France, la libéralisation des marchés de l'énergie dans l'Union européenne et la montée des préoccupations environnementales au cours de la fin du XX^{e} siècle marquent une redistribution des rôles dans les politiques énergétiques. Les échelons infra et supranationaux sont appelés à prendre une place de plus en plus importante. La décentralisation de la politique énergétique vers les échelons régionaux et locaux répond au souci d'adaptation à la libéralisation des marchés de l'énergie, d'une part, et aux objectifs de développement durable et de la protection de l'environnement, d'autre part (Ibrahim, De Sède, 2005). Les lois de décentralisation de 1982 et 1983, puis de 2004 ont transféré de nombreuses compétences aux collectivités territoriales. Les Régions se voient notamment confier des missions d'aménagement du territoire. D'autre part, la loi du 12 juillet 1999 relative au renforcement et à la simplification de la coopération intercommunale fixe de nouveaux cadres juridiques pour les regroupements intercommunaux et les Établissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) deviennent des échelons de gestion des services publics locaux. La loi d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire (LOADDT) de 1999 a par ailleurs confié aux Régions l'élaboration de Schémas Régionaux d'Aménagement et de Développement du Territoire (SRADDT, aujourd'hui SRADDET) qui fixe les orientations fondamentales, à moyen terme, du développement durable du territoire régional. Le Schéma de Services Collectifs de l'Energie définit enfin le cadre de la politique nationale de l'énergie, les objectifs d'exploitation des ressources locales d'énergies renouvelables et d'utilisation de l'énergie concourant à l'indépendance énergétique nationale, à la sécurité d'approvisionnement et à la lutte contre l'effet de serre. À cette fin, il évalue les besoins énergétiques prévisibles des régions, leur potentiel de production énergétique, leurs gisements d'économies d'énergie et les

besoins en matière de transport d'énergie. Si ces lois de décentralisation ne font pas systématiquement directement référence à l'énergie, elles permettent aux échelons locaux de participer pleinement aux politiques d'aménagement du territoire national tout en bénéficiant de structures juridiques pouvant par la suite permettre un éventuel transfert de compétences dans le domaine de l'énergie.

L'ouverture des marchés de l'électricité a également bousculé l'organisation du secteur de l'énergie et contribué à la redistribution des rôles des acteurs. En France, la loi du 10 février 2000, puis la loi du 3 janvier 2003 marquent la fin du monopole d'EDF et GDF tout en conservant les services publics de transport et de distribution. L'ouverture des marchés de l'électricité a autorisé les entreprises de transport et de distribution à étendre leur action sur l'ensemble du marché européen. Cette évolution a permis des économies d'échelle « *par le développement de gigantesques réseaux de distribution interconnectés, permettant de mettre en relation, au niveau européen, producteurs et consommateurs, dans une logique d'investissement minimal pour une rentabilité maximale* » (Chanard, 2008, p. 8). Si cela a permis une meilleure structuration des réseaux à l'échelle du continent, ce modèle demeure fragile. L'éloignement entre lieux de production et consommation engendre des pertes énergétiques et impose le développement de nouvelles infrastructures (lignes à haute tension) difficilement acceptées par les populations (De Sède, Ibrahim, 2007). De nouveaux acteurs apparaissent dans ce contexte qui interroge sur la capacité des collectivités territoriales à définir de réelles politiques énergétiques locales (Long, 2001).

1.1.2 Transition énergétique et redistribution des compétences locales

La loi pour la transition énergétique réaffirme le rôle des collectivités territoriales dans la mise en place de politiques de développement des énergies renouvelables et de maîtrise de l'énergie. Les collectivités territoriales s'engagent ainsi au travers des documents de planification introduits dans la loi Grenelle. L'élaboration des Schémas Régionaux Climat, Air, Énergie (SRCAE) et des Plans Climat Air Énergie Territoriaux (PCAET), contenus dans les articles 68 et 75 de cette loi, engagent les territoires français dans une démarche de mise en œuvre de la transition énergétique. Les SRCAE sont désormais intégrés dans les Schéma Régionaux d'Aménagement de Développement Durable et d'Egalité des Territoires (SRADDET) et deviennent prescriptifs. L'importance de ces documents et le rôle de la Région, définie comme « *l'échelon pertinent pour coordonner les études, diffuser l'information et promouvoir les actions en matière d'efficacité énergétique* » (MEDDE, 2015), ont été réaffirmés et la loi pour la transition énergétique demande à l'ensemble des politiques publiques d'intégrer les objectifs qu'elle contient. Les collectivités territoriales ont ainsi aujourd'hui pour rôle de définir et réguler la ressource énergétique, de définir la production d'énergie renouvelable, de limiter les consommations liées au bâti ou aux transports, de lutter contre la précarité énergétique et de structurer les filières économiques (Cf. loi TECV). Les Régions doivent fixer les objectifs et un cadre général de stratégie. Les intercommunalités doivent, quant à elles, coordonner et mettre en œuvre les actions de transition énergétique à travers les PCAET qui relèveront dorénavant

exclusivement de l'échelon intercommunal. Elles doivent aussi intégrer dans les documents d'urbanisme (Schéma de Cohérence Territoriale – SCoT et Plan Local d'Urbanisme – PLU) les orientations du SRADDET et du PCAET et les prendre en compte. Les acteurs de l'aménagement du territoire et de la planification locale doivent aujourd'hui repenser la manière d'intégrer les questions énergétiques dans les territoires. Si l'exercice de planification constitue, depuis les orientations données par la loi Grenelle, un cadre pour intégrer les problématiques de l'énergie et du climat dans les politiques publiques territoriales, la loi pour la Transition Energétique et la Croissance Verte renforce le rôle de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire (FNAU, 2015). Les Régions sont donc appelées à jouer un rôle de plus en plus important dans la structuration des politiques énergétiques. Mais en règle générale, on constate une grande diversité entre les Régions dans leur niveau d'implication dans une politique énergétique décentralisée (Metreau, Laponche, 2003). Les actions sont donc différenciées selon les Régions et dépendent en grande partie de la volonté et de l'implication des acteurs locaux.

Depuis 2014, la loi MAPAM[23], la loi NOTRe[24] et la loi pour la transition énergétique et la croissance verte modifient le paysage institutionnel local. Les politiques publiques locales disposent désormais d'un nouveau cadre d'action résultant d'un double mouvement tenant d'une part à la réorganisation des périmètres géographiques des territoires et d'autre part à la redéfinition du contenu de leurs missions opérationnelles. Le tableau 9 synthétise les évolutions des compétences entre échelons territoriaux.

Les politiques énergétiques nécessitent par ailleurs de dépasser la séparation entre les niveaux de gouvernance et la sectorisation thématique des actions. Il apparaît que la territorialisation de la transition énergétique appelle au développement de visions transversales et systémiques qui demande coordination des acteurs et des échelles de gouvernance. Les politiques énergétiques semblent ainsi se relocaliser. Des projets de territoire s'organisent autour de la dimension environnementale et de la problématique énergétique. La mise en place de politiques locales transversales dépassant les clivages traditionnels, tenant compte de tous les secteurs d'activité et appréhendant de manière globale l'aménagement du territoire paraît être une condition à la mise en politique de la transition énergétique dans les territoires. Mais cette transversalité devra s'accommoder de la complexité liée à l'emboîtement des échelles de gouvernance, à la multiplicité des acteurs concernés, et au chevauchement des territoires d'application.

[23] Loi de Modernisation de l'Action Publique territoriale et d'Affirmation des Métropoles du 27 janvier 2014
[24] Loi portant la Nouvelle Organisation Territoriale de la République du 7 août 2015

	Communes	EPCI	Départements	Régions
Gouvernance et planification	Création d'agences locales de l'énergie et du climat (ALEC)	Réalisation des PCAET uniquement au niveau intercommunal. Suivi et évaluation tous les 6 ans		Définition des statuts et missions des agences régionales de l'environnement. SRCAE complété par un schéma d'efficacité énergétique et un plan régional biomasse
Urbanisme et aménagement	Le maire peut accorder des dérogations aux règles d'urbanisme qui feraient obstacle aux travaux d'isolation. Les PLU prennent en compte les objectifs du SRADDET et du SRCAE	Les SCoT prennent en compte les objectifs du SRADDET et du SRCAE		Élaboration du SRADDET et du SRCAE. Définition d'objectifs obligatoires et de règles (dans la hiérarchie des normes en matière d'urbanisme)
Habitat et logement	Certaines règles des PLU peuvent être ignorées pour faciliter la rénovation énergétique	Mise en place de réseaux de plates-formes de rénovation énergétique	Résorption de la précarité énergétique	Mise en place d'un programme régional pour l'efficacité énergétique
Mobilité et transports	Création de zones à circulation restreinte. Installation de points de charge pour véhicules électriques (incitation). 20% de véhicules propres dans la flotte publique	Création de zones à circulation restreinte. Installation de points de charge pour véhicules électriques (incitation). 20% de véhicules propres dans la flotte publique		20% de véhicules propres dans la flotte publique. Chef de file de l'intermodalité
Déchets et économie circulaire	Perdent la compétence collecte et traitement. Démarche de lutte contre le gaspillage alimentaire dans les cantines scolaires	Prennent la compétence collecte et traitement	Planification des déchets transférée aux Régions	Plan régional de prévention et de gestion des déchets. Promotion de l'écologie industrielle et territoriale
Énergie	Peuvent exploiter ou faire exploiter toute installation EnR. Participation au capital d'une société anonyme dont l'objet social est la production d'EnR	Coordination de la transition énergétique dans leur territoire par le PCAET. Peuvent exploiter ou faire exploiter toute installation EnR. Participation au capital d'une société anonyme dont l'objet social est la production d'EnR	Peuvent exploiter ou faire exploiter toute installation EnR. Participation au capital d'une société anonyme dont l'objet social est la production d'EnR	Chef de file en matière de climat, d'énergie et de qualité de l'air. Action conjointe avec le représentant de l'État en Région. Peuvent exploiter ou faire exploiter toute installation EnR. Participation au capital d'une société anonyme dont l'objet social est la production d'EnR

Sources : d'après DREAL PACA, Région PACA, ADEME, 2015

Tableau 9. Évolution des compétences locales par grands secteurs d'intervention

1.2 Territorialisation de la transition énergétique en Provence-Alpes-Côte d'Azur, vers une normativité des référentiels statistiques dans l'aménagement du territoire

1.2.1 Politiques énergétiques en région PACA et standardisation des indicateurs de transition

La politique de transition énergétique en Provence-Alpes-Côte d'Azur s'articule autour de trois éléments clés : Le SRCAE et sa territorialisation, le programme AGIR et l'Observatoire Régional de l'Énergie du Climat et de l'Air (ORECA). L'Observatoire Régional de l'Énergie du Climat et de l'Air a été créé en 2001 pour accompagner et évaluer les politiques publiques énergétiques régionales par l'observation de l'évolution du secteur de l'énergie. Ses actions se répartissent entre la réalisation d'un bilan énergétique annuel, la réalisation d'études spécifiques dans une visée d'aide à la décision et le soutien aux structures à la recherche de données statistiques sur l'énergie pour la réalisation d'études, des Plans Climat, etc. Il participe au suivi de la mise en place et de la territorialisation du SRCAE et réunit près d'une vingtaine d'acteurs dont les acteurs majeurs du secteur de l'énergie en région[25] (Figure 34).

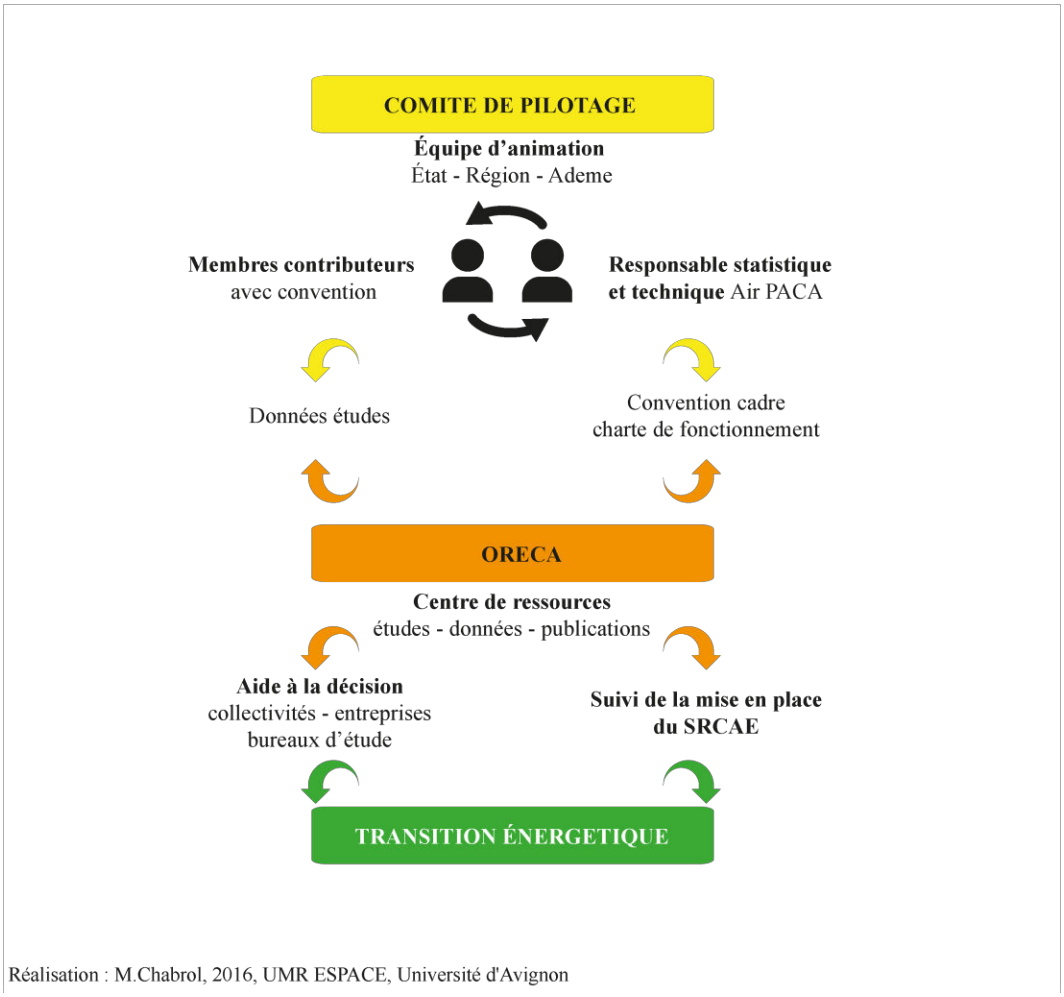


Figure 34. Organisation et mission de l'Observatoire Régional de l'Énergie, du Climat et de l'Air (ORECA)

[25] GRDF, CNR, ENGIE, EDF, E-ON, ERDF, METEOFRANCE

En 2006, la Région a lancé le dispositif Action Globale Innovante pour la Région (AGIR) visant l'accompagnement technique et financier aux projets qui luttent contre le changement climatique grâce à une meilleure gestion de l'énergie. Ce dispositif prévoyait à l'origine une enveloppe de 70 millions d'euros sur quatre ans et s'est traduit dans les faits par une dépense de 60 millions entre 2007 et 2010 et 48 millions entre 2011 et 2015. Ce programme fonctionne sur le principe des appels à projets et se décline autour de cinq axes : *AGIR avec les territoires* (volet aménagement, planification et urbanisme), *AGIR pour le bâtiment durable méditerranéen* (volet architecture, rénovation), *AGIR par l'exemple* (volet démarches écoresponsables, sensibilisation à l'environnement, etc.), *AGIR avec les filières renouvelables et l'innovation* (volet production et distribution d'énergie) et *AGIR avec le grand public* (volet démocratie participative, initiatives citoyennes etc.).

Enfin, suite à la loi Grenelle de 2010, la Région s'est investie dans une démarche d'élaboration du SRCAE sur deux années. Sa construction s'est faite dans une logique de collaboration continue entre les services régionaux et les services préfectoraux, et dans une démarche de concertation et d'échange avec le grand public, les entreprises, le monde de la recherche, de l'ingénierie et de la société civile[26]. La Région s'est en effet impliquée dans une démarche de démocratie participative en parallèle du débat national sur la transition énergétique relatif au projet de loi qui suivra. Des débats publics régionaux sur la transition énergétique et sur l'élaboration du SRCAE ont maillé l'ensemble du territoire pendant six mois jusqu'à l'adoption du SRCAE et son arrêté définitif par les services de l'État pendant l'été 2013.

Les objectifs du SRCAE présentés dans le tableau 10 donnent lieu à 46 orientations transversales, sectorielles et thématiques. Les orientations transversales visent essentiellement à renforcer l'intégration de la question énergétique dans les démarches de planification locale. Les orientations sectorielles appellent à mobiliser les gisements d'économie d'énergie ou de production EnR dans les transports et l'urbanisme, le secteur du bâtiment, de l'industrie, de l'agriculture et de la forêt. Les orientations thématiques s'attachent au développement de la filière énergies renouvelables, à l'amélioration de la qualité de l'air et l'adaptation au changement climatique notamment sur la question des risques naturels.

[26] À ce propos l'Institut Négawatt a réalisé en 2012 un scénario régionalisé 100% renouvelable afin d'alimenter la démarche prospective du SRCAE.

Objectifs du SRCAE	2007 (référence)	2015	2020	2030
Consommation finale d'énergie	1,3 Mtep		Moins 13%	Moins 25%
Consommation d'énergie par habitant	2,7 tep		Moins 20%	Moins 33%
Émissions de GES	47,7 Mteq CO_2		Moins 20%	Moins 35%
Part des EnR dans la consommation finale	10%		20%	30%
Émissions d'oxydes d'azote	123 000 tonnes		Moins 40%	
Émissions de particules fines	15 000 tonnes	Moins 30%		

Source : Région PACA, 2013

Tableau 10. Objectifs du SRCAE en région Provence-Alpes-Côte d'Azur

La figure 35 synthétise les faits marquants de la politique énergétique et du secteur de l'énergie en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Elle permet notamment d'observer l'influence des grandes décisions européennes et nationales sur le niveau local et régional, dans une perspective chronologique. Depuis le début de l'année 2014, le Région met en place une stratégie qu'elle définit comme une territorialisation du SRCAE. Cette action marque à la fois la volonté de décliner formellement les objectifs régionaux du SRCAE aux échelons territoriaux inférieurs, mais aussi de fournir à ces niveaux d'action, des outils et des orientations pour alimenter leur réflexion de mise en œuvre locale de la transition énergétique. La Région s'affiche également en chef de file par l'activation d'un programme d'appels à projets qui vise à soutenir financièrement des projets liés à la transition énergétique au niveau local.

Dans cette perspective, la Région a publié des *fiches territoriales* qui visent à accompagner les collectivités à se fixer leurs propres objectifs de maîtrise de la demande d'énergie et de production d'énergies renouvelables. Ces fiches synthétisent les principaux éléments de bilan énergétique et de production d'énergie renouvelable sur le territoire concerné. Elles présentent les résultats d'une déclinaison des objectifs du SRCAE, selon une répartition des objectifs régionaux tenant compte autant que possible des caractéristiques et des différences de potentiel des territoires. Cette réalisation se traduit donc par près de deux cents fiches, deux par territoires (une fiche synthèse et une annexe) qui couvrent l'ensemble des mailles territoriales de la région à l'exception des communes (Région, Départements, EPCI, Pays, Parcs Naturels Régionaux, Schémas de Cohérence Territoriale et mailles spécifiques du SRADDT[27]).

[27] Le Schéma Régional d'Aménagement et de Développement Durable du Territoire (SRADDT) est en effet doté de sa propre maille territoriale d'observation et de planification.

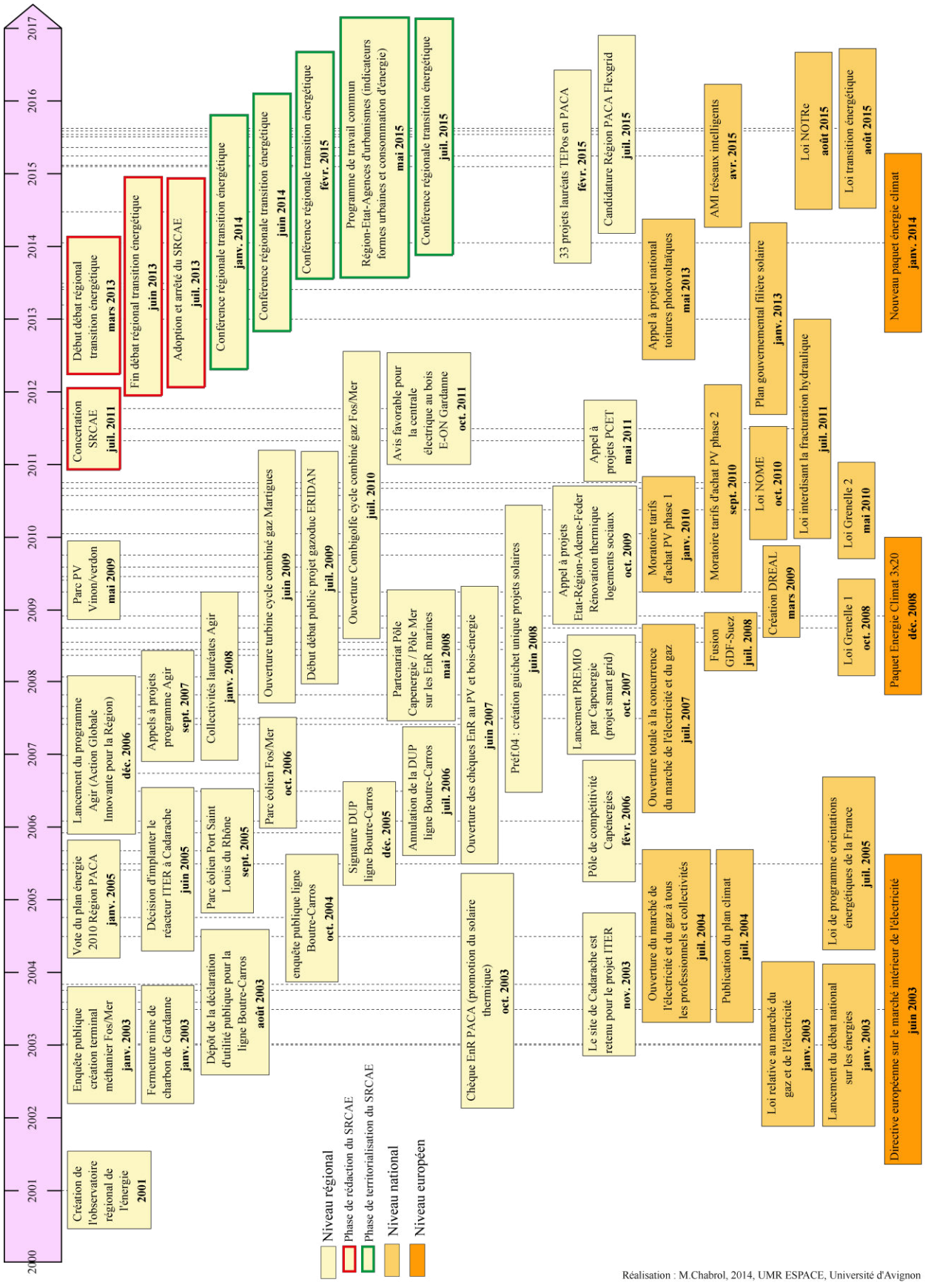


Figure 35. Action publique et énergie, les faits marquants en région PACA de 2001 à 2015

Ces résultats sont des éléments de référence dont les collectivités peuvent se saisir pour faire converger leur stratégie énergétique avec celle de la Région. Ces fiches sont diffusées par l'Observatoire Régional de l'Énergie, du Climat et de l'Air et servent au dialogue et à la concertation entre territoires, mais également aux services de l'État pour disposer d'ordres de grandeur en vue d'émettre un avis sur la compatibilité des documents de planification avec le SRCAE tels que les PCAET, SCoT, PLU, etc.

Dans ce contexte, la Région a été à l'initiative d'une convention avec les agences d'urbanisme pour mener une réflexion commune sur la construction d'indicateurs territorialisés de transition énergétique[28]. Cette démarche révèle une forme de standardisation de la mise en œuvre de la transition énergétique dans les territoires. La diffusion d'un même référentiel convoque en effet une standardisation des projets d'aménagements qui s'y réfèrent, notamment dans le cadre des diagnostics des Plan Climat Air, Énergie, Territoriaux (PCAET). Cette standardisation est d'autant plus forte qu'elle est imposée par la loi pour la transition énergétique qui demande une méthodologie commune de déclinaison des objectifs du SRCAE. Il s'établit ainsi, de la production des données, à leur traitement puis à leur utilisation par les acteurs de l'aménagement du territoire, une chaîne de production de connaissance faite d'une succession de choix qui n'est pas toujours rendu visible aux utilisateurs de ces statistiques. Or toute statistique renvoie une certaine vision d'un phénomène et s'impose ainsi comme contrainte aux utilisateurs (Desrosières, 2014). La territorialisation du SRCAE en région Provence-Alpes-Côte d'Azur engage de cette façon une forme de normativité dans les outils et indicateurs de suivi de mise en œuvre, sans que leur efficacité soit réellement démontrée, ni même questionnée.

1.2.2 Analyse de la robustesse d'un indicateur de transition, la part d'énergies renouvelables dans la consommation

La part d'énergies renouvelables dans la consommation[29] est utilisée comme un indicateur de suivi du développement de la filière renouvelable et constitue ainsi pour les pouvoirs publics le niveau de réussite d'une mise en œuvre de la transition énergétique. Il représente en effet un objectif quantifié à maximiser et dont l'atteinte justifie et légitime les choix et les actions publiques réalisés dans ce domaine.

Notre démarche propose de décliner ce rapport entre production et consommation (avec les productions actuelles et les productions potentielles d'énergies renouvelables) à différents échelons territoriaux. L'objectif est de mettre en évidence autant des degrés de couverture énergétique différenciés par des énergies locales, que des phénomènes de spécialisation en fonction du type de ressource, ou encore des difficultés ou des prédispositions à atteindre une part importante d'énergie renouvelable dans la consommation. La cartographie des résultats obtenus permet d'engager une réflexion sur la dimension territoriale de la mise en œuvre de la

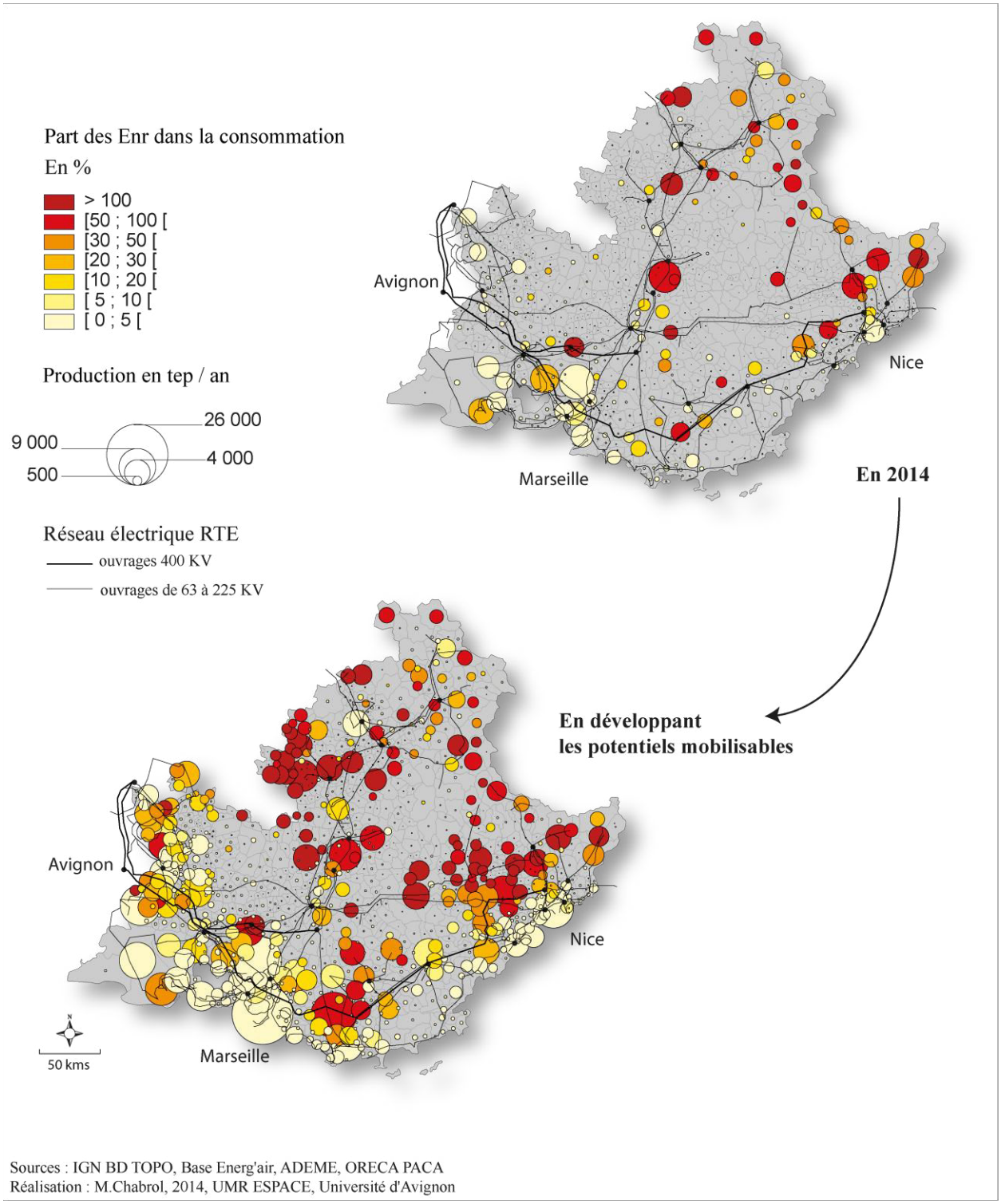
[28] Les résultats de recherche présentés dans ce chapitre et dans le chapitre suivant ont été exposés à plusieurs reprises à des représentants de la Région, de l'État, de l'ADEME et des agences d'urbanisme lors de rencontres pendant la phase de construction des *fiches territoriales*, et pendant la durée de la convention Région-Agences d'urbanisme.

[29] Cet indicateur est nommé « taux de couverture » dans les *fiches territoriales*.

transition énergétique. La comparaison des résultats obtenus par type d'échelon territorial amène à s'interroger sur la pertinence de ces niveaux d'action pour une mise en œuvre de la transition énergétique. Mais cette analyse appelle également à la prudence dans l'usage et l'interprétation de cet indicateur utilisé parfois avec peu de transparence sur sa construction.

La démarche proposée consiste à évaluer les potentiels de production d'énergie renouvelable exploitables à moyen terme dans les territoires. La base *Energ'air* développée par l'Observatoire Régional de l'Énergie du Climat et de l'Air PACA fournit les consommations et les productions d'énergie en région PACA au niveau communal pour l'année 2010. Précisons que rapporter les données des potentiels de production à la consommation de 2010 revient à considérer une hypothèse de stabilité de la consommation d'énergie. De plus, les données sont annualisées, ce qui constitue un frein à l'analyse en empêchant toute possibilité d'y intégrer des questions de saisonnalité. Les données concernant les potentiels d'énergie renouvelable mobilisables à court et moyen termes sont issues des études de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Dans ces études, les données quantifiées de potentiel sont déterminées après avoir intégré les contraintes de raccordement au réseau, les enjeux paysagers et patrimoniaux, des études de faisabilité… Les productions thermiques « classiques » et de grande hydraulique relevant du système énergétique national sont exclues de notre analyse ainsi que les potentiels en bois-énergie, ressource pour laquelle le rapport est peu concluant en raison d'une absence de structuration de filière en région PACA et de tensions avec le secteur bois d'œuvre et d'industrie (Communes forestières PACA, 2009). L'analyse inclut donc le solaire, l'éolien, la petite hydraulique, le biogaz et la récupération de chaleur sur réseau d'assainissement. Toutes les données de production et de consommation sont communiquées en énergie finale et lissées en tonnes équivalent pétrole (tep) au niveau communal (Cf. tableau 8 et figure 27). Ces données sont issues des mêmes référentiels que ceux utilisés par la Région pour la réalisation des *fiches territoriales*.

Dans l'hypothèse d'une valorisation des potentiels énergétiques identifiés dans les études diffusées par l'ORECA, à l'échelle communale, 20% des communes pourraient couvrir plus de 10% de leurs besoins énergétiques annuels par des ressources locales, contre 7% sans l'exploitation de ces potentiels. 16% des communes répondraient à plus de 20% de leurs besoins, contre 5% sans l'exploitation de ces potentiels. 13% dépasseraient 30% d'EnR dans la consommation contre 4% sans l'exploitation des potentiels, et 10% couvriraient plus de 50% de leurs besoins par des EnR contre 3% sans l'exploitation des potentiels. Il convient toutefois de manier cet indicateur avec précaution car certaines communes aux besoins énergétiques très faibles peuvent couvrir plus du double de leurs besoins. Il s'agit essentiellement de communes rurales aux consommations faibles et abritant un fort potentiel en EnR. Au total, la consommation d'énergie des 200 communes pouvant potentiellement répondre à plus de 10% de leurs besoins par des énergies locales, ne représente en fait que 4,5% de la consommation totale régionale. Et leur production ne couvrirait que l'équivalent de 1,7% de la consommation totale régionale (Carte 14, tableau 11).



Carte 14. Part des EnR dans la consommation d'énergie et productions actuelle et potentielle à l'échelle communale en région PACA

	Communes en %		Communautés de communes en %	
EnR dans la consommation	**2014**	**potentiellement**	**2014**	**potentiellement**
0%	0,6	0	0	0
< 10%	93	79	92	65
> 10%	7	20	7	34
> 20%	5	16	4	21
> 30%	4	13	3	13
> 50%	3	10	1	8

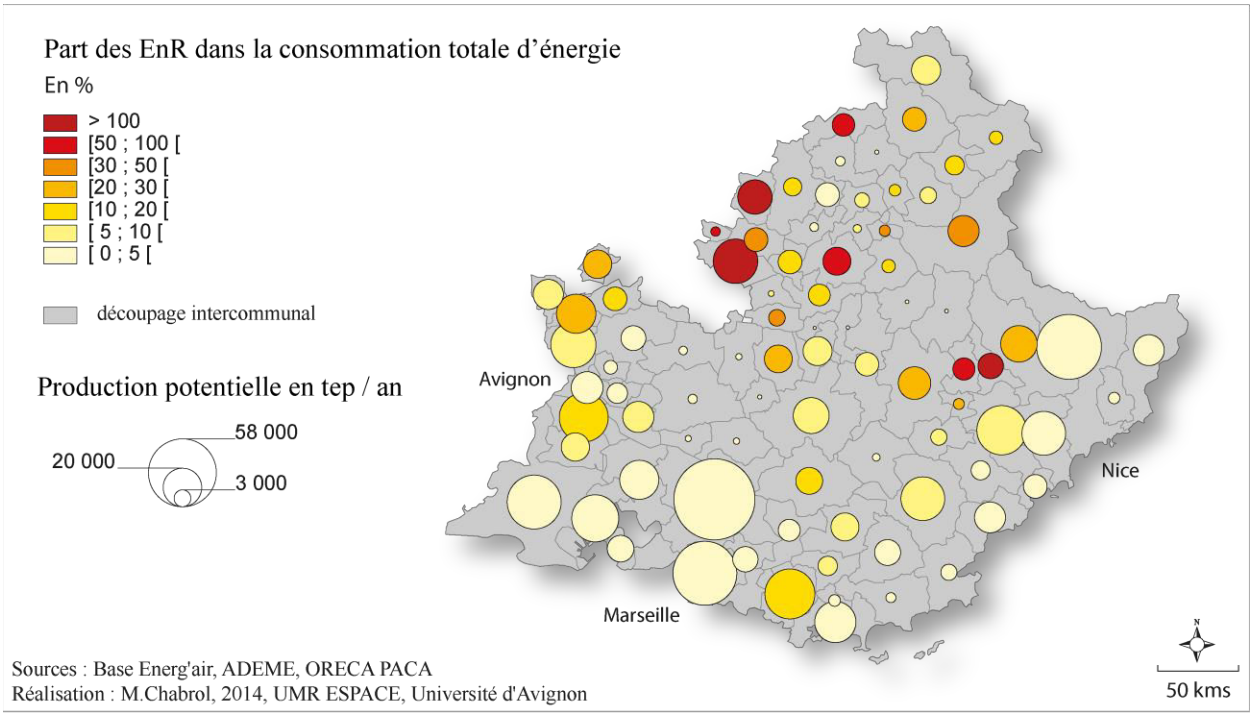
Source : d'après ORECA, ADEME, base Energ'Air

Tableau 11. Part actuelle et potentielle des EnR dans la consommation d'énergie aux échelles communale et intercommunale en région PACA

Cependant, si l'information peut sembler biaisée en milieu rural par des niveaux de consommation peu élevés, ce n'en est pas pour autant totalement aberrant car ces espaces en région PACA sont soumis à de fortes fréquentations touristiques augmentant périodiquement les besoins en énergie. Malheureusement, les données dont nous disposons ne permettent pas d'inclure dans l'analyse une dimension temporelle.

L'agrégation au niveau intercommunal efface en partie le biais lié aux faibles consommations en milieu rural. La constitution politique des intercommunalités, souvent réunies autour d'un pôle urbain majeur, a pour effet de canaliser la production et donc de diminuer la part d'EnR dans la consommation, la production étant absorbée par la commune qui consomme le plus. Cet effet est typique de la Métropole Nice-Côte d'Azur. La ville de Nice, deuxième ville de la région en termes de consommation absorbe toutes les productions potentielles d'arrière-pays. En revanche, cela est moins visible dans des espaces polarisés par des petites villes ou des villes moyennes comme dans la vallée du Rhône au nord d'Avignon, et dans le Var autour de Draguignan ou encore dans les Alpes où la majeure partie des surplus identifiés à l'échelle communale a été absorbée à l'échelle intercommunale (Cf. tableau 11) (Carte 15) :

- 34% des intercommunalités, soit 29 entités sur 85, pourraient répondre à plus de 10% de leurs besoins par des EnR contre seulement 6 intercommunalités sans prise en compte des potentiels exploitables ;
- 21% soit 18 couvriraient 20% des besoins contre 4 entités sans prise en compte des potentiels ;
- 13% soit 11 intercommunalités répondraient à plus 30% de leur consommation annuelle ;
- 8% soit 7 intercommunalités compteraient plus de 50% d'EnR dans leur consommation avec une mise en valeur des potentiels.

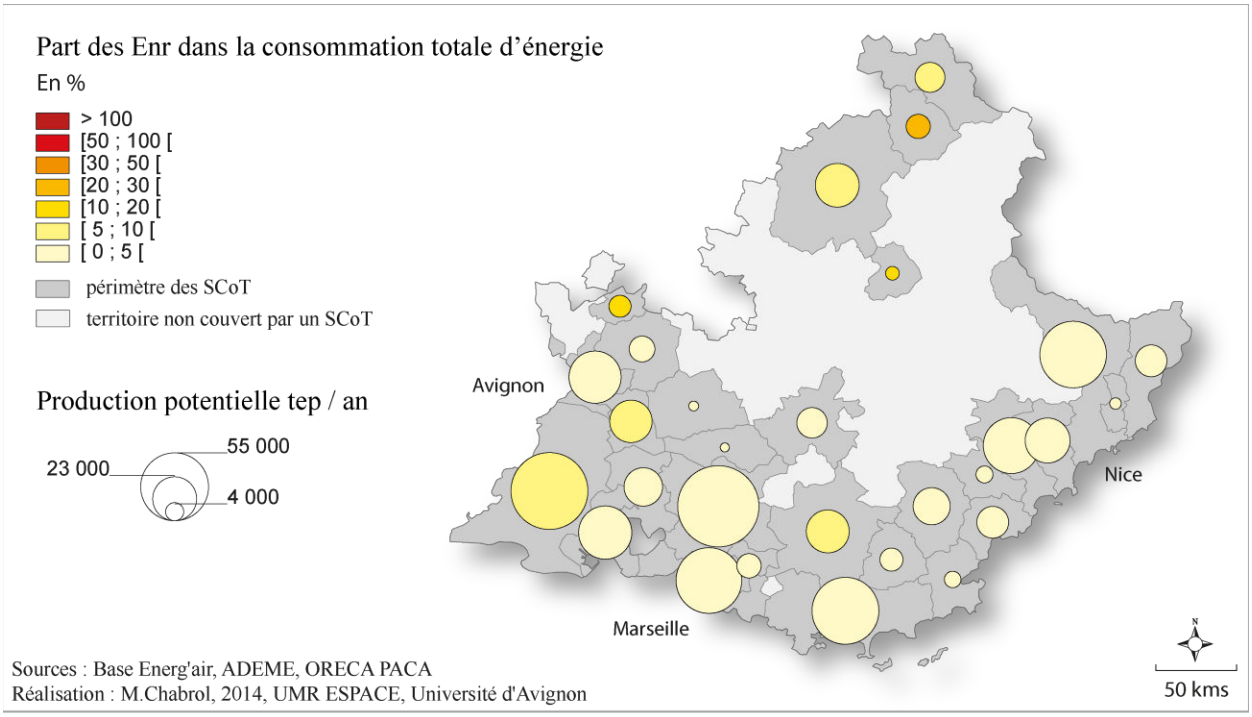


Carte 15. Part potentielle des EnR dans la consommation et production potentielle à l'échelle intercommunale en région PACA

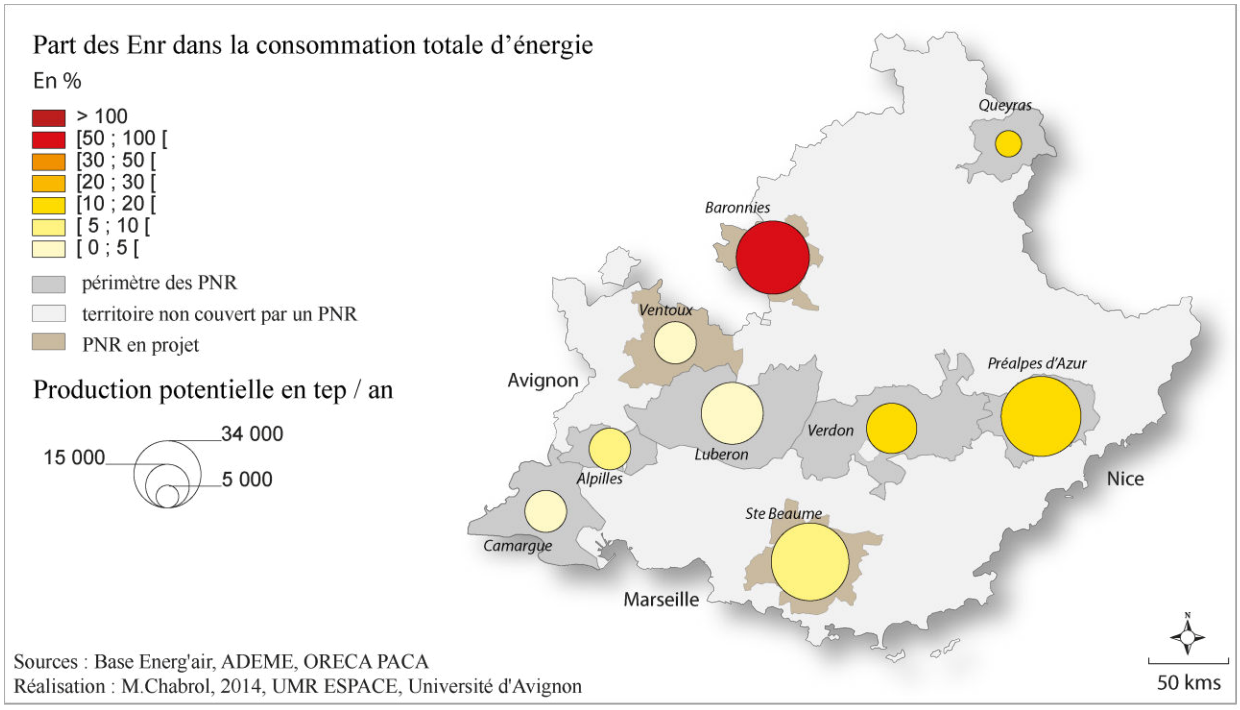
À l'échelle des territoires de projet comme les Schémas de Cohérence Territoriale (SCoT),[30] l'agrégation a pour effet d'homogénéiser les productions qui restent conséquentes. Mais la part d'EnR dans la consommation ne dépasse les 20% que dans l'arrière-pays haut-alpin. L'information est également biaisée par l'absence de SCoT dans un tiers de la superficie de la région. De plus, certains territoires de SCoT couvrent des espaces plus vastes que les intercommunalités, le rapport entre la production et la consommation est donc lissé (Carte 16). À l'échelle des Parcs Naturels Régionaux (PNR)[31], la part d'EnR dans la consommation ne dépasserait 10% que dans trois parcs sur neuf. En revanche, le Parc des Baronnies, parc en préfiguration, possède un potentiel très important. Cette situation interroge sur l'intérêt d'intégrer la question des énergies renouvelables en amont de sa création dans le cadre de la rédaction de la charte. On notera également le cas particulier du PNR des Préalpes d'Azur qui pourrait être en concurrence avec la Métropole Nice-Côte d'Azur. En effet, pour ces deux niveaux d'échelle, les mêmes potentiels locaux sont utilisés. Dans le premier cas, ces potentiels permettraient à un Parc Naturel Régional d'intégrer le développement des énergies renouvelables dans la charte du Parc et dans le second, ils permettraient une sécurisation des approvisionnements de la métropole niçoise (Carte 17), Nice étant en situation de péninsule énergétique et la deuxième ville de la région qui consomme le plus, hors secteur industriel.

[30] Le SCoT est un outil de planification intercommunale, à l'échelle d'un large bassin de vie ou d'une aire urbaine, dans le cadre d'un projet d'aménagement et de développement durable. Il sert de cadre de référence pour les différentes politiques sectorielles centrées sur les questions d'organisation de l'espace et d'urbanisme, d'habitat, de mobilité, d'aménagement commercial, d'environnement...

[31] Les Parcs Naturels Régionaux (PNR) mettent en valeur les espaces ruraux habités. Ils s'organisent autour d'un projet concerté de développement durable, fondé sur la protection et la valorisation de son patrimoine naturel et culturel.



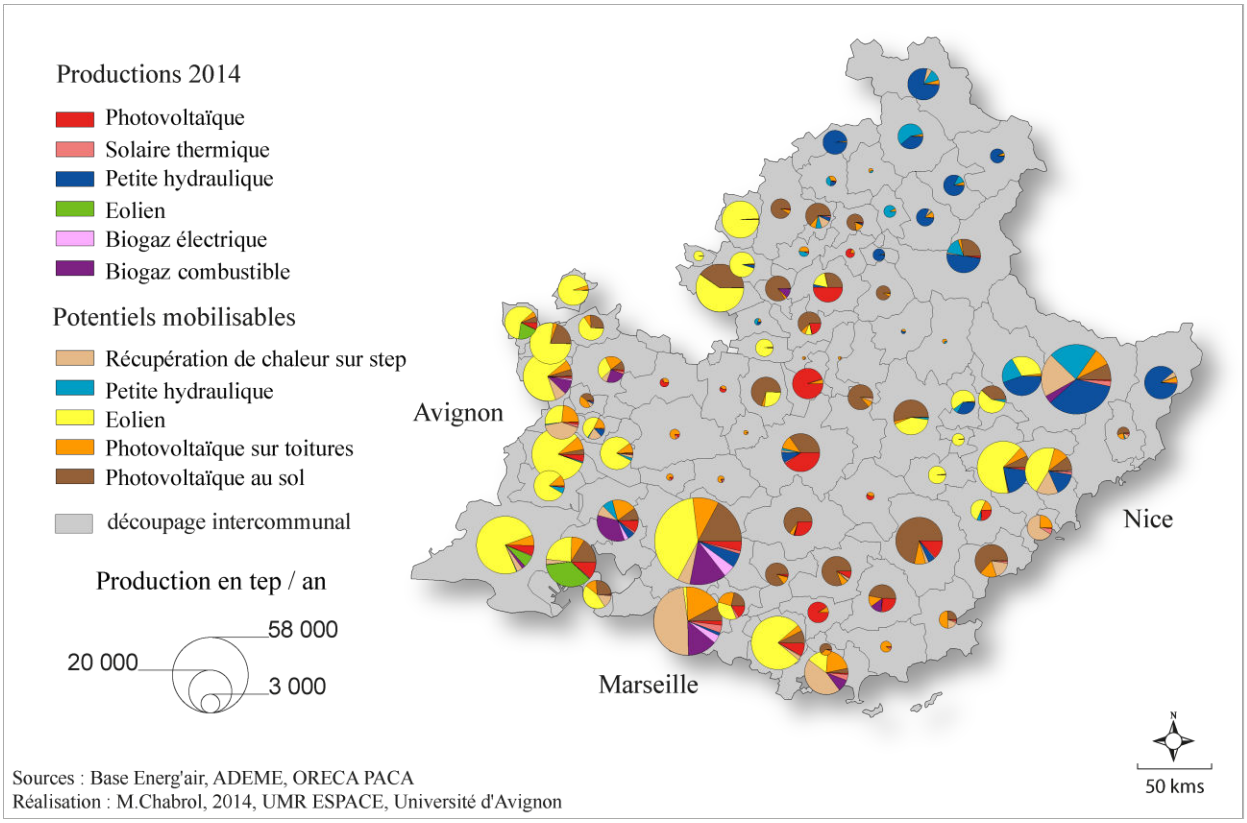
Carte 16. Part potentielle des EnR dans la consommation et production potentielle à l'échelle des Schémas de Cohérence Territoriale en région PACA



Carte 17. Part potentielle des EnR dans la consommation et production potentielle à l'échelle des Parcs Naturels Régionaux en région PACA

D'une façon générale, les effets de spécialisation identifiés dans le chapitre précédent se retrouvent à l'échelon intercommunal et à l'échelle des SCoT. Cependant, l'agrégation à ce niveau d'échelle permet de mieux identifier le mix potentiel pour certaines intercommunalités,

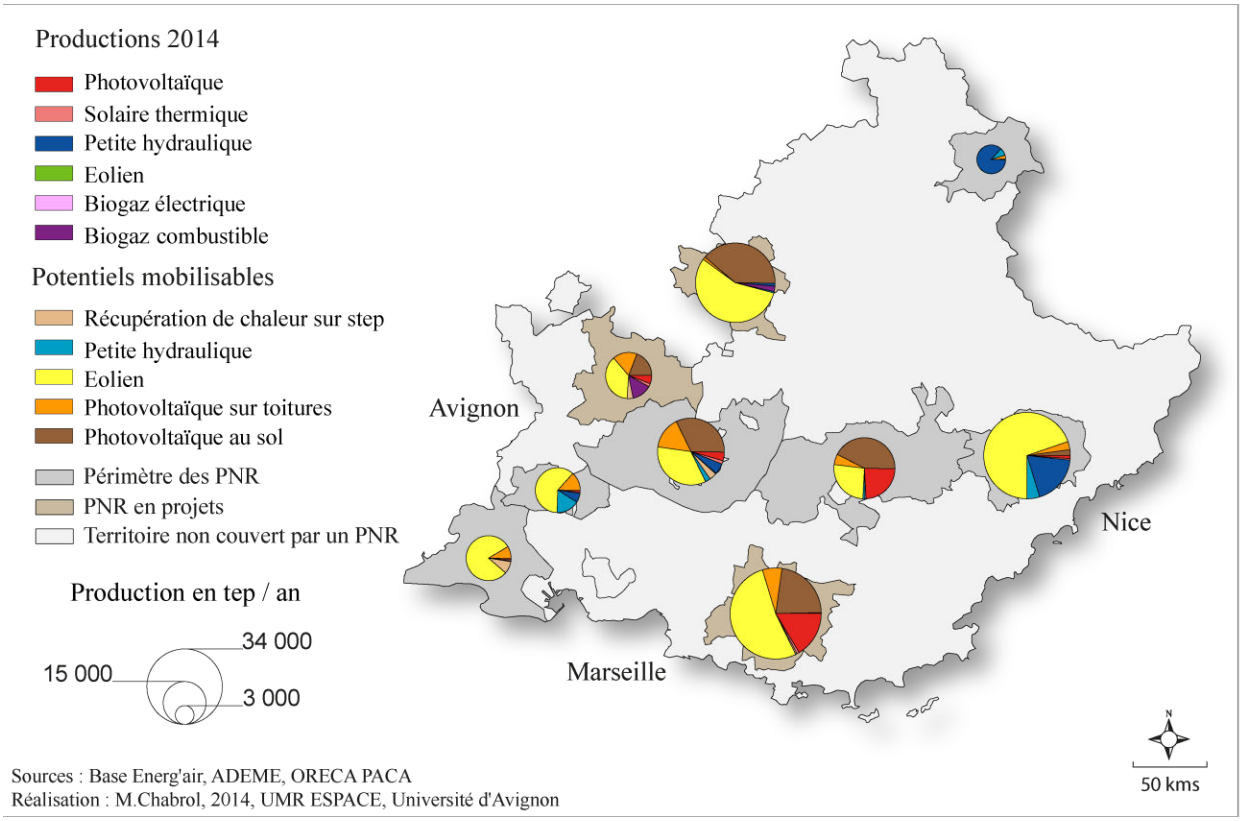
en particulier pour la communauté du pays d'Aix qui possède un mix potentiel diversifié et assez équilibré entre éolien et photovoltaïque au sol (Carte 18).



Carte 18. Mix énergétique en 2014 et potentiel à l'échelle intercommunale en région PACA

L'analyse du mix énergétique à l'échelle des PNR fait apparaître des spécificités et complémentarités entre ressources. Si la ressource hydraulique est spécifique au PNR du Queyras dans les Hautes-Alpes, elle se complète du potentiel éolien dans le parc des Préalpes d'Azur et dans le parc des Alpilles, alors que le PNR de Camargue et celui du Verdon offrent une complémentarité entre éolien et photovoltaïque au sol. Le Parc Naturel Régional du Luberon se détache en présentant un mix énergétique plus diversifié avec un potentiel éolien dominant (Carte 19).

Nos résultats peuvent interpeller les pouvoirs publics. Ils montrent en premier lieu qu'en l'état actuel de nos connaissances et sur la base des études disponibles, la part d'énergies renouvelables dans la consommation totale régionale ne pourra pas atteindre les objectifs fixés par le SRCAE en ne comptant que sur le facteur production. Le développement de tous les potentiels pour lesquels nous disposons de données permettrait de faire passer la part d'EnR actuellement de 10% à 12,5%, toujours, rappelons-le, selon une hypothèse de stabilité de la demande énergétique régionale.



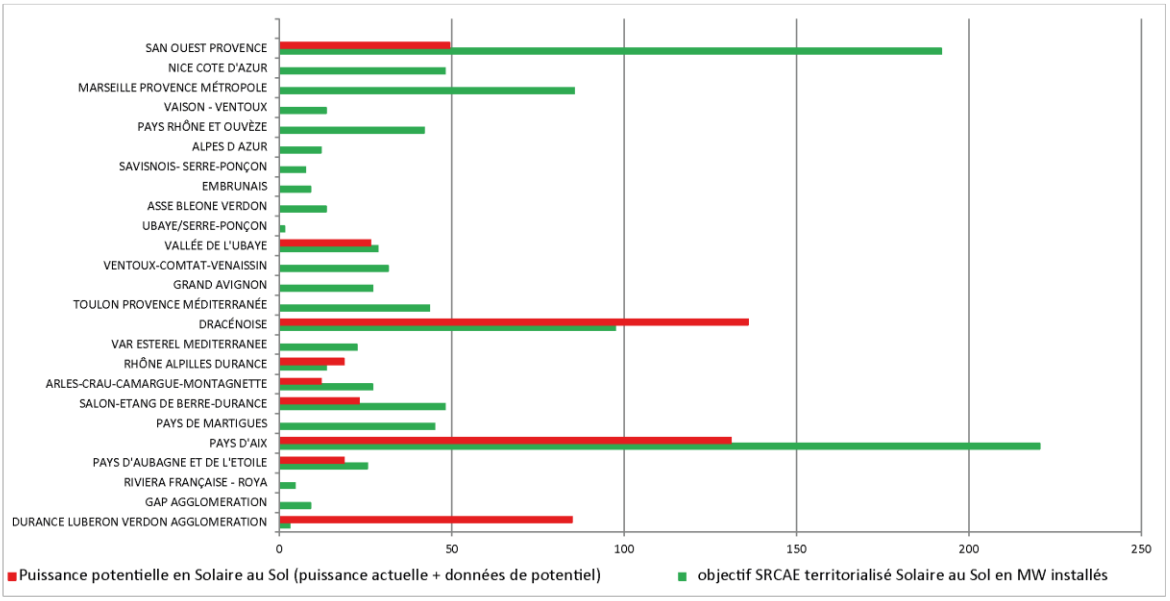
Carte 19. Mix énergétique en 2014 et potentiel à l'échelle des Parcs Naturels Régionaux en région PACA

Cependant, nos résultats montrent que certaines collectivités peuvent atteindre une part d'EnR bien supérieure. Aussi l'analyse proposée et sa représentation cartographique permettraient de déterminer des objectifs à atteindre à chaque échelle de territoire pour lesquels on sait que cet objectif serait atteignable. Cette démarche peut dans ce sens intervenir comme un appui à une démarche de planification fixant des critères d'action.

Les *fiches territoriales* réalisées par la Région intègrent bien ces spécificités, mais les objectifs présentés semblent parfois irréalistes. En réalité en cherchant à reproduire les résultats présentés par la Région, il apparaît que les objectifs de la part d'énergie renouvelable dans la consommation correspondent en fait à la part d'EnR électrique dans la consommation finale d'électricité du seul secteur résidentiel[32]. On note ici un manque de clarté dans l'utilisation de cet indicateur qui introduit un biais important d'interprétation et consiste à maximiser un indicateur de suivi de l'action publique, alors qu'en réalité l'objectif normatif ne paraît pas pouvoir être atteint.

[32] Ce fait n'est mentionné nulle part, ni dans le SRCAE, ni dans lesdites *fiches territoriales*, ni même encore dans le document de suivi du SRCAE qui mentionne que « *le taux de couverture des énergies renouvelables suit bien les objectifs et les a même dépassé* » (ORECA, 2015, p. 18) sans préciser qu'il ne s'agit pas de la part de la consommation totale d'énergie couverte par des EnR, mais bien de la part de consommation d'électricité du secteur résidentiel.

Une analyse plus approfondie montre aussi un décalage entre les objectifs proposés aux EPCI par type de ressource et les données présentes dans les études de potentiel comme dans le cas des centrales photovoltaïques au sol où la comparaison entre les objectifs fixés et les données disponibles montrent tantôt une sous-estimation, tantôt une surestimation (Graphique 21).



Sources : d'après ORECA, ADEME, Région PACA, 2015
Réalisation : M.Chabrol, 2016, UMR ESPACE, Université d'Avignon

Graphique 21. Comparaison entre objectif territorialisé et données de potentiel

La mise en œuvre des énergies renouvelables pose beaucoup de questions de nature spatiale : localisation et diversité des potentiels, importance des marchés de consommation à proximité, existence d'infrastructures de transport, dépendance des sources antérieures d'approvisionnement. Mais la question n'est pas seulement technique et touche aussi à la capacité de mobilisation et de responsabilisation des acteurs locaux de se saisir de la question des enjeux énergétiques pour tenter de la résoudre. La représentation cartographique multi-échelle de la part potentielle d'EnR dans la consommation et du mix énergétique potentiel peut être considérée comme un outil de dialogue et de concertation entre les différents niveaux de l'action publique. Elle permet d'avoir une vision territorialisée d'une production d'énergie potentielle et peut favoriser les démarches prospectives. Elle peut devenir dans ce sens un outil de communication pour accompagner des démarches incitatives, voire susciter des volontés locales d'action. En outre, elle représente un appui supplémentaire à la fois pour l'élaboration des Plan Climat Air Énergie Territoriaux et aussi pour la définition de compétences locales énergétiques. Mais elle permet par ailleurs de révéler des situations potentiellement conflictuelles liées au partage de ces nouvelles ressources. C'est ce que nous avons vu dans le cas de la métropole niçoise et du Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur (Cf. p. 205).

Mais si l'utilisation de référentiels statistiques pour fixer des objectifs normatifs permet de répondre d'une part aux injonctions de la loi pour la transition énergétique et d'autre part de diffuser des connaissances communes et un vocabulaire commun, un usage raisonné et pleinement informé reste indispensable pour limiter les biais d'interprétation ou, tout du moins, en avoir conscience.

Les résultats de notre étude montrent enfin que l'avenir énergétique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur ne pourra pas compter uniquement sur des ressources locales mais devra continuer de s'appuyer sur un approvisionnement national, d'autant plus qu'il faut prendre en compte la dimension temporelle inhérente à l'intermittence des énergies renouvelables. En région PACA, on ne peut pas attendre des énergies renouvelables locales une couverture de la demande globale en énergie.

Aussi l'analyse spatiale proposée doit pouvoir servir une démarche d'anticipation de la consommation énergétique à venir, en encourageant les aménagements urbains à s'orienter vers des espaces susceptibles de couvrir les nouveaux besoins énergétiques que ces aménagements susciteront. Il peut être pertinent d'examiner de façon systématique l'existence et la possibilité d'exploitation de ressources locales lors des demandes de permis de construire et de l'enregistrement des projets immobiliers. Pour cela, les dynamiques spatiales urbaines doivent être cernées et anticipées pour identifier les espaces d'une demande énergétique future. Et dans ce cas, les politiques locales devraient travailler à l'intégration des possibilités de production locale d'énergie et d'optimisation de sa distribution.

Ces ressources énergétiques potentielles peuvent également par ailleurs devenir des ressources fiscales supplémentaires dans un contexte de diminution des dotations publiques aux collectivités. Ce travail d'identification multi-scalaire des mix énergétiques envisageables par collectivité territoriale peut être complété par une estimation des rentes foncières et retombées fiscales correspondantes.
Une telle analyse permettrait à la fois de souligner d'éventuelles inégalités potentielles de richesse entre territoires, et de mesurer de nouvelles possibilités de développement local. Une telle prospective peut sans doute encourager les acteurs locaux à se saisir de cette question. De plus, la conversion de potentiels de production énergétiques en ressources financières publiques potentielles peut favoriser une meilleure acceptabilité sociale de ce type d'infrastructure, par ailleurs source de conflits d'ordre paysager et patrimonial, sous réserve d'une utilisation raisonnée de ces nouvelles ressources par les élus locaux.

2 Fiscalité locale des énergies renouvelables, un levier incertain de développement local

Les ressources énergétiques renouvelables (EnR) sont multiformes et dispersées dans l'espace. Leur exploitation modifie la répartition géographique des potentiels énergétiques. Mais peut-elle bénéficier aux territoires dans lesquels elles se déploient, c'est-à-dire les communes et leurs groupements ? Les activités économiques se traduisent par des retombées fiscales pour les collectivités territoriales et la production d'énergie n'échappe pas à cette règle. Si la question du financement et du coût d'une mise en œuvre de la transition énergétique est au centre des préoccupations, celle des revenus fiscaux des collectivités territoriales et des Établissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) liés aux énergies renouvelables reste peu abordée. Elle semble pourtant cruciale dans la mesure où l'échelon local reste le niveau d'implantation des infrastructures de production, quelles qu'elles soient. Une meilleure connaissance de leur impact sur l'état des finances publiques locales, qui plus est dans un contexte de baisse des dotations de l'État aux collectivités, pourrait mobiliser les élus locaux sur la question énergétique et susciter une meilleure acceptabilité sociale des projets (Chanard, 2011). Les considérations environnementales ne suffisent pas toujours pour encourager les collectivités territoriales à placer la transition énergétique parmi les priorités de leurs politiques publiques. « Combien ça coûte ? » et « combien ça rapporte ? » sont aussi des questions déterminantes dans la prise de décision et l'élaboration de projets (Grison, 2013) dans un contexte de tensions sur les ressources de fonctionnement des collectivités. Le financement des collectivités territoriales par la fiscalité locale oriente leur capacité d'action (CPO, 2010). Cette partie aborde ainsi l'impact du développement des énergies renouvelables sur les ressources des collectivités territoriales. Une mesure aussi précise que possible des retombées fiscales, actuelles et envisageables, liées à l'exploitation d'énergies renouvelables, permet d'identifier de nouvelles sources de richesse dans les territoires et de s'interroger sur leur rôle dans des perspectives de développement local. L'essor rapide et récent de l'énergie solaire en région Provence-Alpes-Côte d'Azur et un accès à une information localisée des puissances énergétiques potentielles pour les centrales solaires au sol, l'éolien et la petite hydroélectricité invitent à prendre cette région et ces trois types de ressources renouvelables comme un exemple d'étude de cas.

2.1 Fiscalité locale et énergies renouvelables

2.1.1 Fiscalité locale et développement territorial

Parmi leurs objectifs, les finances locales des collectivités territoriales et des EPCI ont comme vocation de contribuer au développement économique local et à l'aménagement du territoire (Bouvier, 2013). Relevant historiquement du rôle de l'État, ces compétences sont aujourd'hui au cœur de l'action des collectivités territoriales et des EPCI. Dans un contexte de décentralisation, les objectifs du développement local du début des années 1980 étaient d'apporter une réponse à la désindustrialisation par un développement qualifié alors d'endogène et d'ascendant, soit une conception où les collectivités territoriales favorisent les conditions

d'une reprise économique en développant les potentialités de leur territoire (Aydalot, 1985 ; Talandier, Davezies, 2009). Cette conception du développement local, plutôt associée aux territoires ruraux, est tombée peu à peu en désuétude au profit d'un développement local favorisant les espaces urbains et les métropoles basé sur des stratégies partenariales entre sphère publique et sphère privée. À cela s'ajoute un double contexte : une désindustrialisation des pays occidentaux qui implique des modèles de développement territorial organisés de plus en plus autour de l'économie résidentielle (Davezies, 2009 ; Grandclément, Boulay, 2015), et une économie mondialisée dont les décisions d'exploitation et d'investissement relèvent non pas du niveau local, mais de systèmes d'acteurs économiques positionnés sur le marché international et guidés par des arbitrages marchands (Courlet, 2007). La production d'énergie a pu être considérée de ce point de vue comme a-territoriale dans la mesure où les systèmes productifs énergétiques actuels n'émanaient pas d'un système d'acteurs ancré dans le territoire d'exploitation de ces ressources (Gumuchian *et al.,* 2003 ; Pecqueur, 2006). Des initiatives locales contredisent aujourd'hui cette tendance générale. Bien que fortement médiatisées, elles ne constituent pas encore un modèle alternatif de référence (le territoire du Mené, la commune de Montdidier, les Territoires à Énergie Positive (TEPos), Biovallée, etc.). À l'exception du bois, les productions nouvelles d'énergies renouvelables (solaire, éolien, petite hydroélectricité) ne sont pas suffisantes pour susciter directement un développement économique local, même si les politiques de développement des EnR ont évolué ces dix dernières années de politiques sectorielles vers des politiques plus intégrées suscitant un élargissement des possibles en matière de stratégies énergétiques territorialisées au travers des Schémas Régionaux Climat Air Énergie (SRCAE) et des Plans Climat Air Énergie Territoriaux (PCAET). Si les productions énergétiques renouvelables sont nécessairement localisées, elles ne constituent pas pour autant une ressource directement favorable à un développement local des territoires. Elles ne s'inscrivent pas dans des cercles vertueux de dynamiques de développement, ne participent pas à l'émergence de districts industriels et génèrent très peu d'emplois. Les ressources énergétiques renouvelables sont en effet captées par des acteurs exogènes aux lieux d'exploitation et positionnés sur le marché international de l'énergie comme le Groupe ENGIE (ex-GDF/SUEZ). Les territoires concernés bénéficient toutefois de retombées financières qui peuvent favoriser indirectement des politiques de développement. Tout apport d'activités économiques, quelle que soit leur nature, est en effet générateur de recettes fiscales pour le territoire où ces activités se déploient, et ce d'autant plus si celui-ci en est au départ dépourvu. Le développement territorial est fondé en partie sur l'accueil d'activités et de populations qui participent à la vie collective par leurs contributions fiscales alimentant la dépense publique. Néanmoins, depuis la suppression de la taxe professionnelle en 2010, le levier fiscal n'est plus autant un facteur direct d'attractivité des territoires en faveur des entreprises (CPO, 2014b). Mais la fiscalité locale des entreprises contribue au financement des dépenses des collectivités territoriales qui peuvent être mises au service de leur attractivité, de l'amélioration des services publics ou encore pour limiter la pression fiscale sur les ménages.

Cependant, la latitude des finances locales s'est restreinte dans un contexte général d'affaiblissement des finances publiques. Le 7e rapport du Conseil des Prélèvements Obligatoires sur la fiscalité locale montre en effet la fragilité des recettes des collectivités (CPO, 2010). Leurs dépenses ont augmenté pendant trente ans à mesure que les transferts de compétences s'opéraient. La liberté de gestion dont les gouvernements infranationaux disposent est aussi un facteur d'augmentation de ces dépenses, notamment des dépenses de fonctionnement. Les collectivités ont mobilisé le levier fiscal pour faire face à leur hausse. Les revenus fiscaux constituent l'essentiel des ressources locales, à hauteur d'environ 50%, le reste provenant des dotations de l'État, de l'emprunt et dans une moindre mesure des ressources propres de fonctionnement. Depuis le gel puis la diminution des dotations de l'État aux collectivités, l'équilibre budgétaire des collectivités territoriales et de leurs groupements repose davantage sur les prélèvements fiscaux et le recours à l'emprunt. Or l'augmentation de la pression fiscale et de la dette est mal vécue par les contribuables locaux et les ménages (Meyer, 2013). En conséquence, le financement d'actions nouvelles pose le problème fondamental des moyens budgétaires permettant de les soutenir. D'autant plus que, comme l'a montré Gilbert Meyer (2013), les actions en matière de développement durable imposées par la loi Grenelle de 2010, auxquelles s'ajoutent aujourd'hui celles prescrites par la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte d'août 2015, augmentent les contraintes budgétaires des collectivités. Dans ce contexte est-il possible d'envisager le développement des énergies renouvelables comme une source nouvelle de ressources financières locales ?

2.1.2 Une fiscalité locale favorable aux producteurs d'énergie renouvelable

La fiscalité locale de l'énergie se compose de l'Impôt Forfaitaire sur les Entreprises de Réseau (IFER) et de la Contribution Économique Territoriale (CET). Elle est fortement dépendante de la taille des unités de production énergétique. Le calcul de la Cotisation Économique Territoriale (CET) impose des contributions fiscales importantes aux ouvrages de génie civil conséquents comme les centrales thermiques et les barrages hydroélectriques. La taxe IFER est quant à elle liée à la puissance des installations. Cette fiscalité en place depuis la réforme de la taxe professionnelle et la loi de finances de 2010 est favorable aux entreprises productrices d'énergie renouvelable et se traduit par des retombées fiscales limitées.

Comme pour toute activité présente sur un territoire, les propriétaires des terrains supportant des installations dédiées à la production d'énergie sont soumis au paiement de la taxe locale pesant sur les propriétés foncières bâties. Hors cas spécifique d'exonération ou de régime particulier d'imposition, la taxe est d'autant plus élevée que la surface et la valeur des immobilisations sont elles-mêmes élevées.

La production d'énergie, considérée comme une activité industrielle et commerciale, est par ailleurs soumise à la Contribution Economique Territoriale (CET). Cette contribution fiscale est composée de deux taxes : la Cotisation Foncière des Entreprises (CFE) et la Cotisation sur la Valeur Ajoutée des Entreprises (CVAE).

La CFE est calculée sur la base de la valeur locative des biens passibles de la taxe foncière (terrains, constructions, installations) utilisés par l'entreprise pour les besoins de son activité. Le montant de la CFE est le produit de la base d'imposition et d'un taux fixé par les communes ou les EPCI en fonction de leur régime fiscal (Lang *et al*., 2010).

Les biens exonérés de taxe foncière sur les propriétés bâties sont exclus de la base d'imposition de la CFE. Les centrales solaires au sol et les éoliennes sont dans cette situation. Les panneaux photovoltaïques, les mâts et les pales des éoliennes ne sont pas des ouvrages de maçonnerie et par conséquent l'application de la taxe foncière sur les propriétés bâties, et donc de la CFE, ne s'impose qu'aux seuls socles en béton sur lesquels sont fixés les panneaux solaires ou les mâts des éoliennes (Sablière, 2014). Dans le cas des barrages hydroélectriques situés à la limite de plusieurs communes (c'est souvent le cas le long d'un cours d'eau), la base d'imposition est répartie entre les communes en fonction de l'emprise au sol des ouvrages de génie civil et des retenues d'eau (Bouvier, 2013). De façon générale, la CET ou la CFE frappe lourdement les ouvrages de génie civil conséquents comme les centrales thermiques et les barrages hydroélectriques et ce, d'autant plus que leur taille est importante.

La loi de finances 2010 impose également la Cotisation sur la Valeur Ajoutée des Entreprises (CVAE) « *aux personnes physiques et morales exerçant une activité professionnelle non-salariée à titre habituel au 1er janvier de l'année d'imposition, imposables à la CFE et réalisant un chiffre d'affaires supérieur à 152 000 euros* ». La totalité de la CVAE est reversée aux collectivités ; elle se répartit actuellement entre les communes ou les EPCI (26,5%), les départements (48,5%) et les régions (25%). Cependant, en raison de l'application d'un dégrèvement, seules les personnes réalisant un chiffre d'affaires supérieur à 500 000 euros sont assujetties à la CVAE. Le dégrèvement est compensé par l'État. Le montant de cette cotisation est égal à une fraction (1,5%) de la valeur ajoutée produite par les entreprises. Il ne peut être inférieur à 250 euros pour les entreprises au chiffre d'affaires supérieur à 500 000 euros (Lang *et al.,* 2010). Par ailleurs si l'entreprise redevable de la CVAE possède plusieurs établissements répartis dans des territoires différents, le calcul de la CVAE s'effectue sur le chiffre d'affaires du groupe et le montant de l'impôt est reversé aux collectivités au prorata de la taille des établissements en effectifs salariés. C'est particulièrement le cas des barrages exploités par EDF (Sablière, 2014).

Les installations de production d'énergie renouvelable comme les parcs éoliens et les centrales solaires au sol sont très faiblement affectées par ces deux impôts (CFE et CVAE) pour deux raisons : l'absence d'ouvrages d'art les met à l'abri des impôts fonciers et le calcul de la CVAE basé sur le montant du chiffre d'affaires leur est favorable. Les installations solaires et éoliennes sont en effet souvent exploitées par des sociétés dédiées uniques (société à actions simplifiées (SAS) ou société à responsabilité limitée (SARL)). La gestion d'une installation de production d'énergie renouvelable par une société unique permet de réduire le chiffre d'affaires et de diminuer le montant de la CVAE. Les grands groupes procèdent aussi à une optimisation

fiscale par la création de filiales et de sociétés à actions simplifiées, évitant ainsi les effets de l'application de la CVAE lorsque le chiffre d'affaires est supérieur à 500 000 euros.

La réforme de la taxe professionnelle (2010) dont l'objectif était d'améliorer la compétitivité et de diminuer la pression fiscale sur les entreprises a eu de ce fait les effets escomptés dans le secteur des énergies renouvelables ; elle a été favorable au développement du solaire et de l'éolien (CPO, 2014a). Mais comme l'association AMORCE l'a relevé en 2012, ce bénéfice pour les entreprises a pu se traduire par un manque à gagner pour les collectivités et par une réduction de leur autonomie fiscale (AMORCE, 2012 ; CPO, 2014b). La réforme de la taxe professionnelle a eu en effet comme incidence une baisse du coût de la fiscalité locale des entreprises de 15% en euros courants entre 2009 et 2012 (CPO, 2013).

Pour limiter le gain correspondant à la suppression de la taxe professionnelle au profit des activités non délocalisables (énergie, télécoms, transport ferroviaire) (Dubois, 2013), éviter l'effet d'aubaine dont auraient bénéficié ces entreprises, mais aussi pour maintenir au profit des collectivités territoriales, une forme d'incitation financière à l'accueil d'installations potentiellement génératrices d'externalités négatives (CPO, 2013), le Code Général des Impôts prévoit un Impôt Forfaitaire sur les Entreprises de Réseau, l'IFER. Cet impôt ne dépend pas de taux votés à l'échelon local. Celui-ci est fixé forfaitairement par l'État et revalorisé chaque année (+ 0.9 % en 2015). L'IFER s'applique à certaines catégories de biens et se décline en neuf composantes (Tableau 12).

Composantes de l'impôt forfaitaire sur les entreprises de réseaux
imposition sur les éoliennes et hydroliennes
imposition sur les installations de production d'électricité d'origine nucléaire ou thermique à flamme
imposition sur les centrales de production d'électricité d'origine photovoltaïque ou hydraulique
imposition sur les transformateurs électriques
imposition sur les stations radioélectriques
imposition sur les installations gazières et sur les canalisations de transport de gaz naturel, d'autres hydrocarbures et de produits chimiques
imposition sur le matériel ferroviaire roulant utilisé sur le réseau ferré national pour les opérations de transport de voyageurs
imposition sur certains matériels roulants utilisés sur les lignes de transport en commun de voyageurs en Île-de-France
imposition sur les répartiteurs principaux de la boucle locale cuivre et certains équipements de commutation téléphonique

Source : Code Général des Impôts.

Tableau 12. Les neuf composantes de l'IFER

Si la CFE est fonction de la taille des entreprises, l'IFER dépend quant à lui de leur puissance. Les unités de production d'énergie renouvelable (solaire, éolien et hydroélectricité) d'une puissance supérieure à 100 kW et les unités de production d'origine nucléaire et thermique supérieure à 50 MW sont en effet imposables. Un forfait en euros par kilowatt de puissance installée et par type de production est appliqué. La répartition de l'IFER entre niveaux de collectivités territoriales et EPCI diffère selon la source d'énergie et la nature du régime fiscal des EPCI (fiscalité additionnelle FA ou fiscalité professionnelle unique FPU) (Tableau 13).

La constitution de la ressource fiscale énergétique dépend donc de trois facteurs essentiels : la nature du régime fiscal des groupements de communes, le type de ressource énergétique et la capacité de l'infrastructure. La nature du régime fiscal des Etablissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) implique des modalités différentes de perception et de partage des impôts locaux entre l'intercommunalité et ses communes membres. Dans la mesure où ces modalités d'imposition fiscale ont des impacts notables sur la répartition du produit fiscal, notre analyse fera une distinction systématique selon le régime fiscal de l'intercommunalité.

Production	Forfait en euros/kW	Commune	EPCI	Département
Éolienne	7,27	si FA : 20% si FPU : 0%	si FA : 50% si FPU : 70%	30%
Hydrolienne	7,27	si FA : 50% si FPU : 0%	si FA : 0% si FPU : 50%	50%
Solaire photovoltaïque	7,27	si FA : 50% si FPU : 0%	si FA : 0% si FPU : 50%	50%
Hydroélectricité	3,003	si FA : 50% si FPU : 0%	si FA : 0% si FPU : 50%	50%
Nucléaire et thermique à flamme	3,003	si FA : 50% si FPU : 0%	si FA : 0% si FPU : 50%	50%

FA : fiscalité additionnelle, les communes et leur groupement perçoivent les quatre taxes directes : Taxe d'Habitation, Taxe Foncière sur les Propriétés Bâties, Taxe Foncière sur les Propriétés Non Bâties et Cotisation Économique Territoriale.

FPU : fiscalité professionnelle unique, seul le groupement perçoit l'impôt économique.

Source : DGFIP

Tableau 13. Montant forfaitaire et territorialité de l'IFER au 1er janvier 2015

2.1.3 Infrastructures de production d'énergie renouvelable, des retombées fiscales limitées

Pour les productions récentes d'énergie renouvelable (solaire, éolien, petite hydroélectricité), la taxe IFER est l'impôt qui pèse le plus. La valeur des contributions peut être dans certains cas cinq fois plus élevée que celle perçue au titre de la CVAE. Ainsi par exemple,

un parc solaire EDF EN[33] mis en service avant le moratoire[34] de décembre 2010 avec un tarif d'achat d'environ 0,30 euro le kWh et d'une puissance de 5 MW ayant produit environ 7 800 MWh en 2013 aura généré environ 885 000 euros de valeur ajoutée[35]. À la fin de l'exercice 2013, l'EPCI à fiscalité professionnelle unique où il se situe aura perçu une part de la taxe IFER correspondant à 18 175 euros[36] et une part de CVAE correspondant à 3 517 euros[37].

La comparaison entre des situations types montre bien à la fois le poids de la production énergétique dans les finances de certaines collectivités et les écarts considérables de retombées fiscales entre types de production. Il faudrait 26 parcs éoliens de 10 MW (soit entre 200 et 300 éoliennes d'une puissance d'environ 1 MW) sur le territoire d'un EPCI pour générer une taxe IFER d'un montant équivalent à celui dû à la présence d'une centrale thermique (Tableau 14).

De ce point de vue, il peut paraître plus rentable pour un EPCI d'avoir sur son territoire une centrale thermique ou un grand barrage hydroélectrique plutôt que d'autres types d'infrastructures de production énergétique. Mais cela serait sans compter les externalités négatives liées à ces modes de production. L'actualité récente sur le nucléaire (Fukushima) ou même sur les barrages (Sivens) rappelle bien les questions d'acceptabilité sociale que soulève ce type d'infrastructure.

Par ailleurs, en unité de puissance installée, les parcs éoliens et les centrales solaires sont davantage taxés. Cela peut sembler être un élément dissuasif pour leur implantation. Mais cet effet est en réalité largement compensé par le faible niveau d'imposition des taxes foncières appliquées à ces installations. Autre argument qui joue en leur faveur : le niveau d'imposition des taxes foncières est beaucoup plus élevé pour les centrales thermiques et les barrages. Le rapport entre les retombées d'IFER des énergies renouvelables et le produit de fonctionnement des EPCI montre bien que la fiscalité liée à ces infrastructures a peu d'impact sur les budgets des collectivités (Tableau 14).

Si l'un des objectifs de l'IFER était, comme nous l'avons précédemment dit, de maintenir une forme d'incitation financière à l'accueil d'installations génératrices d'externalités négatives, notamment dans le cas des éoliennes à l'origine de nombreux conflits liés à leur impact paysager (Nadaï, Labussière, 2010), ces observations interrogent sur la capacité réelle du volet fiscal à favoriser l'acceptabilité sociale de ce type d'infrastructure.

[33] Nous prenons dans ce calcul l'exemple de la centrale photovoltaïque SFP EDF EN située à Sainte Tulle (04), lieu-dit « les Grenouillères ».
[34] Décret n°2010-1510 du 9 décembre 2010 suspendant l'obligation d'achat de l'électricité produite par certaines installations utilisant l'énergie radiative du soleil. Suite à ce décret qui a suspendu le rachat pendant trois mois, le tarif d'achat a été d'abord divisé par trois puis n'a cessé de diminuer. Il était en 2014 de 73,6 euros le MWh.
[35] Source : http://www.verif.com/bilans-gratuits/CENTRALE-PHOT-SFP-EDF-STE-TULLE-504330713/
Valeur ajoutée = chiffre d'affaires – charges d'exploitation.
[36] Soit 5 000 kW * (7,27/2).
[37] Soit (885 000 * 1,5%) * 26,5%.

Exemples d'installation	Puissance installée en MW	Montant de l'IFER au profit de l'EPCI à FPU en euros	Part de l'IFER dans le produit de fonctionnement	Population de l'EPCI	Montant de l'IFER en € par habitant	Montant de l'IFER en €/MW
Centrale thermique de Martigues (13)	900	1 351 350	3,8%	71 346	13,5	1 501
Barrage André Blondel de Bollène (84)	350	525 525	6%	24 535	21	1 501
Parc éolien du port autonome de Marseille (13)	10	50 890	0,02%	99 599	0,51	5 089
Centrale solaire d'Esparron du Verdon (04)	8	29 080	0,07%	62 198	0,47	3 635

Sources : Installations et puissances inventoriées par l'auteur ; IFER calculé par l'auteur ; produit de fonctionnement : (DGFIP) ; population : (INSEE).

Tableau 14. Taxe IFER et type d'installation de production énergétique en région PACA

2.2 Retombées fiscales des énergies renouvelables, effets d'aubaine et limitation des perspectives de développement local

Nous posons la question des bénéfices financiers potentiels au profit des collectivités territoriales et EPCI générés par les retombées fiscales d'un possible déploiement des énergies renouvelables (EnR) en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Cette région marquée à la fois par la présence d'opérateurs historiques de l'hydroélectricité comme Électricité De France (EDF) et la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) ainsi que par un développement rapide de l'énergie solaire au cours des dix dernières années (Dubois, Thomann, 2012 ; Duruisseau, 2015) est un terrain propice à l'analyse de la fiscalité de l'énergie.

L'analyse proposée s'appuie sur un inventaire des puissances installées en région PACA en 2014 et sur des mesures de puissances énergétiques potentielles[38] pour les centrales solaires au sol, l'éolien et la petite hydroélectricité (ADEME, 2005, 2009 et 2010). Grâce à ces données, peu connues et peu diffusées et construites pour les besoins de l'argumentaire, il est possible d'estimer et de cartographier les montants des taxes IFER correspondants et les montants de la CVAE liés aux centrales solaires au sol (Tableau 15).

[38] Les données quantifiées de potentiel sont déterminées après avoir intégré les contraintes de raccordement au réseau, les enjeux paysagers et patrimoniaux, des études de faisabilité. Voir http://oreca.regionpaca.fr/

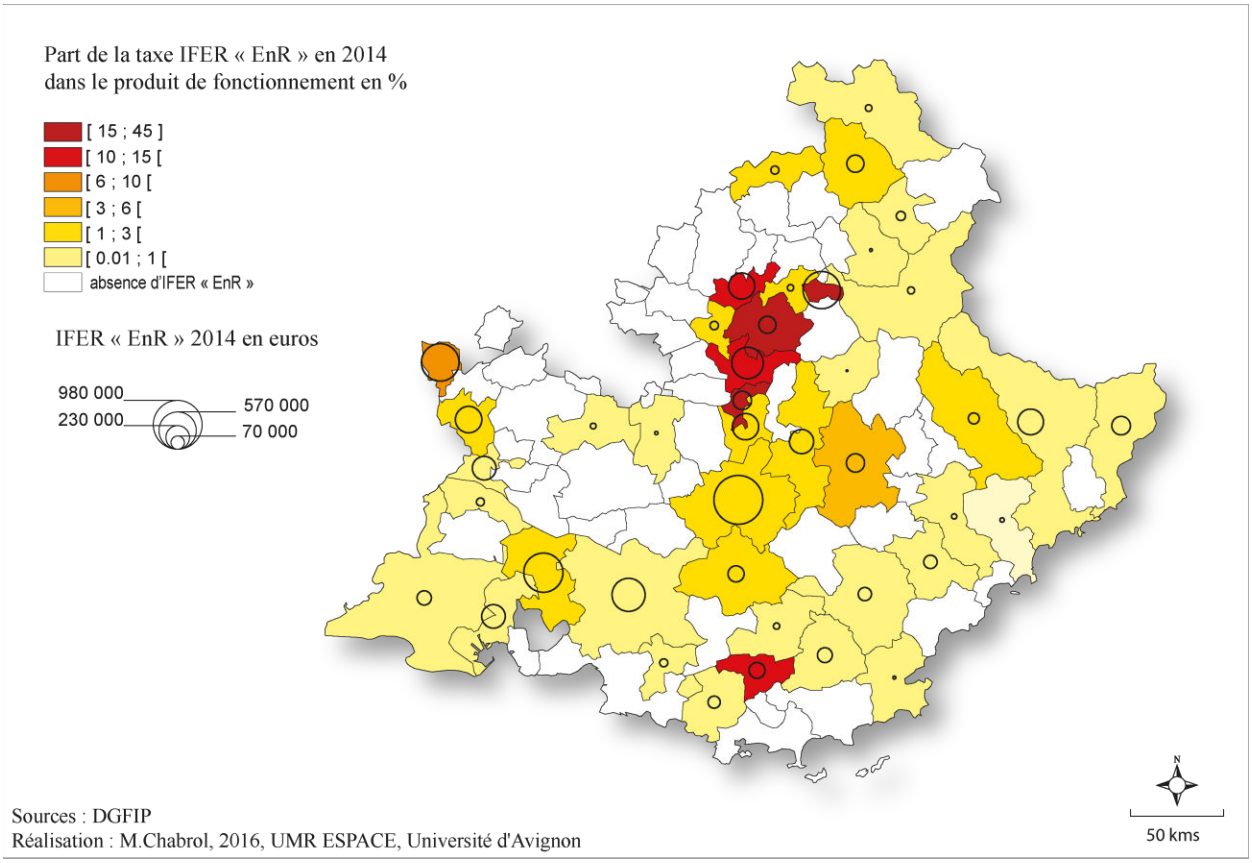
Variable	Source
Puissances installées en 2014 (hydroélectricité, solaire, éolien)	Recensées par l'auteur à partir de différentes sources : DREAL PACA, communiqués de presse des industriels, EDF, CNR, GDF-Suez (Engie), Solaire Direct…, vérification par image satellite (Cf. figures 24 et 26).
Puissances potentielles	Issues des études de l'ADEME, Région PACA, DREAL PACA
Montants de l'IFER	Calculés par l'auteur à partir de la définition de la DGFIP
Montants de la CVAE « solaire »	Calculés par l'auteur à partir de la définition de la DGFIP et des bilans des entreprises après vérification en fonction du tarif d'achat à la date de mise en service.

Tableau 15. Sources et mesures

2.2.1 Un effet d'aubaine pour les territoires de l'arrière-pays provençal

Les montants actuels de la taxe IFER pour l'hydroélectricité, le solaire au sol et l'éolien illustrent le niveau élevé de richesse fiscale de certaines communes ou EPCI lié à la présence d'opérateurs énergétiques historiques comme EDF ou la CNR. Les grands barrages hydroélectriques contribuent dans certains cas à plus de 20% du produit de fonctionnement des territoires concernés. Là où turbine un barrage, le montant de l'IFER par habitant peut atteindre près de 1 400 euros, la moyenne du produit de fonctionnement par habitant dans les EPCI de la région PACA étant de 680 euros. Cependant, le développement récent du solaire a permis à d'autres communes ou EPCI d'augmenter leurs ressources financières. Les retombées de l'IFER résultant de la présence de centrales solaires peuvent atteindre des valeurs comparables à celles des territoires de grands barrages hydroélectriques. Certaines atteignent la moyenne de l'IFER issu de l'hydroélectricité, soit 200 000 euros annuels. On le constate pour des collectivités des Alpes-de-Haute-Provence qui ont accueilli des projets solaires d'envergure industrielle entre 2008 et 2010 (Carte 20).

Par ailleurs, le régime fiscal choisi par les EPCI est un facteur particulier de distribution des retombées fiscales. En effet, le poids de l'activité énergétique dans les budgets locaux des communes appartenant à un EPCI à fiscalité additionnelle est très important. Les communes concernées sont presque en totalité des petites communes d'arrière-pays. Si les localités des espaces urbanisés ont un régime à fiscalité unique qui garantit de plein droit la perception de l'IFER par les EPCI, les communes d'arrière-pays qui ont un régime à fiscalité additionnelle ont une garantie de ressources fiscales lorsqu'une infrastructure de production pérenne est présente sur leur territoire. Cela s'observe dans le cas des barrages alpins EDF dont l'IFER représente plus de 50% des budgets des communes (appartenant à un EPCI à fiscalité additionnelle). Mais ces cas sont extrêmement rares.



Carte 20. Montant de l'IFER lié aux productions solaire, éolienne et hydroélectrique en région PACA au profit des EPCI en 2014

L'exploitation des potentiels en solaire au sol, en éolien terrestre et en petite hydroélectricité augmenterait par conséquent le montant de l'IFER. Un développement des potentiels EnR identifiés se traduirait par une diffusion des retombées d'IFER à partir des espaces déjà bénéficiaires de cet impôt. Les potentiels solaires et éoliens contribuent largement à cette redistribution. Ces nouvelles recettes peuvent atteindre plusieurs centaines de milliers d'euros. De telles ressources représentent une somme importante pour des territoires d'arrière-pays où les activités économiques sont peu développées. Cependant, le gain potentiel le plus important (près de 700 000 euros) concerne un EPCI parmi les plus riches, le pays d'Aix (13), tout en représentant moins de 1% de son produit de fonctionnement. Il faut donc raison garder et relativiser l'impact de ces nouvelles ressources fiscales sur les budgets locaux.

Si les retombées fiscales liées au solaire et à l'hydroélectricité sont partagées en deux parts égales, soit entre les EPCI à fiscalité unique et les départements, soit entre les communes appartenant un EPCI à fiscalité additionnelle et les départements (Cf. tableau 13), les retombées liées au déploiement des potentiels éoliens modifieraient en revanche leur répartition. En effet, dans le cas des communes appartenant à un EPCI à fiscalité additionnelle, les 70% de la taxe IFER accordés de plein droit dans le cas des EPCI à fiscalité unique, sont dans ce cas partagés entre la commune concernée (20%) et son EPCI à fiscalité additionnelle de rattachement (50%). L'exploitation des potentiels éoliens dans les EPCI à fiscalité additionnelle du centre nord de la

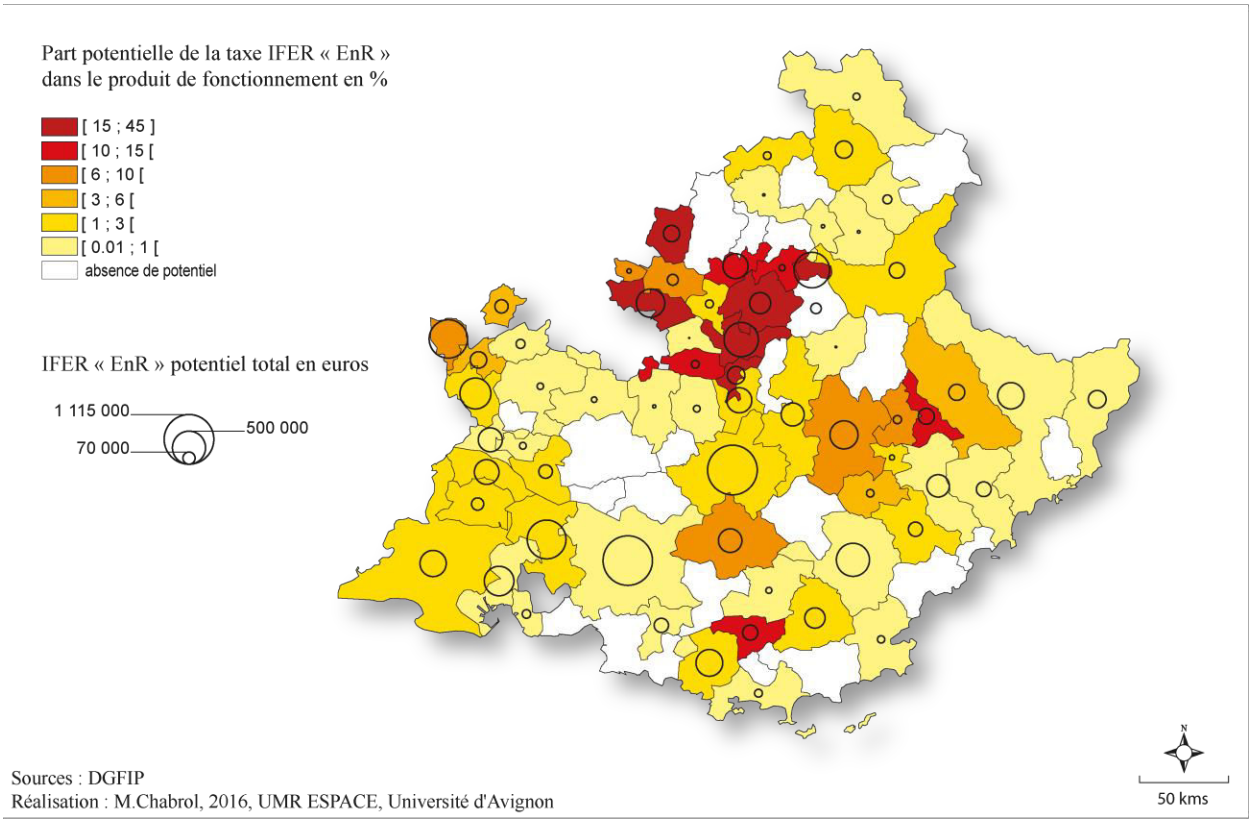
région leur permettrait d'augmenter leur produit de fonctionnement d'entre 3% et 10% grâce à l'IFER, et dans le même temps d'augmenter le produit de fonctionnement d'une partie des communes qui les composent de plus de 10%, cela grâce aux mêmes infrastructures. Une situation identique est observable dans l'arrière-pays des Alpes-Maritimes.

De toute évidence, des valeurs potentielles faibles d'IFER sont en mesure d'avoir un impact important sur les finances locales des collectivités ou EPCI qui ont un budget limité ; à l'inverse des potentiels importants ont peu d'impact pour des collectivités au budget conséquent. Certains montants d'IFER sont toutefois suffisamment élevés pour permettre une augmentation du produit de fonctionnement des EPCI supérieure à 1% comme dans la vallée du Rhône. Le mode de répartition de l'IFER liée à l'éolien entre les échelons communaux et intercommunaux interroge sur l'intérêt pour les EPCI à fiscalité additionnelle de percevoir cet impôt au niveau du groupement ou bien de laisser les communes membres en bénéficier. En effet, dans les territoires ruraux, les montants d'IFER peuvent être très importants au regard des budgets des Communautés. Un transfert de cet impôt au niveau du groupement de communes pourrait en augmenter le produit de fonctionnement dans une perspective de solidarité territoriale. Le Code Général des Impôts donne aux EPCI à fiscalité additionnelle, sur délibérations concordantes, la possibilité de se substituer aux communes membres pour la perception de l'une, de plusieurs ou de l'ensemble des composantes de l'IFER[39]. Dans cette hypothèse, de nouveaux EPCI qui ne perçoivent pas d'IFER aujourd'hui pourraient en bénéficier, essentiellement grâce aux parts d'IFER potentiel solaire et hydroélectrique. Certains d'entre eux pourraient ainsi augmenter leur produit de fonctionnement de plus de 3% pour les uns, jusqu'à plus de 15% pour d'autres.

Les retombées fiscales à envisager amènent à différencier clairement deux types d'espaces. Dans les espaces densément peuplés, voire métropolisés (Aix-Marseille et vallée du Rhône), où les recettes fiscales sont variées en raison d'une urbanisation et d'une activité économique importantes, le développement potentiel des EnR représente une diversification et un élargissement de l'assiette fiscale. Dans ce cas, les nouvelles ressources générées par les installations de production d'énergie renouvelable ne représentent qu'une part très limitée des budgets locaux. Elles peuvent alors être considérées comme un moyen de sécurisation des finances locales, sans pour autant bouleverser considérablement la gestion des territoires concernés et représenter un apport de richesse important.

En revanche, dans les espaces périphériques, en particulier dans les arrière-pays provençaux, ces retombées fiscales potentielles sont en grande partie captées dans des espaces déjà producteurs et donc déjà bénéficiaires de ce type de ressource, particulièrement dans la vallée de la Durance. Cela signifie que les sites les plus favorables pour une production d'EnR ne sont pas encore tous exploités, et surtout que certaines collectivités ou EPCI sont dotés d'une ressource latente supplémentaire pouvant augmenter leur niveau de richesse (Carte 21).

[39] Article 1379-0 bis V du code général des impôts.



Carte 21. Taxe IFER potentielle liée aux productions solaire, éolienne et hydroélectrique en région PACA au profit des EPCI

Le développement des EnR peut donc contribuer à une augmentation et à des modifications (institutionnelles ou territoriales) dans la répartition des ressources fiscales. Toutefois, ces dynamiques concernent clairement les espaces d'arrière-pays. Les niveaux élevés de richesse fiscale liée à l'énergie sont très localisés en PACA. Ils se concentrent en amont de la vallée de la Durance, et de façon moins importante dans la vallée du Verdon et dans la vallée du Rhône. Ils sont fonction des capacités locales de production, du nombre d'habitants et de l'absence d'activités économiques fortement imposables. Moins il y a d'habitants et d'activités économiques, plus les apports de richesse fiscale liée à la production énergétique sont élevés. Mais il ne s'agit pas que d'un simple effet algébrique qui pourrait être vrai pour toute autre activité qui s'implanterait, quoi qu'elle produise, car ces surplus de richesse fiscale trouvent naissance dans des espaces peu attractifs pour d'autres types d'activités.

En cela, les retombées fiscales des énergies renouvelables constituent un effet d'aubaine qui peut sécuriser les finances locales des territoires d'arrière-pays, mais sans pour autant accroître considérablement leurs chances de développement.

2.2.2 Dépendance aux conjonctures économiques et politiques

Si l'IFER demeure la taxe la plus conséquente, les producteurs d'énergie renouvelable sont également redevables de la Cotisation Foncière des Entreprise (CFE) et de la Cotisation sur la Valeur Ajoutée des Entreprises (CVAE). Une estimation de la CFE est difficilement réalisable

en raison de l'impossibilité d'accès à la valeur locative des terrains nécessaire à son calcul. Cependant, son montant reste minime dans le cas du solaire et de l'éolien pour lesquels peu de biens sont imposables à ce titre (cf. *supra*). En revanche, il est possible d'estimer la valeur de la CVAE qui revient aux communes ou aux intercommunalités pour les centrales solaires au sol. Dans un souci d'optimisation, la stratégie des opérateurs dans ce domaine est généralement de déclarer une entreprise dédiée pour chaque installation. Il est alors possible de rechercher le chiffre d'affaires et les charges d'exploitation de ces entreprises[40] de façon à pouvoir ensuite calculer leur valeur ajoutée et estimer ensuite un montant de CVAE (1,5% de la valeur ajoutée). 26,5% de ce montant revient aux communes ou aux EPCI. Dans le cas où les EPCI ont opté pour un régime à fiscalité professionnelle unique, ils perçoivent la totalité de cette part de CVAE. Mais dans le cas où les EPCI sont à fiscalité additionnelle, la part est répartie entre l'EPCI et ses communes membres.

Les montants de CVAE sont sans commune mesure avec ceux générés par l'IFER. Cela s'explique à la fois par la faible part de la CVAE qui revient au bloc communal (26,5%), mais aussi par la chute du tarif d'achat de l'électricité suite au moratoire et au décret du 9 décembre 2010. Le tarif d'achat de l'électricité détermine en effet le chiffre d'affaires des entreprises exploitantes des sites de production. Le montant de la CVAE des installations raccordées au réseau après le moratoire et, *a priori*, celui des installations futures pèsent ainsi bien moins dans le bilan des retombées fiscales (Tableau 16).

Dans ces conditions, il apparaît évident que seuls les projets d'énergie renouvelable d'envergure industrielle sont susceptibles de représenter des bénéfices fiscaux importants pour les collectivités locales, sous réserve que les futurs tarifs d'achat garantissent aux projets à venir des conditions de rentabilité. Les collectivités et les retombées sont donc tributaires de décisions tarifaires qui leur échappent.

[40] Plusieurs sites en ligne permettent de consulter les bilans des entreprises (http://www.verif.com/ ; http://fr.kompass.com/ ; http://www.societe.com/ ; https://www.infogreffe.fr/).

	Pour 1 MW installé de solaire au sol
IFER au profit de la commune ou de l'intercommunalité concernée	3 635 euros[41]
CVAE au profit de la commune ou de l'intercommunalité concernée avant le moratoire	Environ 700 euros[42]
CVAE au profit de la commune ou de l'intercommunalité concernée depuis le moratoire	Environ 175 euros[43]

	IFER « solaire » 2014 en euros	CVAE « solaire » 2014 en euros
Maximum EPCI « Moyenne Durance »	285 345 €	56 910 € (Tarif d'achat antérieur au moratoire)[44]
Moyenne régionale	56 348 €	9 107 €
	IFER « solaire » potentiel en euros	**CVAE « solaire » potentielle en euros**
Maximum EPCI « la Dracénoise »	422 092 €	24 459 € (Tarif d'achat 2015)
Moyenne régionale	115 356 €	1 397 €

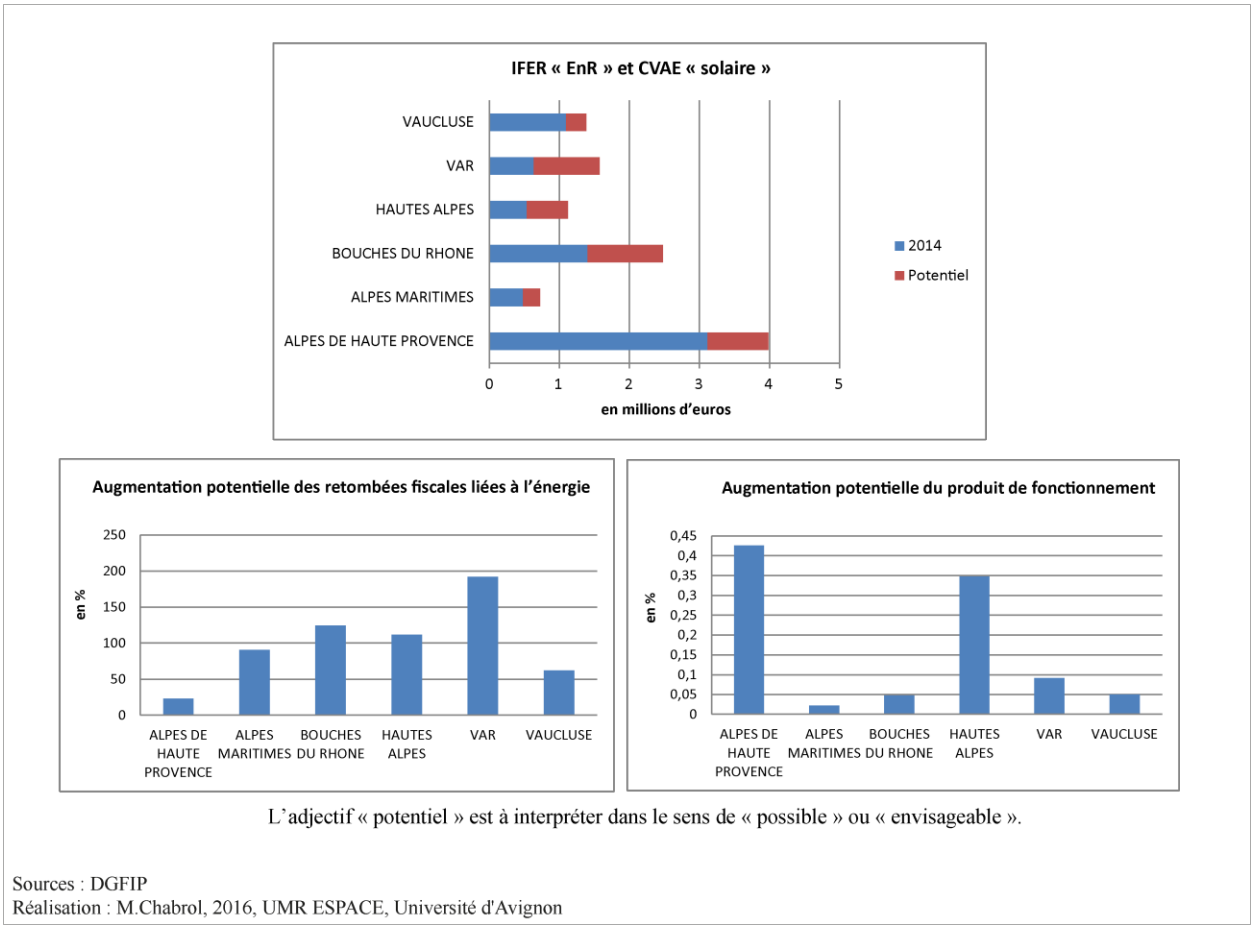
Source : M.Chabrol,2016

Tableau 16. IFER et CVAE « solaire » : deux poids, deux mesures

Par ailleurs, dans le cadre des réformes territoriales prévues dans la loi NOTRe[45] et de la suppression progressive des départements, comment vont être réparties la part d'IFER et la part de CVAE dont bénéficient actuellement les départements ? Si l'objectif de la mobilisation des finances publiques locales est bien de contribuer à garantir un bon niveau de services publics de proximité, les communes et leurs groupements devraient se positionner rapidement sur cette question. Les départements sont en effet également bénéficiaires des retombées fiscales liées à la production d'énergie (Cf. Tableau 13). Les modalités actuelles du partage de l'impôt ne sont sans doute pas étrangères aux prises d'initiative des départements pour développer les énergies renouvelables dans leurs territoires, à l'instar du département des Alpes-de-Haute-Provence. Celui-ci a mis en place une action publique spécifique au secteur du photovoltaïque au sol qui a été un levier fort pour le développement de cette filière. Au niveau départemental, le montant de la CVAE est beaucoup plus élevé qu'au niveau des intercommunalités. Il est estimé à plus de

[41] Pour 1 200 heures de production (moyenne en PACA) : (1MW*1 200)*(7 270/2)
[42] Pour 1 200 heures de production, un tarif d'achat de 30 cents le kWh (moyenne avant le moratoire), une valeur ajoutée d'environ 50% du CA : (((1MW*1 200*300)*50 %)*1.5 %)*26,5 %
[43] Pour 1 200 heures de production, un tarif d'achat actuel de 7,36 cents le kWh, une valeur ajoutée d'environ 50% du CA : (((1MW*1 200*73,6)*50%)*1,5%)*26,5%
[44] Le tarif d'achat est défini à la date de mise en service de la centrale et reste identique pendant toute la durée du contrat.
[45] Loi n°2015-991 du 7 août 2015 portant la nouvelle organisation territoriale de la République

213 000 euros pour le secteur du solaire au sol en 2014 au profit des Alpes-de-Haute-Provence, soit 34 % du montant de l'IFER correspondant. Un développement des potentiels doublerait, au moins[46], le montant des retombées fiscales liées à l'énergie dans trois départements sur six (Bouches-du-Rhône, Hautes-Alpes et Alpes-Maritimes). Les retombées pour le Vaucluse augmenteraient de moitié et celles des Alpes-de-Haute-Provence du quart, alors que celles du Var seraient multipliées par quatre. Les recettes fiscales supplémentaires les plus élevées profiteraient aux Bouches-du-Rhône, soit 1,08 million d'euros, et près de 1 million d'euros au Var. Cependant, c'est dans les Alpes-de-Haute-Provence et les Hautes-Alpes que l'impact sur les budgets serait le plus sensible. Le produit de fonctionnement de ces deux départements augmenterait respectivement de 0,42% et 0,35% (Figure 36). Mais toutes choses égales par ailleurs, ces montants restent extrêmement faibles au regard du produit de fonctionnement de ces collectivités qui atteignent plusieurs centaines de millions d'euros, et même plus de deux milliards pour le département des Bouches-du-Rhône. Ces observations interrogent quant à la possibilité de transférer l'ensemble des impositions issues des énergies renouvelables vers les EPCI, au regard du faible impact qu'elles peuvent avoir sur les budgets des départements.



L'adjectif « potentiel » est à interpréter dans le sens de « possible » ou « envisageable ».

Sources : DGFIP
Réalisation : M.Chabrol, 2016, UMR ESPACE, Université d'Avignon

Figure 36. Retombées fiscales actuelles et envisageables liées à la production d'énergie au profit des départements

[46] Seule la CVAE du secteur solaire a été prise en compte dans les calculs.

2.2.3 La fiscalité locale de l'énergie, entre opportunités et perspectives limitées de développement local

L'analyse de la fiscalité locale des énergies renouvelables en région PACA montre une contradiction entre un possible renforcement parfois important des recettes fiscales et une certaine fragilité liée au manque de diversification de l'assiette fiscale. Dans les espaces où le tissu économique est fragile ou peu développé, de nouvelles taxes représentent une opportunité certaine pour l'amélioration de la gestion publique locale, mais accroissent dans le même temps une forme de dépendance fiscale à une « mono-activité » peu territorialisée, et sur laquelle les élus locaux ont très peu de pouvoir en termes de fiscalité directe. Nous avons vu que les retombées les plus élevées sont dues à l'IFER. Or son montant est fixé par décret de l'État. Les élus locaux n'ont aucune marge de manœuvre pour moduler cet impôt. Le montant de la CVAE résulte par ailleurs de la législation nationale liée au tarif d'achat de l'électricité dont dépend directement le chiffre d'affaires des installations de production. En réalité, la seule marge de manœuvre des élus locaux en terme de fiscalité sur les installations d'EnR se situe dans les taux votés pour les impôts fonciers, et nous avons vu que les productions solaire et éolienne sont très faiblement impactées par ces taxes et sont même exonérées dans certaines collectivités.

Ce manque de gouvernabilité de la fiscalité locale des énergies renouvelables représente une limite pour encourager les élus locaux à accueillir ce type d'infrastructure sur leur territoire. Cependant, tant que l'État garantit l'existence de l'IFER, les collectivités ou EPCI bénéficiaires pourraient, dans l'hypothèse d'un développement des énergies renouvelables, accroître leurs capacités d'investissement public dans des espaces jusqu'alors en retrait du dynamisme régional. Mais du fait du principe de non-affectation des recettes des collectivités territoriales, rien ne garantit que les recettes fiscales liées aux EnR sont et seront réinvesties dans des projets de développement local, voire même qu'elles appuient des opérations à forte dimension environnementale ou en lien avec une mise en œuvre de la transition énergétique (rénovations thermiques, photovoltaïque toiture, etc.). Ces recettes peuvent aussi être absorbées par la gestion courante, par le remboursement de la dette ou par des investissements qui n'ont rien de durable. La question de l'affectation des recettes à des initiatives en faveur du développement local est une question politique qui dépend avant tout du choix des élus et des priorités budgétaires qu'ils définissent avec leurs assemblées délibérantes.

Par ailleurs, des expériences récentes (cf. *supra*) montrent que les infrastructures de production d'énergie renouvelable constituent un élément moteur de développement local, si une mobilisation totale et coordonnée des acteurs locaux pour valoriser ces ressources s'effectue (Nadaï *et al.*, 2015). Il s'agit dans ce cas d'intégrer ces infrastructures dans le cadre de projets de territoires. Cela nécessite toutefois des capacités financières d'investissements importantes, des compétences techniques particulières et des volontés d'innovation sociale locale (Schneider, 2010). C'est pourquoi ces expériences sont encore marginales, limitées à des situations particulières. Ce type de dynamique s'observe dans des territoires dont l'histoire et le contexte économique et socio-spatial favorisent l'émergence d'une mobilisation collective (reconversion de bassins miniers dans

le cas de Loos-en-Gohelle, redynamisation d'une coopérative agricole en perdition dans le cas de Figeac, réactivation de la régie locale d'électricité dans un contexte de libéralisation du marché pour la commune de Montdidier) (Nadaï *et al.*, 2015). Jusqu'à présent, aucune expérience aboutie de ce type n'a été menée en région PACA. En outre, si ce type d'expérience permet de remobiliser un territoire autour d'un projet collectif, cela ne garantit pas pour autant que les perspectives de développement économique local s'en trouvent réellement augmentées. Le développement local se manifeste en effet en grande partie par la création d'emplois, ce que ne font pas vraiment les nouvelles activités productrices d'énergie renouvelable, particulièrement le solaire au sol et l'éolien dont les infrastructures, une fois mises en service, ne nécessitent pas la présence continue d'une main d'œuvre importante.

L'analyse de la fiscalité locale de l'énergie révèle une situation particulière des collectivités territoriales et EPCI situés en zones rurales, entre opportunités financières nouvelles et dépendance à la conjoncture économique et politique. En région PACA, les communes, EPCI et départements d'arrière-pays sont les bénéficiaires privilégiés des retombées fiscales liées à la production d'énergie car ils offrent à la fois les meilleures conditions physiques pour produire de l'énergie renouvelable et des surfaces foncières disponibles et à faible valeur locative. Si le montant des retombées fiscales semble parfois dérisoire au regard des budgets des grandes métropoles, il peut être important par rapport aux budgets des collectivités et EPCI des territoires ruraux. Cependant, même si un développement d'infrastructures de production d'énergie dans ces espaces représente un bénéfice financier, il n'en représente pas nécessairement pour autant un élément directement moteur de développement local. Il peut néanmoins en être le carburant. La législation fiscale de l'énergie donne peu de visibilité à ces collectivités en les soumettant fortement à la conjoncture politique nationale et en réduisant leur marge de manœuvre en termes de fiscalité dynamique.

Par ailleurs, certaines collectivités cherchent à tirer directement profit des ressources renouvelables dans une démarche de projet de territoire encouragée dans le cadre du projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte. Au-delà de l'analyse de la fiscalité locale de l'énergie, on est amené à s'interroger sur le souhait et la capacité des élus locaux à s'impliquer dans ce type de démarche de projet qui nécessite investissements publics, compétences techniques et mobilisation active, dans la mesure où subsiste la possibilité d'augmenter le niveau de richesse de leur collectivité sans investissement particulier de leur part si ce n'est d'accepter de nouvelles infrastructures de production sur leur territoire.

Cette analyse révèle enfin plus généralement ce qu'on peut qualifier de dilemme de l'intérêt général. Les élus locaux se trouvent à la fois face à des injonctions en termes de développement durable contenues dans les lois Grenelle et de la transition énergétique, et face à des enjeux de développement économique de leurs territoires qui semblent pour l'instant difficilement trouver une réponse dans la « croissance verte ». Les EnR ne sont pas mécaniquement un facteur de croissance. Les territoires qui ont des expériences abouties de projet territorial basé sur le développement des EnR témoignent par ailleurs de capacités d'ingénierie, de coordination politique ou d'expériences passées en matière de portage des EnR qui résultent de processus longs et complexes difficiles à reproduire et à généraliser.

3 La transition énergétique : renouveau territorial ou développement durable inégal

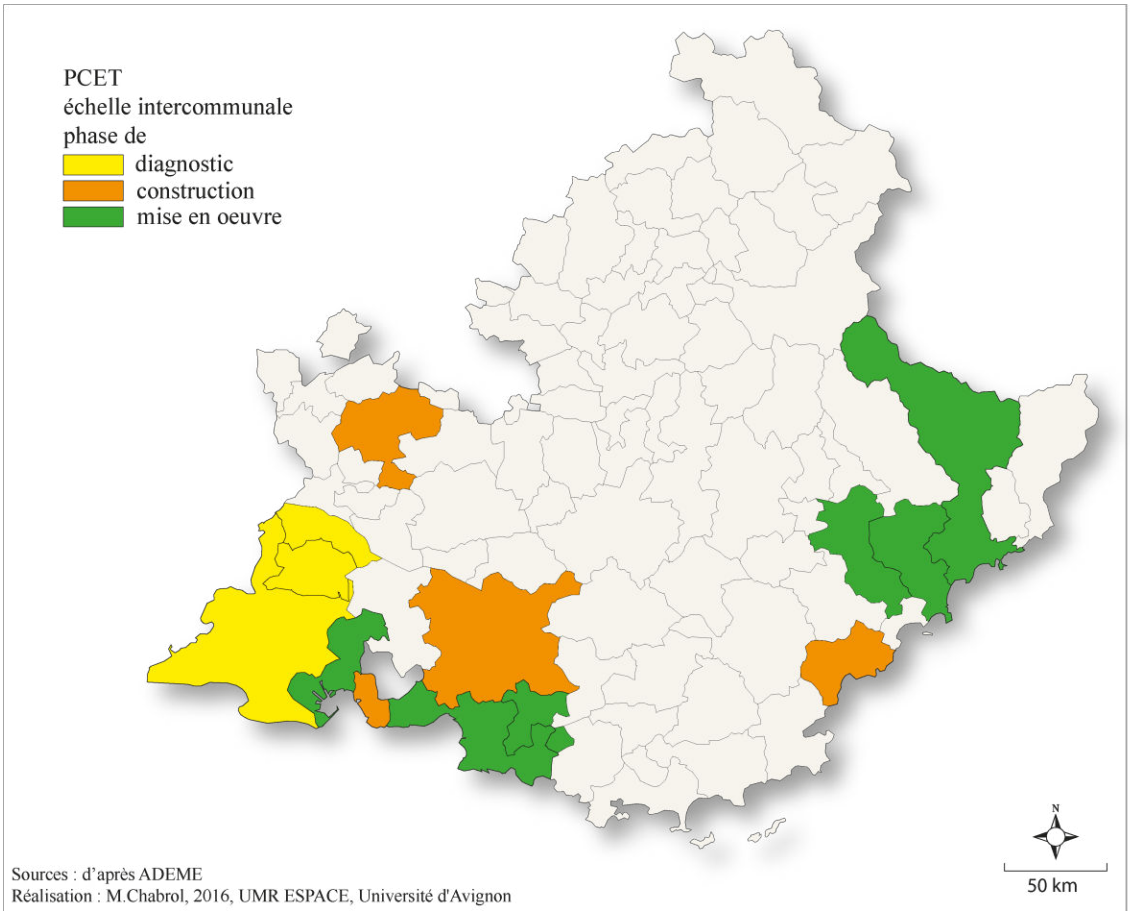
La transition énergétique questionne donc la façon dont le pouvoir social, économique et politique se manifeste dans l'espace et résulte de stratégies de partage, d'intégration économique et/ou de gestion de l'espace par les acteurs (État, collectivités, entreprises) dans l'exercice de leur autorité politique ou commerciale et industrielle (Brenner, 1999). Les modes de gouvernance des territoires sont reconfigurés aujourd'hui à la fois par une redistribution des compétences et par l'intégration des enjeux énergétiques dans les démarches de planification. La mise en œuvre de la transition énergétique dans les territoires de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur se traduit par une différenciation spatiale importante des démarches et processus de gouvernance. Si les espaces très urbanisés répondent en premier lieu aux obligations normatives de la loi Grenelle, les territoires de projets et les territoires d'arrière-pays semblent trouver dans la transition énergétique l'occasion de renouveler leur mode de gestion de l'espace et d'activer une source nouvelle de développement endogène.

3.1 Entre réponses aux injonctions normatives et démarches de projet de territoire

Les modifications du paysage institutionnel amenées par les lois MAPAM, NOTRe et TECV remettent en cause la réalisation des Plans Climats Énergie Territoriaux (PCET). Ces derniers introduits par la loi Grenelle doivent être aujourd'hui réalisés uniquement à l'échelle intercommunale, intégrer la composante qualité de l'air pour devenir des Plan Climat Air Énergie Territoriaux (PCAET), et être mis en compatibilité avec le SRCAE. Ces modifications mettent un coup d'arrêt aux villes de plus de 50 000 habitants et aux départements qui s'étaient engagé dans cette voie et ralentissent dans le même temps les démarches entreprises pour les adapter à ce nouveau contexte. Si l'objectif imposé par la loi TECV est bien de couvrir l'ensemble du territoire par ces nouveaux documents de planification, la réalisation des PCET (ancienne génération) ne concernait jusqu'à présent qu'une portion limitée du territoire (Carte 22). Il apparaît clairement que ces documents de planification qui nécessitent des compétences importantes d'ingénierie et un accompagnement par des structures spécialisées (ADEME, bureaux d'études) mettent de côté un grand nombre d'intercommunalités déjà en proie à la réalisation des SCoT et des Agendas 21.

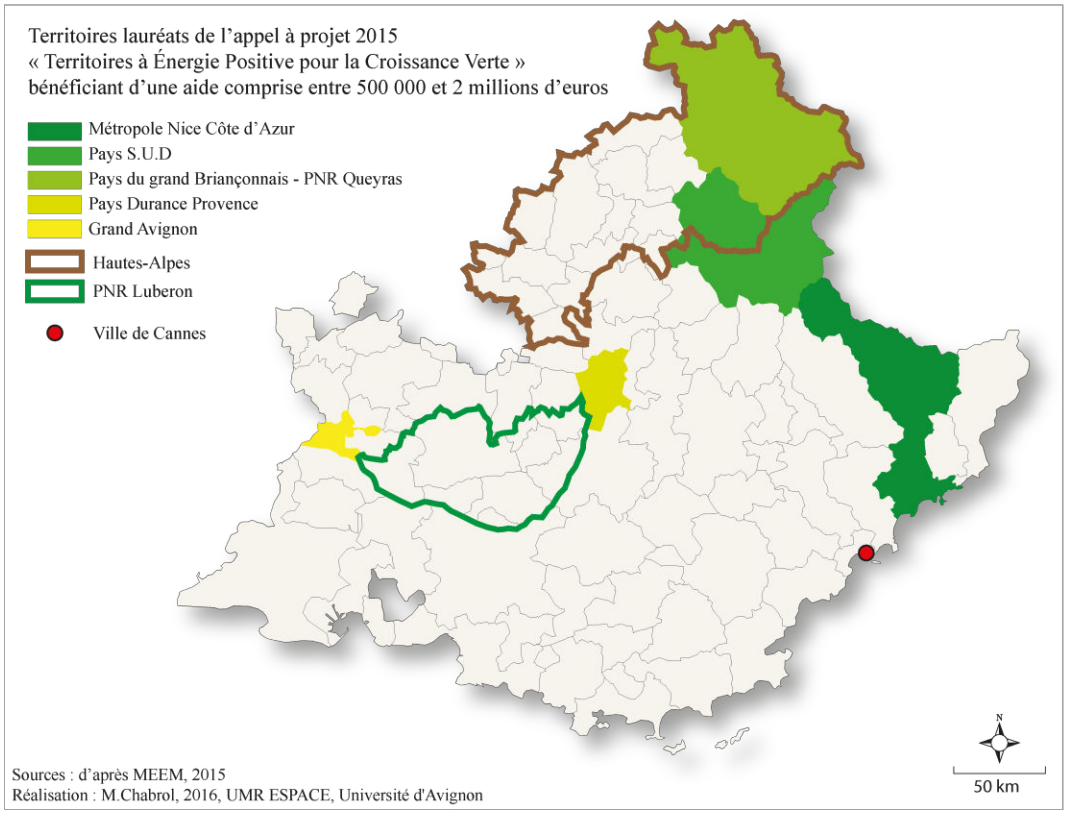
Il semble aussi que la réalisation de ces documents soit corrélée à la taille de l'EPCI. En effet, seuls les PCET des territoires les plus peuplés (Métropoles marseillaise et niçoise) ont atteint précocement une phase de mise œuvre. Cette analyse est également confirmée par une enquête récente réalisée auprès de 336 collectivités de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (ORECA, 2015)[47]. Cette enquête montre en effet que 46% des collectivités ne savent pas ce qu'est le SRCAE et que 29% des collectivités savent qu'il existe mais sans savoir réellement de quoi il s'agit. Leurs résultats montrent aussi que les collectivités des Bouches-du-Rhône et des Alpes-Maritimes sont les mieux informées sur cette question.

[47] Sondage Opinion Way Auxilia pour l'Observatoire Régional de l'Énergie, du Climat et de l'Air de Provence-Alpes-Côte d'Azur.

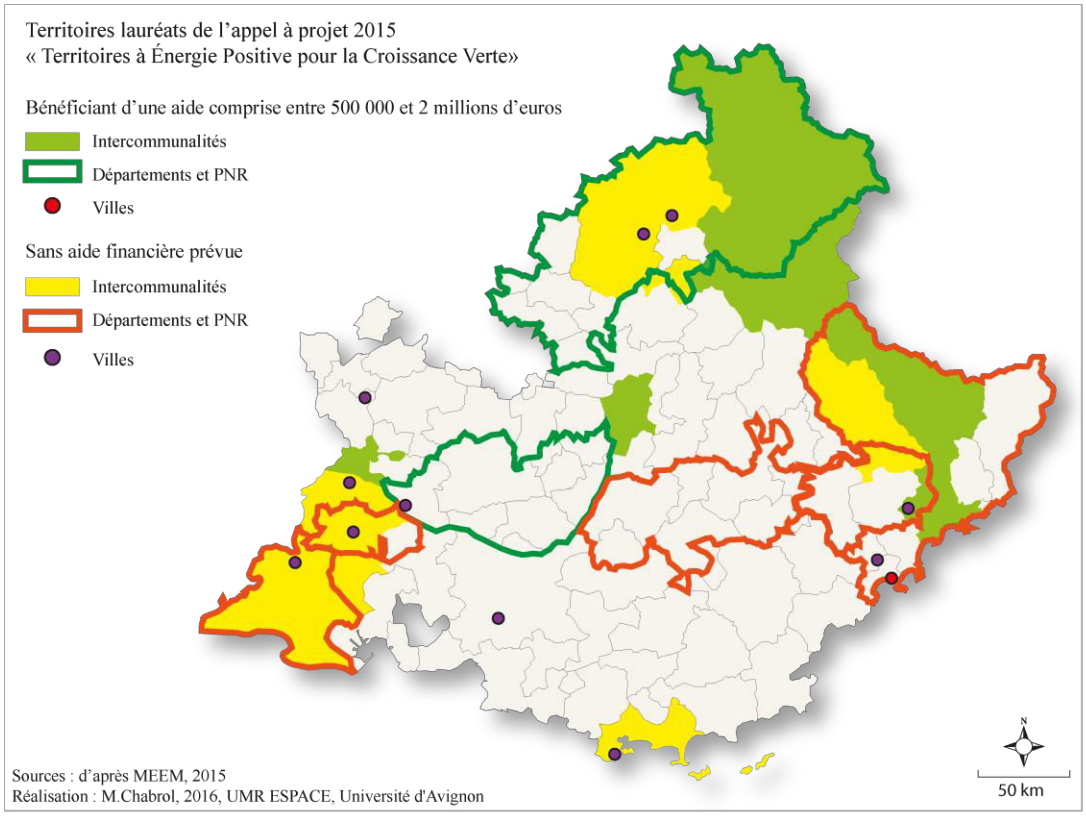


Carte 22. État d'avancement des PCET à l'échelle intercommunale en région PACA en 2015

En revanche, les démarches basées sur les volontés locales en réponse aux programmes d'appels à projets nationaux et régionaux ne concernent pas tout à fait le même type de territoire. Si l'ensemble des candidatures à l'appel national « *Territoires à énergie positive pour la croissance verte* » (TEPCV) de 2015 a été validé, seules huit d'entre elles vont bénéficier d'une subvention de l'État comprise entre 500 000 euros et 2 millions d'euros en fonction des projets. Ces territoires sont en majorité des territoires de projet : trois Pays, le Parc Naturel Régional du Luberon et le Parc Naturel Régional du Queyras. Ces territoires sont dans des espaces d'arrière-pays à dominante rurale et touristique. À cela s'ajoutent deux espaces urbains, la communauté d'agglomération du Grand Avignon et la ville de Cannes, puis la Métropole de Nice (comprenant à la fois la Métropole littorale et l'arrière-pays alpin) et le Conseil Départemental des Hautes-Alpes (Cartes 23 et 24).

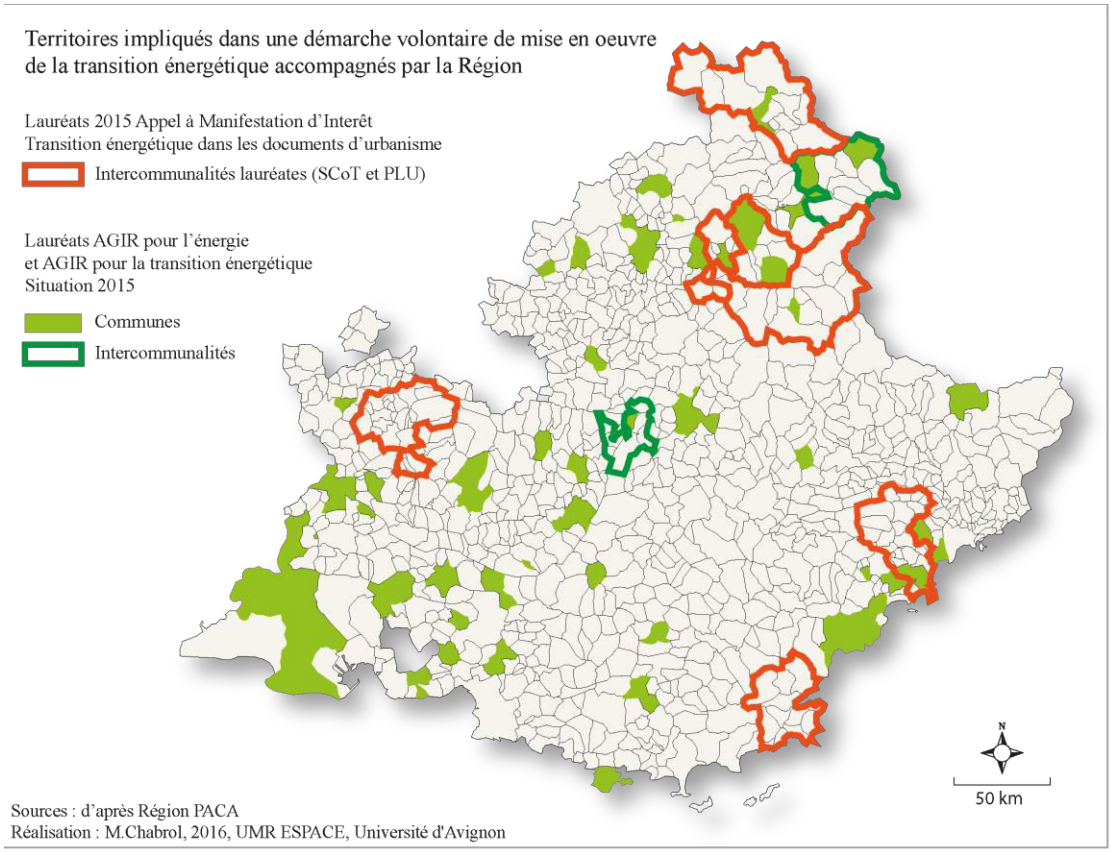


Carte 23. Les huit territoires lauréats 2015 de l'appel à projets national « Territoires à énergie positive pour la croissance verte » bénéficiant d'une subvention



Carte 24. Les 33 territoires lauréats 2015 de l'appel à projets national « Territoires à énergie positive pour la croissance verte »

Les territoires lauréats des appels à projets régionaux rassemblent une partie des territoires lauréats de l'appel national précédemment évoqué mais qui ne bénéficient pas de subventions, des territoires déjà impliqués dans une démarche d'élaboration d'un PCET, et enfin des territoires qui cumulent appel à projets national et régional (Carte 25). À ce titre, les territoires alpins attirent l'attention. Les espaces de montagnes semblent en effet être l'objet d'attentions plus particulières de l'État et de la Région. Ils apparaissent comme des territoires expérimentaux dans un contexte de réflexion engagée autour d'un Acte II de la loi Montagne[48]. Une mission parlementaire s'est vu en effet confier le rôle en janvier 2015 de formuler des propositions concrètes et opérationnelles pour actualiser cette loi. Le rapport parlementaire remis au gouvernement en septembre 2015 inscrit clairement la mise en œuvre de la transition énergétique dans les territoires de montagne comme une opportunité nouvelle de développement endogène. La proposition 20a suggère de « *soutenir le déploiement d'une économie circulaire en montagne, adossée à une logique de développement endogène et collaboratif* » (Genevard, Laclais, 2015, p.63). Les projets de *territoires à énergie positive* sont présentés comme étant dans la continuité de l'idée « *d'auto-développement* » promue par la loi de 1985. La proposition 20c va plus loin en conseillant d'engager le chantier de l'autonomie énergétique des territoires de montagne en valorisant les ressources locales comme le bois et la petite hydroélectricité (Genevard, Laclais, 2015, p. 64).



Carte 25. Territoires lauréats des appels à projets régionaux du programme AGIR et de l'appel à manifestation d'intérêt « Transition énergétique dans les documents d'urbanisme »

[48] Loi du 9 janvier 1985 relative au développement et à la protection de la montagne.

Dans ce contexte, les territoires alpins se sont engagés dans une démarche de mise en œuvre de la transition énergétique à l'échelle locale. Le Pays Serre-Ponçon Ubaye Durance (Pays SUD, cf. carte 23) est le seul territoire de haute montagne à l'échelle nationale à être déjà engagé dans une démarche de territoire à énergie positive. Mais ce nouveau projet de territoire ne s'établit pas dans un espace neutre. Il s'appuie d'abord sur une économie locale déjà active autour du tourisme hivernal et estival, et bénéficie d'une culture locale imprégnée par l'énergie puisque ce territoire est celui du barrage historique du lac de Serre-Ponçon d'une puissance de 380 MW. La présence d'un ouvrage de production d'énergie est une ressource territoriale activée depuis longtemps par les populations locales qui bénéficient d'une aménité attractive en saison estivale et capable de générer un attrait touristique important alimentant l'économie locale. Ce territoire s'appuie en partie sur la présence de ce barrage pour viser l'autonomie énergétique. Nous sommes là aussi face un problème d'interprétation et de robustesse des indicateurs d'autonomie énergétique. Il paraît en effet difficile de considérer que l'énergie produite par ce barrage vise à alimenter un territoire local. L'électricité produite alimente l'ensemble du réseau électrique et bénéficie à une large part du territoire régional. Cet exemple montre une fois encore que la mise en œuvre locale de la transition énergétique est spatialement différenciée par des spécificités territoriales, mais interroge également la notion de solidarité énergétique territoriale dans une dualité entre espaces métropolisés et arrière-pays. Notre analyse confirme par ailleurs les observations présentées dans le chapitre précédent dont la conclusion précise que les espaces où la demande énergétique est faible apparaissent comme ceux où le degré de liberté dans la mise en œuvre de la transition énergétique est le plus important et pourrait donner lieu à des changements endogènes (Cf. chapitre 4).

3.2 *Territorial lock-in* et développement durable inégal

La territorialisation de la transition énergétique s'inscrit dans un processus de *Path dependence*. Celui-ci convoque en effet un phénomène d'inertie dans les structures politiques et territoriales qui verrouille les dynamiques ultérieures dans un état stable de *Path dependence*. La libéralisation du marché de l'énergie, les injonctions nouvelles « climat-énergie », et le processus de décentralisation politique ont orienté une trajectoire d'évolution qui se traduit en France par une territorialisation de l'énergie suivant une logique descendante. Cette trajectoire se traduit alors par deux mouvements. L'un s'inscrit directement dans le renforcement des structures territoriales existantes. Ce phénomène s'illustre particulièrement par le renforcement du rôle de la Région dans la territorialisation de la transition énergétique et la poursuite du processus de décentralisation politique et de redistribution des compétences. L'autre est stimulé par un contexte favorable aux changements endogènes (appels à projets nationaux et régionaux, projets de territoires autonomes en énergie, prises de compétences locales énergie) et convoque une adaptation des structures territoriales et de leur mode de gouvernance. Il apparaît que cette adaptation n'aboutit pas à une trajectoire d'évolution vers un modèle de gouvernance totalement décentralisé et horizontal, mais à une adaptation du système par une optimisation à la marge qui renvoie son évolution vers un état stable de *Path dependence* (Figure 37).

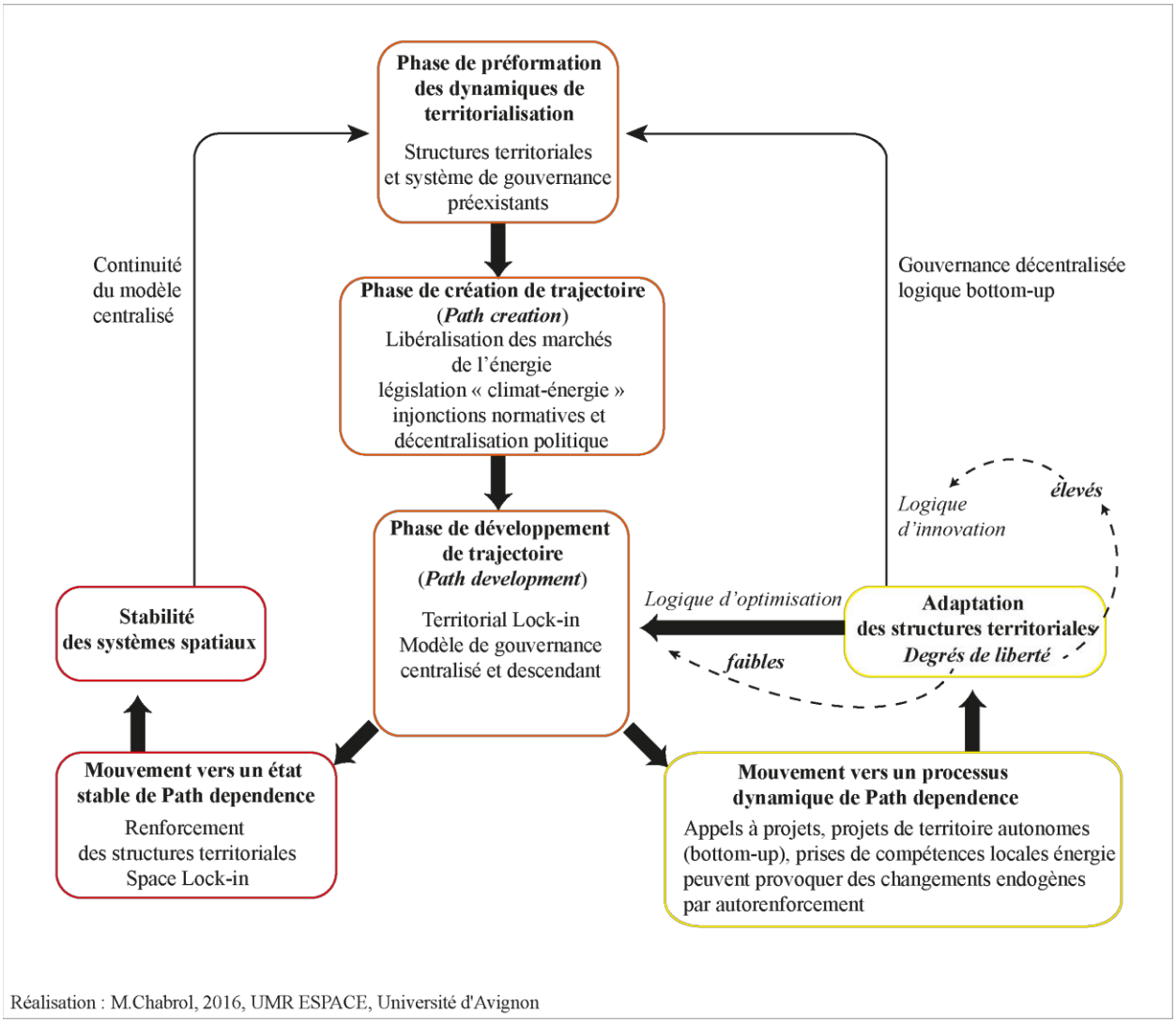


Figure 37. *Territorial lock-in* et *Path dependence* dans la territorialisation de la transition énergétique en région PACA

Cette optimisation est construite par l'articulation multi-échelle de la mise en œuvre de la transition énergétique dans les territoires. Cette articulation multi-niveau catalyse, oriente, voire contrôle les initiatives locales de transition dans un souci de mise en adéquation et de compatibilité entre les modes de gouvernance de ces niveaux.

Un certain nombre d'éléments sont selon nous susceptibles de contribuer à ce qu'on peut qualifier de développement durable inégal.

La différenciation spatiale des capacités et volontés locales de mise en œuvre d'une planification locale intégrant la dimension énergétique implique nécessairement une mise en œuvre différenciée et inégale de la transition énergétique. Dans la continuité des travaux menés par Nadaï *et al.* (2015), nos analyses montrent d'une part que les infrastructures de production d'énergie renouvelable peuvent constituer un élément moteur de développement local si une mobilisation totale et coordonnée des acteurs locaux pour valoriser ces ressources s'exprime dans le cadre de véritables projets de territoires, et d'autre part que cette mobilisation collective

s'anime dans des territoires dont l'histoire et le contexte économique et socio-spatial en favorisent l'émergence. En outre, si ce type d'expérience permet de remobiliser un territoire autour d'un projet collectif, cela ne garantit pas pour autant que les perspectives de développement économique local s'en trouvent nécessairement augmentées.

S'il paraît encore difficile aujourd'hui, par manque de recul temporel, de considérer la mise en œuvre de la transition énergétique dans les territoires comme un instrument de développement endogène, elle constitue toutefois déjà un dispositif de planification qui donne un nouveau souffle dans les visions territoriales des acteurs locaux et ouvre des pistes nouvelles de gestion et de gouvernance des espaces. Mais elle nécessite toutefois des capacités financières d'investissements importantes, des compétences techniques particulières et des volontés d'innovation sociale locale (Schneider, 2010). Il apparaît que les conditions favorables à une transition énergétique locale conjuguent les éléments suivants : volontés politiques des élus, intérêt financier (fiscal ou subvention) et culture énergétique (ou coopérative) locale. L'hétérogénéité spatiale de ces critères entraîne des potentiels de changement inégaux selon les territoires. Alors que le projet de transition énergétique a une dimension sociétale universelle forte et vise à répondre à des enjeux globaux, sa mise en œuvre dans les territoires et à l'échelon local peut générer des inégalités. Ces inégalités se mesurent en termes d'accès à un territoire de vie sobre, intelligent, efficace et durable. Les valeurs positives véhiculées par ces termes aujourd'hui largement utilisés dans les politiques publiques montrent que la question énergétique est bien liée à celle de l'amélioration des conditions de vie. Les territoires qui pourront mettre en œuvre des projets visant la sobriété ou l'efficacité énergétique, les réseaux intelligents et la durabilité offriront des aménités nouvelles. Mais la question des territoires peu attractifs pour l'industrie de l'énergie, mal dotés en finances publiques, ou tenus à l'écart de l'accompagnement financier de l'État, des Régions ou de l'Union européenne, reste ouverte. En outre, la diffusion de l'idée d'autonomie énergétique interpelle sur de possibles dérives d'un localisme émergent et révèle de nouvelles ambiguïtés.

La politique énergétique nationale est historiquement centralisée, particulièrement dans le secteur de l'électricité où ce centralisme s'est enraciné dans un jeu complexe d'acteurs intégrés dans la construction d'infrastructures qui minimisent les déséquilibres entre les espaces ruraux et urbains et garantissent un accès à l'énergie dans une logique de solidarité territoriale (Poupeau, 2007). Cette logique de solidarité et la prédominance de la technologie nucléaire ont limité le rôle des territoires dans la définition de la politique énergétique nationale. Les évolutions juridiques récentes (Cf. 1.1.2), la libéralisation du secteur de l'électricité et l'intégration des énergies renouvelables fournissent un cadre favorable à la légitimation des territoires comme acteurs de l'énergie. Les démarches de territorialisation de la transition énergétique montrent qu'une réappropriation des questions énergétiques par les citoyens, les élus et les acteurs socio-économiques locaux semble possible. Le déploiement de projets de territoire comme le programme des territoires à énergie positive pour la croissance verte (TEPCV) traduit l'émergence d'une forme de localisme dans les politiques publiques de l'énergie

(Nadaï *et al*., 2015). Cela s'inscrit en fait dans un mouvement plus large de relocalisation de la production selon un principe de proximité et de minimisation de l'empreinte écologique des activités[49]. Cette démarche peut paraître à première vue comme un élément nouveau de décentralisation politique proposant aux collectivités territoriales de faire preuve d'initiatives et d'innovation pour prendre en main leur avenir énergétique. Mais notre analyse a bien montré que les expériences locales de transition énergétique sont, d'une part, tributaires de financements exogènes pour se réaliser et doivent, d'autre part, être compatibles avec les politiques énergétiques nationales et régionales. De fait, les démarches ascendantes sont soumises au contrôle politique des échelons supérieurs ou en sont dépendantes financièrement. De ce point de vue, la territorialisation de la transition énergétique nécessite une articulation entre échelons territoriaux dans une logique de partenariat. Les modalités de ce partenariat sont aujourd'hui ouvertes. La distinction entre territoires métropolisés qui s'engagent davantage sur la voie de l'intégration de l'énergie dans la planification locale, et territoires ruraux qui s'engagent plutôt dans une démarche de projet et de valorisation des ressources locales montrent que la mise en œuvre de la transition énergétique dans les territoires peut aboutir soit à l'autonomisation des collectivités territoriales dans la conception et la mise en œuvre de leur avenir énergétique, soit à la structuration d'une organisation territoriale scalaire dans laquelle les collectivités territoriales et les EPCI sont les vecteurs des stratégies énergétiques conçues et décidées aux échelons supérieurs (en particulier aux échelles nationales et régionales).

[49] Réseaux courts, association pour le maintien de l'agriculture paysanne, écologie industrielle, démocratie participative, monnaie locale…

La transition énergétique suppose de concevoir une territorialisation multi-niveau basée sur l'interaction entre la puissance politique nationale, les entreprises, l'Union européenne et les collectivités territoriales (Chanard, 2011), principe de gouvernance souvent conceptualisé par le modèle de gouvernance multi-niveau (Multi-Level Gouvernance MLG) (Hooghe, Marks, 2002 ; Bache, Flinders, 2004 ; Smith, 2007). Mais le modèle du MLG, qu'il soit horizontal ou vertical (Smith, 2007), conserve une dimension hiérarchique forte et ne constitue pas en cela une véritable rupture dans les modes de territorialisation de l'énergie. De plus, les villes, les régions et les collectivités territoriales ne participent pas directement à la définition de la politique énergétique nationale et doivent intégrer la dimension énergétique à leurs projets de planification. La gouvernance multi-niveau n'est pas forcément compatible avec des modèles de développement totalement *bottom-up* qui sont en contradiction avec les choix politiques et industriels du passé. Rappelons que l'accès universel à l'énergie et à faible coût en France est permis par son modèle centralisé, arborescent et descendant issu de l'intégration de la question énergétique dans les réflexions sur l'aménagement du territoire national après la Deuxième Guerre mondiale (Bouneau, 2006). La gouvernance multi-niveau relève de la *path dependence* parce que chaque niveau de gouvernance défend et cherche à conserver son intérêt. Les modèles bottom-up basés sur l'appropriation des enjeux énergétiques et la mise en œuvre de projet par les acteurs locaux demanderaient à l'État d'accepter une perte de pouvoir de décision et aux grandes entreprises de renoncer à leur monopole industriel, ce qui représente un coût politique difficile à accepter.

Aussi les capacités de mise en œuvre d'une planification locale intégrant la dimension énergétique sont très différenciées d'un territoire à l'autre, et par conséquent cette différenciation est susceptible de générer ce qu'on peut qualifier de développement durable inégal. La différenciation spatiale de ces facteurs (géographiques, économiques, politiques, financiers) dans l'espace implique nécessairement une mise en œuvre différenciée et inégale de la transition énergétique. D'abord sur le plan thématique, la maîtrise de la consommation via la rénovation des bâtiments et le développement de réseaux de chaleur sont surtout abordés dans les métropoles alors que le développement des énergies renouvelables concerne davantage les espaces ruraux. Si dans les métropoles la question énergétique accompagne les réflexions autour de l'amélioration du cadre de vie et de la gestion de services collectifs, elle devient dans les espaces ruraux l'espérance d'un levier de développement local.

Chapitre 6
Socio-spatial lock-in :
le poids des structures socio-spatiales héritées

L'inscription spatiale des sociétés résulte de contraintes spatiales, de choix, de règles, de conflits et de négociations entre différents groupes sociaux. Elle est le fruit d'interactions systémiques alimentées par des stratégies individuelles et collectives qui agissent sur l'organisation de l'espace dans toute la complexité et la diversité des actes sociaux. Les formes de l'emprise bâtie sont les conséquences durables d'inscriptions spatiales structurées (ordonnées ou désordonnées) des sociétés, appelées aussi structures socio-spatiales. Ces formes dérivent en effet de choix stratégiques individuels, libres ou contraints (localisation de l'habitat, accessibilité des zones d'emploi, etc.), de règles et de stratégies collectives (planification, aménagement, Plan Local d'Urbanisme, etc.) et d'interactions entre différents groupes sociaux (ségrégation socio-spatiale). Une forte inertie caractérise les structures socio-spatiales qui contraignent les interactions sociales et spatiales (réseaux de transport, dynamiques foncières, etc.), ainsi que leurs propres potentialités de changement et d'évolution.

Ce sixième chapitre analyse comment la transition énergétique convoque une réévaluation de la forme, de la fonction et de la valeur de certaines structures socio-spatiales en particulier celles des espaces urbains et périurbains. L'exemple de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur permet de s'interroger sur la capacité réelle de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme à agir dans le domaine de la maîtrise de la consommation d'énergie, face à des dynamiques territoriales maintenant anciennes et dont le résultat dans l'organisation des territoires est devenu une contrainte. Les structures socio-spatiales sont ainsi présentées dans ce chapitre comme un élément de *Path dependence* où les dynamiques qui les concernent peuvent être en contradiction avec le projet de transition énergétique.

1 Les liens entre forme urbaine et consommation d'énergie

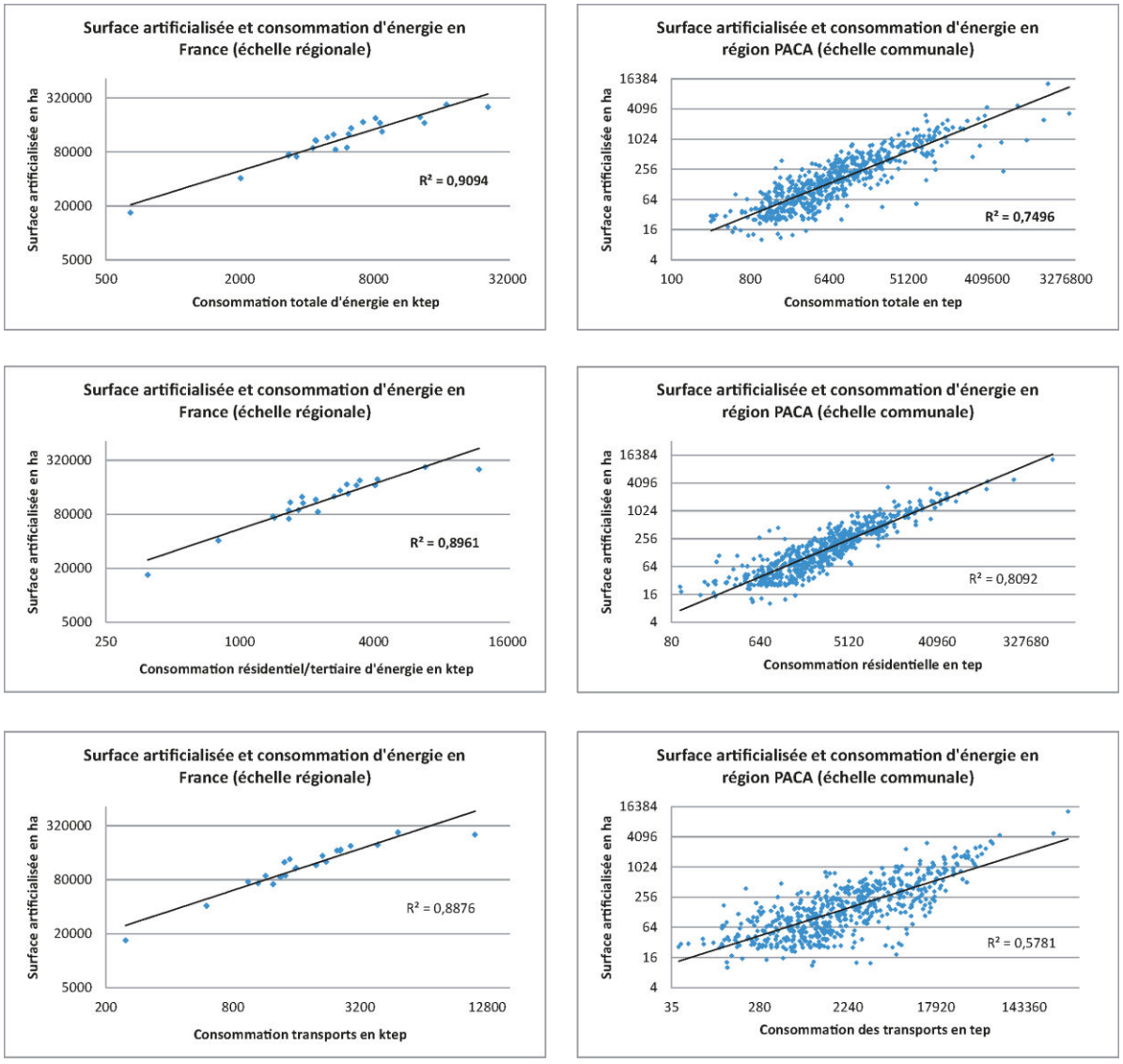
Dans la perspective d'un développement urbain soutenable, la contribution possible de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme à la diminution des consommations d'énergie est une idée aujourd'hui largement répandue (Loi Grenelle, 2009). Mais si les bénéfices d'une amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments sont indiscutables, il n'en est pas de même pour les effets de la planification territoriale. L'enjeu énergétique est aujourd'hui intégré aux projets d'aménagement du territoire sans pour autant que leur rôle réel en termes de diminution des consommations d'énergie puisse être déterminé. Ces projets se cristallisent pour beaucoup autour du contrôle et de la limitation de l'extension spatiale des villes et des agglomérations. De nombreux rapports préconisent la densification et la compacité des villes pour minimiser les dépenses énergétiques et maximiser l'accessibilité des lieux. Une ville compacte permettrait théoriquement de réduire les distances des déplacements individuels, de favoriser les transports collectifs et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. La modification de la morphologie urbaine par le comblement des vides et la densification sont évoquées aujourd'hui comme des solutions. Ce discours s'appuie sur des travaux mettant en évidence un lien inverse entre densité urbaine et consommation énergétique. Beaucoup concluent qu'une ville dense est moins énergivore (Newman, Kenworthy, 1989 ; Pouyanne, 2004 ; Le Néchet, 2011 ; Desjardins, 2011). Mais il apparaît que beaucoup de ces études « *ne mettent pas bien en évidence la part strictement liée à la forme urbaine dans les différences constatées en matière de consommation énergétique* » (Desjardins, 2011).

La détermination et la caractérisation des liens entre les formes d'organisation spatiale et les consommations énergétiques sont par conséquent des préalables nécessaires à la mise en œuvre de la transition énergétique dont le principal pilier demeure la maîtrise de la consommation d'énergie. Cette partie s'inscrit dans la continuité de ces recherches en proposant d'analyser les relations entre densité, extension et fragmentation des taches urbaines, avec les consommations d'énergie. Nous proposons une étude de cas en région Provence-Alpes-Côte d'Azur pour vérifier l'existence de telles relations dans cette région. Les résultats obtenus permettent de nuancer le lien entre forme urbaine et consommation d'énergie.

1.1 Occupation de l'espace et dégradation d'énergie, un phénomène irréversible

L'occupation de l'espace par des activités humaines et la densification des formes de peuplement peuvent être considérées comme les résultantes spatiales d'une dégradation progressive et croissante d'énergie au cours du temps. Nos sociétés sont devenues totalement dépendantes d'apports énergétiques qui permettent la pérennité, le développement ou l'extension de leurs organisations spatiales. L'organisation spatiale des territoires est un processus lent dont les structures produites sont dotées d'une très forte inertie. Cette structuration est un phénomène irréversible, nourri par des processus de croissance (croissance démographique, urbaine, économique…). Les villes s'accroissent et se rejoignent. Les agglomérations s'étendent. La demande en énergie augmente. Seuls des phénomènes de rupture dans ces processus de

croissance peuvent diminuer ou stabiliser la demande globale en énergie. Ces phénomènes de rupture peuvent relever autant de conjonctures économiques et sociales (crises et déprises industrielles) que de politiques volontaristes (sobriété…). C'est pourquoi le lien entre l'occupation de l'espace et la consommation d'énergie est une réalité évidente (Cf. chapitre 1). Une confrontation des données d'occupation du sol fournies par la base *Corine Land Cover* aux données de consommation d'énergie de la base *Eider* et de la base *Energ'air* établit des relations linéaires entre la surface de territoire artificialisé et la consommation énergétique (Figure 38).



Sources : Corinne Land Cover, SOeS base Eider, base Energ'air
Réalisation : M.Chabrol, 2015, UMR ESPACE, Université d'Avignon

Figure 38. Surface artificialisée et consommation d'énergie en France et en région PACA en 2006

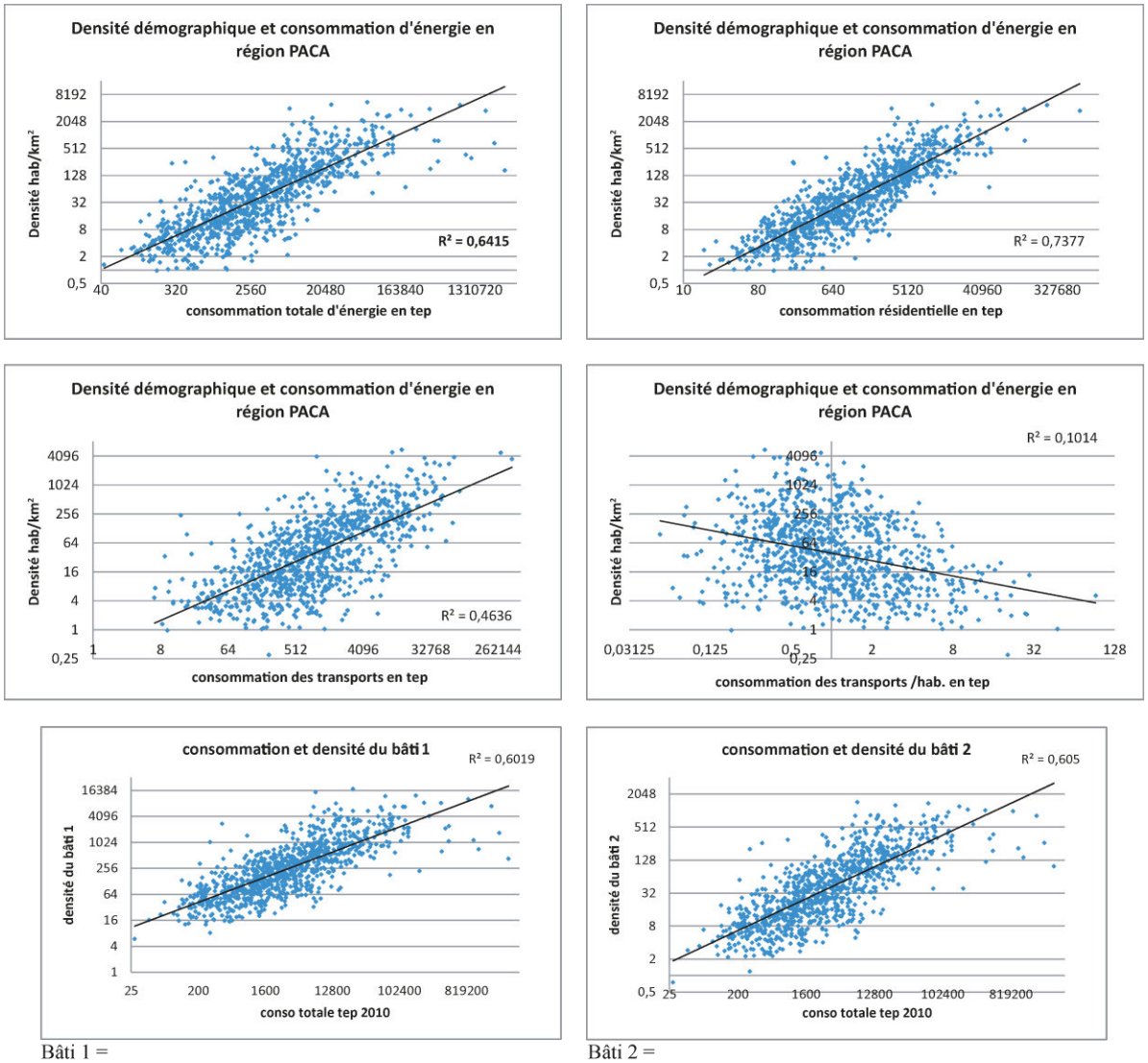
Les mesures réalisées à l'échelle des régions métropolitaines décrivent des coefficients de détermination R^2 de 0,9 entre la consommation totale et la surface de territoire artificialisée, de 0,89 lorsque les mesures sont effectuées à partir de la consommation des secteurs résidentiel et tertiaire, et de 0,88 avec la consommation des transports. Des corrélations de même ampleur sont établies lorsque nous distinguons la surface de tissu urbain continu du tissu urbain discontinu.

Ces corrélations sont également établies à l'échelle communale en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Avec un nombre d'individus statistiques très élevé, la corrélation reste significative (R^2 = 0,74) (Figure 38). Cette analyse montre que plus les sociétés occupent, aménagent et utilisent l'espace, plus les besoins en énergie sont importants, autant dans les phases de structuration que de fonctionnements. Ce que nous avons décrit à l'échelle des systèmes de villes nationaux dans le chapitre 1, s'observe aussi à l'échelle des régions métropolitaine, ainsi qu'à l'échelle communale.

1.2 Densité urbaine et consommation d'énergie, des relations inverses à nuancer

Les travaux sur le lien entre densité des villes et consommation énergétique sont aujourd'hui nombreux. Ils s'inscrivent dans la continuité des travaux de Newman et Kenworthy (1989) et ont en commun de montrer un lien inverse entre la densité urbaine et la consommation d'énergie des personnes pour la mobilité. Mais cette relation appelle plusieurs points d'observation. Tout d'abord, la consommation d'énergie est systématiquement rapportée au nombre d'habitants. Or cela masque totalement les effets de masse. En effet, la ville permet des économies d'échelles et d'agglomération, de mutualiser des services, etc. En conséquence, la consommation d'énergie par habitant est souvent plus faible en milieu urbain qu'ailleurs. En revanche, les quantités d'énergie finale consommées demeurent les plus élevées dans les grandes métropoles et dans les villes industrielles. Par exemple, la consommation d'énergie de Marseille représente plus de 13% de la consommation régionale, alors que chaque commune n'en représente en moyenne que 0,10%. Pourtant un résident de Marseille consommait 2,08 tep en 2010 alors que la moyenne régionale était de 4,75 tep par habitant. Par ailleurs, les analyses se focalisent très souvent sur les consommations liées à la mobilité, masquant ainsi le poids des besoins énergétiques des secteurs résidentiel, tertiaire et industriel. Et enfin comme le soulignent Xavier Desjardins et Marie Llorente, ces études « *ne mettent pas bien en évidence la part strictement liée à la forme urbaine dans les différences constatées en matière de consommation énergétique* » (Desjardins, Llorente, 2009) puisque les morphologies urbaines sont très souvent mesurées en s'appuyant sur les densités démographiques. Or l'aménagement du territoire n'agit qu'indirectement sur les densités de population par la proposition de grandes orientations ou de mesures visant la modification de l'agencement des espaces bâtis et artificialisés. De plus, les analyses régionales sont rares dans ces études qui traitent généralement des grandes métropoles. La question de la *transition énergétique* se pose aujourd'hui à des échelles régionale et locale alors que l'énergie était jusque-là de la responsabilité nationale (Cf. chapitre 5). C'est pourquoi nous analysons les relations entre densité et consommation à l'échelle régionale par l'exemple de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. La base de données *Energ'air* fournit la consommation d'énergie par commune et par secteur pour l'année 2010. La confrontation de ces données aux densités démographiques ne montre aucun lien inverse entre densité et consommation sur l'ensemble des communes de la région. Au contraire, une relation linéaire positive (R^2 de 0,64) est mesurée entre la consommation finale et la densité démographique. De façon très générale, plus la densité démographique est élevée plus les quantités d'énergie finale sont importantes. Cependant,

il s'agit là d'une tendance et le nuage de points montre de grands écarts de consommation pour les densités supérieures à 250 hab/km^2. Ces écarts s'expliquent par le poids de la consommation du secteur industriel pour certaines villes. Ainsi en décomposant la consommation par secteur, la relation établie est plus significative avec la consommation du secteur résidentiel (R^2 de 0,73), mais elle est plus incertaine avec la consommation liée aux transports (R^2 de 0,43). En revanche, aucune relation linéaire n'est identifiée en rapportant la consommation au nombre d'habitants, comme dans l'analyse de Newman et Kenworthy. Même si les nuages de points obtenus dessinent une très légère tendance à une relation inverse, les valeurs des coefficients de détermination ne sont pas significatives. Les résultats sont en tous points similaires en utilisant des indicateurs de densité du bâti, les mètres carrés construits à l'hectare d'une part, et une densité du bâti intégrant la verticalité d'autre part. Aucune relation inverse entre la densité urbaine et la consommation énergétique, en valeur brute ou relative à la population, n'a pu être démontrée en région PACA (Figure 39).



Bâti 1 =
(Surface bâtie * hauteur moyenne) / Surface de la commune

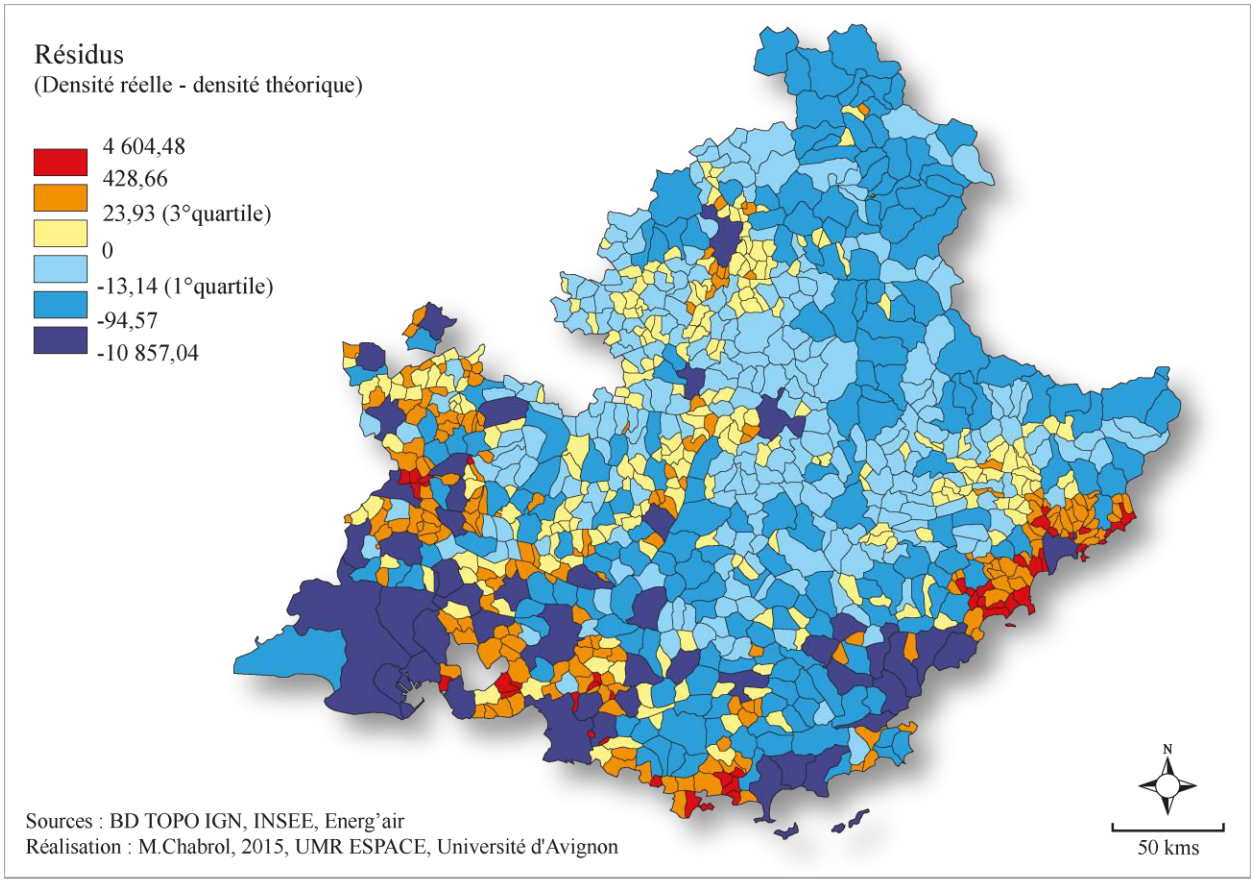
Bâti 2 =
nombre de m² bâtis par hectare

Sources : IGN BD TOPO, INSEE, base Energ'air
Réalisation : M.Chabrol, 2015, UMR ESPACE, Université d'Avignon

Figure 39. Densités et consommation d'énergie en région PACA en 2010

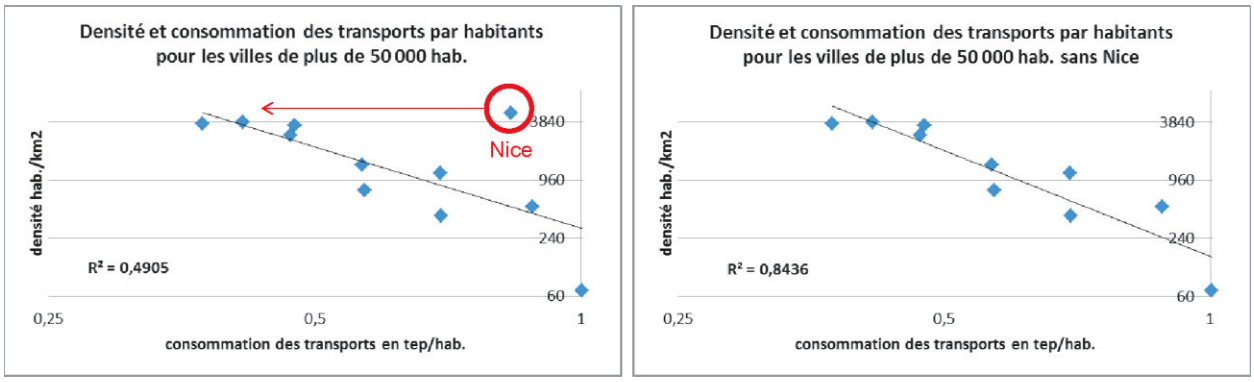
De plus, l'analyse des résidus de régression entre la consommation d'énergie du secteur résidentiel et la densité démographique montre que le niveau de consommation ne justifie pas à lui seul le niveau de densité de population.

La carte 26 montre en effet que la plupart des couronnes périurbaines des grandes agglomérations a un niveau de densité de population plus élevé en réalité que ce que le suggèrerait le niveau de consommation d'énergie. Et inversement, les grandes agglomérations sont moins denses en réalité que ce que le suggère le niveau de consommation observé.



Carte 26. Densité de population et consommation d'énergie en région PACA en 2010, résidus de régression

On ne peut donc pas affirmer qu'en région PACA, la densification des espaces impliquerait une moindre consommation des besoins énergétiques. Les éléments permettant d'expliquer des consommations par habitant moins élevées en ville se situent ailleurs. Les fonctions urbaines ont sans doute beaucoup de poids (économies d'échelle, mutualisation de services, chauffage collectif, mode de vie citadin, etc.). Mais nous ne pouvons pas dire qu'une relation inverse entre densité et consommation des personnes pour la mobilité soit observable à l'échelle d'un territoire régional. Ainsi dans les villes de plus de 50 000 habitants en région PACA, la consommation d'énergie par personne pour les transports diminue lorsque la densité des villes augmente (Graphique 22) excepté lorsque la consommation des transports aériens est prise en compte, comme dans le cas de Nice où la consommation par habitant est deux fois plus élevée que ce qu'elle devrait être en théorie au regard de sa densité.



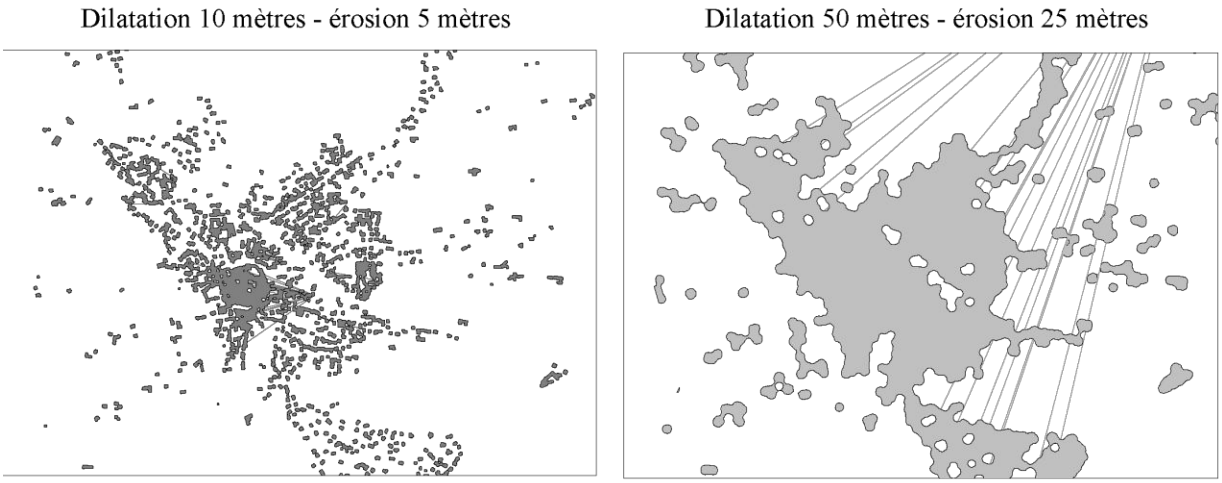
Sources : INSEE, base Energ'air
Réalisation : M.Chabrol, 2015, UMR ESPACE, Université d'Avignon

Graphique 22. Densités et consommation d'énergie dans les villes de plus de 50 000 habitants en région PACA en 2010

1.3 Extension urbaine fragmentée et consommations énergétiques

Le contrôle de l'extension urbaine nécessite d'identifier la forme prise par cette extension. La caractérisation du degré de continuité ou de fragmentation de l'espace bâti permet d'évaluer s'il existe un lien entre les formes d'extension et la consommation d'énergie. Nous avons pour cela identifié les taches urbaines du département du Vaucluse selon la méthode de *dilatation/érosion* (CERTU, 2004).

« *La dilatation consiste à agréger entre eux les bâtis distants de moins de D mètres. Pour cela, il faut créer un tampon à partir de chaque objet. Le tampon est un polygone englobant la zone située dans un rayon R=D/2 autour d'un objet. L'érosion consiste à redonner aux objets leur taille initiale en laissant reliés entre eux les objets qui auront été agrégés. Pour cela, il faut appliquer un tampon négatif de rayon –R* » (CERTU, 2004). Deux niveaux de taches urbaines ont été testés. Un premier niveau basé sur une dilatation de 50 mètres et une érosion de 25 mètres permet d'appréhender l'extension urbaine dans sa globalité, mais ne permet pas de distinction entre certains niveaux de densité du bâti, par exemple entre le périurbain dense et diffus. Un second niveau basé sur une dilatation de 10 mètres et une érosion de 5 mètres permet un degré de précision supplémentaire en créant des taches différentes selon les niveaux de densité du bâti (Figure 40).



Sources : IGN BD TOPO
Réalisation : M.Chabrol, 2015, UMR ESPACE, Université d'Avignon

Figure 40. Définitions des taches urbaines

Nous proposons ensuite un indicateur d'extension urbaine capable de la caractériser en rendant compte de son degré de fragmentation ou de continuité. Cet indice de fragmentation est basé sur le rapport entre la surface discontinue de la tache urbaine, le nombre d'éléments constituant la partie discontinue de la tache urbaine et la surface totale de la tache urbaine d'une commune.

Il permet de différencier des configurations particulières considérant à la fois la taille et le nombre de taches constituant la partie discontinue de l'extension urbaine, et la proportion de cette partie discontinue dans la surface totale d'extension. L'indice est faible lorsque la forme de l'extension urbaine est fragmentée. La part d'extension discontinue et le nombre de taches de l'espace discontinu sont importants. L'indice est élevé lorsque la part d'extension continue est élevée et que le nombre d'éléments constituant la partie discontinue de la tache urbaine est faible (Figure 41).

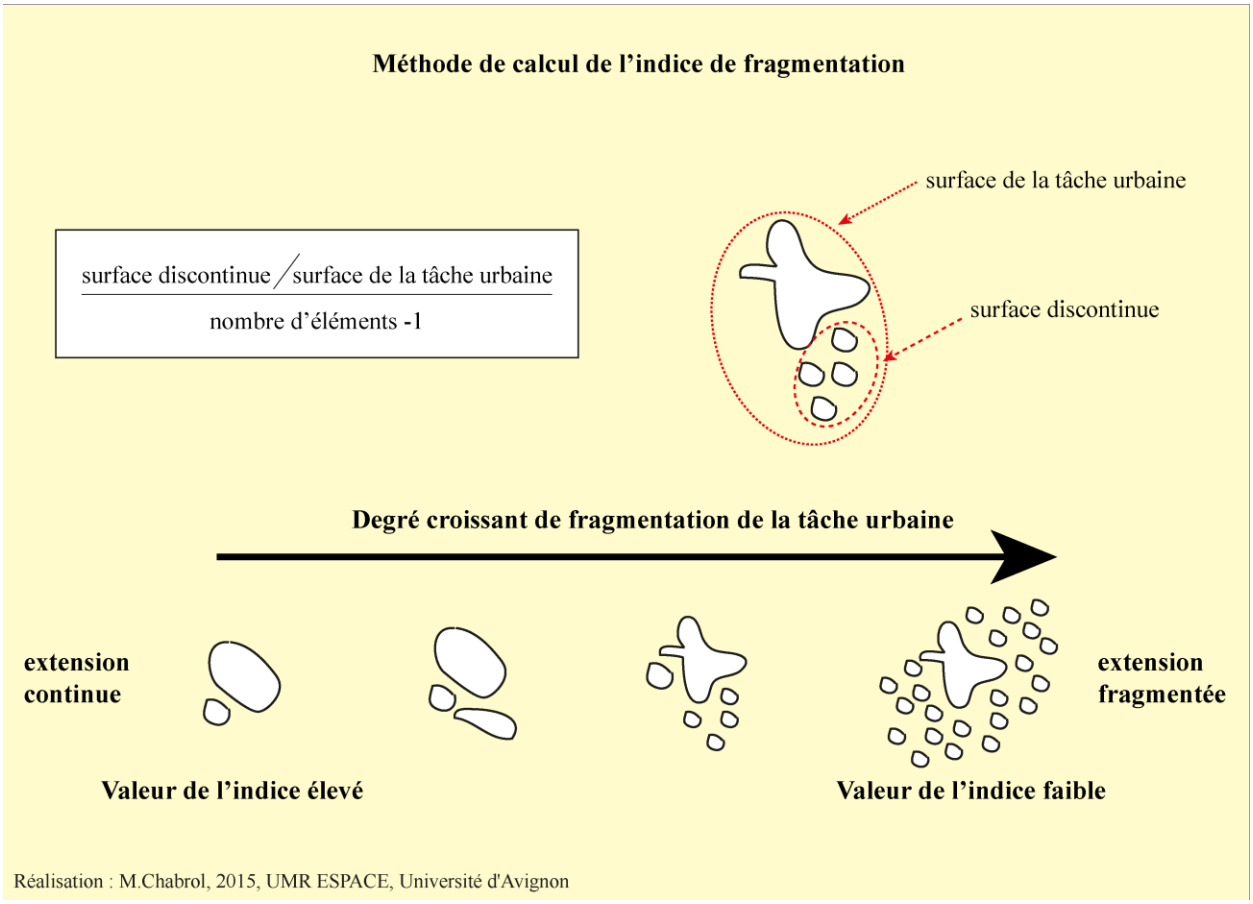


Figure 41. Calcul de l'indice de fragmentation

La confrontation de cet indice aux données de consommation communales d'énergie montre une corrélation importante, quelle que soit la méthode de définition des taches urbaines choisie. Cependant, la relation est davantage marquée avec une dilatation à 10 mètres (Tableau 17). La consommation d'énergie tend à augmenter quand la tache urbaine est fragmentée et constituée d'une part importante d'espace discontinu dans son extension (Figure 42).

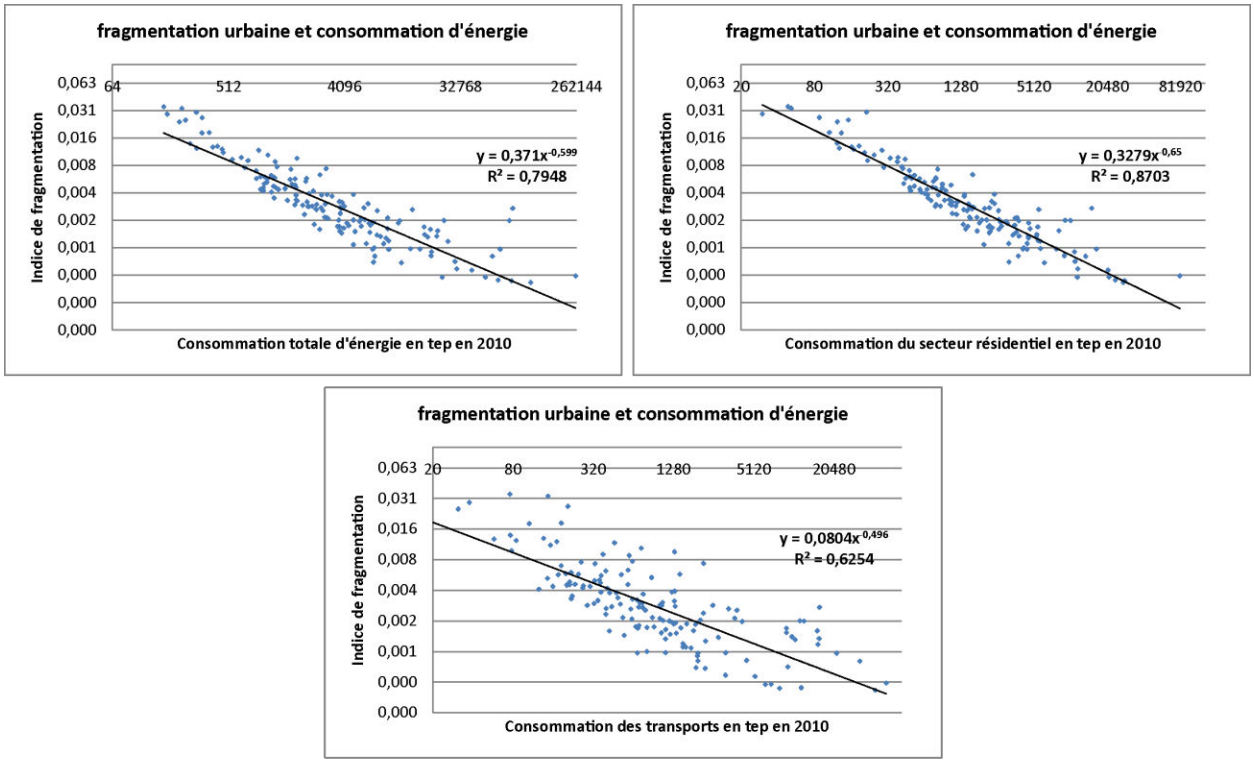
Entre 61% et 80% de la variance de la consommation d'énergie sont expliqués par celle du degré de fragmentation de l'extension urbaine. L'analyse des résidus de régression montre des écarts très faibles entre valeurs réelles et valeurs théoriques (Carte 25). Moins de dix communes sont concernées par des écarts négatifs ou positifs significatifs. Il s'agit dans les deux cas d'aberrations statistiques attribuables au fait que ces communes sont très petites, peu peuplées et peu bâties. Soit la population y est inférieure à 100 habitants et la surface bâtie inférieure à un hectare, soit la superficie de la commune est inférieure à un kilomètre carré. La mesure de l'indice y est donc biaisée par des valeurs trop faibles. Rappelons toutefois que la mesure d'une relation statistique ne signifie pas une relation de cause à effet.

Cela signifie que les communes caractérisées par une consommation d'énergie élevée sont aussi caractérisées par une fragmentation marquée de l'extension urbaine. Il est important de préciser que les résidus de régression entre consommation résidentielle et fragmentation de l'extension urbaine sont réduits dans les espaces les plus peuplés et urbanisés, c'est-à-dire dans ceux qui consomment le plus (Cartes 27 et 28). De ce point de vue, cet indicateur paraît robuste pour décrire l'implication de la fragmentation des extensions urbaines dans les communes les plus urbanisées.

	Dilatation 10 mètres	Dilatation 50 mètres
Consommation totale	$R^2 = 0,79$	$R^2 = 0,70$
Secteur résidentiel	$R^2 = 0,87$	$R^2 = 0,80$
Secteur transports	$R^2 = 0,62$	$R^2 = 0,61$

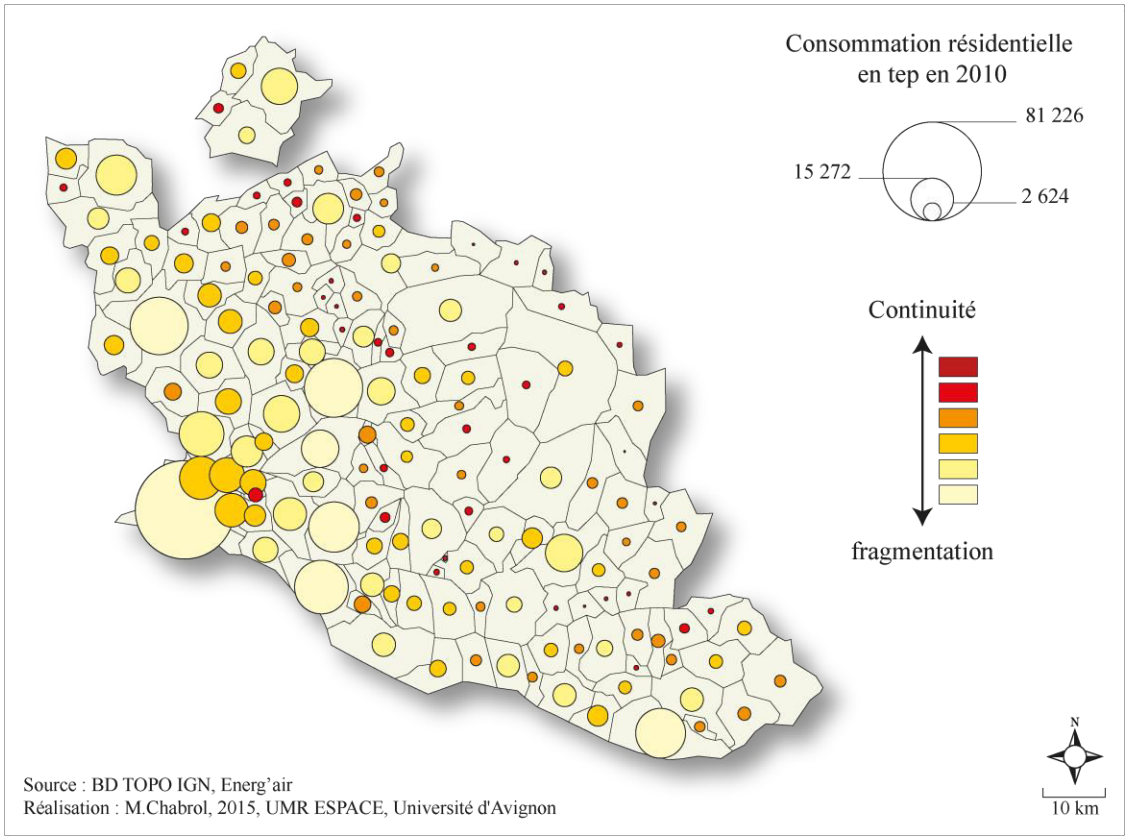
Sources : d'après IGN BD TOPO, base Energ'air

Tableau 17. Coefficient de détermination entre l'indice de fragmentation et la consommation d'énergie selon la méthode de définition des taches retenue

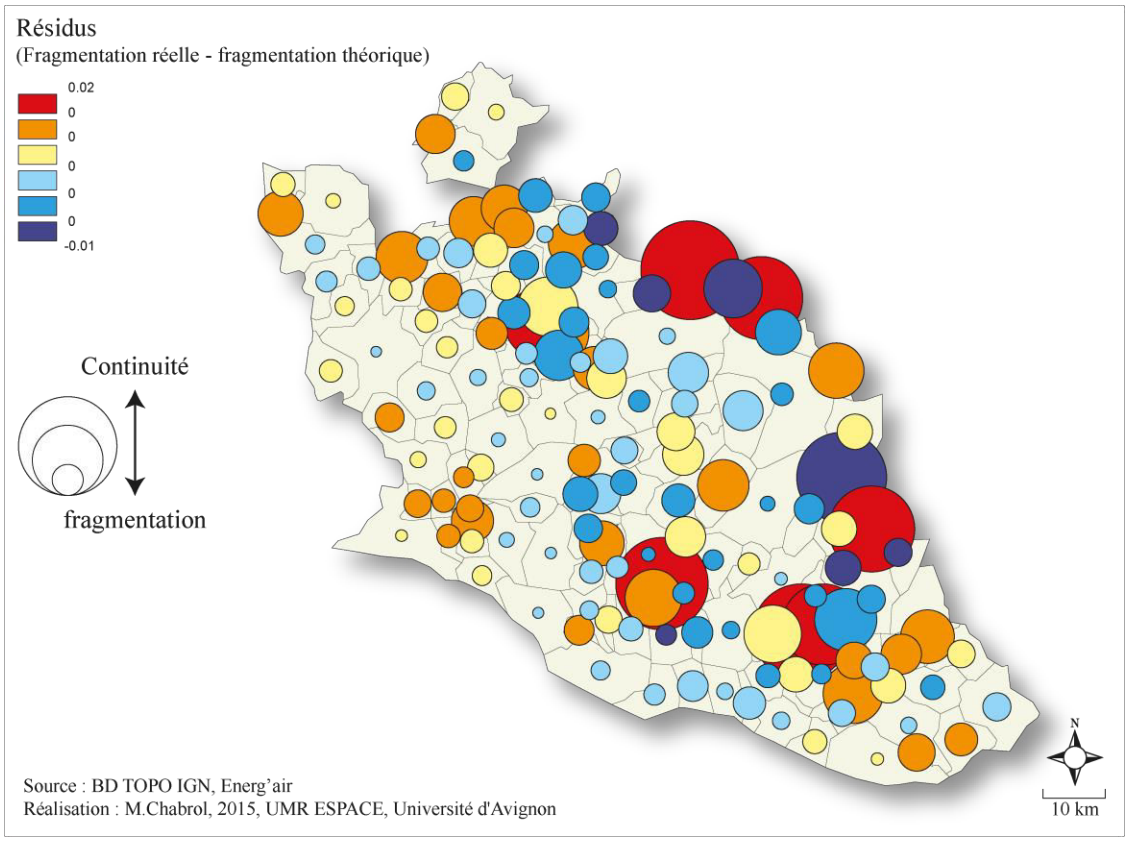


Sources : IGN BD TOPO, base Energ'air
Réalisation : M.Chabrol, 2015, UMR ESPACE, Université d'Avignon

Figure 42. Extension urbaine fragmentée et consommation d'énergie en Vaucluse



Carte 27. Indice de fragmentation et consommation d'énergie résidentielle en Vaucluse en 2010



Carte 28. Fragmentation et consommation d'énergie résidentielle, résidus de régression

Les mesures statistiques effectuées ne permettent pas d'affirmer qu'augmenter la densité des villes permettrait de réduire les consommations énergétiques. En revanche, le degré de fragmentation de la forme de l'extension urbaine semble déterminer en partie les consommations énergétiques. Contenir l'extension urbaine en favorisant la continuité plutôt que le mitage apparaît bien comme une solution pour maîtriser les consommations. Cependant, on ne peut pas nier le fait qu'occuper et aménager l'espace nécessite de l'énergie. L'extension des surfaces artificialisées s'accompagne nécessairement d'une augmentation de la consommation d'énergie dans un contexte de croissance urbaine et démographique. Contenir l'étalement urbain en limitant le mitage et en favorisant une continuité d'extension reste indispensable dans une perspective de transition énergétique, mais n'agira que partiellement sur la consommation en ralentissant son rythme d'augmentation. Il est donc difficile d'affirmer que la modification des morphologies urbaines par la densité et/ou la compacité réduira de façon significative les consommations d'énergie. De plus, nous avons caractérisé ici la forme urbaine en termes de continuité du bâti, mais la prise en compte du périmètre d'extension urbaine et des figures qu'il recouvre pourraient aussi contribuer à l'explication des différences constatées en matière de consommation d'énergie (extension concentrique, linéaire, en doigts de gant, dimension fractale, etc.). De même, le calcul de l'énergie « grise[50] » liée à l'aménagement de formes urbaines souhaitées par les pouvoirs publics (formes compactes et polycentriques) serait sans doute riche d'enseignements. Par ailleurs, des gisements certains de réduction des consommations se trouvent aussi, comme le rappellent Orfeuil et Massot (2007), dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes techniques et technologiques (bâtiment, moteur, etc.), ou encore dans l'optimisation des réseaux de distribution de l'énergie. Enfin, la maîtrise des consommations d'énergie ne peut pas être pensée indépendamment de la production. Sur ce terrain, l'aménagement du territoire a un rôle certain à jouer dans une mise en œuvre de la transition énergétique, celui du déploiement de nouvelles sources d'énergie et du meilleur appariement spatial possible entre ces productions nouvelles et les consommations futures. Pour cela, les dynamiques spatiales urbaines doivent être cernées et anticipées pour identifier les espaces d'une demande énergétique future. Et dans ce cas, le contrôle de l'extension urbaine devra intégrer les possibilités de production locale d'énergie et d'optimisation de sa distribution. Il ne faut pas par ailleurs oublier le coût et le prix l'énergie. Une augmentation importante de ces deux paramètres pourrait ralentir considérablement les dynamiques d'extension urbaine. Enfin, il apparaît ici que la question de la maîtrise des consommations énergétiques n'est pas qu'une question technique qui pourrait se résoudre par une action sur la morphologie des villes. Le rôle des structures socio-spatiales mérite également d'être examiné dans sa globalité.

[50] L'énergie « grise » est l'énergie dépensée dans la phase amont de fabrication des matériaux et plus largement des produits industriels : conception, extraction, transformation, transport. Elle peut recouvrir de 50 à 75% de l'énergie totale d'un produit.

2 *Lou camin de vida prouvençau,* une contrainte socio-spatiale à une mise en œuvre de la transition énergétique

La question de la performance énergétique, entre efficacité, sobriété et maîtrise de la consommation, est devenue centrale dans la planification territoriale (CERTU, 2012 ; Scarwell *et al.*, 2015). Souvent implicite dans de nombreux documents de planification (Agenda 21, SCoT, PLU…), la dimension énergétique des territoires est maintenant explicitement abordée dans les Schémas Régionaux Climat Air Énergie (SRCAE) et des Plans Climat Air Énergie Territoriaux (PCAET) (Cf. chapitre 5). Cette intégration des préoccupations énergétiques dans les documents de planification nécessite de comprendre en amont comment l'organisation d'un territoire détermine son niveau de consommation énergétique. L'analyse de la consommation d'énergie permet de réinterroger les modalités d'organisation des territoires à l'aune des problématiques énergétiques actuelles. La recherche des déterminants spatiaux et territoriaux de cette consommation conduit à s'interroger sur le poids des structures socio-spatiales existantes. Celles-ci peuvent être en effet considérées comme un frein à une mise en œuvre de la transition énergétique et révéler la difficulté à apporter des réponses locales et régionales à un projet politique national. La maîtrise de la demande énergétique dans le secteur résidentiel est l'un des piliers évoqués par les pouvoirs publics pour la mise en œuvre de la transition énergétique (MEDDE, 2015).

Dans quelle mesure les caractéristiques résidentielles déterminent-elles le niveau de consommation énergétique des ménages ? De façon complémentaire aux études portant sur les caractéristiques énergétiques des bâtiments (Maizia, 2007), des travaux récents ont montré comment la consommation d'énergie est impliquée dans un système de relations socio-matérielles dans lequel les individualités et les normes sociales sont réaffirmées (Zélem, 2010 ; Walker, 2014 ; Lévy *et al.*, 2014 ; Zélem, Beslay, 2015). Habiter, occuper un espace, se l'approprier est un acte fondamental de la construction identitaire individuelle et collective, d'un rapport identitaire aux lieux duquel découlent des comportements résidentiels spécifiques (Carpentier, 2010), et par conséquent des pratiques individuelles de consommation d'énergie. Toutefois, restreindre la recherche de déterminants de consommation énergétique domestique à l'analyse des pratiques individuelles conduit à sous-estimer l'inscription des individus dans des structures socio-spatiales plus larges. La notion de mode d'habiter permet de considérer autant la manière dont les individus résident, que le rapport à l'espace que ce mode résidentiel exprime (habitat collectif, pavillon, appartement bourgeois, périurbain, etc.) (Stock, 2004), mais aussi les caractéristiques matérielles des logements et les aspects morphologiques des tissus urbains abordés dans la partie précédente. C'est par cette étude des structures socio-spatiales communales que nous approcherons ici les modes d'habiter.

Cette partie s'intéresse aux configurations spatiales de la demande énergétique résidentielle au sein d'un territoire régional en montrant comment les modes d'habiter et leur localisation sont des éléments d'explication de cette demande, mais aussi comment la question énergétique s'insère dans des problématiques plus larges (aménagement, attractivité des

territoires, périurbanisation, inégalités sociales, etc.). Autrement dit la question n'est pas de savoir *qui* consomme, mais *où* consomme-t-on, et ce que cela montre de l'organisation spatiale d'un territoire.

2.1 Le poids des structures socio-spatiales héritées

L'inscription spatiale des sociétés résulte de contraintes spatiales, de choix, de règles, de conflits et de négociations entre différents groupes sociaux. Elle est le résultat systémique d'interactions issues de stratégies individuelles et collectives qui organisent et modifient l'espace dans toute la complexité et la diversité des actes sociaux. Les formes de l'emprise bâtie sont les conséquences durables d'inscriptions spatiales structurées (ordonnées ou désordonnées) des sociétés, appelées aussi structures socio-spatiales. Elles résultent en effet de choix stratégiques individuels, libres ou contraints (localisation de l'habitat, accessibilité des zones d'emploi, etc.), de règles et de stratégies collectives (planification, aménagement, Plan Local d'Urbanisme, etc.) et d'interactions entre différents groupes sociaux (ségrégation socio-spatiale). Les structures socio-spatiales sont dotées d'une forte inertie et contraignent en retour les interactions sociales et spatiales (réseaux de transport, dynamiques foncières, etc.), ainsi que leurs propres potentialités de changement et d'évolution. Elles relèvent de ce point de vue de la *Path dependence* (Pierson, 2000). Ce concept qui correspond à une situation où les décisions passées impliquant une direction donnée induisent des dynamiques ultérieures suivant la même trajectoire a trouvé sa place en géographie et dans l'étude des transitions énergétiques. La dimension spatiale de la *Path dependence* dans les transitions soutenables a été soulignée entre autres par Boshma et Martin (2010) et a été récemment réaffirmée par Hansen et Coenen (2014, p. 6) qui rappellent que « *according to Martin (2010, p. 3), the combination of historical contingency and the emergence of self-reinforcing effects, steers a technology, industry or regional economy along one path rather than another* ».

L'évolution des territoires a en effet été alimentée par des choix anciens privilégiant les technologies basées sur les combustibles fossiles (Unruh, 2000 ; Bridge *et al.,* 2010). Les coûts de sortie de ce modèle ont augmenté avec le temps ; à la fois les coûts *irrécupérables* de la structuration de l'espace par les sociétés (environnement bâti, réseaux, infrastructures), mais aussi les cultures au lieu de consommation exprimées par des attentes et des normes concernant le coût et la fiabilité de l'approvisionnement énergétique, ou encore les pratiques sociales associées à la consommation de l'énergie. Certaines structures socio-spatiales, en particulier celles des espaces urbains et périurbains, sont réévaluées à l'aune de la transition énergétique. L'attention accrue portée à l'efficacité énergétique ravive les débats sur la morphologie urbaine, la densité des villes et leurs effets énergivores (Newman, Kenworthy, 1989 ; Massot, Orfeuil, 2007 ; Wiel, 2009). De nombreux rapports préconisent la densification et la compacité pour minimiser les dépenses énergétiques et maximiser l'accessibilité des lieux (Cf. 1.2). Une ville compacte permettrait théoriquement de réduire les distances des déplacements individuels, de favoriser les transports collectifs et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre (Orfeuil, 2008). Cette question est aujourd'hui largement analysée (Pouyanne, 2004 ; Desjardins, 2011 ;

Le Néchet, 2011, 2015) mais il reste cependant difficile, comme nous l'avons précédemment démontré, d'affirmer avec certitude qu'une modification des morphologies urbaines peut réduire de façon significative les consommations d'énergie (Dupuy, 2002), d'autant plus que le calcul de l'énergie « grise[51] » liée à l'aménagement des formes urbaines définies comme *durables* (formes compactes et polycentriques) est inexistant, bien que des recherches se développent pour intégrer l'énergie grise dans les bilans énergétiques (Pourouchottamin *et al.,* 2013). Les coûts liés à la restructuration de l'environnement bâti et des réseaux pour tendre vers ces modèles sont difficiles à estimer.

Ces modèles se heurtent également aux cultures au lieu de consommation exprimées par des pratiques sociales et résidentielles et des modes d'habiter spécifiques impactant la consommation d'énergie. Des études récentes ont montré l'influence des usages et des pratiques du logement sur la consommation énergétique résidentielle. Lévy *et al.* ont démontré qu'à l'échelle nationale, la variabilité du niveau de consommation renvoyait à des profils de population et à des caractéristiques spécifiques du logement (Lévy *et al.*, 2014, p. 52). Leurs résultats ont montré l'intérêt de ne pas réduire l'analyse des consommations uniquement aux caractéristiques du bâti et appellent à élargir les indicateurs de mesure de la consommation d'énergie résidentielle. L'analyse proposée dans cette partie répond à cet appel à une échelle régionale. Par ailleurs, l'impact du mode d'habiter périurbain sur les consommations d'énergie n'est plus à démontrer (cf. revue de littérature proposée par Desjardins et Llorente en 2009). La littérature abonde sur ce sujet autant pour démontrer l'impact de la périurbanisation sur la consommation de carburant que pour évaluer l'impact énergétique de l'habitat individuel, ou encore démontrer que *« l'habiter périurbain n'est pas encore remis en cause par la question énergétique aux yeux de ceux qui y résident* » (Desjardins, Mettetal, 2012, p. 56). Cependant, ces études ne permettent pas de distinguer la variabilité de la consommation au sein de différentes formes de périurbain. L'habiter périurbain recouvre en effet des formes différentes tant en termes de type d'habitat qu'en termes de pratiques et de représentations (Lévy, 2002).

Notre approche s'inscrit donc dans la continuité des études portant sur la recherche de déterminants de la consommation énergétique résidentielle. Elle propose, en s'appuyant sur des méthodes quantitatives reproductibles, de développer une approche régionale de ce phénomène qui permet d'une part de distinguer plusieurs catégories au sein d'un même mode d'habiter, et d'autre part d'intégrer les spécificités géographiques, sociales et culturelles d'un territoire spécifique.

[51] L'énergie « grise » est l'énergie dépensée dans la phase amont de fabrication des matériaux et plus largement des produits industriels : conception, extraction, transformation, transport. Elle peut recouvrir de 50 à 75% de l'énergie totale d'un produit.

2.2 Structures socio-spatiales types et consommation d'énergie, des espaces périurbains énergivores

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) est un terrain propice au traitement de notre problématique. Troisième région métropolitaine en termes de consommation d'énergie, cette région est également soumise à des difficultés d'approvisionnement en raison de sa situation en bout du réseau électrique national. La maîtrise de la demande énergétique y représente donc un enjeu important, en particulier dans le secteur de l'habitat qui représente 30% de l'énergie consommée. Cette région est également le théâtre de fortes dynamiques de métropolisation qui en font un espace privilégié d'observation des structures et dynamiques périurbaines.

L'analyse présentée s'articule en trois étapes. La première vérifie l'existence à l'échelle régionale d'une relation statistique entre la demande énergétique et les caractéristiques du parc de logements. La deuxième montre comment les caractéristiques résidentielles se distribuent dans l'espace régional et contribuent à qualifier des espaces types. La troisième analyse la variabilité de la consommation énergétique résidentielle entre les espaces types identifiés et qualifie les caractères énergivores de chacun d'eux pour en faire une cartographie.

2.2.1 Demande énergétique au lieu de vie : une combinaison de facteurs résidentiels

On cherche dans cette partie à expliquer les variations intercommunales de la consommation d'énergie liée au secteur résidentiel, à partir d'un jeu de variables décrivant certaines caractéristiques des ménages (taille), des logements (type, ancienneté, équipement en chauffage) et du territoire communal (densité de logement au kilomètre carré bâti). Un modèle de régression multiple *pas-à-pas*[52] a été implémenté de la façon suivante : la consommation d'énergie 2010 du secteur résidentiel par commune (base Energ'Air de l'Observatoire Régional Énergie Climat Air de la région PACA (ORECA PACA))[53] rapportée au nombre de logements par commune (base logement 2010 de l'INSEE) correspond à la variable à expliquer. Les variables explicatives sont calculées à partir de la base logement 2010 de l'INSEE à la commune : densité de logements au km^2 bâti[54], population par ménage, part de résidences secondaires, part de logements vacants, part de résidences principales de type maison, part de résidences principales de type appartement, part de résidences principales occupées par des propriétaires, part de résidences principales occupées par des locataires, part de résidences principales équipées en chauffage individuel électrique, part de résidences principales équipées en chauffage central individuel, part de résidences principales équipées en chauffage central collectif, part de logements construits avant 1949, entre 1949 et 1974, entre 1975 et 1981, entre 1982 et 1989, entre 1990 et 1998 et entre 1999 et 2005. Ces données présentent l'intérêt d'offrir une base communale unifiée qui facilite les traitements statistiques et cartographiques dans le cadre d'une

[52] Les calculs ont été effectués avec le logiciel libre TANAGRA (Rakotomalala, 2005) voir http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/tanagra/fr/tanagra.html.
[53] http://oreca.regionpaca.fr/
[54] La surface bâtie a été calculée à partir de la BDTOPO 2010 de l'IGN.

analyse régionale, avec des variables explicatives intégrant autant des caractéristiques morphologiques (bâti) et matérielles (équipement) que sociales (type d'occupant) et elles permettent les questionnements présentés dans le tableau 18. Par ailleurs, ces données sont en accès libre et permettent à tout un chacun de reproduire notre analyse, la vérifier, la réfuter ou la compléter. Un premier modèle implémenté à partir des données brutes présentait des biais importants (effets de taille, colinéarité, coefficient de corrélation hors norme de 0,999…). C'est pourquoi toutes les variables utilisées ici sont relatives dans le but de limiter les biais économétriques.

Variables explicatives	Questionnements
Population par ménage en 2010	Influence du nombre d'habitants par foyer
Nombre de logements par km^2 bâti	Influence de la densité de logement par rapport à la surface bâtie
Résidences secondaires et logements vacants	Présence de surface bâtie mais une demande énergétique saisonnière ou inexistante
Type de résidence (maison ou appartement)	Influence des surfaces d'habitation et de la mitoyenneté
Statut des occupants (propriétaires ou locataires)	Influence du cycle de vie et de la condition sociale
Équipement en chauffage (individuel, collectif, électrique…)	Influence du mode de chauffage
Périodes de construction	Influence de l'ancienneté du bâti et des normes de construction

Tableau 18. Facteurs résidentiels et consommation d'énergie en PACA : questionnements

La régression multiple effectuée est globalement pertinente (R^2 = 0,8352 et R^2 ajusté = 0,8333). Un test reposant sur la statistique de Fisher (Dodge, 2007) conclut à la significativité globale du modèle (p-value inférieure à un seuil de significativité pour un risque d'erreur de 5%) (Tableau 19), ainsi qu'un test de significativité individuelle des coefficients pour les variables introduites dans le modèle (p-value pour chaque variable systématiquement inférieure au risque de 5%) (Tableau 20).

Variable endogène	Consommation résidentielle d'énergie 2010 en tep par logement
Exemples	958
R^2	0,835238
R^2 ajusté	0,833322
Sigma – erreur type	0,221296
F-Test (11,946)	435,9654 (0,000000)

Sources: IGN BD TOPO, INSEE, base Energ'air

Tableau 19. Significativité globale du modèle de régression multiple

Variable	Coefficient	Standard deviation	t(946)	p-value
Constante	-0,312466	0,238284	-1,311315	0,19007
Part de logements occupés par des propriétaires	0,021644	0,000862	25,099497	0
Densité de logements au km^2 bâti	-0,027188	0,002998	-9,067568	0
Part de logements occupés par des locataires	0,00686	0,001151	5,960491	0
Part de logements construits avant 1949	-0,001136	0,000578	-1,963831	0,049842
Population par ménage	0,128248	0,035639	3,598518	0,000337
Part de logements équipés en chauffage central individuel	0,005682	0,001162	4,8916	0,000001
Part de logements construits entre 1999 et 2005	0,005406	0,00171	3,161893	0,001617
Part de logements équipés en chauffage central collectif	-0,006349	0,002001	-3,172339	0,001561
Part de logements de type appartement	0,010177	0,002219	4,585763	0,000005
Part de logement de type maison	0,008527	0,002239	3,808074	0,000149
Part de logements construits entre 1990 et 1998	0,004296	0,001627	2,640798	0,008407

Sources: IGN BD TOPO, INSEE, base Energ'air

Tableau 20. Valeurs des coefficients et test de significativité du modèle de régression multiple

Le test de Fisher conclut donc à la significativité globale du modèle ainsi qu'à la significativité des coefficients des variables. Le modèle reconstitue correctement la consommation d'énergie par logement de la très grande majorité des communes : 94% d'entre elles ont des résidus situés dans l'intervalle +/– 2 sigma. Les résidus sont en adéquation avec la loi normale, ce qui valide l'usage du modèle de régression (Figure 43). De plus, les espaces les plus peuplés et les plus urbanisés sont correctement modélisés. La cartographie des résidus montre une tendance à la surconsommation en périphérie d'Aix-en-Provence et dans une partie des communes alpines. Une investigation plus approfondie des résidus les plus élevés et des valeurs extrêmes (> à 3^e quartile + 1.5*intervalle interquartile pour chaque variable spécifiée dans le modèle de régression) permet d'identifier trois situations particulières :

- Les stations de montagne à très forte densité de logements et d'appartements. Le manque d'information sur la fréquentation touristique et une valeur élevée de densité de logement implique une sous-estimation de la consommation par le modèle ;
- Les communes du camp militaire de Canjuers (Var). Cette activité fausse les valeurs de population résidante tout en impliquant d'importantes surfaces bâties ;
- Les communes très faiblement peuplées et très peu bâties.

En dehors de ces cas très spécifiques, la demande énergétique au lieu de vie dépend donc de la combinaison de facteurs résidentiels et cette relation est statistiquement significative.

Attribute	Mu Sigma	Shapiro-Wilk	Lilliefors D = max[D-,D+]	Anderson-Darling	d'Agostino
		(p-value)	(p-value)	(p-value)	(p-value)
Résidus $y_i - y'_i$	0,0000 0,2200	0,982397	0,0515 = max[0,0389,0,0515]	4,679585	5,9351 ^ 2 + 3,1127 ^ 2 = 44,9149
		0	*(p < 0.01)*	*(p < 0.01)*	0

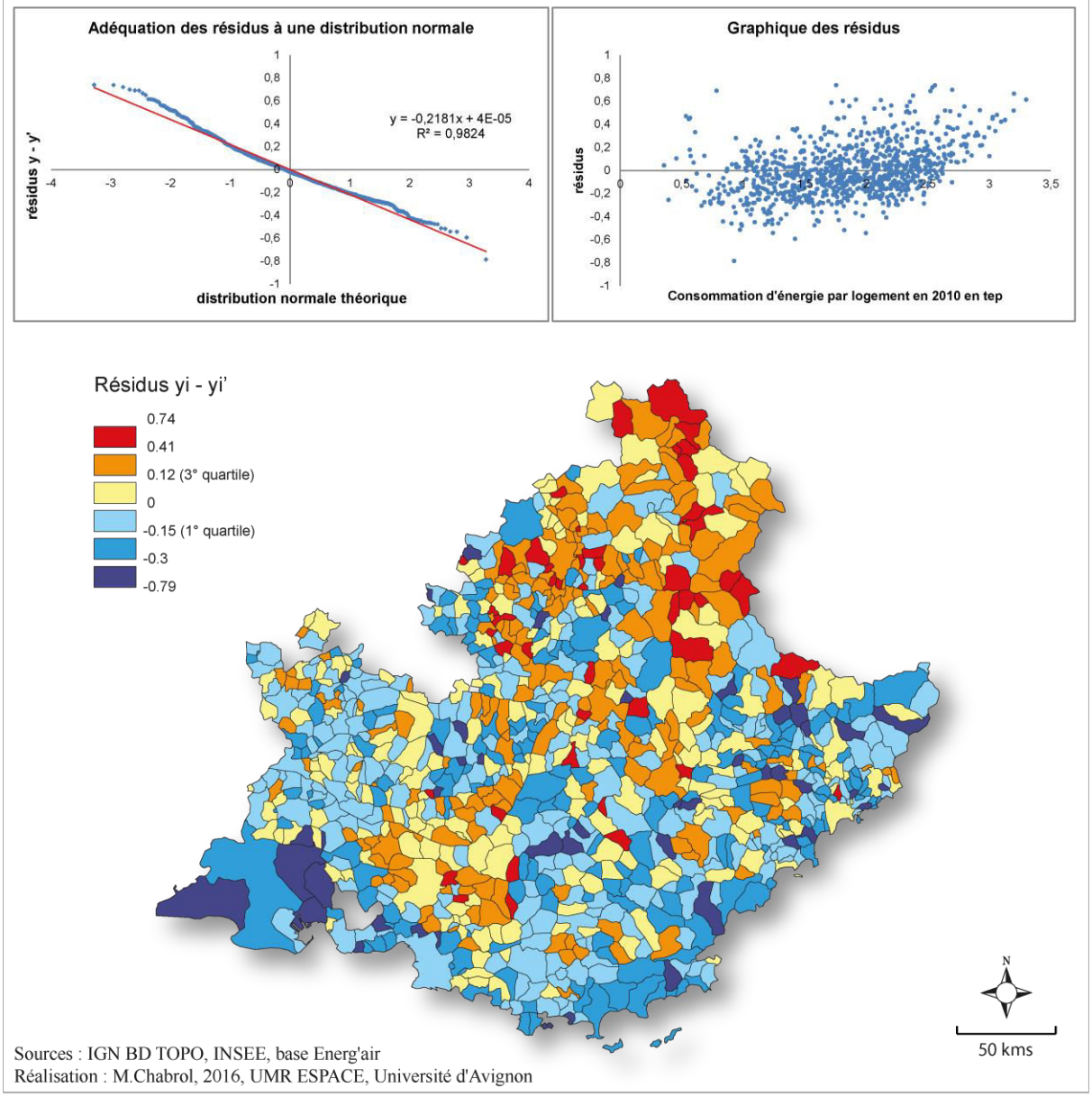


Figure 43. Tests de normalité des résidus et cartographie des résidus du modèle de régression multiple

Les résultats du modèle montrent que la demande énergétique au sein des logements dépend d'une combinaison de facteurs résidentiels. Ils confirment les résultats présentés récemment par Jean-Pierre Lévy *et al.* (2014) à l'échelle nationale. Le modèle permet

également d'évaluer le poids de chaque variable sur la consommation d'énergie. Le tableau 21 présente la valeur du coefficient attribué à chaque variable dans l'équation obtenue, et permet d'étayer des hypothèses associées aux effets respectifs des différentes variables de structure socio-spatiale. Les variables sont classées par ordre d'importance décroissante en fonction de leur poids lors du processus de sélection des variables par les corrélations partielles (Rakotomalala, 2005 ; Dodge, 2007).

Variables	Coefficient	hypothèses
Constante	-0,312466	
Part de logements occupés par des propriétaires	0,021644	Révélateur d'un mode d'habiter, d'une position dans le cycle de vie, d'un niveau de vie ?
Densité de logements au km^2 bâti	-0,027188	La densité de logement impliquerait une consommation plus faible ?
Part de logements occupés par des locataires	0,00686	Révélateur d'un mode d'habiter, précarité énergétique ?
Part de logements construits avant 1949	-0,001136	Les logements anciens seraient moins énergivores (pierre, murs épais, etc.) ?
Population par ménage	0,128248	Plus on est nombreux plus on consomme (eau chaude, électroménager etc.) ?
Part de logements équipés en chauffage central individuel	0,005682	Le chauffage individuel serait plus énergivore ?
Part de logements construits entre 1999 et 2005	0,005406	Les logements récents seraient plus énergivores ? Non-respect des normes RT 2000 ?
Part de logements équipés en chauffage central collectif	-0,006349	Le chauffage collectif serait moins énergivore ?
Part de logements de type appartement	0,010177	Un appartement n'impliquerait pas forcément une consommation plus faible ?
Part de logement de type maison	0,008527	Une maison n'impliquerait pas toujours une consommation plus élevée qu'un appartement ?
Part de logements construits entre 1990 et 1998	0,004296	Phase importante de périurbanisation, habitat de mauvaise qualité ?

Sources: IGN BD TOPO, INSEE, base Energ'air

Tableau 21. Résultats du modèle de régression multiple et hypothèses

Le modèle confirme que la demande énergétique résidentielle relève bien d'une combinaison socio-matérielle de facteurs. Les deux variables qui pèsent le plus sur le niveau de consommation énergétique sont la part de propriétaires, qui reflète des conditions sociales et/ou un cycle de vie spécifique, et la densité de logement qui caractérise l'agencement des espaces bâtis. Par ailleurs, l'observation des coefficients confirme certaines évidences comme l'impact

de la taille du ménage sur la consommation. Elle confirme aussi les résultats de travaux antérieurs, notamment ceux sur la densité, mais aussi ceux de l'Atelier Parisien d'Urbanisme (2007) qui montraient que le bâti d'avant-guerre n'était pas si énergivore car « *les méthodes constructives génèrent peu de ponts thermiques et les surfaces de vitrages restent faibles* » (APUR, 2007, p. 17). Le modèle interroge aussi l'impact des normes thermiques car la part de logements récents paraît augmenter la consommation.

Si ce modèle confirme l'existence d'un lien statistique entre la demande énergétique résidentielle et les caractéristiques du parc de logements, il ne dit rien sur l'impact que peut avoir l'organisation spatiale du territoire sur cette consommation. Aussi, une analyse de la distribution spatiale de ces caractéristiques paraît essentielle à ce stade de l'étude.

2.2.2 Identification de structures socio-spatiales types

Cette combinaison de variables résidentielles n'est pas répartie aléatoirement dans l'espace régional. Elle le structure en sous-ensembles cohérents du point de vue des spécificités géographiques et territoriales, en soulignant l'appartenance des communes à des types d'espace. Une classification ascendante hiérarchique (CAH) permet de distinguer ces espaces et d'élaborer une typologie. La classification obtenue permet de distinguer trois grands groupes constitués de sous-catégories (Figures 44 et Carte 29).

Un premier groupe rassemble les communes urbaines et les communes touristiques. Des combinaisons différentes de variables dessinent des profils propres à des sous-groupes :

- les grandes métropoles denses (Marseille et Nice) et les villes très denses du littoral azuréen sont caractérisées par une très forte densité de logements par rapport à la surface bâtie et un parc à forte dominante locative de type appartement, équipé en chauffage central collectif ;
- les villes petites et moyennes se distinguent des précédentes par une densité de logements moins caractéristique et une présence plus forte d'équipement en chauffage central individuel ;
- les stations touristiques du littoral méditerranéen et des Hautes-Alpes à forte densité de logements par rapport à la surface bâtie ;
- les stations touristiques moins denses au bâti ancien.

Un deuxième groupe rassemble les communes périurbaines, espace qualifié ici de périphérie dense, répartie en trois catégories :

- les communes périurbaines caractérisées par un habitat plutôt de type pavillonnaire construit dans les années 1990 ;
- les communes périurbaines caractérisées par une part de propriétaires très élevée, un habitat pavillonnaire plutôt récent et une prédominance de chauffage central individuel ;

- les communes périurbaines au parc résidentiel mixte (sans prédominance d'un type d'habitat ou d'une période de construction) mais avec une tendance locative plus marquée.

Un dernier groupe rassemble les communes d'arrière-pays, espace qualifié ici de périphérie diffuse, avec un habitat individuel qui distingue deux catégories en fonction des périodes de construction :

- les communes d'arrière-pays au bâti ancien (avant 1949) ;
- les communes d'arrière-pays au bâti récent (années 2000).

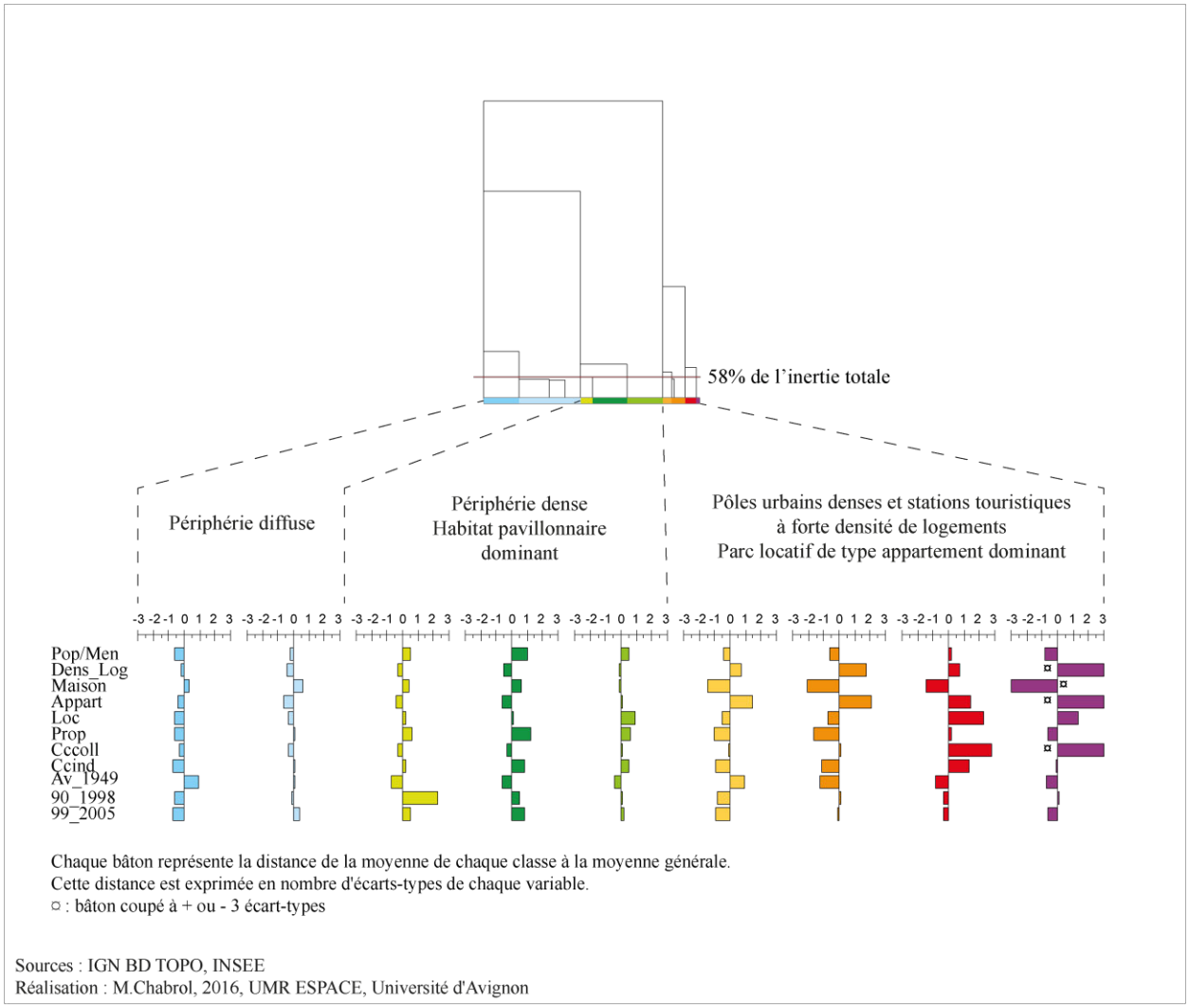
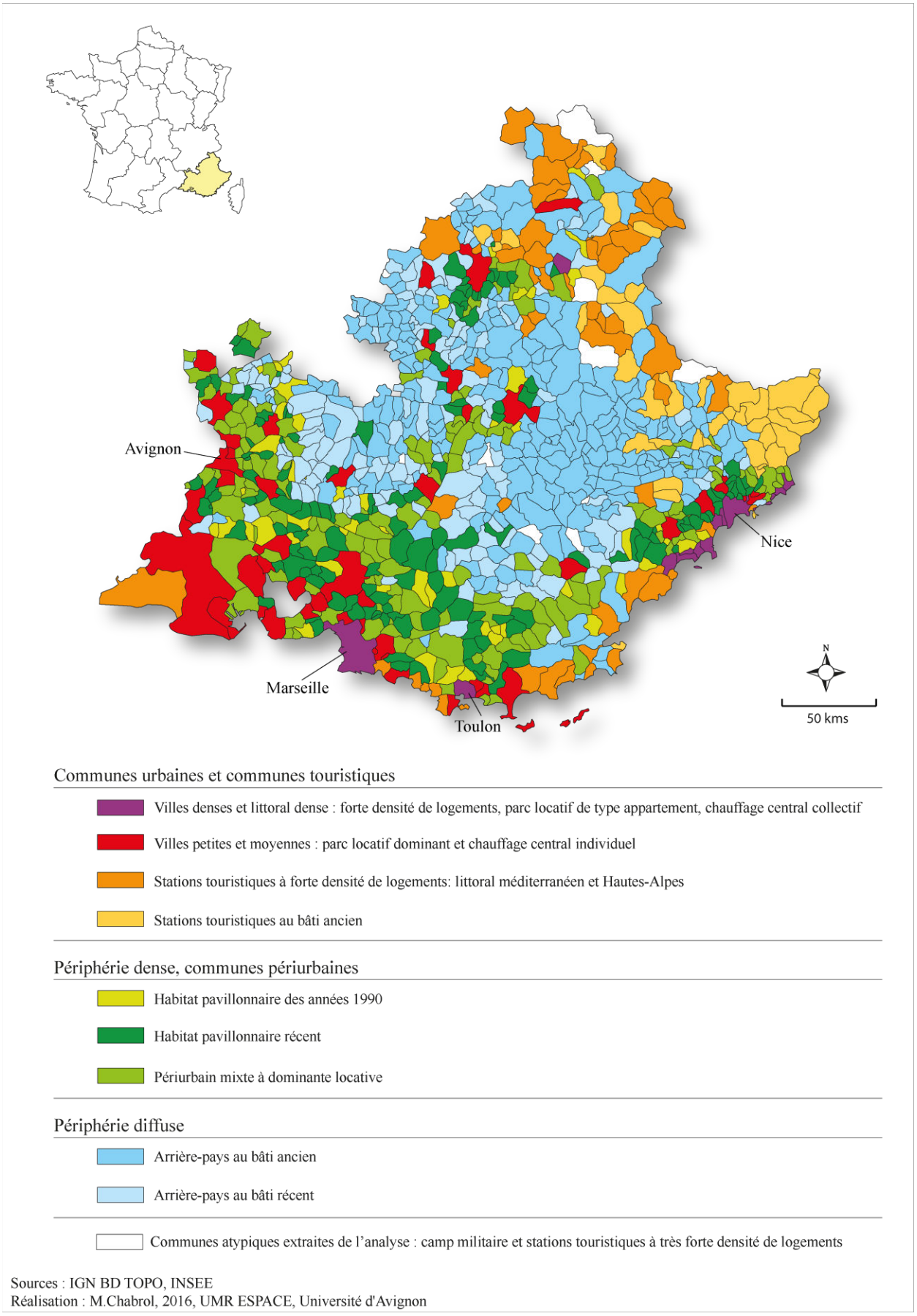


Figure 44. Dendrogramme et profil des classes de la typologie spatiale du parc résidentiel en PACA



Carte 29. Typologie spatiale du parc résidentiel en PACA par classification ascendante hiérarchique

2.2.3 Part explicative des structures socio-spatiales types dans la consommation d'énergie

Une analyse de variance montre une différence significative de la consommation d'énergie par logement entre les groupes définis par la typologie. Elle indique que la demande énergétique des logements dépend en partie de l'appartenance des communes à l'un des types d'espace identifié.

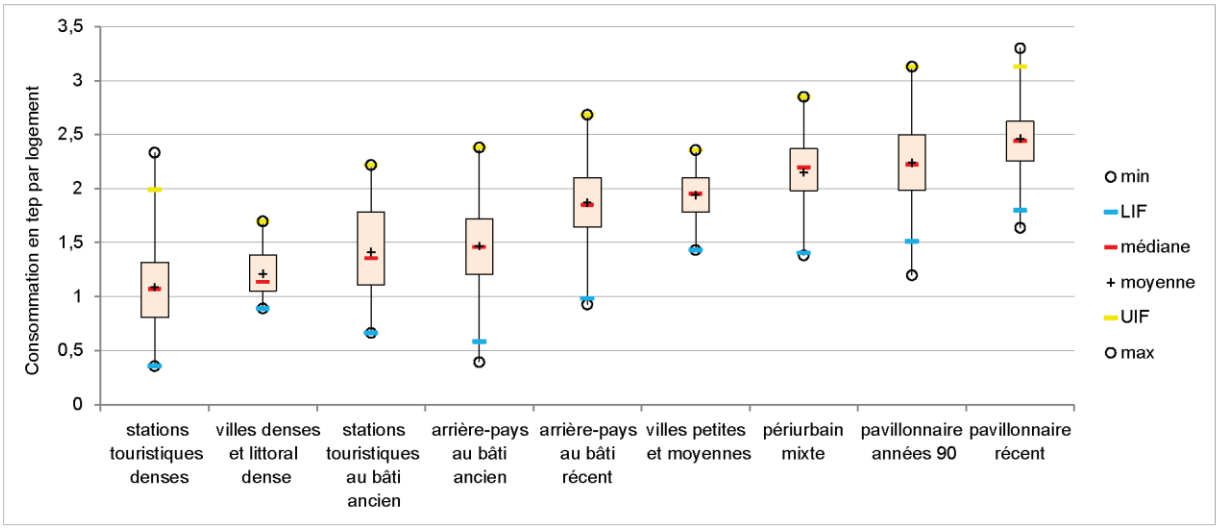
La consommation moyenne d'énergie par logement est plus élevée dans les catégories du périurbain que dans les autres types d'espace (Tableau 22). Elle est notamment deux fois plus élevée dans le pavillonnaire récent que dans les villes denses. Le rapport entre la variabilité entre les classes et la variance totale est égal à 0,60. Cela signifie que la différence entre les catégories identifiées explique 60% de la variance totale de la consommation par logement.

Variable Y	**Variable X**	**Description**				**Test**		
Consommation résidentielle d'énergie par logement en tep en 2010	Typologie spatiale résidentielle	**Types**	**Nombre**	**Moyenne**	**Std-dev**	**Variance**		
		arrière-pays au bâti récent	155	1,86	0,35	**Source**	**Sum of square**	**d.f.**
		stations touristiques au bâti ancien	40	1,41	0,42	BSS	166,3602	8
		pavillonnaire années 90	53	2,23	0,39	WSS	107,357	938
		villes petites et moyennes	48	1,93	0,21	TSS	273,7171	946
		arrière-pays au bâti ancien	269	1,46	0,34	**Niveau de signification**		
		périurbain mixte	156	2,14	0,30	**Statistics**	**Value**	**Prob**
		villes denses et littoral dense	16	1,20	0,23	Fisher F	181,690419	0
		stations touristiques denses	58	1,08	0,38			
		Pavillonnaire récent	152	2,46	0,29			
		Total	947	1,84	0,53			

Sources: IGN BD TOPO, INSEE, base Energ'air

Tableau 22. Résultats de l'analyse de variance

Une représentation de la distribution de la consommation par logement dans chaque type d'espace sous forme de boîtes à moustache permet d'apprécier cette relation (Figure 45).



Sources : IGN BD TOPO, INSEE, base Energ'air
Réalisation : M.Chabrol, 2016, UMR ESPACE, Université d'Avignon

Figure 45. Box-plots de la consommation par logement par type d'espace

L'observation des valeurs centrales (médiane, moyenne et intervalle interquartile) montre une réelle tendance de la demande énergétique des logements à être plus élevée dans les communes périurbaines. Les valeurs maximales ainsi que celles des troisièmes quartiles sont également les plus élevées pour les trois catégories d'espace périurbain.

2.2.4 Caractères énergivores des structures socio-spatiales types

Si l'analyse précédente a montré que le niveau de consommation énergétique des communes dépend en partie de leur appartenance à un type d'espace, il convient d'identifier au sein de ces sous-ensembles les caractéristiques les plus énergivores. Une matrice de corrélations entre la consommation par logement et les variables résidentielles au sein de chaque type d'espace précise les variables qui y déterminent une consommation plus importante ou plus faible (Figure 46).

Si certaines variables sont très représentatives du type d'espace (Cf. figure 44), ce ne sont pas toujours celles-ci qui pèsent le plus dans la description du niveau de la consommation. En effet si les communes urbaines sont caractérisées par une part élevée d'appartements, c'est pourtant bien la part de maisons individuelles qui fait varier positivement leur consommation (R = 0,74). Une densité élevée de logements par rapport à la surface bâtie implique partout des consommations plus faibles. Parmi les variables liées à un comportement peu énergivore, on note qu'une part élevée de résidences secondaires dans les stations touristiques les plus attractives de la région (Cassis, Isola, etc.), autant sur la Côte d'Azur que dans les espaces de haute montagne (64% en moyenne, pouvant aller au-delà de 90%) est associée à une faible consommation énergétique.

Villes et littoral dense

EXOGENES	r	statistique t	Pr(>|t|)
PART_MAISON	0,7489	4,2288	0,0008
PART_APPART	-0,7317	-4,0162	0,0013
PART_RP_PROP	0,668	3,3588	0,0047
NBLOG/KM2_BATI	-0,6669	-3,3491	0,0048
PART_RSECOCC	-0,6364	-3,0872	0,008
PART_RP_LOC	0,4747	2,0182	0,0632
PART_RP_CINDELEC	0,4301	1,7828	0,0963
PART1982_1989	0,39	1,5846	0,1354
P10_POP/MEN	0,376	1,5184	0,1512
PART_RP_CCIND	0,3345	1,328	0,2054
PART_RP_CCCOLL	0,2822	1,1005	0,2897
PART1975_1981	0,2546	0,9852	0,3413
PART1990_1998	-0,1762	-0,6699	0,5138
PARTavant 1949	-0,1667	-0,6326	0,5372
PART_LOGVAC	0,1464	0,5537	0,5885
PART1949_1974	-0,1215	-0,4582	0,6539
PART1999_2005	-0,0391	-0,1464	0,8857

Villes petites et moyennes

EXOGENES	r	statistique t	Pr(>|t|)
PART_APPART	-0,6389	-5,6324	0
PART_MAISON	0,6385	5,6262	0
NBLOG/KM2_BATI	-0,5379	-4,3272	0,0001
PART_RP_PROP	0,4798	3,7089	0,0006
PART1949_1974	-0,3914	-2,885	0,0059
PART_RP_CCIND	0,3632	2,644	0,0112
PART_RP_LOC	-0,3517	-2,5478	0,0142
PART_RSECOCC	-0,3089	-2,2031	0,0326
PART_RP_CCCOLL	-0,3009	-2,1396	0,0377
PART1982_1989	0,179	1,2339	0,2235
PART_RP_CINDELEC	-0,1727	-1,189	0,2405
P10_POP/MEN	0,1448	0,9928	0,326
PARTavant 1949	0,1438	0,9858	0,3294
PART1990_1998	0,0925	0,6298	0,5319
PART1975_1981	0,0915	0,6234	0,5361
PART_LOGVAC	-0,0055	-0,0372	0,9705
PART1999_2005	0,0051	0,0349	0,9723

pavillonnaire récent

EXOGENES	r	statistique t	Pr(>|t|)
PART_RP_PROP	0,6691	11,0281	0
PART_RSECOCC	-0,5043	-7,1522	0
PART_RP_CCIND	0,4638	6,4118	0
PART_LOGVAC	-0,4099	-5,5037	0
PART1975_1981	0,3495	4,5685	0
PARTavant 1949	-0,3049	-3,9207	0,0001
NBLOG/KM2_BATI	-0,2742	-3,4915	0,0006
PART_RP_CCCOLL	0,2514	3,1819	0,0018
PART_MAISON	0,2043	2,5555	0,0116
PART_APPART	-0,1946	-2,4294	0,0163
PART1982_1989	0,192	2,3966	0,0178
PART_RP_CINDELEC	0,1248	1,5409	0,1255
PART1990_1998	0,1052	1,2953	0,1972
PART_RP_LOC	-0,083	-1,0205	0,3091
PART1999_2005	-0,0805	-0,9892	0,3242
PART1949_1974	-0,0283	-0,347	0,7291
P10_POP/MEN	0,0268	0,3282	0,7432

pavillonnaire années 90

EXOGENES	r	statistique t	Pr(>|t|)
PART_RP_PROP	0,8481	11,4325	0
PART_RSECOCC	-0,7837	-9,0093	0
P10_POP/MEN	0,5697	4,951	0
PART_RP_CINDELEC	0,4943	4,0612	0,0002
PART_MAISON	0,4803	3,9103	0,0003
PART_RP_CCIND	0,4593	3,6929	0,0005
PART1975_1981	0,4191	3,2966	0,0018
PART1982_1989	0,3821	2,9531	0,0047
PART_APPART	-0,373	-2,8707	0,0059
PART1990_1998	-0,3036	-2,2754	0,0271
PART_RP_LOC	0,2369	1,7411	0,0877
PART_LOGVAC	-0,1657	-1,1999	0,2357
PARTavant 1949	-0,1377	-0,9929	0,3255
NBLOG/KM2_BATI	-0,1208	-0,8689	0,389
PART1999_2005	-0,0866	-0,6205	0,5377
PART_RP_CCCOLL	-0,0778	-0,5575	0,5796
PART1949_1974	-0,0335	-0,2393	0,8119

périurbain mixte

EXOGENES	r	statistique t	Pr(>|t|)
PART_RSECOCC	-0,7109	-12,5453	0
PART_RP_PROP	0,6863	11,711	0
PART_RP_CCIND	0,539	7,9419	0
NBLOG/KM2_BATI	-0,4072	-5,5328	0
PART_RP_CINDELEC	0,397	5,3672	0
PART_MAISON	0,3421	4,518	0
PART1975_1981	0,334	4,398	0
PART_RP_LOC	0,3132	4,0924	0,0001
PARTavant 1949	-0,2517	-3,2275	0,0015
PART_APPART	-0,2477	-3,1734	0,0018
PART_LOGVAC	-0,2416	-3,0892	0,0024
PART1999_2005	0,2225	2,8317	0,0052
PART_RP_CCCOLL	0,1016	1,2675	0,2069
PART1949_1974	0,0881	1,0977	0,2741
PART1990_1998	-0,0512	-0,6359	0,5258
PART1982_1989	0,0439	0,545	0,5865
P10_POP/MEN	-0,0254	-0,3152	0,753

stations touristiques denses

EXOGENES	r	statistique t	Pr(>|t|)
PART_RSECOCC	-0,7884	-9,5919	0
PART_RP_PROP	0,7853	9,4907	0
PART_RP_CCIND	0,7062	7,4635	0
NBLOG/KM2_BATI	-0,6703	-6,7585	0
PART_RP_LOC	0,6637	6,6397	0
PART_MAISON	0,6475	6,3582	0
PART_APPART	-0,5438	-4,8491	0
PART_LOGVAC	0,539	4,7882	0
PART_RP_CCCOLL	0,5296	4,6727	0
PART_RP_CINDELEC	0,4725	4,0116	0,0002
PART1975_1981	-0,2391	-1,843	0,0706
PARTavant 1949	0,2092	1,6008	0,1151
PART1949_1974	-0,1463	-1,1067	0,2731
PART1990_1998	0,1398	1,0563	0,2954
P10_POP/MEN	0,1121	0,8444	0,4021
PART1982_1989	0,0551	0,4129	0,6813
PART1999_2005	-0,021	-0,1571	0,8757

stations touristiques au bâti ancien

EXOGENES	r	statistique t	Pr(>|t|)
PART_RP_PROP	0,6871	5,8294	0
P10_POP/MEN	0,6618	5,4419	0
NBLOG/KM2_BATI	-0,6467	-5,227	0
PART_RSECOCC	-0,6096	-4,7404	0
PART_RP_LOC	0,5878	4,4788	0,0001
PART_RP_CCIND	0,556	4,123	0,0002
PART1999_2005	0,5109	3,6637	0,0008
PARTavant 1949	-0,469	-3,2734	0,0023
PART_RP_CINDELEC	0,4347	2,9757	0,0051
PART_MAISON	0,4231	2,8786	0,0065
PART_APPART	-0,4192	-2,8465	0,0071
PART1990_1998	0,3402	2,2301	0,0317
PART_RP_CCCOLL	0,3383	2,2164	0,0327
PART1949_1974	0,3254	2,1215	0,0405
PART1982_1989	0,1995	1,2548	0,2172
PART1975_1981	0,1687	1,0549	0,2981
PART_LOGVAC	-0,0977	-0,6049	0,5488

arrière-pays au bâti récent

EXOGENES	r	statistique t	Pr(>|t|)
PART_RP_PROP	0,7171	12,7257	0
PART_RSECOCC	-0,6561	-10,7529	0
PART_RP_CCIND	0,5207	7,5436	0
PART_RP_LOC	0,437	6,0095	0
PART_RP_CINDELEC	0,3991	5,3836	0
P10_POP/MEN	0,3372	4,4302	0
NBLOG/KM2_BATI	-0,269	-3,4544	0,0007
PART1999_2005	-0,2507	-3,2027	0,0017
PARTavant 1949	0,217	2,7496	0,0067
PART_MAISON	0,1675	2,1019	0,0372
PART_RP_CCCOLL	0,1496	1,8712	0,0632
PART_APPART	-0,1472	-1,8412	0,0675
PART1990_1998	-0,1218	-1,5182	0,131
PART1949_1974	0,0854	1,0597	0,2909
PART1982_1989	-0,0626	-0,7757	0,4391
PART_LOGVAC	-0,0258	-0,3192	0,75
PART1975_1981	0,018	0,2233	0,8236

arrière-pays au bâti ancien

EXOGENES	r	statistique t	Pr(>|t|)
PART_RSECOCC	-0,7315	-17,5311	0
PART_RP_PROP	0,6778	15,0616	0
PART_RP_CCIND	0,623	13,0141	0
PART_RP_LOC	0,4882	9,1405	0
NBLOG/KM2_BATI	-0,3771	-6,6522	0
PART_RP_CINDELEC	0,3674	6,4539	0
P10_POP/MEN	0,3484	6,0741	0
PART1999_2005	0,2572	4,3489	0
PART_RP_CCCOLL	0,2533	4,2785	0
PART_LOGVAC	0,1751	2,9053	0,004
PART_MAISON	0,1546	2,5577	0,0111
PART1975_1981	-0,1339	-2,2073	0,0281
PART_APPART	-0,1108	-1,8223	0,0695
PART1982_1989	0,0632	1,034	0,3021
PART1990_1998	0,0539	0,8826	0,3782
PARTavant 1949	-0,0392	-0,641	0,5221
PART1949_1974	-0,0163	-0,2659	0,7905

Sources : IGN BD TOPO, INSEE, base Energ'air
Réalisation : M.Chabrol, 2016, UMR ESPACE, Université d'Avignon

Figure 46. Matrice des corrélations

Ces espaces ne sont donc pas particulièrement énergivores puisque la demande y est saisonnière, ce qui peut poser par ailleurs d'autres problèmes notamment en terme de gestion de la pointe de consommation d'électricité en haute saison. Les stations touristiques au bâti ancien consomment donc davantage en raison d'une demande annuelle. La part de propriétaires, la taille des ménages et la part de logements construits entre 1999 et 2005 y sont des variables déterminantes. La périphérie diffuse présente une plus grande mixité de variables déterminantes

parmi lesquelles la part de propriétaires est la plus déterminante, à laquelle s'ajoutent la présence de chauffage individuel et électrique, et la part de logements construits entre 1999 et 2005.

2.2.5 Un mode d'habiter énergivore : « lou camin de vida prouvençau »

La demande énergétique des logements des espaces périurbains est clairement déterminée par un mode d'habiter caractéristique de l'habitat pavillonnaire. Les parts de propriétaires et d'équipement en chauffage individuel et/ou électrique sont les variables déterminantes communes aux trois catégories d'espace périurbain. Bien que les deux premières catégories soient caractérisées par une grande part de logements récents, ce sont les logements construits dans les années 1970 et 1980 qui contribuent à une consommation accrue. Dans la catégorie du périurbain mixte, les logements construits au début des années 2000 augmenteraient également le caractère énergivore de ces espaces.

Les deux classes qui consomment le plus sont très révélatrices de ce qu'on peut qualifier de « *Lou Camin de Vida Prouvençau* », traduction adaptée en provençal de « *l'American Way of Life* ». Dans ces communes, l'habitat individuel s'organise en zones pavillonnaires constituées de vastes villas de style provençal avec piscine. Il s'agit bien d'une version moderne du modèle d'habitat provençal, loin du mas aux oliviers ou du village groupé préservant de la chaleur caniculaire. Ces communes sont parfois constituées presque entièrement de zones pavillonnaires dispersées autour d'un hameau originel parfois constitué d'un ou deux bâtiments.

Ces deux types sont très représentatifs de l'idéal d'accès à la propriété de populations plutôt aisées mais dans lesquelles on ne peut pas, d'un point de vue statistique, distinguer de catégories socio-professionnelles précises. Il peut donc s'agir autant de cadres, que de retraités, de fonctionnaires, ou de chefs d'entreprise. « *Lou Camin de Vida Prouvençau* » correspond bien à la version méridionale et provençale du modèle d'habitat pavillonnaire. « *Le pavillon est ce qu'on appelle une maison, dans des milieux sociaux élevés. C'est aussi le plus souvent un mode de production : le propriétaire d'une parcelle à bâtir « fait construire » par une entreprise* » (Roux, 2013). Mais « *l'accession pavillonnaire périurbaine n'est pas seulement un choix « par défaut » ou sous contrainte. Elle répond à des aspirations sociales profondes* » (Jaillet, 2013). Ce modèle aujourd'hui commun de l'accession pavillonnaire se conjugue en région PACA au tropisme solaire et à l'attractivité des métropoles aixoise, marseillaise et niçoise pour constituer un mode d'habiter que nous qualifions ici de « *Lou Camin de Vida Prouvençau* ». Cette proximité relative aux espaces naturels (porteurs dans le Sud de l'image d'un cadre de vie agréable), mais aussi à des pôles économiques importants permet cette comparaison avec le modèle américain où l'habitat individuel « *incarne le principe de l'accession à la propriété d'une maison individuelle entourée d'un jardin, localisée à proximité d'un environnement naturel et reliée (souvent par l'autoroute) aux zones économiques et aux espaces de consommation* » (Ghorra-Gobin, 2013). Ce mode d'habiter est donc un modèle parmi d'autres. Il diffère en cela par exemple du tropisme littoral de la Côte d'Azur, et concerne une partie seulement des espaces périurbains.

La troisième catégorie de communes périurbaines (périurbain mixte à tendance locative) répond aussi à ce désir de « *Lou Camin de Vida Prouvençau* » mais semble concerner davantage les classes moyennes. L'habitat est moins dispersé et s'organise en lotissements plus compacts jusqu'à atteindre parfois la continuité du bâti. Les piscines se font plus rares et les surfaces d'habitation plus petites.

On peut en déduire que le niveau de revenu a une influence sur la consommation d'énergie au sein des logements. Un haut niveau de revenu peut impliquer des surfaces de logement plus importantes ainsi que la présence d'équipements énergivores (électroménager, piscine, climatisation…). La mesure d'indicateurs du niveau de vie permet de comprendre que la différenciation entre les types d'une même grande catégorie (villes et communes touristiques, périphérie dense et périphérie diffuse) dépend très largement de cette caractéristique, particulièrement pour les trois catégories de périurbain.

La combinaison du revenu net moyen des foyers fiscaux imposables par commune, du revenu net moyen des foyers fiscaux non imposables par commune et la part de foyers fiscaux non imposables dans le total des foyers fiscaux permet d'obtenir un indicateur global du niveau de richesse construit de la façon suivante :

- Si le revenu net moyen des foyers fiscaux imposables par commune est supérieur au 3^{e} quartile au niveau régional, et que la part de foyers fiscaux non imposables est inférieure à 50%, on considère que les communes ont un niveau de richesse significativement élevé.
- Si le revenu net moyen des foyers fiscaux non imposables par commune est inférieur au 1er quartile au niveau régional, et que la part de foyers fiscaux non imposables est supérieure à 50%, on considère que les communes ont un niveau de richesse significativement faible.

Cet indicateur différencie clairement les sous-ensembles identifiés précédemment (Figure 47).

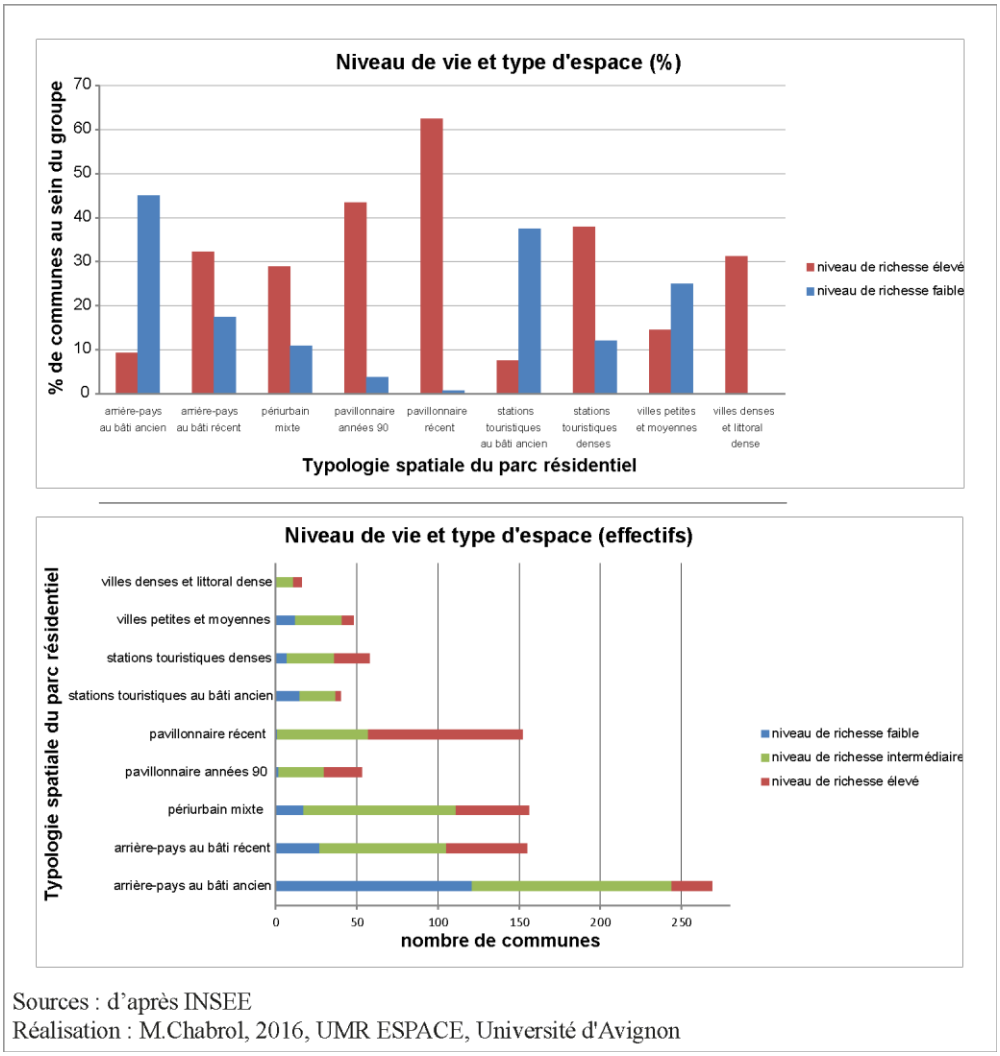


Figure 47. Niveau de richesse et typologie spatiale du parc résidentiel en PACA

Parmi les trois catégories de périurbain, celle qui consomme le plus est une catégorie au niveau de richesse significativement élevé. Elle est composée à plus de 60% de communes au niveau de richesse significativement élevé et ne compte que 1% de communes au niveau de richesse faible. Elle concentre 62% de l'ensemble des communes riches de la région. Le niveau de richesse oppose aussi les deux catégories de communes touristiques, ainsi que les deux catégories de la périphérie diffuse.

Cette analyse est révélatrice de la diversité des modes d'habiter périurbains qui témoignent d'une forte individualisation des rapports à l'espace et d'une hétérogénéité socio-spatiale au-delà de laquelle on peut observer un certain nombre de régularités et de logiques collectives (Cailly, Dodier, 2007).

2.2.6 Spatialité des caractères énergivores, une base de réflexion pour l'intégration de la question énergétique dans les documents de planification

Le croisement de la typologie du parc résidentiel avec la consommation d'énergie par logement et l'investigation faite sur le niveau de richesse et le type d'habitat permettent d'aboutir à une cartographie des caractères énergivores de l'habitat en région PACA (Carte 30).

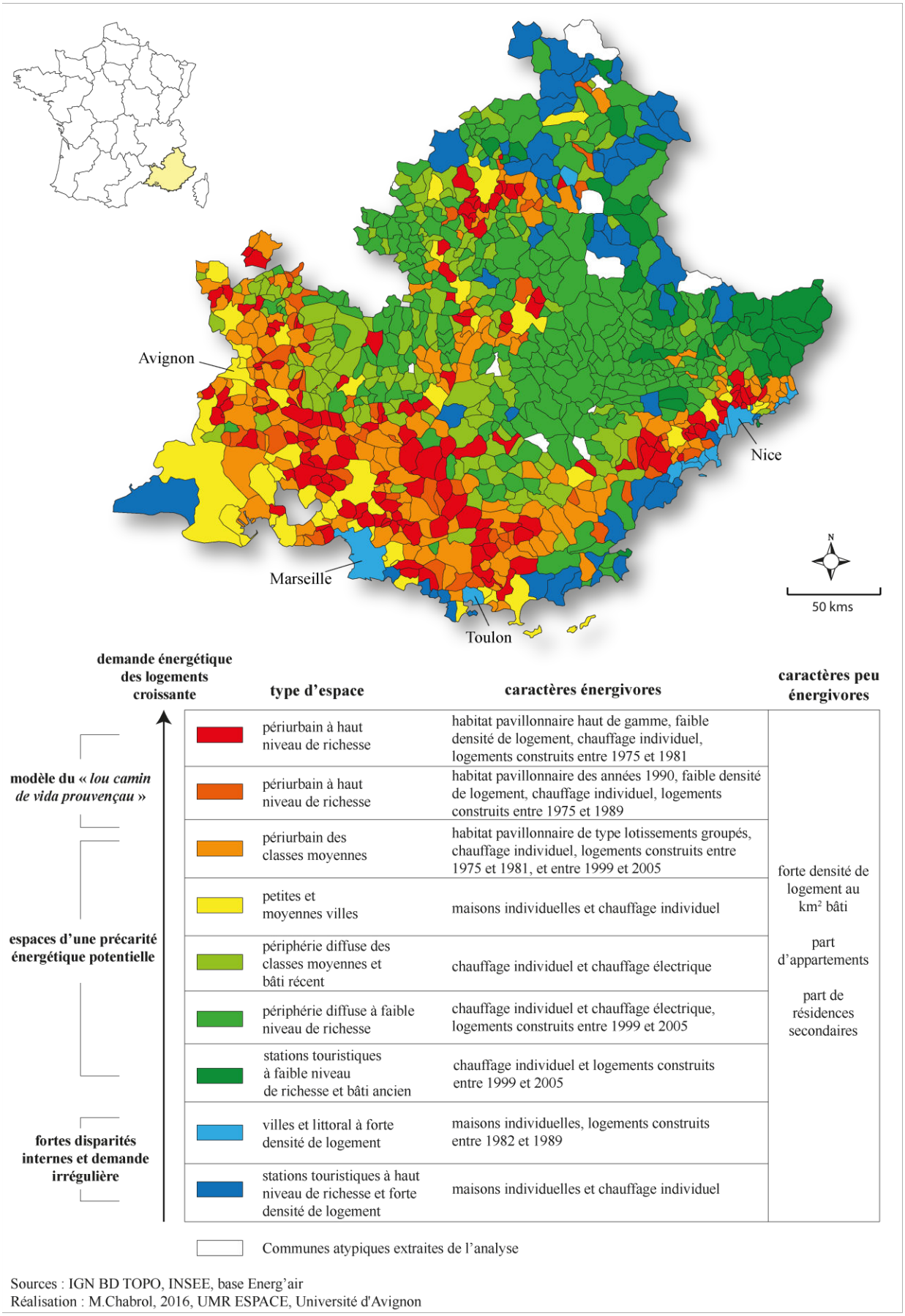
Dans toutes les catégories définies, les communes qui consomment le moins ont soit une part de résidences secondaires élevée, soit une part d'appartements élevée, soit une densité de logements au km^2 bâti importante. La présence de résidences secondaires implique par définition des consommations saisonnières ; la présence d'appartements suppose des surfaces d'habitation souvent plus petites et, tout comme la densité de logement, favorise la mutualisation de services comme le chauffage ou l'eau chaude sanitaire.

L'analyse montre que les métropoles de Marseille et de Nice ne sont pas particulièrement énergivores. Malgré tout, elles concentrent l'essentiel de la demande énergétique régionale en volume. De plus, de fortes disparités internes autant en termes de niveau de richesse que de caractéristiques du parc résidentiel ne permettent pas à ce niveau d'échelle de distinguer de variabilité en matière de consommation. Il y a donc une part d'incertitude importante qu'une analyse infra urbaine pourrait peut-être diminuer.

Mais dans le cadre d'une politique régionale de la maîtrise de l'énergie en PACA, toute l'attention semble devoir se porter sur les espaces du desserrement urbain. Le mode de vie caractérisé par l'accès à la propriété d'une maison individuelle, de surcroît équipée en chauffage individuel, apparaît comme un facteur de consommation accrue.

Les périodes de construction interrogent aussi sur le respect, l'usage et l'impact des normes de construction et en particulier celles de la règlementation thermique. Les règlementations thermiques (RT) se succèdent depuis 1974 suite au choc pétrolier de 1973 (RT 1974, RT 1982, RT 1988, RT 2000, RT 2005, RT 2012) (Collet, 2011). Les périodes de construction qui apparaissent comme déterminantes d'une consommation accrue dans notre étude sont celles qui se succèdent de 1974 à 2005 (1975-1981, 1982-1989 et 1990-2005) selon le type d'espace concerné. Dans ces conditions, il est difficile d'admettre que ces règlementations ont eu un poids déterminant. Les consommations énergétiques des logements ne répondent pas seulement à des besoins de chauffage et le caractère énergivore ne se mesure pas uniquement en termes de déperdition thermique.

L'analyse effectuée interroge aussi les situations de précarité face à l'énergie. Si la question de la précarité énergétique est avant tout une question de précarité sociale, la capacité financière d'accès à l'énergie reste une composante essentielle de la qualité de vie. Les catégories spatiales médianes de notre analyse (périurbain des classes moyennes, petites et moyennes villes, périphérie diffuse et stations touristiques à faible niveau de richesse) sont les espaces d'une précarité énergétique potentielle. Ces espaces concentrent la majorité des communes à faible niveau de richesse.



Carte 30. Caractères énergivores des modes d'habiter en région PACA

La transition énergétique par la volonté de maîtrise des consommations d'énergie implique la remise en cause d'un mode d'habiter l'espace particulièrement prégnant en région PACA, celui de l'accès à la propriété et à la villa moderne provençale, « *Lou Camin de Vida Prouvençau* ». Les consommations d'énergie sont révélatrices des usages qui sont faits des espaces. Ce n'est pas uniquement l'agglomération des individus qui entraîne de fortes demandes en énergie, mais aussi un mode d'habiter l'espace particulier, un mode de répartition des hommes dans l'espace dominé par l'habitat individuel pavillonnaire. Les volontés actuelles de réduction de l'étalement urbain sont de plus en plus intégrées aux politiques d'aménagement du territoire, mais ces interventions a posteriori sont-elles réellement efficaces face à l'ampleur du phénomène ? On peut s'interroger sur la capacité réelle d'action des pouvoirs publics face à une dynamique territoriale maintenant ancienne et dont le résultat dans l'organisation des territoires est devenu une contrainte. Cela soulève la question du degré de liberté des aménageurs dans l'évolution des systèmes territoriaux. L'aménagement du territoire ne fait-il pas qu'accompagner, au mieux encadrer et contrôler les dynamiques territoriales ?

Outre les dernières règlementations thermiques, la transition énergétique est l'occasion de repenser la planification et les modèles d'organisation des territoires, dans une perspective de long terme. Mais freiner l'offre d'un modèle d'habiter se heurte à la demande d'une population désireuse d'acquérir des terrains à bâtir, qui alimentera par la suite une forme d'économie résidentielle favorable aux finances locales des communes. Aussi si une déclinaison infrarégionale de la transition énergétique et une ventilation de ses objectifs dans les documents de planification locale semblent possibles, la prise en compte des spécificités territoriales sera la condition nécessaire, d'une part à leur définition, et d'autre part à leur efficacité.

La maîtrise des consommations d'énergie s'inscrit dans un processus de *Path dependence*. L'émergence de dynamiques socio-spatiales dans l'évolution des territoires en région Provence-Alpes-Côte d'Azur est orientée par la nature des structures socio-spatiales préexistantes ou héritées. Celles-ci convoquent en effet un processus d'évolution qui verrouille les dynamiques ultérieures dans un état stable de *Path dependence*. Les localisations résidentielles, de l'emploi et des aménités, et les interactions spatiales qui en découlent ont orienté une trajectoire d'évolution qui se traduit en PACA par un mode d'habiter dominant et énergivore. Cette trajectoire se traduit alors par deux mouvements. L'un s'inscrit directement dans le renforcement des structures existantes. Les dynamiques intrinsèques des territoires (extension urbaine, métropolisation) se renforcent et tendent à stabiliser les évolutions. L'autre peut être stimulée par un contexte favorable aux changements endogènes (normes dans le bâtiment, règlementation favorable au contrôle de l'étalement urbain dans les PLU) et peut convoquer une adaptation des structures socio-spatiales. Il apparaît en région Provence-Alpes-Côte d'Azur que cette adaptation n'aboutit pas à une trajectoire d'évolution vers un mode d'habiter moins énergivore, mais à une adaptation du système par optimisation qui renvoie son évolution vers un état stable de *Path dependence* (Figure 48).

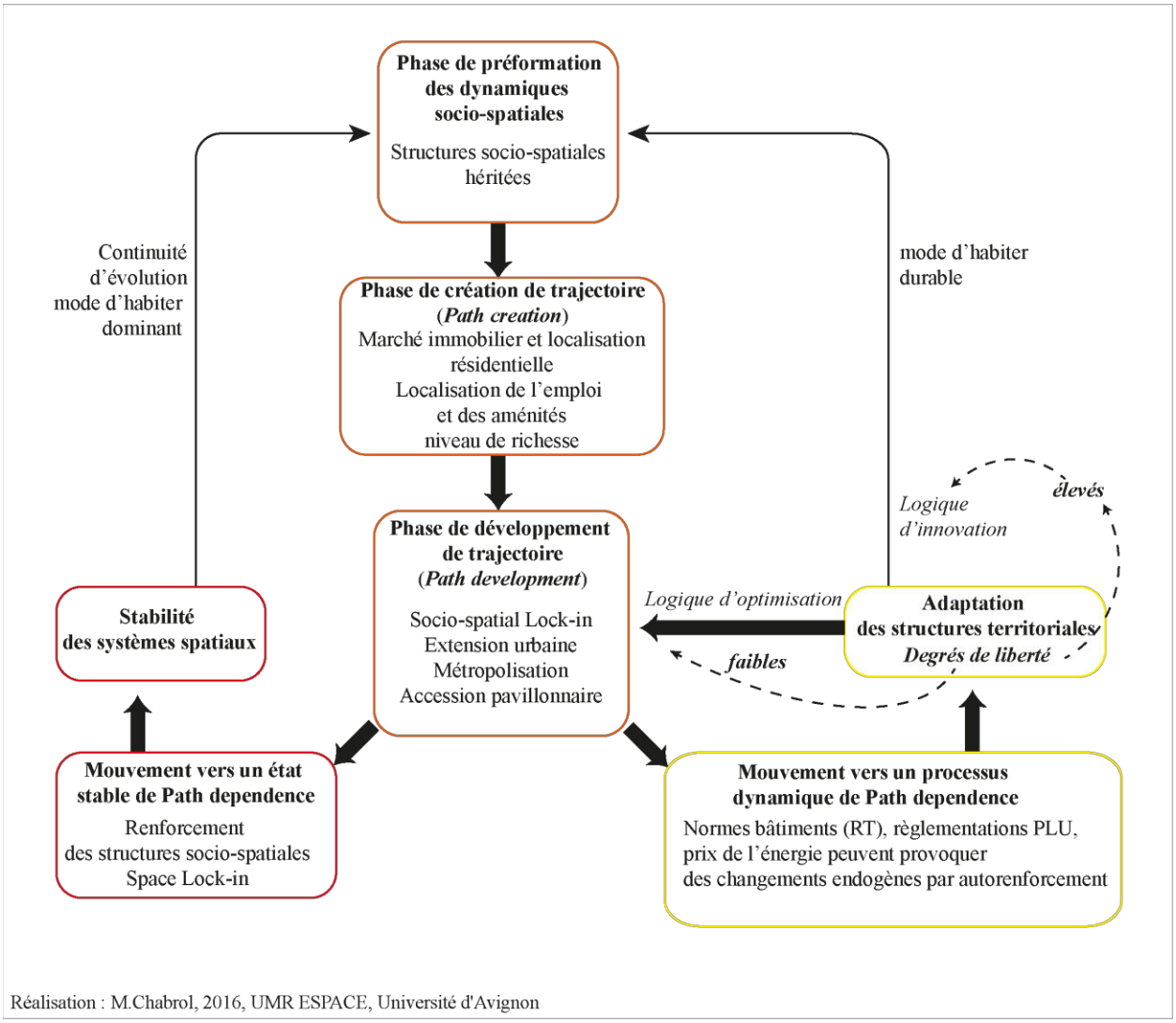


Figure 48. *Socio-spatial lock-in* et *Path dependence* dans la maîtrise de la consommation énergétique en région PACA

L'utilisation de l'espace et les modes d'habiter déterminent des comportements globaux de consommations énergétiques. Une analyse régionale permet d'identifier ces comportements. Mais elle ne permet pas cependant d'identifier dans l'espace régional des comportements individuels guidés par des choix ou contraints par l'appartenance à une catégorie sociale, même si des groupes relativement homogènes se sont affirmés dans notre analyse. Une étude plus fine en termes d'échelle permettrait sans doute de différencier, pour un même type d'espace énergivore, les catégories de population en mesure d'adopter des stratégies individuelles intégrant la question énergétique, de celles pour lesquelles la notion même de stratégie n'est pas envisageable au regard des contraintes fortes que représente l'accès au logement et à l'emploi.

Ce chapitre révèle également le poids de dynamiques territoriales telles que l'étalement urbain, l'extension des zones pavillonnaires, le report de la population vers la périphérie des aires urbaines et le tropisme solaire. On peut s'interroger sur les degrés de liberté dans l'évolution des structures territoriales. Quelles sont les marges de manœuvre réelles des acteurs du territoire et des individus pour intégrer la dimension énergétique dans les stratégies d'aménagement ou dans les stratégies résidentielles individuelles, face aux contraintes exercées par les dynamiques intrinsèques des territoires ? La remise en cause des structures socio-spatiales héritées peut impliquer des coûts matériels élevés liés à l'urbanisme et à l'aménagement de l'espace, mais le coût social l'est tout autant car reconsidérer les structures socio-spatiales nécessite de reconsidérer les modes de vie et de consommation dont la marge d'évolution se situe dans les normes, et donc la contrainte.

Conclusion de la deuxième partie

L'organisation spatiale des territoires pèse sur l'orientation de leur trajectoire. Elle influe sur le degré de liberté dans leur évolution. Cette partie a mis en avant le poids des structures spatiales dans l'évolution des territoires, de leur effet « attracteur » et de l'effort nécessaire pour influer sur leur mouvement inertiel. Les espaces où la demande énergétique est faible apparaissent comme ceux où le degré de liberté dans la mise en œuvre de la transition énergétique est le plus important et pourrait donner lieu à des changements endogènes.

Aussi les capacités de mise en œuvre d'une planification locale intégrant la dimension énergétique sont très différenciées d'un territoire à l'autre. Par conséquent, cette différenciation est susceptible de générer ce qu'on peut qualifier de développement durable inégal. La différenciation spatiale de ces facteurs (géographiques, économiques, politiques, financiers) dans l'espace implique nécessairement une mise en œuvre différenciée et inégale de la transition énergétique. D'abord sur le plan thématique, la maîtrise de la consommation via la rénovation des bâtiments et le développement de réseaux de chaleur sont surtout envisagés dans les métropoles alors que le développement des énergies renouvelables concerne davantage les espaces ruraux. Si dans les métropoles la question énergétique accompagne les réflexions autour de l'amélioration du cadre de vie et de la gestion de services collectifs, elle devient dans les espaces ruraux l'espoir d'un levier de développement local.

Mais le poids de dynamiques territoriales comme l'étalement urbain, l'extension des zones pavillonnaires, le report de la population vers la périphérie des aires urbaines et le tropisme solaire interroge sur les degrés de liberté dans l'évolution des structures territoriales. Les marges de manœuvre réelles des acteurs du territoire et des individus pour intégrer la dimension énergétique dans les stratégies d'aménagement ou dans les stratégies résidentielles individuelles peuvent être réduites face aux contraintes exercées par les dynamiques intrinsèques des territoires. La prise en compte de la spatialité dans l'étude de la transition énergétique permet de relever que celle-ci n'est pas un processus de décision politique indifférent aux lieux. La dimension spatiale des territoires, les règles d'interactions spatiales et les modèles d'organisation sont aussi des éléments pouvant perturber, contraindre ou déterminer les politiques de transition énergétique.

Conclusion générale

Analyser la transition énergétique comme un processus géographique modifie la façon dont on peut aborder les questions qui la sous-tendent. Les rapports de position, le poids des structures spatiales existantes, les processus de différenciation spatiale associés à de possibles nouvelles infrastructures énergétiques, la configuration spatiale de la demande et la variété d'échelles d'organisation possibles permettent de dire que la transition énergétique n'est pas un processus de décision politique indifférent aux lieux.

Au terme de cette thèse, nous sommes en mesure de définir un territoire en transition tel que décrit dans la figure 49.

Un *territoire en transition* est d'abord caractérisé par des *conditions initiales* spécifiques. *La présence historique d'infrastructures énergétiques* est favorable au développement des énergies renouvelables. La présence d'entreprises qui connaissent et maîtrisent le marché de l'énergie confère aux territoires des prédispositions pour une mise en œuvre de la transition énergétique. Les partenaires industriels sont connus et ont contribué à une forme de culture énergétique locale. Mais la présence d'infrastructures, notamment les réseaux, facilite aussi les conditions techniques du développement des énergies renouvelables. *La difficulté d'accès à l'énergie* et une situation d'insécurité face aux approvisionnements encouragent aussi les territoires à se mobiliser sur la question de l'énergie. Enfin, *les démarches localistes*, les volontés locales institutionnelles, ou émanant de la société civile, d'inscrire l'énergie dans une démarche de projet de territoire et de développement local constituent aussi des conditions initiales propices à une entrée en transition des territoires. Ces trois *conditions initiales* ne sont pas présentes partout simultanément et peuvent s'imbriquer. Toutefois la présence simultanée de ces trois conditions accélère le processus de transition, comme nous avons pu le montrer dans les espaces haut-alpins en région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Un territoire entre ensuite en transition selon *trois logiques*. Là aussi ces logiques ne sont pas nécessairement contradictoires et peuvent coexister dans l'espace. *Une logique ascendante d'entrée en transition* concerne les territoires dont les conditions initiales marquées par des volontés de *développement endogène* sont dominantes. Les dispositifs TEPCV et TEPos sont aujourd'hui les outils privilégiés en région Provence-Alpes-Côte d'Azur pour activer ces conditions initiales. Mais d'autres démarches comme les coopératives citoyennes par exemple pourraient aussi activer une mise en transition. *Une logique descendante suivant la hiérarchie des normes* traduit la voie institutionnelle d'entrée en transition des territoires. Elle s'appuie en effet sur les collectivités territoriales pour fixer à tous les échelons des cadres d'action et des objectifs normatifs de transition. Enfin, *une logique purement industrielle de développement exogène*

concerne le déploiement des énergies renouvelables selon une démarche de développement de filière inscrite dans un mouvement concurrentiel et d'opportunités économiques.

Le processus de transition énergétique inscrit les territoires dans une double *trajectoire d'optimisation*, à la fois *structurelle et fonctionnelle*. *Optimisation structurelle* et *optimisation fonctionnelle* sont indissociables. Elles consistent à agir autant sur l'organisation spatiale et le fonctionnement quotidien des territoires que sur les modes de gouvernance ou encore sur la structure matérielle des systèmes d'approvisionnement énergétique. La rénovation urbaine par exemple est désormais vue aussi au travers du prisme énergétique et rejoint l'enjeu social par la question de la précarité énergétique. *Un territoire en transition* agit par la planification spatiale et questionne les choix de localisation de l'habitat et de l'activité dans une démarche de maîtrise de la consommation d'énergie. Cette optimisation vise à minimiser l'impact énergétique des structures spatiales des territoires.

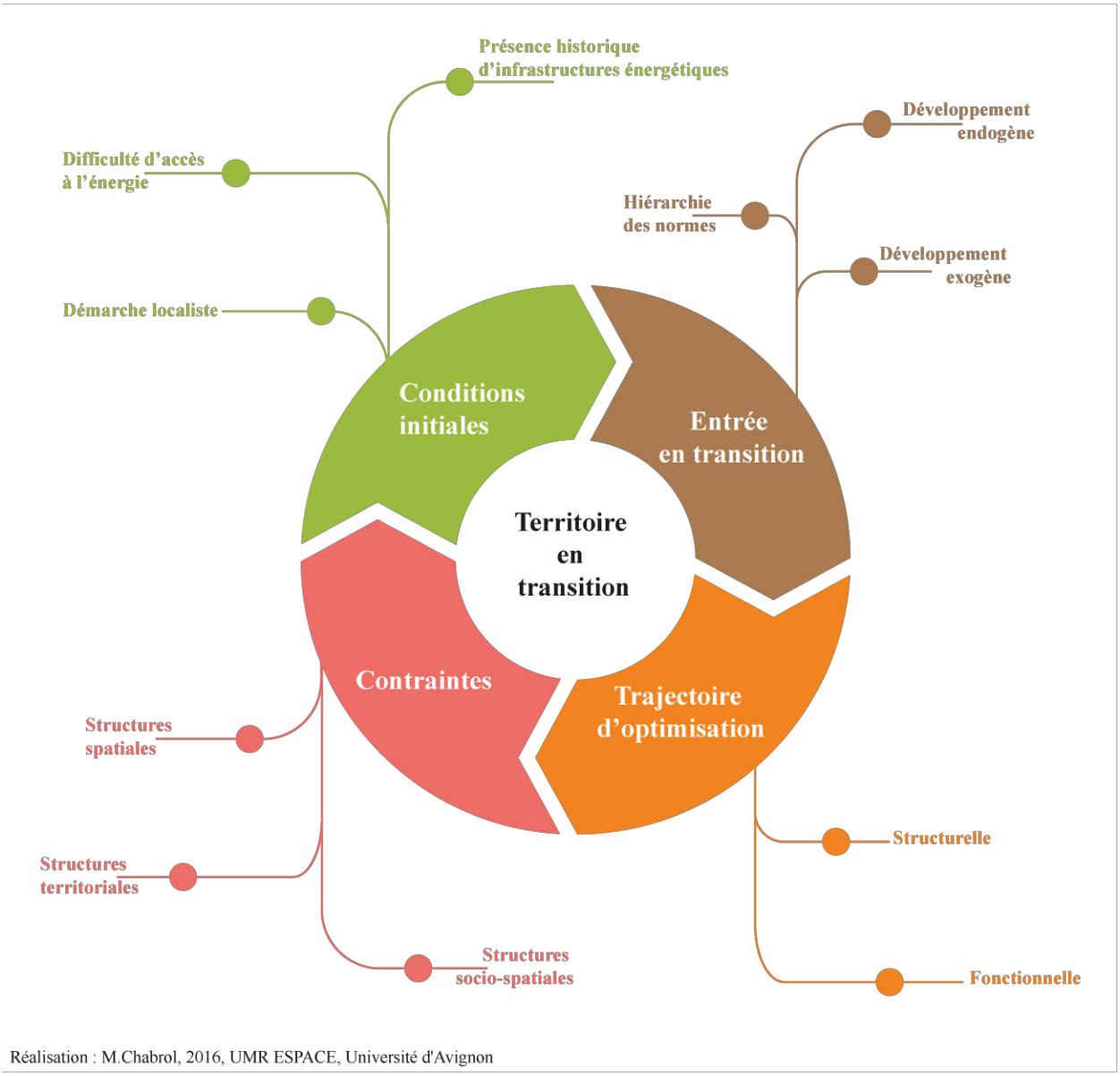


Figure 49. Les territoires de la transition énergétique

Les territoires en transition sont contraints par trois éléments fondamentaux dans le fonctionnement des territoires que nous avons qualifiés de *Space lock-in*.

La trajectoire d'optimisation se heurte en effet au poids des structures existantes, des routines et de la trajectoire dominante. *Les structures spatiales des systèmes d'approvisionnement* orientent la localisation de développement des technologies renouvelables. *Les structures territoriales* imposent un cadre normatif à l'optimisation fonctionnelle des territoires. *Les routines dans les pratiques spatiales* et les choix de localisation résidentielle des individus sont en contradiction avec l'optimisation structurelle des territoires. La trajectoire de transition est de ce point de vue canalisée vers une évolution marginale des conditions de départ. La modification des conditions initiales peut ainsi permettre à de nouveaux territoires d'entrer en transition et aux autres de poursuivre leur trajectoire par boucle de rétroaction selon un principe de *Path dependence*. La figure 50 décrit l'évolution systémique des *territoires en transition*. Elle montre les interactions entre *conditions initiales, entrée en transition, optimisation et contraintes*. Elle illustre en outre comment les trajectoires d'optimisation rétroagissent sur les conditions initiales par l'intermédiaire des contraintes (*Space lock-in*).

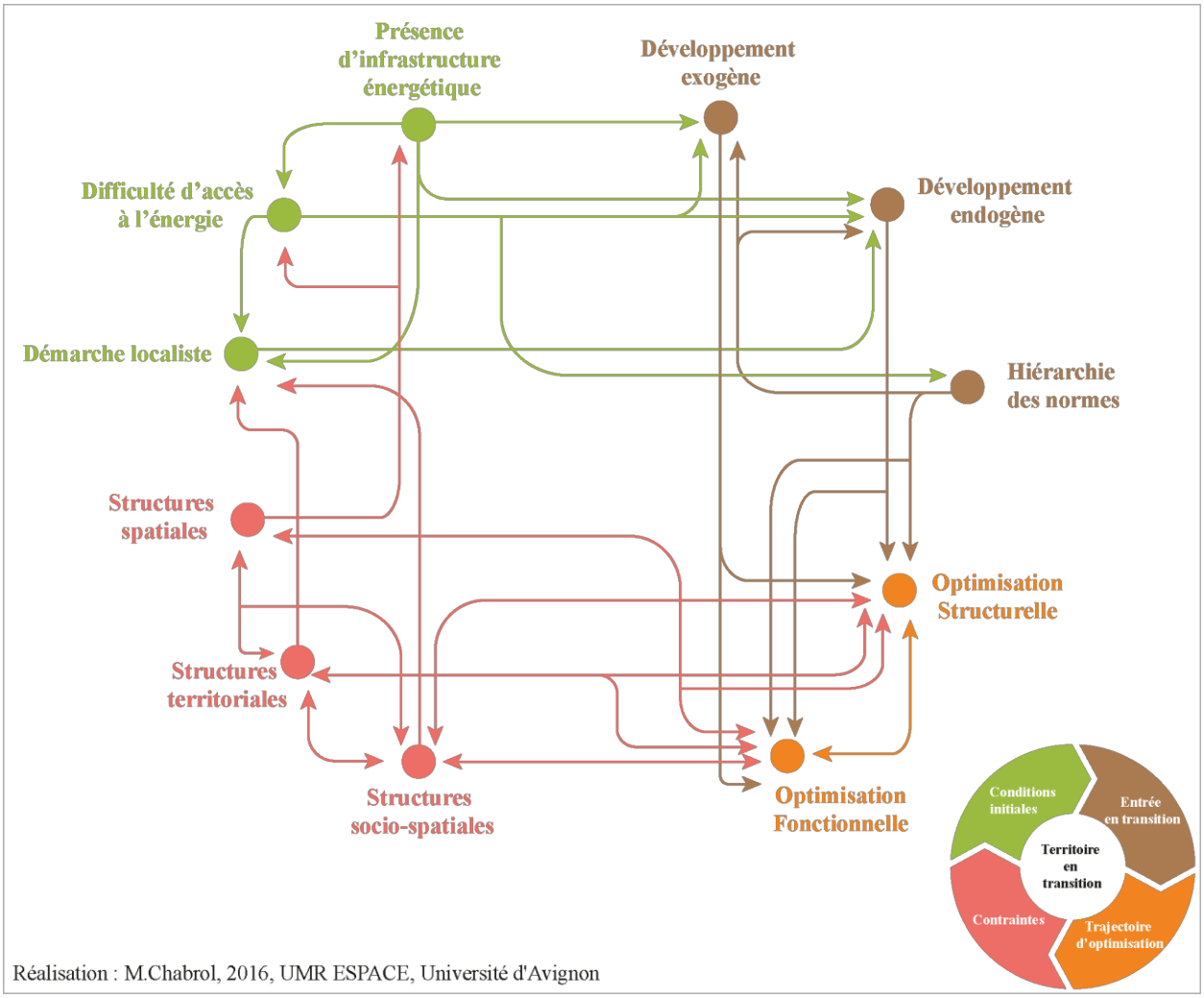


Figure 50. Fonctionnement systémique d'un territoire en transition

La présence d'infrastructures énergétiques agit sur *la difficulté d'accès à l'énergie* (en cas d'absence d'infrastructure), peut motiver *une démarche localiste* ancrée dans une culture énergétique locale et par conséquent s'inscrire dans un processus de *développement endogène*. Mais elle est aussi favorable au *développement exogène* dans une logique de continuité du développement industriel de filière.

La difficulté d'accès à l'énergie peut être un moteur de transition autant par *développement exogène* (développer de nouveaux marchés), que par application de *la hiérarchie des normes* et des politiques publiques d'accès à l'énergie, que par une volonté locale de répondre à cet enjeu par une valorisation des ressources locales (*développement endogène*).

La territorialisation de la transition énergétique suivant *la hiérarchie des normes* favorise aujourd'hui autant *un développement exogène* (principe des appels d'offres), qu'un *développement endogène* (principe des appels à projets).

Ces trois types *d'entrée en transition* (*développement exogène, endogène et application de la hiérarchie des normes*) conduisent à une *trajectoire d'optimisation structurelle et fonctionnelle* orientée selon l'importance des *contraintes spatiales et territoriales* qui s'exercent. L'action sur les *structures spatiales* des systèmes énergétiques rétroagit sur la *présence d'infrastructures énergétiques* et sur *l'accès à l'énergie*. L'action sur les *structures territoriales* peut influencer les *démarches localistes* favorablement ou non. L'action sur les *structures socio-spatiales*, les modes d'habiter ou les pratiques énergivores des individus rétroagit également sur les *démarches localistes* en les confortant ou non. La modification des conditions initiales, même à la marge, peut stimuler par auto-renforcement une trajectoire de transition suivant une dynamique de *Path dependence*.

Vers une optimisation des systèmes spatiaux et territoriaux

En l'état actuel, la transition énergétique n'annonce pas de changement radical dans l'évolution des structures spatiales et territoriales, mais plutôt une optimisation de celles-ci : une optimisation progressive des infrastructures énergétiques (*en théorie* jusqu'à la substitution des ressources fossiles par les ressources renouvelables), une optimisation des politiques énergétiques, une optimisation marginale de la consommation.

Les analyses présentées dans cette thèse valident ainsi nos hypothèses de départ en décrivant trois situations types de *Path dependence* qui impliquent une évolution marginale des structures spatiales et territoriales. Cette évolution est lente et répond de mécanismes d'auto-renforcement catalysés par des situations initiales spécifiques aux territoires.

Aussi cette évolution ne s'inscrit ni dans une remise en cause du modèle dominant de croissance économique, ni dans une dynamique d'adaptation au changement climatique, ni même dans un principe d'augmentation de la résilience des territoires face à une diminution des approvisionnements énergétiques fossiles, ce qui s'explique par l'absence de choc exogène

(rupture majeure dans les approvisionnements, hausse trop élevée des prix, accident nucléaire, catastrophe écologique, etc.).

Il apparaît alors que la transition énergétique est guidée uniquement par une logique de développement économique dont le résultat spatial est encore peu visible et difficile à anticiper.

Le chapitre 4 a montré comment le déploiement des énergies renouvelables dans l'espace s'appuie sur la filière énergétique existante pour se structurer. La place prise par les grands groupes énergéticiens, le principe des appels d'offres nationaux et l'ouverture du marché de l'énergie sont clairement l'illustration d'une volonté de relance économique par le développement des technologies renouvelables. Ce développement est bien une dynamique qui vise à diversifier et augmenter l'offre énergétique mais qui nécessite autant l'optimisation des structures matérielles, les réseaux, que de leurs systèmes de gestion. Cette optimisation s'effectue dans une logique de *Path dependence* par des processus d'autocatalyse. Ces mécanismes d'auto-renforcement sont orientés par des éléments politico-économiques exogènes *a-territoriaux* (tarif d'achat de l'électricité, appels d'offres sur la production renouvelable et sur la recherche et développement, concurrence mondialisée), et par des éléments endogènes spatiaux (structures spatiales des systèmes énergétiques).

Le chapitre 5 s'est attaché à montrer que la transition énergétique consiste à optimiser la politique énergétique nationale en s'appuyant sur un système de gouvernance multi-scalaire. Celui-ci prend appui sur la structure territoriale décentralisée que représentent les collectivités territoriales et les intercommunalités. Chaque niveau territorial d'intervention devient le vecteur de stratégies énergétiques conçues et décidées aux niveaux supérieurs.

Enfin, le chapitre 6 révèle un enjeu auquel il est très difficile de répondre. Celui-ci s'inscrit dans une logique d'optimisation des territoires dans un rapport systémique forme-fonctionnement-développement. Cette optimisation vise l'efficacité énergétique par une réflexion sur les structures spatiales qui favorisent un fonctionnement moins énergivore tout en préservant une logique de développement et d'amélioration des conditions de vie.

Cette logique d'optimisation questionne la loi d'entropie que nous avons évoquée au début de la thèse. La maximisation de la dissipation de l'énergie a permis aux sociétés humaines de produire des structures spatiales qui optimisent leur fonctionnement, accélèrent leur évolution et maximisent le potentiel d'interaction sociale entre les individus. Augmenter l'efficacité énergétique des sociétés nécessite une augmentation de leur niveau de complexité, donc une augmentation de l'entropie. Dans le cas contraire d'une diminution de l'entropie, doit-on s'attendre à une perte d'efficacité des fonctionnements sociétaux ? Cette question est ouverte et amène à reconsidérer les interactions qui relient les sociétés à l'environnement dans un dilemme évolutif.

Territorialisation des systèmes énergétiques, entre *localisme* et opportunités économiques

La transition énergétique ranime l'intérêt pour la notion de territoire compris au sens large comme un « *agencement de ressources matérielles et symboliques capable de structurer les conditions pratiques de l'existence d'un individu ou d'un collectif social et d'informer en retour cet individu et ce collectif sur sa propre identité* » (Lévy, Lussault, 2013, p. 999).

Le caractère multi-situé et dispersé des gisements d'énergie renouvelable renvoie à une possible relocalisation des systèmes de production et d'approvisionnement en énergie. Il peut susciter en cela des volontés locales de réappropriation des ressources matérielles (ressources énergétiques, réseaux, infrastructures de distribution, etc.) dans le cadre d'une redéfinition d'un système symbolique et informationnel autour d'une démarche de projet. La transition énergétique met ainsi en évidence l'émergence d'un nouveau *localisme* qui réactualise la notion de développement endogène et de développement local comme mode alternatif non capitaliste de croissance. Ce *localisme* s'exprime en région Provence-Alpes-Côte d'Azur dans des espaces marqués historiquement par l'activité rurale et la production hydroélectrique. Il est le signe d'une forme de méfiance face aux bouleversements spatiaux issus de l'urbanisation. Ces espaces participent en effet depuis des décennies à l'approvisionnement énergétique des espaces métropolisés du littoral et de la vallée du Rhône, et en cela à leur développement économique. Les territoires de l'arrière-pays provençal voient aujourd'hui dans les énergies renouvelables et la transition énergétique une opportunité pour alimenter leur propre développement. Mais la mise en politique de la transition énergétique en France et sa déclinaison dans les territoires ne relèvent pas en réalité d'un modèle décentralisé et ascendant, mais de la construction d'une nouvelle économie qui favorise l'intégration des territoires. La possibilité introduite par la loi TECV pour les communes et EPCI d'entrer au capital de Sociétés Anonymes dont l'objet social est la production d'énergie renouvelable révèle bien qu'il s'agit davantage de dynamiser la filière énergétique que de mettre en place un modèle sociétal basé sur la proximité et l'adéquation entre ressources locales et besoins locaux. De la même façon, la maîtrise des consommations d'énergie vise davantage le développement du secteur du bâtiment qu'une trajectoire de décroissance. Cette ouverture du marché de l'énergie aux institutions locales marque l'inscription de la déclinaison territoriale de la transition énergétique dans ce que Rifkin qualifie de « *capitalisme distribué* » (Rifkin, 2011). Elle peut permettre en effet une déconcentration d'une partie du capital vers les territoires à condition que les acteurs du territoire et de la société civile (associations, coopératives, citoyens, etc.) se saisissent de cette opportunité. Dans ce contexte, les chapitres 4 et 5 ont montré une restructuration des systèmes énergétiques et une restructuration du système de gouvernance de la politique énergétique qui n'annoncent en rien un changement dans la nature centralisée de ces systèmes. Aussi les évolutions énergétiques analysées dans cette thèse interrogent sur la mise en place d'une méta-structure territoriale arborescente qui nécessite l'articulation des échelles qui la composent.

Échelles, territoires et énergies

Un processus de restructuration du système énergétique régional existe bien en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Mais il correspond à un renforcement du maillage énergétique du territoire en s'appuyant sur la structure existante : il y a bien une restructuration mais cette dynamique est une dynamique marginale d'optimisation de l'approvisionnement en énergie des territoires qui ménage les structures en place, voire les conforte. Aussi l'enjeu de la transition énergétique se situe davantage dans l'articulation entre les grands réseaux préexistants et de possibles

réseaux locaux et multi-échelles. Plusieurs situations peuvent se chevaucher à différents niveaux d'échelle, ce qui amène à interroger la transition énergétique dans le cadre d'une dynamique spatiale plus générale, celle de la constitution d'un méta-réseau, un réseau de réseaux. Le développement des énergies renouvelables illustre une restructuration par extension des réseaux, par la multiplication des nœuds, l'augmentation de leur emprise spatiale et de leur interconnexion. Mais ce méta-réseau nécessite l'articulation des échelles qui le composent. Plus les espaces ont une consommation élevée (autrement dit dans les grandes agglomérations), plus le réseau est complexe et ramifié, et à l'inverse moins les espaces consomment, moins nombreuses sont les ramifications, plus stable est la demande. Il apparaît ainsi que les capacités de production doivent être proportionnelles au niveau d'échelle spatiale à laquelle elles sont déployées. Doit-on en effet considérer le développement des énergies renouvelables comme une production supplémentaire nécessaire pour accroître et sécuriser l'approvisionnement des espaces où la demande est la plus forte ? Ou bien comme une production calibrée pour une demande locale et structurée scalairement (faible production pour faible demande, production moyenne pour une demande modérée, etc.) ?

Se pose alors la question de l'optimum local qui se matérialise aujourd'hui au travers des réseaux intelligents. Il s'agit d'atteindre l'optimalité dans la gestion de la demande en électricité à toutes les échelles. La mise en place des réseaux intelligents, au plus près de l'utilisateur final, c'est-à-dire à grande échelle, n'est-elle pas révélatrice d'une optimisation par structuration scalaire, du réseau électrique européen jusqu'au compteur individuel ? Le développement des énergies renouvelables et des réseaux intelligents supposent la mise en œuvre de micro-réseaux connectés les uns avec les autres formant ainsi un réseau de niveau supérieur, et ainsi de suite jusqu'au réseau électrique européen.

Mais l'analyse de la transition énergétique montre aussi que cette méta-structure concerne également la gouvernance des territoires. La transition énergétique nécessite de concevoir une territorialisation multi-niveau basée sur l'interaction entre la puissance politique nationale, les entreprises, l'Union européenne et les collectivités territoriales. Cela soulève donc une triple question d'échelle :

- l'échelle spatiale permettant de maximiser le rapport entre la production et la consommation ;
- l'échelle liée au dimensionnement des réseaux et des unités de production ;
- l'échelle liée à la territorialisation de la transition énergétique.

La difficulté pour répondre à cette question réside dans deux éléments fondamentaux constitutifs de l'espace géographique : ses structures et ses dynamiques.

Événement spatial latent et changement spatial

Le chapitre 6 a mis en avant l'écart qui existe entre planification et processus socio-spatial. Il révèle en cela la distinction entre l'acte et l'événement, c'est-à-dire entre d'une part ce qui est fait par les acteurs dans la considération d'une finalité, d'une stratégie d'organisation et de fonctionnement de l'espace, et d'autre part ce qui se produit vraiment dans l'espace et

entraîne une modification durable de son organisation. L'impact réel des décisions d'aménagement face aux dynamiques intrinsèques des territoires est donc questionné.

Le premier chapitre a montré que les changements énergétiques du passé sont des événements spatiaux (EPEES[55], 2000) dans la mesure où ils ont été suffisamment puissants et inscrits dans une certaine épaisseur temporelle pour entraîner une perturbation durable et significative de l'organisation spatiale (EPEES, 2000, p. 194) : la structuration de systèmes de villes en réseaux hiérarchisés. Nous avons montré au cours de cette thèse que la mise en œuvre de la transition énergétique contemporaine suppose de provoquer sciemment des changements spatiaux ; non pas des changements dans l'espace, mais bien des mutations profondes dans les systèmes spatiaux dans une perspective d'optimisation (maximisation de leur efficacité énergétique). L'application du concept de *Path dependence* à nos travaux a cependant mis en évidence que ces changements nécessitent du temps pour se produire afin de catalyser des processus de changements dans des mécanismes d'auto-renforcement et de rétroaction. Il est dès lors possible de considérer cette transition énergétique comme un événement spatial latent dont la modification de l'organisation spatiale qu'il implique n'est pas immédiatement observable. De ce point de vue, l'incertitude doit être prise en compte dans les politiques publiques énergétiques. Et cette incertitude concerne tout autant le contexte conjoncturel de l'énergie que les difficultés pour anticiper les conséquences à venir des prises de décisions actuelles.

Feuille de route pour une recherche sur la dimension spatiale de la transition énergétique

Si nous avons pu dans cette thèse mesurer des contraintes de localisation des productions d'énergie renouvelable, mesurer le bénéfice financier pour les collectivités de nouvelles infrastructures, mettre en garde les institutions publiques en charge de la mise en œuvre de la transition énergétique sur la pertinence et l'usage d'indicateurs spatialisés, mettre en évidence le rôle des structures socio-spatiales dans le niveau de consommation énergétique observé dans les territoires, un certain nombre de verrous méritent une attention particulière pour ouvrir des perspectives de recherche.

Mesurer le niveau de consommation énergétique des structures spatiales dans une logique spatio-temporelle et multi-échelle

Si nous avons en effet insisté sur le fait que la transition énergétique se traduit par la recherche d'une optimisation des structures spatiales dans une perspective d'efficacité énergétique, nous n'avons pas pu proposer dans cette thèse de modèle suffisamment sophistiqué pour rendre compte de leur niveau de consommation énergétique. La difficulté première réside dans l'accès aux données fines de consommation, propriétés des fournisseurs et producteurs d'énergie, la seconde réside dans le manque de précision des données accessibles, en particulier le manque de précision temporelle. Les données de consommations étant annualisées, toute tentative d'analyse spatio-temporelle mensuelle, quotidienne ou horaire est impossible. Or une

[55] Espaces Post-Euclidiens et Événements Spatiaux, groupe de recherche sur la non-linéarité en géographie, créé à l'instigation de J. Charre, J.-P. Ferrier, J.-P. Gilg, R. Jeansoulin, G. Krier, D. Larcena.

telle analyse permettrait de mettre clairement en évidence un déplacement dans l'espace des besoins énergétiques liés à au fonctionnement quotidien ou saisonnier des systèmes territoriaux.

Une telle démarche permettrait par comparaison de cas d'étude d'engager une réelle réflexion sur le rapport entre la forme et le fonctionnement des structures spatiales en recherchant les situations qui minimisent la consommation d'énergie. La maîtrise de données de consommation à grande échelle (au niveau du bâtiment par exemple) apparaît également nécessaire pour favoriser par principe d'agrégation l'analyse multi-échelle de cette consommation. Une démarche de ce type alimenterait les réflexions et les choix stratégiques de localisation de l'habitat, des activités et des aménités (Genre-Grandpierre *et al.*, 2012). Elle permettrait par ailleurs de limiter grandement les biais d'interprétation liés à l'usage d'indicateurs à visée normative tels que révélés dans le chapitre 5. La publication récente au journal officiel de juillet 2016 des décrets relatifs à la transmission des données énergétiques aux collectivités territoriales à l'échelle des quartiers (IRIS INSEE) apporte déjà une première réponse à ce frein.

Relocalisation de la production d'énergie et changement spatial

La restructuration du système énergétique que nous avons mis en évidence dans cette thèse est trop émergente pour l'envisager comme un événement générateur de changement spatial. Aussi un suivi de cette dynamique paraît nécessaire pour en évaluer la vitesse et l'ampleur. Nous avons vu que cette dynamique est très sensible aux évolutions exogènes (législation, libéralisation…) et aux spécificités locales des territoires. La simulation de trajectoires d'évolutions possibles en fonction de changements exogènes et/ou endogènes représente un champ d'analyse et de recherche ouvert et pluridisciplinaire permettant d'aborder autant l'évolution des structures matérielles comme les réseaux, que les interactions entre acteurs dans une approche individu centré, ou encore l'expérimentation autour de modèles énergétiques territorialisés.

Toute la complexité de la transition énergétique ne réside pas seulement dans la multiplicité des thématiques qu'elle aborde, mais aussi dans la complexité spatiale et territoriale qui l'encadre et la détermine, celle de l'organisation des hommes dans l'espace.

« *Et que le vaste monde*
poursuive sa course folle
vers d'infinis changements »
Colum McCann

Références bibliographiques

Acket C., Vaillant J., 2011, *Les énergies renouvelables, état des lieux et perspectives*. Paris: Technip.

Ademe, Conexia, Valorem, 2010, *Étude du potentiel de production d'électricité d'origine éolienne terrestre en région Provence-Alpes-Côte d'Azur.*

Ademe, Axenne, 2009, *Étude du potentiel de production d'électricité d'origine solaire en Provence-Alpes-Côte d'Azur.*

Ademe, Geres, 2005, *Étude du potentiel régional pour la production petite hydroélectricité en Provence-Alpes-Côte d'Azur.*

Aklin M., Urpelainen J., 2013, "Political competition, path dependence, and the strategy of sustainable energy transitions". *American Journal of Political Science* 57, pp. 643-658.

Allen R.C., 2012, "Backward into the future: the shift to coal and implications for the next energy transition". *Energy Policy* 50 pp. 17-23.

AMORCE, 2012, *Quelles ressources fiscales pour les collectivités accueillant des parcs éoliens ?* Enquête auprès des collectivités éoliennes. Série économique ENE 01mars 2012.

Araujo K., 2014, "The emerging field of energy transitions: progress, challenges, and opportunities". *Energy Research and Social Science* 1, pp. 112-121.

ARPE, Agence Régionale Pour l'Environnement, 2011, *le gaz de schiste en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, quels enjeux et quels impacts pour notre territoire ?* Note de synthèse.

Arthur B., 1988, "Self-reinforcing mechanisms in economics". In Anderson P, Arrow K., Pines D., (eds.) *The economy as an evolving, complex system*, pp. 9-31. Reading Mass: Addison-Wesley.

Arthur B., 1994, Path dependence, self-reinforcement and human learning. In Arthur B., *Increasing returns and path dependence in the economy*, pp. 133-158. Ann Arbor: University of Michigan Press.

Arthur B., 1994, Urban systems and historical path dependence. In Arthur B., *Increasing returns and path dependence in the economy*, pp. 99-110. Ann Arbor: University of Michigan Press.

Asheim B.T., Boschma R.A., Cooke P., 2011, "Constructing Regional Advantage: Platform Policies Based on Related Variety and Differentiated Knowledge Bases". *Regional Studies* 45, pp. 893-904.

Asher F., Allemand S., Lévy J., (dir.), 2005, *Les Sens du mouvement. Modernité et mobilités*. Paris éditions Belin.

Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR), 2007, *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes*. Paris : Atelier parisien d'urbanisme, 148 p. http://www.apur.org/sites/default/files/documents/246.pdf

Auerbach F., 1913, "Das Gesetz der Belvolkerungskoncentration". *Petersmanns Geographische Mitteilungen* 59, pp. 74-76.

Aydalot Ph., 1985, *Économie régionale et urbaine*. Paris, Economica.

Bache I., Flinders M., 2004, *Multi-Level Governance*. Oxford University Press.

Baggioni V., 2014, « Éviter la conflictualité des opérations d'aménagement : un savoir-faire des équipes-projets ? Étude comparative de deux parcs solaires. ». *Participations*, vol. 3 n°10, pp. 121-150.

Bailly B., Rosenstein F., 2003, « Planification du réseau de transport d'électricité et maîtrise de la demande d'électricité : vers une complémentarité des objectifs ? ». *Flux* 54, pp. 28-35.

Bak P., 1999, *Quand la nature s'organise*. Paris, Flammarion.

Barles S., 2007, « Le métabolisme parisien aujourd'hui ». *Les Annales de la recherche urbaine* 103, pp. 64-72.

Barré B., Mérenne-Schoumaker B., 2011, *Atlas des énergies mondiales*. Paris: Autrement.

Bass F., 1969, "A new product growth model for consumers durables". *Management science* volume 15-5 pp. 215-227.

Berkhout F., Angel D., Wieczorek A.J., 2009, "Asian development pathways and sustainable sociotechnical regimes". *Technological Forecasting and Social Change* 76, pp. 218-228.

Binz C., Truffer B., 2011, "Technological innovation systems in multiscalar space. Analyzing an emerging water recycling technology with social network analysis". *Geographica Helvetica* 66, pp. 254-260.

Bolzon H., Rocher L., Verdeil E., « Transitions énergétiques multiples et contradictoires à Sfax (Tunisie) ». *Flux* 93-94, pp. 77-90.

Bonnefoy J.-L., 2001, « Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multi agents : pâture en forêt virtuelle ». *L'Espace géographique,* 1/2001.

Bonneuil C., Fressoz J-B., 2013, *l'Événement Anthropocène. La Terre, l'histoire et nous*. Paris : Seuil.

Boschma R.A., 2004, « Proximité et innovation ». *Économie rurale* 280, pp. 8-24.

Boschma R.A., Frenken K., 2006, Why is economic geography not an evolutionary science? *Journal of Economic Geography* 6, pp. 273-302.

Boschma R.A., Frenken K., 2012, "Technological relatedness and regional branching", in: Bathelt H., Feldman M.P., Kogler D.F. (Eds.), *Beyond Territory. Dynamic Geographies of Knowledge Creation, Diffusion and Innovation*. Routledge, Milton Park, pp. 64-81.

Boshma R., Martin R., 2010, *The Handbook of Evolutionary Economic Geography*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham.

Boucher-Hedenström F., Rutherford J., 2007, « La démunicipalisation du service de l'énergie à Stockholm ». *Les Annales de la recherche urbaine* 103, pp.144-152.

Bouneau C., 2006, « Réseaux électriques et électrification rurale : des territoires périphériques de l'innovation ? ». *Flux* 63-64, pp. 85-88.

Bouvier Y. (dir.), 2012, *Les défis énergétiques du XXIe siècle. Transition, concurrence et efficacité au prisme des sciences humaines.* Editions Peter Lang.

Bouvier M., 2013, *Les finances locales*, 15° édition, Paris Editions Lextenso.

Bouzarovski S., Petrova S., Sarlamanov R., 2012, "Energy poverty policies in the EU: A critical perspective". *Energy Policy* 49, pp. 76-82.

Brenner N., 1999, "Beyond state-centrism? Space, territoriality and geographical scale in globalization studies". *Theory and Society* vol. 28-2, pp. 39-78.

Bridge G., Bouzarovski S., Bradshaw M., Eyre N., 2013, "Geographies of energy transition: Space, place and the low-carbon economy". *Energy Policy* 53, pp. 331-340.

Brunet R., 1986, « La carte-modèle et les chorèmes ». *Mappemonde,* 86/4.

Brunet R., Ferras R., Théry H., 1992, *Les mots de la géographie.* Montpellier: GIP Reclus, La Documentation française.

Brunet R., 2001, « Désaménagement du territoire : l'énergie en France ». *Mappemonde,* 2001/01.

Bulkeley H., Castan Broto V., Hodson M., Marvin S., 2011, *Cities and Low Carbon Transitions*. London, Routledge, pp. 107-125.

Bulkeley H., Castan Broto V., Maassen A., 2014, "Low carbon transitions and the reconfiguration of urban infrastructure". *Urban Studies* 51, pp. 1471-1486.

Cailly L., Dodier R., 2007, « La diversité des modes d'habiter des espaces périurbains dans les villes intermédiaires : différenciations sociales, démographiques et de genre ». *Norois* [en ligne], 205 2007/4. Presses universitaires de Rennes.

Campbell C., Laherrère J., 1998, "The End of Cheap Oil". *The Scientific American* march 98, pp. 78-84.

Calvert K., Simandan D., 2010, "Energy, space, and society: A reassessment of the changing landscape of energy production, distribution, and use". *Journal of Economics and Business Research* 16, pp. 13-37.

Calvert K., 2015, "From energy geography to energy geographies: Perspectives on a fertile academic borderland". *Progress in Human Geography,* first published on January 21, 2015 as doi:10.1177/0309132514566343

Calzonetti F., Solomon B., (dir.), 1985, *Geographical Dimensions of Energy*. Boston, MA: D. Reidel.

Carnot N.L.S., 1824, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Paris, Bachelier.

Carpentier S., 2010, « Modes d'habiter urbains et ruraux : entre continuité et rupture ». *Articulo - Journal of Urban Research* 3. https://articulo.revues.org/1548

Carrizo S., Velut S., 2005, « Nouvelles territorialités en Amérique Australe. Activités énergétiques et intégration dans les terres et les mers magellanes ». *L'Espace géographique,* 2/2005, pp. 161-175.

Carvalho L., Mingardo G., Van Haaren J., 2012, "Green Urban Transport Policies and Cleantech Innovations: Evidence from Curitiba, Göteborg and Hamburg". *European Planning Studies* 20, pp. 375-396.

Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme (Certu), 2004, Mesurer la tache urbaine, *Sign@ture lettre d'information géographique* 28, pp. 16-26.

Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme (Certu), 2012, *PLU et production d'énergie – Fiches 1-2-3*. Paris : Éditions du CERTU, coll. « Dossiers ».

Chabrol M., Grasland L., 2016, « *Lou camin de vida prouvençau*, une contrainte socio-spatiale à la mise en œuvre de la transition énergétique. », *L'Espace géographique*, 1/2016, pp. 79-94.

Chabrol M., Grasland L., 2016, « Fiscalité locale des énergies renouvelables, un levier incertain de développement local (France) ». *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Espace, Société, Territoire, document 770, mis en ligne le 03 février 2016.

Chabrol M., 2016, "Re-examining historical energy transitions and urban systems in Europe", *Energy Research and Social Science*, vol. 13 Special Issue *Energy Transitions in Europe: Emerging Challenges, Innovative Approaches, and Possible Solutions,* pp. 194-201.

Chabrol M., Grasland L., 2015, « Les liens entre forme urbaine et consommation d'énergie. Analyse d'un préalable pour la mise en œuvre de la transition énergétique aux échelles locales et régionales » in : Scarwell H-J. *et al*, *Réussir la transition énergétique*. Lille, Presse Universitaire du Septentrion, pp. 193-201.

Chabrol M., 2015, « Hiérarchies urbaines et transitions énergétiques: une approche évolutive en Europe de 1800 à 2010 », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Débats et Perspectives, mis en ligne le 08 novembre 2015.

Chabrol M., Grasland L., 2014, « Contraintes spatiales et enjeux territoriaux d'une déclinaison régionale de la transition énergétique : l'exemple de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement,* Volume 14-3 Décembre 2014, mis en ligne le 16 janvier 2015.

Chaisson E., 2001, *Cosmic Evolution: the rise of complexity in Nature*. USA: President and Fellows of Harward College.

Chanard C., 2008, « Collectivités territoriales et énergie : analyse des compétences locales », Colloque ASRDLF « *Territoire et action publique territoriale : nouvelles ressources pour le développement régional* », 25, 26, 27 août, Rimouski, Canada.

Chanard C., 2011, *Territoire et énergie : politiques locales, échelles d'intervention et instruments de mobilisation, de connaissance et d'action*. Thèse de géographie, Besançon, Université de Franche-Comté.

Chapman J.D., 1961, "A geography of energy: An emerging field of study". *The Canadian Geographer* 1, pp. 10-15.

Chapman J.D., 1989, *Geography and energy: Commercial energy systems and national policies*. New York: John Wiley & Sons.

Chardonnet J., 1962, *Les sources d'énergie*. Paris : Editions Sirey.

Charles L., 2015, « Transition écologique : image ou réalité ? (Penser la transition énergétique) ». In Scarwell H-J., Leducq D., Groux A. (dir.), *Transitions énergétiques : quelles dynamiques de changement ?* Paris : L'Harmattan, pp. 19-32.

Charre J., 2000, « Le pourquoi et le pourquoi pas ». *Géopoint* : L'explication en géographie, Groupe Dupont, UMR ESPACE.

Christen G., Hamman P., 2015, *Transition énergétique et inégalités écologiques : énergies renouvelables et implications citoyennes en Alsace*. Strasbourg : Presses universitaires de Strasbourg, coll. « Études alsaciennes et rhénanes ».

Coenen L., Raven R., Verbong G., 2010, "Local niche experimentation in energy transitions: A theoretical and empirical exploration of proximity advantages and disadvantages". *Technology in Society* 32, pp. 295-302.

Coenen L., Benneworth P., Truffer B., 2011, "Towards a spatial perspective on sustainability transitions". Paper presented at the *DIME Final Conference*, 6-8 April 2011, Maastricht.

Coenen L., Benneworth P., Truffer B., 2012, "Toward a spatial perspective on sustainability transitions". *Research Policy* 41, pp. 968-979.

Coenen L., Truffer B., 2012, "Places and spaces of sustainability transitions: Geographical contributions to an emerging research and policy field". *European Planning Studies* 20, pp. 367-374.

Coenen L., Hansen T., 2015, "The geography of sustainability transitions : review, synthesis and reflections on an emergent research field". *Environmental innovation and societal transitions* 17, pp. 92-109.

Collet P., 2011, « La règlementation thermique de 1974 à aujourd'hui ». *Actu Environnement*. http://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/energie-batiment-rt2012/historique-reglementation-thermique.php4

Commission Européenne, 2011, *Règlement du parlement européen et du conseil concernant des orientations pour les infrastructures énergétiques transeuropéennes et abrogeant la décision* n° 1364/2006/CE. Bruxelles.

Communes forestières Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2009, *Synthèse des gisements de bois disponibles pour une valorisation énergétique en Provence-Alpes-Côte d'Azur*. Rapport d'étude. Mission régionale Bois énergie.

Conseil des Prélèvements Obligatoires (CPO), 2010, *La Fiscalité locale*, Paris, La Documentation française.

Conseil des Prélèvements Obligatoires (CPO), 2013, *Fiscalité locale et entreprises. Cartographie de la fiscalité locale des entreprises*, Paris, La Documentation française.

Conseil des Prélèvements Obligatoires (CPO), 2014a, *Fiscalité locale et entreprises*, Paris, La Documentation française.

Conseil des Prélèvements Obligatoires (CPO), 2014b, *Fiscalité locale et entreprises. Attractivité des territoires et fiscalité locale des entreprises*, Paris, La Documentation française.

Cook E.F., 1976, *Man, Energy, Society*. San Francisco, CA: Freeman and Co.

Cour des comptes, 2012a, « La contribution au service public de l'électricité (CSPE) ». Communication à la commission d'enquête du Sénat sur le coût réel de l'électricité afin d'en déterminer l'imputation aux différents agents économiques.

Cour des comptes, 2012b, *Les coûts de la filière électronucléaire*. Rapport public thématique.

Courlet C., 2007, « Développement économique et territoire : quels rapports ? », in : Lapèze J. (dir.), *Apport de l'approche territoriale à l'économie du développement*. Paris : L'Harmattan, pp. 29-52

Coutard O., 2010, « Services urbains : la fin des grands réseaux ? », in : Coutard O., Lévy J-P. (dir.), *Ecologies urbaines*. Paris, Economica-Anthropos, pp. 102-129.

Coutard O., Rutherford J., 2011, "The rise of post-networked cities in Europe ? Recombining infrastructural, ecological and urban transformations in low carbon transitions", in: Bulkeley *et al*., *Cities and Low Carbon Transitions*. London, Routledge, pp. 107-125.

Coutard O., Rutherford J., 2010, "Energy transition and city–region planning: understanding the spatial politics of systemic change". *Technology Analysis and Strategic Management* 22, pp. 711-727.

Coutard O., Rutherford J., 2009, « Les réseaux transformés par leurs marges : développement et ambivalence des techniques « décentralisées » ». *Flux* 2009/2, 76-77, pp. 6-6.

Criqui P., Allaire J., 2007, « Trois modèles de villes Facteur 4 ». *Les Annales de la recherche urbaine* 103, pp. 54-63.

Criqui P., 2009, « Vers une rupture profonde du modèle énergétique mondial ». *Questions internationales* 38, pp. 67-78.

Cruciani M., 2015, « Réseaux électriques et transition énergétique en Europe ». *Notes de l'IFRI*, Paris : ISBN : 978-2-36567-404-1

Curran D.W., 1973, *Géographie mondiale de l'énergie*. Paris : Masson, coll. Géographie.

Dauphiné A., 1995, *Chaos, fractales et dynamiques en géographie*. Montpellier, Reclus Espace mode d'emploi.

Dauphiné A., 2003, *les théories de la complexité chez les géographes*. Paris : Economica, coll. Anthropos.

Davezies L., 2009, « L'économie locale résidentielle », *Géographie, économie, société*, Vol.11-1, pp. 47-53.

David P., 1985, "Clio and the economics of QWERTY". *American Economic Review* 75 pp. 332-337.

David P., 1993, "Historical economics in the long run: Some implications of path dependence". In Snooks G.D., (ed.) *Historical analysis in economics*, pp. 29-40. London: Routledge.

David P., 1994, "Why are institutions the "carriers of history"? Path dependence and the evolution of conventions, organizations and institutions". *Structural Change and Economic Dynamics* 5, pp. 205-220.

David P., 2005, Path dependence in economic processes: Implications for policy analysis in dynamical systems contexts. In Dopfer K., (ed.), *The evolutionary foundations of economics*, pp. 151-194. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.

Daviet S., Monge R., "From "Evolutionary Turn" to "Territorial Resources": The New trajectories of Innovation in Provence, France". *Geography Compass* 4/10.

Defeuilley C., 2014, « Portrait d'entreprise. La transition énergétique - 1 ». *Flux* 2014/1-95, pp. 65-76.

De Sède M-H., Ibrahim K., 2007, « Pour une approche territoriale de l'énergie : une réponse aux défis du XXIe siècle », Actes du Festival international de géographie, Saint-Dié-des-Vosges, 4 au 7 octobre 2007, [en ligne] disponible sur http://archives-fig-st-die.cndp.fr/actes/actes_2007/index.htm

Desjardins X., 2001, « Pour l'atténuation du changement climatique, quelle est la contribution possible de l'aménagement du territoire ? ». *Cybergeo*. http://cybergeo.revue.org/23531

Desjardins X., Llorente M., 2009, *Revue de la littérature scientifique sur le lien entre les formes d'organisation territoriale, les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre. Quelle contribution de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire à l'atténuation du changement climatique ?* Paris : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer.

Desjardins X., Mettetal L., 2012, « L'habiter périurbain face à l'enjeu énergétique ». *Flux* 89-90, pp. 46-57.

Desrosières A., 2014, *Prouver et gouverner. Une analyse politique des statistiques publiques*. Paris, La Découverte, coll. « Sciences humaines ».

Dewald U., Truffer B., 2012, "The Local Sources of Market Formation: Explaining Regional Growth Differentials in German Photovoltaic Markets". *European Planning Studies* 20, pp. 397-420.

Di Méo C., 2006, *La face cachée de la décroissance*. Paris : L'Harmattan, coll. Questions contemporaines.

Di Méo G., 2014, *Introduction à la géographie sociale*. Paris : Armand Colin.

Dodge Y., 2007, *Statistique. Dictionnaire encyclopédique*. New York : Springer.

Dubois M., 2009, *La Transition énergétique. Vivre dans un monde fini*. Paris : Desclée de Brouwer.

Dubois J., Thomann S., 2012, *Tensions sur les champs et les bois. L'essor des énergies vertes en Provence-Alpes-Côte d'Azur*. Editions de l'Aube, La Tour d'Aigues.

Dupuy G., 2002, « ''Cities and automobile dependence'' revisité : les contrariétés de la densité ». *Revue d'économie régionale et urbaine* 1, pp. 141-156.

Durand F., 2008, *La décroissance : rejet ou projets ?* Paris : Ellipses, coll. Transversale Débats.

Durand L., Pecqueur B., Senil N., 2015, « La transition énergétique par la territorialisation. L'énergie comme ressource territoriale », in : Scarwell H-J. *et al*, *Réussir la transition énergétique.* Lille, Presse Universitaire du Septentrion, pp. 29-36.

Duruisseau K., 2015, « Les centrales photovoltaïques dans le sud de la France. Un exemple de territorialisation de la transition énergétique », in : Scarwell H-J. et al, *Réussir la transition énergétique*. Lille, Presse Universitaire du Septentrion, pp. 57-66.

Dutozia J., 2013, *Espaces à enjeux et effets de réseaux dans les systèmes de risques*. Thèse de doctorat, UMR Espace, université de Nice-Sophia Antipolis.

EDF, 2016, L'aventure EDF, lumière sur le premier électricien mondial-Histoire, [en ligne] disponible sur https://www.edf.fr/groupe-edf/premier-electricien-mondial/histoire

Ellerkamp Ph., 2000, *Étude de l'extension urbaine autour d'Avignon et de Montpellier de 1936 à 1999 par la simulation de dynamiques spatiales à l'aide de modèles cellulaires d'interaction locale*. Thèse de doctorat, UMR Espace, université d'Avignon.

Emelianoff C., 2007, « Les villes européennes face au changement climatique », *Les Annales de la recherche urbaine* 103, pp. 159-169.

Emelianoff C., Mor E., 2013, « Société postcarbone: les villes pionnières ». *Futuribles* 392, pp. 27-41.

Espaces Post-Euclidiens et Evénements Spatiaux – EPEES, 2000, « Événement spatial », *L'Espace géographique* 2000/3, pp. 193-199.

Essletzbichler J., 2012, "Renewable Energy Technology and Path Creation: a multi-scalar approach to energy transition in the UK". *European Planning Studies* 20-5, pp. 791-816.

EON, 2011, *La conversion de Provence 4 à la biomasse, un avenir pour la centrale et la région.* E-ON France.

Faller F., 2014, "Regional Strategies for Renewable Energies: Development Processes in Greater Manchester". *European Planning Studies* 22, pp. 889-908.

Fast S., 2013, "Social acceptance of renewable energy: Concepts, trends, and geographies". *Geography Compass* 7, vol.12, pp. 853-866.

FNAU, 2015, *Climat / iser la planification*. Les Dossiers FNAU, n°37, Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme.

Fouquet R., 2010, "The slow search for solutions: lessons from historical energy transitions by sector and service". *Energy Policy* 38, pp. 6586-6596

Fouquet R., Pearson P.J.G., 2012, "Past and prospective energy transitions: insights from history". *Energy Policy* 50, pp. 1-7

Fournier M., Grison J-B., Rieutort L., 2012, « Les enjeux du développement des énergies renouvelables : les enjeux territoriaux ». *Droit de l'environnement* hors-série.

Frankhauser P., 2013, « La ville fractale – un concept d'aménagement multi-échelle » in : Brun G., *Ville et mobilité - Nouveaux regards de la recherche*. Collection « Méthodes et Approches » du Predit. Economica, pp. 85-99

Gales B., Malanima P., Kander A., Rubio M., 2007, "North versus South: Energy transition and energy intensity in Europe over 200 years". *European review of economic history, II*, pp. 215-249.

Garnsey E., McGlade J., 2006, "*Complexity and co-evolution: Continuity and change in socio-economic systems"*. Cheltenham, U.K.: Edward Elgar.

Geels F.W., 2010, "Ontologies, socio-technical transitions (to sustainability), and the multi-level perspective". *Research Policy* 39, pp. 495-510.

Geels F.W., 2011, "The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms". *Environmental Innovation and Societal Transitions* 1, pp. 24-40.

Genevard A., Laclais B., 2015, *Un acte II de la loi montagne pour un pacte renouvelé de la nation avec les territoires de montagne*. Rapport Commission Parlementaire.

Genre-Grandpierre C., Melnikava A., Michelon P., 2016. « Optidens : un modèle de simulation pour explorer les conditions de possibilité d'une ville lente, mais accessible ». *Transports* 495, pp. 36-43

George P., 1950, *Géographie de l'énergie*. Paris : Editions Génin, coll. Géographie économique et sociale.

Georgescu-Roegen N., 1971, *The entropy law and the economic process*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.

Georgescu-Roegen N., 1977, "Matter matters too", in Wilson K.D., *Prospetcs for growth: Changing expectations for the future*. New-York: Massachusetts: Praeger, pp. 293-313.

Georgescu-Roegen N., 1979, « La loi d'entropie et le problème économique », in Georgescu-Roegen N., *la décroissance*, trad. Grinevald J., Rens I., 2° édition 1995, 3° édition 2008, Paris : Le Sange de la Terre.

Ghorra-Gobin C., 2013, « La banlieue, rêve américain ou espace en voie de disparition ? ». *Revue Esprit* 393, « Tous périurbains ! », pp. 121-130.

Gilly J.P., Torre A., 2000, *Dynamiques de Proximité*. Paris : L'Harmattan.

Gioda A., 2014, « El Hierro (Canaries) : une île et le choix des transitions énergétique et écologique », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 14 Numéro 3.

Godard A., Tabeaud M., 2004, *Les climats. Mécanismes, variabilité, répartition*. Paris : Armand Colin.

Grandclément A., Boulay G., 2015, « Fonction résidentielle et dynamique de la fiscalité locale sur le littoral méditerranéen français ». *L'Espace géographique*, 2015/1, pp. 57-72.

Gras A., 2015, « Les transitions énergétiques de la civilisation thermo-industrielle dans l'anthropocène, et la perspective d'une rupture globale », in Scarwell H-J., Leducq D., Groux A. (dir.), *Transitions énergétiques : quelles dynamiques de changement ?* Paris : L'Harmattan, pp. 553-573.

Grenier A., 2007, Ville et énergie. Spécificité et complexité de la question en France. *Les Annales de la recherche urbaine* 103, pp. 128-136.

Grinevald J., 2007, *La biosphère de l'Anthropocène. Pétrole et climat, la double menace. Repères transdisciplinaires 1824-2007*. Genève (Suisse) : Editions Médecine et Hygiène.

Grison J-B., 2013, « Ressources locales et développement territorial dans les très petites communes : un potentiel en question ». *Geocarrefour* Vol. 88-1, pp. 75-86.

Grubler A., 2012, "Energy transitions research: Insights and cautionary tales". *Energy Policy* 50, pp. 8-16

Guérin-Pace F., 1993, *Deux siècles de croissance urbaine*. Paris, Anthropos.

Guerin-Pace F., 1995, "Rank-Size distribution and the process of urban growth". *Urban Studies* 323, pp. 551-562.

Gumuchian H., Grasset E., Lajarge R., Roux E., 2003, *Les acteurs, ces oubliés du territoire*, Paris : Editions Economica Anthropos.

Gunderson L., Holling C.S., 2002, *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*. Washington D.C.: Island Press.

Guyol N.B., 1971, *Energy in the Perspective of Geography*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

Haberl H., 2002, "The energetic metabolism of societies, part II: empirical examples". *Journal of Industrial Ecology* 5, pp. 71-88.

Haggett P., 1976, "Measuring instability in the growth of urban systems: a biproportionate index", *Geoforum*.

Hansen T., 2014, "Juggling with Proximity and Distance: Collaborative Innovation Projects in the Danish Cleantech Industry". *Economic Geography* 90, pp. 375-402.

Hassink R., 2005, "How to unlock regional economies from path dependency? From learning region to learning cluster". *European Planning Studies* 13, pp. 521-535.

Hirsh R.F., Jones C.F., 2014, "History's contributions to energy research and policy". *Energy Research and Social Science* 1, pp. 106-111.

Hoare A., 1979, "Alternative energies: alternative geographies?" *Progress in Human Geography* vol. 3-4, pp. 506-537.

Hodson M., Marvin S., 2009, "Cities mediating technological transitions: understanding visions, intermediation and consequences". *Technology Analysis and Strategic Management* 21, pp. 515-534.

Hodson M., Marvin S., 2010, "Can cities shape socio-technical transitions and how would we know if they were?". *Research Policy* 39, pp. 477-485.

Hodson, M., Marvin, S., 2012. "Mediating Low-Carbon Urban Transitions? Forms of Organization, Knowledge and Action". *European Planning Studies* 20, pp. 421-439.

Hooghe L., Marks G., 2003, *Unraveling the Central State, but how ? Types of Multi-Level Governance*. Institute for advanced studies, Vienna.

Ibrahim K., De Sède M.H., 2005, « Modèle d'analyse locorégional des systèmes énergétiques ». *7e rencontres de Théo Quant*, 26-28 janvier 2005, Besançon-France.

IEA, 2015, *World Energy Outlook*. Editions de l'IEA.

IFPEN, Institut Français du Pétrole Energies Nouvelles, 2012, *Les hydrocarbures non conventionnels, évolution ou révolution ?* Panorama 2012.

IPCC, 2014, *Climate Change, rapport de synthèse du groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat.* New-York : Cambridge University Press.

Jaglin S., Verdeil E., 2013, « Énergie et villes des pays émergents : des transitions en question. Introduction ». *Flux* 3 93-94, pp. 7-7

Jaillet M-C., 2013, « Peut-on encore vivre en ville ? L'exemple de Toulouse ». *Revue Esprit* 393, « Tous périurbains ! », pp. 68-82.

Jeandel C., Mosseri R. (dir.), 2011, le Climat à Découvert. Paris : CNRS Editions.

Juisto S., 2009, "Energy Transformations and Geographic Research", in Castree N., *et al.*: *A Companion to Environmental Geography*. Blackwell Publishing Ltd, chapitre 31, pp. 533-551.

Kander A., Malanima P., Warde P., 2013, *Power to the people, Energy in Europe over the last Five Centuries*. Princeton: Princeton University Press.

Karplus Y., Meir A., 2013, "The production of space: A neglected perspective in pastoral research". *Environment and Planning D: Society and Space* vol. 31, pp. 23-42.

Kerrest A., 2016, « L'exploitation des ressources minérales des corps célestes ». Conférence à la faculté de droit d'Aix-en-Provence, 4 mai 2016.

Kirai P., 2009, *Systèmes énergétiques : Vulnérabilité – Adaptation – Résilience (VAR) - Kenya*. Helio international.

Kuznets S., 1930, *Secular movements in production and prices: their nature and their bearing upon cyclical fluctuations.* Boston: Houghton Mifflin.

Labrousse M., 2006, « L'énergie répartie et la production décentralisée d'énergie ». *Les cahiers de Global Chance* 21, pp. 7-33.

Labussière O., 2013, « Energies renouvelables et territoire : nouveaux accès, nouveaux potentiels », in Mosseri R., Jeandel C., *L'énergie à découvert*. CNRS Editions, pp. 286-287.

Labussière O., Nadaï A., 2015, *L'énergie des sciences sociales*. Paris, Athéna.

Lagendijk A., 2006, "Learning from conceptual flow in regional studies: Framing present debates, unbracketing past debates". *Regional Studies* 40, pp. 385-399.

Lagendijk A., Boertjes S., 2013, "Light Rail: All change please! À post-structural perspective on the global mushrooming of a transport concept". *Planning Theory* 12, pp. 290-310.

Lagerholm M., Malmberg A., 2009, "Path dependence in economic geography", in Magnuson L. (ed.), *The evolution of path dependence*, pp. 87-107. Cheltenham, U.K.: Edward Elgar.

Lang A., Toulemont B., Zapf H., 2010, *La contribution économique territorial*. Rueil-Malmaison : Editions Lamy.

Laponche B., 2002, « Production décentralisée d'énergie : enjeux énergétiques et territoriaux ». *4es assises nationales de l'énergie*, Grenoble, pp. 7-33.

Lefebvre H., 1974, *La production de l'espace*. Paris : éditions Anthropos, collection société et urbanisme.

Lejoux P., Ortar N. (dir.), 2013, « La transition énergétique : vrais enjeux, faux départs ? ». *SHS Web of conferences* vol. 9, Lyon, 21-22 octobre.

Le Néchet F., 2011, « Consommation d'énergie et mobilité quotidienne selon la configuration des densités dans 34 villes européennes ». *Cybergeo*. http://cybergeo.revue.org/23634

Lévy J., 2002, « Modes de vie urbains et modèles d'urbanité », in Jouvenel H., Lamblin V., Theys J. (dirs) *Radioscopie de la France en mutation, 1950-2030*. Paris, Futuribles international.

Lévy J-P., Roudil N., Flamand A., Belaïd F., 2014, « Les déterminants de la consommation énergétique domestique ». *Flux* 96-2, pp. 40-54.

Lopez F., Bouton A., 2015, « Les micro-systèmes techniques de la transition énergétique ». *Revue Urbanités* 6, « La ville et les tuyaux ».

Lorius C., Carpentier L., 2010, *Voyage dans l'Anthropocène*. Arles : Actes Sud, coll. Babel.

Lotka A., 1924, *Elements of physical biology*. Baltimore.

Luten D., 1971, "The economic geography of energy". *The Scientific American* 224 pp. 164-175.

Maizia M., 2007, *Les Pompes à chaleur. Prospective des consommations d'énergie et des émissions de CO2 dans l'habitat : les gisements offerts par les pompes à chaleur*. Paris : Éditions IDDRI, coll. Les Cahiers du Clip 18, pp. 2-47.

Magnin G., 1995, « Ville et énergie : faut-il redéfinir la place des collectivités territoriales dans les politiques énergétiques ? » *Revue de l'énergie* 473, pp.806-813.

Mandelbrot B., 1975, *Les objets fractals*. 1ère édition Paris Flammarion.

Manners G., 1971, *The Geography of Energy*. London: Hutchinson & Company.

Marchand-Vaguet Y., 2005, « La conquête des hydrocarbures en Sibérie occidentale, le modèle centre-périphérie revisité ». *L'Espace géographique,* 2/2005, pp. 145-159.

Marchetti C., Nakicenovic N., 1979, *The dynamics of energy systems and the logistic substitution model*. Work carried out under a grant from the Volkswagenwerk Foundation. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenbrug, Austria.

Markard J., Raven R., Truffer,B., 2012, "Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects". *Research Policy* 41, pp. 955-967.

Martin Ph., 2008, « Ne faudrait-il pas re-naturaliser la géographie ? ». *Géopoint* : Demain la géographie, Avignon, Groupe Dupont et UMR ESPACE.

Martin R., Sunley P., 2006, "Path dependence and regional economic evolution". *Journal of Economic Geography* 6, pp. 395-438.

Martin R., 2010, "Rethinking Regional Path Dependence: Beyond Lock-in to Evolution". Roepke Lecture in Economic Geography vol. 86-1, pp. 1-27.

McCauley S.M., Stephens J.C., 2012, "Green energy clusters and socio-technical transitions: analysis of a sustainable energy cluster for regional economic development in Central Massachusetts", USA. *Sustainability Science* 7, pp. 213-225.

McGuire B., Sarrazin J., 1963, « Aluminium, histoire de l'Alcan », traduction française, *Canadian Geographical Journal,* 1963, p. 6.

Meadows D., Meadows D., 1972, *Halte à la croissance ? Rapport au Club de Rome*. Paris : Fayard.

MEDDE, 2015, *Projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte*. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.

Mérenne-Schoumaker B., 2002, *La localisation des industries. Enjeux et dynamiques*. Presses Universitaires de Rennes.

Mérenne-Schoumaker B., 2007, *Géographie de l'énergie. Acteurs, lieux et enjeux*. Paris: Belin.

Metreau E., Laponche B., 2003, *Étude de faisabilité d'une initiative d'animation des réseaux d'acteurs français impliqués dans les actions énergétiques territoriales*. Volume 1 : Rapport, ICE, Étude réalisée pour l'ADEME, 93 p.

Meyer G., 2013, *Développement durable et finances locales*, Paris : L'Harmattan.

Michel M., 1994, *L'aménagement régional en France, du territoire aux territoires.* Paris: Masson.

Moisset J.J., 1972, *L'alcan et la croissance économique du Saguenay-lac-St-Jean*. Thèse de doctorat présentée à la Faculté de droit et des sciences économiques et sociales de l'Université de Fribourg.

Monstadt J., 2007, "Urban Governance and the Transition of Energy Systems: Institutional Change and Shifting Energy and Climate Policies in Berlin". *International Journal of Urban and Regional Research* 31-2, pp. 326-343.

Moriconi-Ebrard F., 1993, *L'urbanisation du monde depuis 1850.* Paris: Anthropos.

Moriconi-Ebrard F., 2000, *De Babylone à Tokyo, les grandes agglomérations du Monde*. Paris : Ophrys.

Morin E., 1990, *Introduction à la pensée complexe*. Paris : Le Seuil.

Mumford L., 1950, *Technique et civilisation*. Paris : Le Seuil.

Murphy J., Smith A., 2013, "Understanding transition - periphery dynamics: renewable energy in the Highlands and Islands of Scotland". *Environment and Planning A* 45, pp. 691-709.

Nadaï A., von der Horst D., 2010, "Landscapes of energies". *Landscape Research* 35-2, pp. 143-155

Nadaï A., Labuissière O., 2010, "Birds, wind and the making of wind-power landscapes in Aude". *Landscape research* 35-2, pp. 209-233.

Nadaï A., Labussière O., 2013, "Playing with the line, channelling multiplicity: Wind power planning in the Narbonnaise (Aude, France)". *Environment and Planning D* 31 pp. 116-139.

Nadaï A., Labussière O., Debourdeau A., Régnier Y., Cointe B., Dobigny L., 2015, "French policy localism: Surfing on Positive Energie Territories (Tepos)". *Energy Policy* 78, pp. 281-291.

Nasaw D., 1992, "Cities of light, landscapes of pleasure", in : Ward D., Zunz O. (dir.), *The Landscape of Modernity: Essays on New York City, 1900-1940*. New York: Russell Sage Foundation, pp. 273-286.

Ndjambou L., 2005, « La dynamique de l'arrière-pays international des ports camerounais : l'impact du projet pétrolier de Doba sur le port de Kribi ». *L'Espace géographique,* 2/2005, pp. 134-145.

Newman P., Kenworthy J., 1989, *Cities and Automobile dependence : a sourcebook.* Victoria: Gower, Adelshot and Brookfields.

Newell P., Mulvaney D., 2013, "The political economy of the just transition". *The Geographical Journal* 178, pp. 132-40.

Nicholls L., Strengers Y., 2014, "Air conditioning and antibiotics: Demand management insights from problematic health and household cooling practices". *Energy Policy* 67, pp. 673-681.

Nicolis G., Prigogine I., 1992, *A la rencontre du complexe*, Paris, Presses Universitaires de France.

Nordqvist C., 2015, "Owning materials from an asteroid now legal in United States". *Market Buisness News.* http://marketbusinessnews.com/owning-an-asteroid-now-legal-in-united-states/113158

Odell P., 1974, *Energy: needs and resources*. London: MacMillan Press.

Odru P., 2010, *Le stockage de l'énergie.* Paris: Dunod.

ORECA, 2012, *Atlas des énergies en région Provence-Alpes-Côte d'Azur.* Région PACA.

ORECA, 2015, Plaquette de l'ORECA 2014, édition 2015, en ligne, http://oreca.regionpaca.fr/uploads/tx_egestiondoc/ORECA_2015_BDef.pdf

Orfeuil J.-P., Massot M.-H., 2007, « La consommation énergétique doit-elle réguler la ville ou les véhicules ? Mobilités urbaines et réalisme écologique ». *Annales de la recherche urbaine* 103, pp. 18-29.

Ornetzeder M., Rohracher H., 2013, "Of solar collectors, wind power, and car sharing: Comparing and understanding successful cases of grassroots innovations". *Global Environmental Change* 23, pp. 856-867.

Page S.E., 2006, "Path dependence". *Quarterly Journal of Political Science* 1, pp. 87-115.

Pasqualetti M., Gipe P., Righter G., 2002, *Wind Power in View: Energy Landscapes in a Crowded World*. San Diego, CA: Academic Press.

Pecqueur B., Zimmermann J.B., 2004, *Économie de Proximités*. Paris : Hermès.

Pecqueur B., 2006, « Le tournant territorial de l'économie globale », *Espaces et sociétés* vol. 1-2, pp.17-32.

Petitet S., 2011, « Eau, assainissement, énergie, déchets : vers une ville sans réseaux ? » *Métropolitiques* 14, décembre 2011.

Pierson P., 2000, Increasing returns, path dependence and the study of politics. *American Political Science Review* 94, pp. 252-67.

Poupeau F.-M.2007, « La fabrique d'une solidarité territoriale. État et élus ruraux dans l'adoption d'une péréquation des tarifs de l'électricité en France ». *Revue française de Science Politique* 57-5, pp. 599-628.

Pourouchottamin P., Barbier C., Chancel L., Colombier M., 2013, *Nouvelles représentations des consommations d'énergie*. Paris : Éditions IDDRI, coll. Les Cahiers du Clip 22.

Pouyanne G., 2004, « Des avantages comparatifs de la ville compacte à l'interaction forme urbaine-mobilité. Méthodologie et premiers résultats ». *Les cahiers scientifiques du transport* 45, pp. 49-82.

Prigogine I., 1968, *Introduction to thermodynamics of irreversible processes*. Paris: Dunod.

Pumain D., 1982, *La dynamique des villes.* Paris: Economica.

Pumain D., 1997, « Pour une théorie évolutive des villes ». *L'Espace géographique,* 1997-2, pp. 119-134.

Pumain D., 1998, « Les modèles d'auto organisation et le changement urbain ». *Cahiers de géographie du Québec* 42-117, pp. 349-366.

Pumain D., Sanders L., Saint-Julien Th., 1989, *Villes et Auto-Organisation*. Paris, Economica.

Pumain D. (dir.), 2005, *Hierarchy in Natural and Social Sciences*. Springer.

Pumain D., 2006, « Systèmes de villes et niveaux d'organisation », in Bourgine P., Lesne A., *Morphogenèse, L'origine des formes.* Paris : Belin, pp.239-263.

Pumain D., 2012, « Une théorie géographique pour la loi de Zipf ». *Région et Développement* 36, pp. 32-54.

Raffestin C., 2012, "Space, territory, and territoriality", *Environment and Planning D: Society and Space* vol.30, pp.121-141.

Rakotomalala R., 2005, « TANAGRA: une plate-forme d'expérimentation pour la fouille de données ». *Modulad*, 32, pp. 70-85.

Raux C., Traisnel J.-P., Pochet P., Maizia M., Croissant Y., Bagard V., Peguy P.-Y., 2006, *Analyse et modélisation des comportements transports-habitat-localisations.* ETHEL. Rapport R3. Action concertée CNRS Ministère de la Recherche. LET, Lyon.

Raux C., Traisnel J.-P., 2007, Habitat et déplacements dans les aires urbaines. Impacts énergétiques et environnementaux de la croissance péri-urbaine. *Les Annales de la Recherche Urbaine* 103, pp. 31-41.

Raven R., Schot J., Berkhout F., 2012, "Space and scale in socio-technical transitions". *Environmental Innovation and Societal Transitions* 4, pp. 63-78.

Région Champagne-Ardenne, 2015, *Formation éolienne, leadership de la Champagne-Ardenne*. Direction du développement économique.

Région PACA, 2013, *Schéma Régional Air Climat Énergie*. Disponible sur http://www.regionpaca.fr/developpement-durable/transitions-energetiques/climat-air-et-energie/schema-regional-climat-air-energie.html

Rifkin J., 1980, *Entropy, a new world view*. New-York (USA): The Viking Press.

Rifkin J., 2012, *La troisième révolution industrielle.* (F. D. Chemla, Trad.) Paris: les liens qui libèrent.

Rip A., Kemp R., 1998, "Technological change", in Rayner S., Malone E.L., *Human Choice and Climate Change*. Colombus: Battelle Press, pp. 327-399.

Rocher L., 2013, « Le chauffage urbain dans la transition énergétique : des reconfigurations entre flux et réseaux ». *Flux* 92, pp. 23-35.

Roddier F., 2012, *Thermodynamique de l'évolution. Un essai de thermo-bio-sociologie.* Artignosc-sur-Verdon : Editions Parole.

Romerio F., 2012, "Energy consumption and its determinants from 1900 to 2100 in developed and developing countries". *IAEE European Conference*, Venice (Italy).

Romerio F., 2012, « L'énergie et ses relations avec la croissance et le développement dans la perspective d'une révolution verte » in Bouvier Y. (dir.), 2012, *Les défis énergétiques du XXIe siècle. Transition, concurrence et efficacité au prisme des sciences humaines*, pp. 49-62. Editions Peter Lang.

Roux J-M., 2013, « Pour en finir avec le périurbain ». *Revue Esprit* 393, « Tous périurbains ! », pp. 109-120.

RTE, 2012, *Les enjeux d'alimentation électrique en Paca.* Réseau de Transport d'Électricité.

RTE, 2012, *Schéma décennal 2012 du développement du réseau de transport d'électricité.* Réseau de Transport d'Électricité.

RTE, 2014, *Schéma régional de raccordement au réseau des énergies renouvelables de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.* Réseau de Transport d'Électricité.

Rudolf F., 2015, « La transition énergétique entre homéostasie du système et effondrement : retour sur trois décennies de mobilisations discursives autour de l'écologie ». *Cahiers de recherche sociologique* 58, pp. 37-54.

Rühl C., *et al.*, 2012, "Economic development and the demand for energy: a historical perspective on the next 20 years". *Energy Policy* 50, pp. 109-116.

Rumpala Y., 2013, « Formes alternatives de production énergétique et reconfigurations politiques. La sociologie des énergies alternatives comme étude des potentialités de réorganisation du collectif ». *Flux* 92, pp. 47-61.

Rutherford J., 2013, « Avant-Propos. Les Flux d'énergie », *Flux* 93-94, pp. 4-6.

Rutherford J., Coutard O., 2014, "Urban Energy Transitions: Places, Processes and politics of Socio-technical Change". *Urban Studies* 51-7, pp. 1353-1377.

Rutter P., Keirstead J., 2012, "A brief history and the possible future of urban energy systems". *Energy Policy* 50, pp. 72-80.

Sablière P., 2014, *Droit de l'énergie*, Paris, Editions Dalloz.

Saint-André B., 2008, « L'énergie intelligente dans la ville durable : Perspectives d'évolution du métier d'énergéticien. » *Flux* 74, pp. 68-76.

Sanders L., 1992, *Systèmes de villes et synergétique*. Paris, Anthropos.

Sanders L., 2000, « La place de l'explication dans l'analyse spatiale ». *Géopoint 2000.*

Sanders L., 2001, *Modèles en analyse spatiale*. Paris, Hermes.

Sanders L., 2012, « Regards scientifiques croisés sur la hiérarchie des systèmes de peuplement: de l'empirie aux systèmes complexes ». *Région et Développement* 36, pp. 128-146.

Scarwell H., Leducq D., Groux A., (dir.), 2015, *Réussir la transition énergétique*. Lille : Presses Universitaires du Septentrion.

Schaffar A., 2009, Croissance et hiérarchie urbaines dans les pays émergents. Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de la Réunion.

Schaffar A., 2012, « Les lois de Zipf et de Gibrat pour les villes : une introduction ». *Région et Développement* 36, pp. 6-10.

Scheer H., 2005, *Energieautonomie. Eine neue politik für erneuerbare energien.* (A. S. 2007, Trad.) Münich: Verlag Antje Kunstmann GmbH.

Schoumacher E.F., 1973, *Small is beautiful, une société à la mesure de l'homme*. Paris : Contretemps/Le Seuil.

Schneider L., 2010, *Le développement durable territorial*. La Plaine Saint Denis : Editions Afnor.

Scott A.J., 2000, "Economic geography: the great half-century". *Cambridge Journal of Economics* 2, pp. 483-504.

Shove E., Walker G., 2007, "CAUTION! Transitions ahead: politics, practice, and sustainable transition management". *Environment and Planning A* 39, pp. 763-770.

Shove E., Walker G., Brown S., 2014, "Transnational Transitions: The Diffusion and Integration of Mechanical Cooling". *Urban Studies* 51, pp. 1506-1519.

Smil V., 2008, *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*. Cambridge, MA: MIT Press.

Smil V., 2010, *Energy Transitions: histories, requierments, Prospects*. Praeger Publishers

Smith A., 2007, “Emerging in between: The multi-level governance of renewable energy in the English regions”. *Energy Policy* 35, pp. 6266-6280.

Smith A., Voß J-P., Grin J., 2010, “Innovation studies and sustainability transitions: The allure of the multi-level perspective and its challenges”. *Research Policy* 39, pp. 435-448.

Soddy F., 1926, *Wealth, virtual wealth and debt. The solution of the economic paradox.* Georges Allen and Unwin.

Solier B., Trotignon R., 2010, *Comprendre les enjeux énergétiques.* Paris: Pearson education France.

Solomon B., Pasqualetti M., 2004, “History of energy in geographic thought”, in: Cleveland C.J. (ed.) *Encyclopedia of Energy*, Volume 2. San Diego, CA: Elsevier, pp. 831-842.

Souami T., 2009, « Conceptions et représentations du territoire énergétique dans les quartiers durables ». *Flux* 2, pp. 71-81.

Souami T., 2007, « l’intégration des technologies énergétiques dans l’action urbaine. Éclairage théorique d’expériences européennes ». *Les annales de la recherche urbaine* 103, pp. 6-17.

Sovacool B., Ryan S.E, Stern P.C., Janda K., Rochlin G., Spreng D., Pasqualetti M.J., Wilhite H., Lutzenhiser L., 2015, “Integrating social science in energy research”. *Energy Research and Social Science* 6, pp. 95-99.

Späth P., Rohracher H., 2010, “Energy regions: The transformative power of regional discourses on socio-technical futures”. *Research Policy* 39, pp. 449-458.

Späth P., Rohracher H., 2012, “Local Demonstrations for Global Transitions—Dynamics across Governance Levels Fostering Socio-Technical Regime Change Towards Sustainability”. *European Planning Studies* 20, pp. 461-479.

Spooner D., 1981, “The geography of coal’s second coming”. *Geography* 66, pp. 29-41.

Spooner D., 2000, “New geographies of energy”, in: Kent A., (ed.) *Reflective Practice in Geography Teaching*. London: Paul Chapman, pp. 68-83.

Stock M., 2004, « L’habiter comme pratique des lieux géographiques ». *EspacesTemps.net*. http://www.espacestemps.net/articles/habiter-comme-pratique-des-lieux-geographiques/

Subrémon H., 2014, « Usages de l’énergie dans l’habitat : la transition énergétique vue d’en bas », *Flux* 96, pp. 4-9.

Tainter J., 1988, *The Collapse of Complex Societies*. Cambridge University Press.

Talandier M., Davezies L., 2009, *Repenser le développement territorial ? Confrontation des modèles d’analyse et des tendances observées dans les pays développés*. PUCA collection recherche 198, La Défense.

Taleb N.N., 2007, *The Black Swan. The Impact of the Highly Improbable*. London, Penguin.

Taylor MJ., 2005, “Electrifying rural Guatemala: Central policy and rural reality”. *Environment and Planning C: Government and Policy* 23, pp. 173-189.

Theys J., Vidalenc E., 2011, « Le territoire, un levier complémentaire pour l’atteinte du facteur 4 », *Développement durable et territoire* 1, vol. 2.

Thom R., 1972, *Stabilité structurelle et morphogénèse*. Paris, Inter-éditions.

Torre A., 2004, « Proximité et localisation ». *Économie rurale* 280, pp. 2-7.

Torre A., Rallet A., 2004, « Introduction. Proximité et territoires ». *Économie rurale* 280, pp. 25-41.

Truffer B., Coenen L., 2012, "Environmental Innovation and Sustainability Transitions in Regional Studies". *Regional Studies* 46, pp. 1-21.

Turing A., 1952, "The chemical basis of morphogenesis." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 327, pp. 37-72.

Unruh G.C., 2000, "Understanding carbon lock-in". *Energy Policy* 12, vol. 28, pp. 817-830.

Uyarra E., Gee, S., 2013, "Transforming urban waste into sustainable material and energy usage: the case of Greater Manchester (UK)". *Journal of Cleaner Production* 50, pp. 101-110.

Van Zyl F., 1968, "Power supply and industry in South Australia". *The Australian Geographer* 6, pp. 507-514.

Wagstaff H.R., 1974, *A Geography of Energy*. Dubuque, Iowa: W.C. Brown.

Walker G., 2014, "The dynamics of energy demand : change, rhythm and synchronicity". *Energy Research and Social Science* 1, pp. 49-55.

Warde P., 2007, "Energy consumption in England and Wales 1560-2000". *Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Studi sulle Società del Mediterraneo.*

Wiel M., 2009, « Comment construire une ville cohérente ? ». *Etudes foncières* 138, p. 12-17.

Willbanks T.J., 1985, "Geography of Energy: the quest for roles and missions", in Calzonetti F., Solomon B., (dir.), 1985, *Geographical Dimensions of Energy*. Boston, MA: D. Reidel, chapter 25.

Wimmer A., Kössler R., 2006, *Understanding change: Models, methodologies and metaphors*. Basingstoke, U.K.: Palgrave Macmillan.

Wirth S., Markard J., Truffer B., Rohracher H., 2013, "Informal institutions matter: Professional culture and the development of biogas technology". *Environmental Innovation and Societal Transitions* 8, pp. 20-41.

World Bank, 2012, *Turn down the heat. Why a 4°C warmer world must be avoided*. Washington: World Bank Report.

Young H.P., 2009, "Innovation diffusion in heterogeneous populations: contagion, social influence and social learning". *American economic review* 5, vol. 99, pp. 1899-1924.

Zelem M.-C., 2007, « Les difficultés des petites collectivités à intégrer la notion d'efficacité énergétique ». *Les Annales de la recherche urbaine* 103, pp. 170-179.

Zelem M.-C., 2010, *Politiques de maîtrise de la demande d'énergie et résistances au changement.* Paris : L'Harmattan. Coll. Logiques sociales.

Zelem M.-C., Beslay C., 2015, *Sociologie de l'énergie, gouvernance et pratiques sociales.* Paris: CNRS Editions, coll. Alpha.

Zimmerer K., 2011, "New geographies of energy". *Annals of the Association of American Geographers* 101, pp. 705-711.

Zipf G., 1941, *Natural unity and disunity: the Nation as a bio-social Organism.* Bloomington: Principia Press.

Zipf G., 1949, *Human behavior and the principle of least effort.* Cambridge: Addison Wesley Press.

Tables

Table des figures

Figure 1. Formes d'énergie et transformations _____ 25

Figure 2. Ville d'Arvida, Québec : barrage hydroélectrique et complexe industriel_____ 36

Figure 3. Ville de Zaporojia, Ukraine : barrage hydroélectrique et complexe industriel _____ 37

Figure 4. Produit Intérieur Brut et consommation d'énergie en Union européenne en 2012 _____ 49

Figure 5. Évolution des mix énergétiques nationaux dans six pays d'Europe 1800-2010 _____ 59

Figure 6. Phases d'évolution de l'espace géographique et croissance entropique au cours des XIX^{e} et XX^{e} siècles 65

Figure 7. Évolutions sociétales, entropie et changement qualitatif de l'espace géographique _____ 65

Figure 8. Hypothèse de trajectoire d'évolution selon un principe d'optimisation par production maximale d'entropie (MEP) _____ 66

Figure 9. Hypothèse de trajectoire d'évolution selon un principe de réduction de l'entropie externe _____ 67

Figure 10. Die Energiewende, virage énergétique allemand et métaphore routière _____ 73

Figure 11. La transition énergétique en France, métaphore du choix _____ 73

Figure 12. Déclinaison territoriale de la transition énergétique dans les documents d'urbanisme _____ 80

Figure 13. Objectifs de transition et documents de planification locale _____ 81

Figure 14. Synergie et articulation scalaire entre réseaux d'énergie_____ 92

Figure 15. Perspective multi-niveau et transition des systèmes sociotechniques _____ 104

Figure 16. Processus auto-catalytiques dans le modèle canonique de la *Path Dependence* _____ 120

Figure 17. Le modèle canonique de *Path dependence* dans l'évolution des localisations industrielles _____ 120

Figure 18. Modèle alternatif de *Path dependence* dans l'évolution des localisations industrielles_____ 122

Figure 19. Modèle de *Path dependence* dans l'évolution des structures spatiales _____ 124

Figure 20. Dimension spatiale de la *Path dependence* dans la transition énergétique _____ 127

Figure 21. Space lock-in et transition énergétique _____ 137

Figure 22. Éléments structurants et modèle d'organisation spatiale du système d'approvisionnement énergétique de la région PACA _____ 149

Figure 23. Dynamiques récentes du système d'approvisionnement énergétique de la région PACA_____ 150

Figure 24. Centres et périphéries dans le système d'approvisionnement énergétique de la région PACA _____ 151

Figure 25. Création d'une base de données géoréférencée des sites de production d'électricité supérieurs à 1 MW de puissance en 2015 en région PACA _____ 159

Figure 26. *Material lock-in*, *Place dependence* et *Path dependence* dans le développement régional des énergies renouvelables en région PACA _____ 170

Figure 27. Compilation de données énergétiques et mise en place d'un système d'information géographique multi-niveaux _____ 172

Figure 28. Schéma conceptuel de l'évolution du système énergétique selon une trajectoire tendancielle _____ 178

Figure 29. Schéma conceptuel de l'évolution du système énergétique selon une trajectoire tendancielle intégrant la variabilité des capacités d'action locales _____ 179

Figure 30. Modèle d'évolution du système énergétique de la région PACA selon une trajectoire tendancielle __ 180

Figure 31. Schéma conceptuel de l'évolution du système énergétique selon une trajectoire théorique de structuration scalaire des approvisionnements _____ 182

Figure 32. Modèle d'évolution du système énergétique de la région PACA selon une trajectoire théorique de structuration scalaire des approvisionnements _____ 183

Figure 33. Modèle d'évolution du système énergétique de la région PACA selon une trajectoire de changement conjoncturel : l'exemple des hydrocarbures non conventionnels _____ 186

Figure 34. Organisation et mission de l'Observatoire Régional de l'Énergie, du Climat et de l'Air (ORECA) __ 197

Figure 35. Action publique et énergie, les faits marquants en région PACA de 2001 à 2015 _____ 200

Figure 36. Retombées fiscales actuelles et envisageables liées à la production d'énergie au profit des départements _____ 225

Figure 37. *Territorial lock-in* et *Path dependence* dans la territorialisation de la transition énergétique en région PACA _____ 233

Figure 38. Surface artificialisée et consommation d'énergie en France et en région PACA en 2006 _____ 241

Figure 39. Densités et consommation d'énergie en région PACA en 2010 _____ 243

Figure 40. Définitions des taches urbaines _____ 246

Figure 41. Calcul de l'indice de fragmentation _____ 247

Figure 42. Extension urbaine fragmentée et consommation d'énergie en Vaucluse _____ 248

Figure 43. Tests de normalité des résidus et cartographie des résidus du modèle de régression multiple _____ 257

Figure 44. Dendrogramme et profil des classes de la typologie spatiale du parc résidentiel en PACA _____ 260

Figure 45. Box-plots de la consommation par logement par type d'espace _____ 263

Figure 46. Matrice des corrélations _____ 264

Figure 47. Niveau de richesse et typologie spatiale du parc résidentiel en PACA _____ 267

Figure 48. *Socio-spatial lock-in* et *Path dependence* dans la maîtrise de la consommation énergétique en région PACA _____ 271

Figure 49. Les territoires de la transition énergétique _____ 278

Figure 50. Fonctionnement systémique d'un territoire en transition _____ 279

Table des cartes

Carte 1. Intensité énergétique en Union européenne en 2012 _____ 50

Carte 2. Puissance installée en éolien et en photovoltaïque en France _____ 86

Carte 3. Répartition spatiale de la consommation d'énergie en 2010 et des puissances électriques installées supérieures à 1 MW en région PACA en 2014 _____ 147

Carte 4. Localisation et puissance des sites de production d'électricité supérieurs à 1 MW en région Provence-Alpes-Côte d'Azur avant 2000 et entre 2000 et 2009 _____ 160

Carte 5. Localisation et puissance des sites de production d'électricité supérieurs à 1 MW en région Provence-Alpes-Côte d'Azur entre 2000 et 2011 _____ 161

Carte 6. Localisation et puissance des sites de production d'électricité supérieurs à 1 MW en région Provence-Alpes-Côte d'Azur entre 2000 et 2013 _____ 162

Carte 7. Localisation et puissance des sites de production d'électricité supérieurs à 1 MW en région Provence-Alpes-Côte d'Azur entre 2000 et 2015 _____ 163

Carte 8. Partage du territoire régional de l'énergie entre acteurs du secteur _____ 166

Carte 9. Diffusion des projets de centrales photovoltaïques au sol en région PACA entre 2007 et 2012 _____ 167

Carte 10. Production 2014 et production potentielle d'énergie renouvelable par commune en région PACA ____ 173

Carte 11. Mix énergétique en 2014 et mix potentiel à l'échelle communale en région PACA _____ 174

Carte 12. Mix énergétique potentiel et travaux prévus par RTE dans le schéma régional de raccordement au réseau des énergies renouvelables en région PACA _____ 175

Carte 13. Permis exclusifs de recherche de gaz non conventionnels en région PACA (accordé et en cours d'instruction) _____ 185

Carte 14. Part des EnR dans la consommation d'énergie et productions actuelle et potentielle à l'échelle communale en région PACA _____ 203

Carte 15. Part potentielle des EnR dans la consommation et production potentielle à l'échelle intercommunale en région PACA _____ 205

Carte 16. Part potentielle des EnR dans la consommation et production potentielle à l'échelle des Schémas de Cohérence Territoriale en région PACA _____ 206

Carte 17. Part potentielle des EnR dans la consommation et production potentielle à l'échelle des Parcs Naturels Régionaux en région PACA _____ 206

Carte 18. Mix énergétique en 2014 et potentiel à l'échelle intercommunale en région PACA _____ 207

Carte 19. Mix énergétique en 2014 et potentiel à l'échelle des Parcs Naturels Régionaux en région PACA _____ 208

Carte 20. Montant de l'IFER lié aux productions solaire, éolienne et hydroélectrique en région PACA au profit des EPCI en 2014 _____ 220

Carte 21. Taxe IFER potentielle liée aux productions solaire, éolienne et hydroélectrique en région PACA au profit des EPCI _____ 222

Carte 22. État d'avancement des PCET à l'échelle intercommunale en région PACA en 2015_____ 229

Carte 23. Les huit territoires lauréats 2015 de l'appel à projets national « Territoires à énergie positive pour la croissance verte » bénéficiant d'une subvention_____ 230

Carte 24. Les 33 territoires lauréats 2015 de l'appel à projets national « Territoires à énergie positive pour la croissance verte » _____ 230

Carte 25. Territoires lauréats des appels à projets régionaux du programme AGIR et de l'appel à manifestation d'intérêt « Transition énergétique dans les documents d'urbanisme » _____ 231

Carte 26. Densité de population et consommation d'énergie en région PACA en 2010, résidus de régression ___ 244

Carte 27. Indice de fragmentation et consommation d'énergie résidentielle en Vaucluse en 2010 _____ 249

Carte 28. Fragmentation et consommation d'énergie résidentielle, résidus de régression _____ 249

Carte 29. Typologie spatiale du parc résidentiel en PACA par classification ascendante hiérarchique _____ 261

Carte 30. Caractères énergivores des modes d'habiter en région PACA _____ 269

Table des graphiques

Graphique 1. Consommation d'énergie fossile et émissions de CO_2 dans le monde de 1965 à 2014 _____ 44

Graphique 2. Production mondiale de pétrole de 1965 à 2014 _____ 46

Graphique 3. Évolution de la consommation d'énergie par habitant au cours du XX^{e} siècle en Europe _____ 51

Graphique 4. Évolution de l'intensité énergétique au cours du XX^{e} siècle en Europe _____ 51

Graphique 5. Consommation d'énergie dans six pays d'Europe de 1800 à 2010 _____ 55

Graphique 6. Consommation d'énergie et population urbaine dans six pays d'Europe de 1800 à 2010 _____ 56

Graphique 7. Consommation d'énergie et évolution des hiérarchies urbaines dans six pays d'Europe de 1800 à 2010 _____ 58

Graphique 8. Part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en % dans les pays de l'Union européenne en 2014 _____ 84

Graphique 9. Production primaire d'énergies renouvelables en France en 2014 _____ 85

Graphique 10. Évolution de la production primaire d'énergie renouvelable en France de 1990 à 2014 _____ 86

Graphique 11. Consommation primaire d'électricité corrigée du climat en France de 1981 à 2015 _____ 88

Graphique 12. Évolution du mix énergétique français au cours du XX^{e} siècle _____ 88

Graphique 13. Modes de chauffage des résidences principales en France métropolitaine _____ 93

Graphique 14. Evolution du mix énergétique dans la production en région PACA de 1990 à 2009 _____ 143

Graphique 15. Evolution de la part de production régionale d'énergie primaire dans la consommation finale de 1990 à 2009 en région PACA _____ 143

Graphique 16. Évolution du mix énergétique dans la consommation en région PACA de 1990 à 2009 _____ 144

Graphique 17. Évolution de la consommation d'énergie par secteur en région PACA de 1990 à 2009 _____ 144

Graphique 18. Part d'approvisionnement extrarégional dans le réseau électrique en PACA au cours de trois journées types en 2015 _____ 146

Graphique 19. Dynamique de restructuration du système énergétique en région PACA de 2007 à 2012 _____ 164

Graphique 20. Évolution de la distribution rang-taille des productions d'énergie par commune en région PACA de 2004 à 2010 _____ 165

Graphique 21. Comparaison entre objectif territorialisé et données de potentiel _____ 209

Graphique 22. Densités et consommation d'énergie dans les villes de plus de 50 000 habitants en région PACA en 2010 _____ 245

Liste des tableaux

Tableau 1. Taux de conversion des différentes sources d'énergie en tonne équivalent pétrole _____ 26

Tableau 2. Sources d'énergie, caractéristiques et principales applications_____ 27

Tableau 3. Stratégie Nationale Bas-Carbone _____ 78

Tableau 4. Les principaux acteurs du marché de l'électricité en France _____ 87

Tableau 5. Coûts d'installation et facteur de charge des sources productrices d'électricité _____ 89

Tableau 6. Coût de production de l'électricité en France _____ 90

Tableau 7. Réseau et écosystème urbain_____ 154

Tableau 8. Sources des données de potentiels de production d'énergie renouvelable en région PACA _____ 171

Tableau 9. Évolution des compétences locales par grands secteurs d'intervention _____ 196

Tableau 10. Objectifs du SRCAE en région Provence-Alpes-Côte d'Azur _____ 199

Tableau 11. Part actuelle et potentielle des EnR dans la consommation d'énergie aux échelles communale et intercommunale en région PACA _____ 204

Tableau 12. Les neuf composantes de l'IFER _____ 215

Tableau 13. Montant forfaitaire et territorialité de l'IFER au 1er janvier 2015_____ 216

Tableau 14. Taxe IFER et type d'installation de production énergétique en région PACA _____ 218

Tableau 15. Sources et mesures _____ 219

Tableau 16. IFER et CVAE « solaire » : deux poids, deux mesures _____ 224

Tableau 17. Coefficient de détermination entre l'indice de fragmentation et la consommation d'énergie selon la méthode de définition des taches retenue_____ 248

Tableau 18. Facteurs résidentiels et consommation d'énergie en PACA : questionnements _____ 255

Tableau 19. Significativité globale du modèle de régression multiple _____ 255

Tableau 20. Valeurs des coefficients et test de significativité du modèle de régression multiple _____ 256

Tableau 21. Résultats du modèle de régression multiple et hypothèses _____ 258

Tableau 22. Résultats de l'analyse de variance_____ 262

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE _____ **7**

PARTIE 1 LA TRANSITION ENERGETIQUE : OBJET ET PROCESSUS GEOGRAPHIQUE 17

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE _____ **19**

CHAPITRE 1 L'ENERGIE DANS L'EVOLUTION DES SYSTEMES SPATIAUX _____ **21**

1 L'ENERGIE, CARBURANT DES EVOLUTIONS SPATIALES _____ **24**

1.1 De la physique générale aux évolutions sociétales, l'énergie au cœur des transformations _____ 24

1.1.1 Travail, puissance et modification des systèmes matériels _____ *24*
1.1.2 L'énergie dans tous ses états _____ *24*
1.1.3 Un élément moteur dans l'histoire de l'humanité _____ *29*

1.2 L'énergie comme objet géographique _____ 30

1.2.1 Héritages et construction d'un objet disciplinaire _____ *30*
1.2.2 Énergie, espace et société _____ *32*
1.2.3 Le rôle de l'énergie dans la modification des organisations spatiales _____ *34*

2 LA LOI D'ENTROPIE ET L'EVOLUTION DES SYSTEMES SPATIAUX _____ **39**

2.1 Principes généraux de la thermodynamique et applications en sciences humaines _____ 39

2.1.1 Entropie et structures dissipatives _____ *40*
2.1.2 La loi d'entropie et le processus économique _____ *41*

2.2 Loi d'entropie et crise énergétique : un modèle de croissance à bout de souffle _____ 43

2.2.1 Incertitudes climatiques et implications énergétiques _____ *43*
2.2.2 Entre épuisement physique et épuisement économique des ressources fossiles _____ *45*

2.3 Structures dissipatives et dégradation entropique de l'espace géographique, l'exemple des systèmes de villes en Europe 1800-2010 _____ 53

2.3.1 Consommation et hiérarchies urbaines, le modèle rang-taille revisité _____ *54*
2.3.2 Évolution des systèmes de villes et loi d'entropie, quelles implications ? _____ *62*

CHAPITRE 2 TRANSITION ENERGETIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES : AMBIGUÏTES D'UN NOUVEAU MODELE ENERGETIQUE **69**

1 DEFINIR LA TRANSITION ENERGETIQUE **72**

1.1 Sémantique de la transition et de la transition énergétique 72

1.2 Des transitions passées à l'économie bas-carbone 74

1.2.1 Les moteurs historiques des transitions énergétiques 75
1.2.2 Transition énergétique actuelle et économie bas-carbone 75

1.3 L'institutionnalisation de la transition énergétique 76

1.3.1 Les orientations de la politique énergétique nationale française 76
1.3.2 Une logique descendante dans la mise en œuvre de la transition énergétique 79

2 LE DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES, UNE TRANSITION ELECTRIQUE **83**

2.1 Mix énergétique et intégration des énergies renouvelables 83

2.1.1 État des lieux des énergies renouvelables en France 83

2.2 Enjeux techniques, économiques et sociaux d'une transition électrique 87

2.2.1 Le problème du coût de production de l'électricité 89
2.2.2 Les enjeux techniques liés à la planification du réseau de transport de l'électricité 91
2.2.3 Une forme d'énergie dématérialisée et omniprésente 93

CHAPITRE 3 ENJEUX SPATIAUX ET TERRITORIAUX DE LA TRANSITION ENERGETIQUE **97**

1 LA TRANSITION ENERGETIQUE, UNE QUESTION SOCIO-MATERIELLE **100**

1.1 Un domaine de recherche émergeant en sciences humaines et sociales 100

1.2 Multi Level Perspective et analyse des transitions, un cadre analytique dominant amené à évoluer 102

2 DE LA SPECIFICITE DES TERRITOIRES A LA MULTIPLICITE DES TRANSITIONS ENERGETIQUES **106**

2.1 Différenciation spatiale et transitions énergétiques multiples 106

2.2 Matérialité spatiale de la transition énergétique 108

2.2.1 Au-delà des recompositions sociales, observer la matérialité spatiale du changement 108
2.2.2 Distribution différenciée des ressources locales et dynamiques spatiales 109
2.2.3 Reconsidérer les formes urbaines et l'aménagement des territoires 111

2.3 Reconfiguration des modes et des échelles de gouvernance 112

2.3.1 Spatialité des acteurs, entre proximité géographique et relations multi-scalaires 114
2.3.2 Perspectives de développement économique régional 115

3 TRANSITION ENERGETIQUE ET *PATH DEPENDENCE* : LE POINT DE VUE DU *SPACE LOCK-IN* ____ 117

3.1 Le poids des structures spatiales, un manque dans les approches *mainstream* de la transition énergétique _____ 117

3.2 La *Path dependence* comme cadre conceptuel_____ 118

3.3 Dimensions spatiales de la Path dependence et transition énergétique _____ 123

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE _____ 129

PARTIE 2 LA TRANSITION ENERGETIQUE SOUS CONTRAINTES SPATIALES ET TERRITORIALES, ENTRE POTENTIALITES DE CHANGEMENT ET *PATH DEPENDENCE* _____ 131

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE : POSITIONNEMENT ET HYPOTHESES DE RECHERCHE__ 133

CHAPITRE 4 MATERIAL LOCK-IN : L'INFLUENCE DES STRUCTURES SPATIALES ET LA DEPENDANCE AU LIEU _____ 139

1 L'APPROVISIONNEMENT EN ENERGIE EN PROVENCE-ALPES-COTE D'AZUR : PROFIL ENERGETIQUE REGIONAL ET GRANDS PRINCIPES D'ORGANISATION SPATIALE _____ 142

1.1 Un territoire largement dépendant des approvisionnements extérieurs _____ 142

1.2 Organisation spatiale du système d'approvisionnement énergétique en région PACA _____ 146

2 *PLACE DEPENDENCE* ET *PATH DEPENDENCE* DANS LE DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES _____ 152

2.1 Le modèle du réseau centralisé en débat _____ 153

2.1.1 Système énergétique décentralisé et autonomie énergétique, des notions à relativiser_____ 155
2.1.2 Proximité et développement des énergies renouvelables_____ 156

2.2 Entre adaptation aux modèles existants et émergence d'un modèle de proximité _____ 158

2.2.1 L'offre de production d'électricité par les EnR : analyse spatio-temporelle_____ 158
2.2.2 Le partage du territoire régional de l'énergie par les acteurs, un principe de sélection naturelle ? ____ 165
2.2.3 Un modèle de Place dependence et de Path dependence_____ 169

3 IMPLICATIONS DU *MATERIAL LOCK-IN* DANS LE DEVELOPPEMENT POTENTIEL DES ENERGIES RENOUVELABLES _____ 171

3.1 Mix énergétique potentiel et *Place dependence*_____ 173

3.1.1 Localisation des potentiels et effets de spécialisation _____ 173
3.1.2 Raccordement des potentiels EnR et renforcement de la structure existante _____ 175

3.2 Modèles spatiaux et modèles de transition_____ 177

3.2.1 Modèle de transition tendanciel_____ 177
3.2.2 Modèle de transition théorique distribué à l'équilibre _____ 181
3.2.3 Modèle de transition avec changement de conjoncture_____ 184

CHAPITRE 5 TERRITORIAL LOCK-IN : LA TERRITORIALISATION ET LE DEVELOPPEMENT DURABLE INEGAL **189**

1 MISE EN POLITIQUE DE LA TRANSITION ENERGETIQUE ET PLANIFICATION REGIONALE DE L'ENERGIE EN PROVENCE-ALPES-COTE D'AZUR **192**

1.1 Collectivités territoriales et énergie, vers une décentralisation des politiques énergétiques 192

1.1.1 Politiques énergétiques et compétences locales 192
1.1.2 Transition énergétique et redistribution des compétences locales 194

1.2 Territorialisation de la transition énergétique en Provence-Alpes-Côte d'Azur, vers une normativité des référentiels statistiques dans l'aménagement du territoire 197

1.2.1 Politiques énergétiques en région PACA et standardisation des indicateurs de transition 197
1.2.2 Analyse de la robustesse d'un indicateur de transition, la part d'énergies renouvelables dans la consommation 201

2 FISCALITE LOCALE DES ENERGIES RENOUVELABLES, UN LEVIER INCERTAIN DE DEVELOPPEMENT LOCAL **211**

2.1 Fiscalité locale et énergies renouvelables 211

2.1.1 Fiscalité locale et développement territorial 211
2.1.2 Une fiscalité locale favorable aux producteurs d'énergie renouvelable 213
2.1.3 Infrastructures de production d'énergie renouvelable, des retombées fiscales limitées 216

2.2 Retombées fiscales des énergies renouvelables, effets d'aubaine et limitation des perspectives de développement local 218

2.2.1 Un effet d'aubaine pour les territoires de l'arrière-pays provençal 219
2.2.2 Dépendance aux conjonctures économiques et politiques 222
2.2.3 La fiscalité locale de l'énergie, entre opportunités et perspectives limitées de développement local 226

3 LA TRANSITION ENERGETIQUE : RENOUVEAU TERRITORIAL OU DEVELOPPEMENT DURABLE INEGAL **228**

3.1 Entre réponses aux injonctions normatives et démarches de projet de territoire 228

3.2 *Territorial lock-in* et développement durable inégal 232

CHAPITRE 6 SOCIO-SPATIAL LOCK-IN : LE POIDS DES STRUCTURES SOCIO-SPATIALES HERITEES **237**

1 LES LIENS ENTRE FORME URBAINE ET CONSOMMATION D'ENERGIE **240**

1.1 Occupation de l'espace et dégradation d'énergie, un phénomène irréversible 240

1.2 Densité urbaine et consommation d'énergie, des relations inverses à nuancer 242

1.3 Extension urbaine fragmentée et consommations énergétiques 245

***2 LOU CAMIN DE VIDA PROUVENÇAU,* UNE CONTRAINTE SOCIO-SPATIALE A UNE MISE EN ŒUVRE DE LA TRANSITION ENERGETIQUE** **251**

2.1 Le poids des structures socio-spatiales héritées 252

2.2 Structures socio-spatiales types et consommation d'énergie, des espaces périurbains énergivores 254

2.2.1 Demande énergétique au lieu de vie : une combinaison de facteurs résidentiels _____ 254
2.2.2 Identification de structures socio-spatiales types _____ 259
2.2.3 Part explicative des structures socio-spatiales types dans la consommation d'énergie _____ 262
2.2.4 Caractères énergivores des structures socio-spatiales types_____ 263
2.2.5 Un mode d'habiter énergivore : « lou camin de vida prouvençau » _____ 265
2.2.6 Spatialité des caractères énergivores, une base de réflexion pour l'intégration de la question énergétique dans les documents de planification _____ 268

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE _____ 273

CONCLUSION GENERALE _____ 275

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES _____ 287

TABLES _____ 307

TABLE DES FIGURES _____ 309

TABLE DES CARTES _____ 311

TABLE DES GRAPHIQUES _____ 313

LISTE DES TABLEAUX _____ 314

TABLE DES MATIERES _____ 315