
Réseaux de distribution de l'énergie et sobriété énergétique des territoires, les apports d'une approche thermodynamique et métabolique des systèmes territoriaux

**Paul-Marie Guinchard, Marie-Hélène de Sède-Marceau et Massimiliano
Capezzali**



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/18608>

DOI : [10.4000/vertigo.18608](https://doi.org/10.4000/vertigo.18608)

ISSN : 1492-8442

Éditeur

Les Éditions en environnement VertigO

Édition imprimée

Date de publication : 28 septembre 2017

Ce document vous est offert par Centre national de la recherche scientifique (CNRS)



Référence électronique

Paul-Marie Guinchard, Marie-Hélène de Sède-Marceau et Massimiliano Capezzali, « Réseaux de distribution de l'énergie et sobriété énergétique des territoires, les apports d'une approche thermodynamique et métabolique des systèmes territoriaux », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 17 Numéro 2 | septembre 2017, mis en ligne le 28 décembre 2004, consulté le 12 décembre 2017. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/18608> ; DOI : [10.4000/vertigo.18608](https://doi.org/10.4000/vertigo.18608)

Ce document a été généré automatiquement le 12 décembre 2017.



Les contenus de *VertigO* sont mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Réseaux de distribution de l'énergie et sobriété énergétique des territoires, les apports d'une approche thermodynamique et métabolique des systèmes territoriaux

Paul-Marie Guinchard, Marie-Hélène de Sède-Marceau et Massimiliano Capezzali

Introduction

- 1 Au-delà des approches disciplinaires classiques, les approches territoriales de l'énergie se multiplient avec l'idée de l'importance d'une meilleure prise en compte des caractéristiques des territoires. Poussée par le changement de paradigme qu'induit, entre autres, le développement des énergies renouvelables (EnR), la pertinence d'une relocalisation des réflexions, des projets et des actions s'impose. Pourtant, malgré les efforts produits et la mise en œuvre de programmes en faveur de la sobriété énergétique, les consommations énergétiques ne cessent de croître. Différents éléments explicatifs doivent être avancés, à commencer par la croissance démographique au niveau de la planète, qui, mécaniquement, ne peut que pousser les consommations globales à la hausse. Dans le même ordre d'idée, nos systèmes économiques et financiers fondés sur la croissance économique comme seule source de développement sociétal ne peuvent que conduire à une augmentation de la consommation. La substitution d'une consommation par une autre que l'on nomme l'effet rebond peut contribuer à l'annulation des économies d'énergie, sous l'effet de changements de comportements notamment. Autre piste, l'inertie du système, avant tout formaté par la source principale d'énergie qui coule

à flot, le pétrole, dont les caractéristiques ont favorisé la mobilité individuelle et les transports et de ce fait une certaine forme d'organisation spatiale, énergivore. Dans ce contexte, même si aujourd'hui la nécessité d'un changement de paradigme énergétique, imposé par les tensions environnementales et climatiques, tout autant que voulu par l'exploitation d'autres ressources énergétiques, ne fait plus débat, nous fonctionnons toujours au sein de systèmes hérités du passé, de l'ère du tout pétrole (organisations économiques, territoriales, voire sociétales). Ce constat mettant en avant les liens forts existant entre structures et organisations territoriales et sources, formes et distribution de l'énergie nous amène aujourd'hui à poser l'hypothèse du rôle que pourraient jouer les réseaux énergétiques, leurs caractéristiques (notamment morphologiques) en matière de sobriété énergétique et de régulation.

- 2 C'est pourquoi notre intention, en complément des voies de solutions ou de recherche déjà mises en œuvre, est de développer les arguments qui nous conduisent à mettre en évidence l'existence de relation entre les réseaux et l'organisation spatiale et le rôle que les réseaux énergétiques peuvent jouer dans les actions en faveur de la sobriété énergétique. En outre, nous nous appuyons sur une représentation la plus ouverte possible de la notion de territoire et des relations du territoire à l'énergie. Pour cela, nous souhaitons faire un lien entre le socle théorique, emprunté aux sciences physiques et biologiques à l'origine de notre proposition et les perspectives de recherche et travaux envisagés pour valider cette approche complémentaire relevant de ce qu'on appelle l'intelligence territoriale¹ (Noucher et de Sède Marçeau, 2010 ; de Sède-Marçeau, 2015). En proposant un cadre théorique spatio-temporel de description et d'analyse des systèmes énergétiques territoriaux, nous tenterons de valider notre approche par la mise en œuvre et l'exploitation de modèles permettant d'en simuler les structures et fonctionnements.

Liens énergie – territoires et approche territoriale de l'énergie

- 3 Dans sa définition la plus classique, le territoire existe en référence aux êtres vivants qui l'occupent, il est aussi défini, par analogie à la notion de territoire de chasse des animaux ou de territoire des espèces vertébrées (Ruwet, 2016). C'est aussi un milieu que se sont appropriées les sociétés humaines, et au sein duquel elles y accomplissent leur développement. Il est défini de longue date à partir de la notion de circonscription ou de pays, il devient alors un traceur socio-économique du géo système (Bertrand et Bertrand, 1992). C'est aussi un support d'action donc de vie des sociétés humaines (Gentelle, 1992). Pour (Schwarz, 1997), il est caractérisé par trois niveaux fonctionnels, physique, logique et holistique, auxquels on peut faire correspondre différents niveaux d'abstraction, du territoire vécu au territoire « rêvé », tel qu'il apparaît à chacun à travers les filtres qui conditionnent les multiples représentations que l'on s'en fait, Ainsi, chaque point de vue déterminant le regard porté sur celui-ci engendre une représentation particulière (Grasland et de Ruffray, 2014). De ce fait, le territoire génère des perceptions multiples révélatrices des enjeux et des systèmes de valeurs portés par les acteurs. Selon (Raffestin, 1984), le territoire est produit à partir de l'espace par les réseaux, circuits et flux projetés par les différents groupes sociaux inscrits dans l'espace et dans le temps. Pecqueur et Peyrache-Gadeau (2010) le conçoit comme un système complexe auto-organisé qui est décrit par ses composantes productives et cognitives et dont les dynamiques sont issues des interactions entre acteurs qu'ils soient individuels ou collectifs. Le territoire devient

alors un « système apprenant » disposant d'une capacité de régulation. Plus généralement, la littérature valide l'idée de dynamiques avant tout sociétales imprimant leurs systèmes de valeurs dans l'espace. Le territoire peut donc être qualifié de système dynamique complexe, capable d'auto-organisation sous l'impulsion de facteurs physiques tout autant qu'idéels. Dans un contexte de tensions toujours plus fortes sur les ressources et de nécessaire régulation, mais aussi en termes de fonctionnement des espaces comme des institutions qui les gèrent, le territoire apparaît comme un socle conceptuel solide, dont les fondements structurels, fonctionnels et spatio-temporels sont précisés alors même que ses contours et composants sont conditionnés par les systèmes de représentation et les actions auxquels il est soumis.

- 4 Cette base conceptuelle étant posée, il convient de s'interroger sur la pertinence et les éventuelles perspectives que peuvent offrir les approches territoriales dans le cadre des problématiques énergie-climat. En contribuant à rapprocher les représentations et les points de vue des aménageurs et urbanistes d'une part et des spécialistes de l'énergie et du climat d'autre part, les contraintes imposées par la nécessaire réduction de la part des énergies fossiles couplées aux problématiques environnementales ont favorisé l'émergence de nouvelles approches, plus intégratrices et localisées (Godinot, 2011). Les sources d'énergies renouvelables modifient la répartition géographique des disponibilités énergétiques. Bien qu'inégalement réparties, car dépendantes de spécificités locales, ces énergies sont distribuées sur l'ensemble des territoires. Elles effacent l'impression de territoires énergétiquement isotropes qui contribuait à une vision dématérialisée des espaces locaux de l'énergie. Ce différentiel de disponibilité implique un recentrage territorial et bouleverse la perception que nous nous faisons des systèmes énergétiques sur les territoires. Par ailleurs, au-delà de la localisation même de ces nouveaux « gisements » de ressources énergétiques, leur répartition est susceptible, comme cela s'est déjà produit dans le passé, de modifier les dynamiques de localisation des activités. Au XIXe siècle, pour certaines industries, comme la métallurgie lourde ou bien encore la céramique « *le combustible est si essentiel que la plupart des usines s'installent à proximité du carreau des mines* » (Claval, 1969, p. 190). Vidal de la Blache avait déjà en 1889 dans son ouvrage intitulé « L'Europe ; Etats et nations autour de la France » montré le rôle fondamental de l'énergie dans le développement des régions industrielles en Europe. Ces quelques références nous montrent l'intérêt d'une approche historique de l'évolution conjointe des ressources énergétiques et de leurs propriétés et de l'évolution de la localisation des activités et des peuplements afin d'identifier des phénomènes thermodynamiques d'atomisation/concentration (Roddier, 2012) susceptibles d'améliorer notre compréhension des systèmes énergétiques territoriaux.
- 5 Par ailleurs, tout comme les structures de l'offre, celles de la demande sont également étroitement liées aux territoires et à leurs organisations. Ainsi la répartition des pôles de consommation, mais aussi la structure des réseaux de transport, y compris d'énergie, influent grandement sur le système énergétique notamment en termes d'efficacité énergétique et de propension à l'économie. L'organisation des circuits de production et des chaînes logistiques influent sur l'efficacité énergétique attachée à la production de nos biens de consommation (Rizet et Keita, 2005). La configuration des territoires conditionne les consommations énergétiques. Les travaux menés sur les liens entre densité de population et consommation énergétique ont depuis longtemps validé la relation entre ces deux variables (Newman et Kenworthy, 1989, 1999). Nous pouvons citer également le phénomène des îlots de chaleur urbains et dont l'existence a de fortes

répercussions sur les consommations énergétiques des bâtiments, notamment du fait du recours massif à la climatisation en été (Clergeau, 2011). Ce phénomène propre, comme son nom l'indique, aux structures urbaines est le fruit d'un certain nombre de facteurs combinés tels que la structure de la ville et notamment l'organisation des rues, mais aussi les matériaux, la présence/absence de végétation, le contexte climatique, plus largement le système ouvert complexe que constitue la ville. Ses répercussions sur la température sont loin d'être négligeables. C'est ce que met en avant l'étude menée sur l'agglomération d'Athènes, identifiant des intensités maximales entre l'hyper centre et les zones rurales environnantes de près de 16 °C ! (Santamouris, 2004)

- 6 Le temps apparaît également comme un paramètre fondamental à la compréhension des relations territoire-énergie. Les ressources tout comme la demande sont marquées par des processus cycliques imbriqués, qu'ils relèvent de la notion de temps court ou temps long. Ces processus sont directement liés aux dynamiques des potentiels de ressources comme dans le cas du cycle de vie des arbres. Ils découlent également, pour la demande, de temps sociaux, fréquences quotidiennes ou plus longues (Garabuau-Moussaoui et Pierre 2016).
- 7 Ces exemples illustrent parfaitement l'intérêt d'une lecture territoriale de l'énergie puisque, comme nous le voyons pour les temps sociaux, les clés de compréhension des processus ne viennent pas spécifiquement de composantes propres au domaine de l'énergie, mais davantage d'un environnement, physique et notamment infrastructurel, économique, social, technologique, dont les modes d'organisation et de fonctionnement conditionnent fortement les usages et les rythmes de consommation de l'énergie. Les intérêts de cette lecture territoriale de l'énergie n'ont pas échappé à la sphère des énergéticiens comme des décideurs et du politique. La planification énergétique territoriale apparaît comme une approche alternative reposant sur l'intégration de spécificités territoriales, en y intégrant les dimensions politiques, économiques, technologiques et sociales (Cherix et al., 2015). L'énergie devient une variable maîtresse des politiques d'aménagement du territoire. En France, dans les Schémas régionaux climat air énergie (SRCAE), ou Schémas régionaux éoliens (SRE), les collectivités territoriales sont amenées à prendre en compte la problématique énergétique dans leurs documents planificateurs comme les Plans locaux d'urbanisme (PLU), Schéma de cohérence territoriale (SCOT) ou autre Plan climat énergie territorial (PCET) (Godinot 2011). Cependant, les résultats opérationnels, conséquences des actions définies dans ce type de planification semblent limités (Laigle et al., 2012). Cette évolution se confirme dans les derniers textes publiés suite à la loi de transition énergétique du 17 août 2015. Depuis la nouvelle codification issue de l'ordonnance du 23 septembre 2015, c'est l'article L101-2 du Code de l'urbanisme qui fixe les objectifs que les collectivités publiques devront respecter dans leurs politiques en matière d'urbanisme, parmi lesquels :
 - « la lutte contre le changement climatique et l'adaptation à ce changement, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'économie des ressources fossiles, la maîtrise de l'énergie et la production énergétique à partir de sources renouvelables ». (Lambert et al., 2016)
- 8 La maîtrise de l'énergie, tant en termes d'approvisionnement que de consommation passe également par le citoyen consommateur voire producteur - de nature intrinsèquement décentralisée -, dont la prise de conscience de l'ampleur des défis à relever doit conditionner les mutations comportementales, directement liés à l'achat ou aux usages de l'énergie ou plus largement, aux modes de consommation, aux choix de localisation résidentielle, etc. Les opérateurs eux aussi proposent des approches visant à la maîtrise

de la demande en énergie. Née de la crise pétrolière, l'idée d'investir dans des actions de maîtrise de la demande, plutôt que dans le renforcement systématique des capacités de production et de distribution, tend de plus en plus à s'imposer (Broc, 2006). Dans le cadre de cette utilisation rationnelle de l'énergie, définie aussi de manière plus large comme sobriété énergétique, les approches dites MDE (Maîtrise de la Demande en Énergie) se multiplient jouant sur l'efficacité énergétique, les temporalités d'usage, la réponse à la demande et le stockage (Palensky et Dietrich, 2011) et validant implicitement la dépendance aux systèmes territoriaux. Ces mutations apparaissent comme les révélateurs d'un véritable changement de paradigme énergétique dont territoire et information sont des composantes majeures.

- 9 Enfin, dans le cadre des travaux menés sur les organisations urbaines, des liens implicites sont faits avec la dimension énergétique, notamment par le biais des consommations induites par la mobilité. Cependant, si des travaux concernent les relations entre formes urbaines et énergie (Maïza, 2008), peu de recherches à l'interface entre géographie et énergie portent spécifiquement sur les liens entre formes ou organisations urbaines et sources d'énergie utilisées, et plus particulièrement en ce qui concerne les caractéristiques et les conséquences quant à l'organisation et à l'efficacité des réseaux de distribution de l'énergie.

Dynamiques territoriales ; les apports de la physique et de la biologie

Les territoires, des systèmes dissipatifs répondant aux lois de la thermodynamique ?

- 10 Vouloir comprendre la problématique de l'énergie dans les territoires implique aujourd'hui de construire le raisonnement sur une connaissance d'un système complexe, combinant phénomènes et processus physiques et biologiques et dont l'ensemble des éléments interagissent tout en étant largement ouvert sur l'extérieur. Comme le souligne Fléty (2014, 80), « Les structures, fonctions et processus territoriaux existent notamment au vu d'un système énergétique donné. De façon similaire, [...], chacun des processus énergétiques est contraint par les caractéristiques du territoire ».
- 11 En regard de ces éléments, le territoire, comme tout système ouvert est donc bien dépendant des flux énergétiques² qui le traversent, l'alimentent et conditionnent son évolution. Il agit comme une structure dissipative³ produisant complexité et organisation, répondant ainsi aux grands principes de la thermodynamique (Prigogine et Stengers, 1979 ; Roddier, 2012). Cette évolution, éloignant les systèmes de l'équilibre thermodynamique, implique l'existence de réactions non linéaires comme cela a bien été démontré en chimie. Ce sont elles qui permettent par exemple l'apparition, en hydrodynamique, des cellules de Bénard⁴ (Roddier, 2012), illustrant la capacité d'auto-organisation d'un système ouvert et donc, soumis à une contrainte extérieure.
- 12 Ces réactions combinées peuvent mener à la création de structures spatiales, temporelles voire spatio-temporelles. Elles conduisent à des processus de différenciation, aboutissant à la délimitation de frontières et à la détermination intrinsèque du système lui-même. La pertinence de ces mécanismes thermodynamiques appliqués aux systèmes socio spatiaux a été mise en avant dans différents travaux. Prigogine, en 1994 déclarait que :

« L'exemple le plus simple de structure dissipative que l'on peut évoquer par analogie, c'est la ville. La ville est en interaction avec son environnement, elle est différente de la campagne qui l'entoure. Mais si les relations entre la ville et la campagne venaient à être supprimées, la ville disparaîtrait » (Prigogine, 1994).

- 13 La ville est donc bien au sens biochimique du terme, un système ouvert, qui opère dans un environnement avec lequel il a des échanges d'énergie sous certaines conditions. Ces analogies sont évoquées par Pumain (1998) dans le cadre de travaux de formalisation et de modélisation des dynamiques urbaines. Deux apports potentiellement importants sont soulignés par l'auteur. D'une part la prise en compte explicite de différents niveaux d'observation et à minima de deux, l'échelle macroscopique de l'ensemble du système et celle microscopique des éléments qui le composent. D'autre part les formalisations proposées, sous une forme mathématique, ouvrent la voie à l'expérimentation notamment par le biais de la simulation numérique. Plus récemment, des travaux menés dans le cadre de réflexions sur la transition énergétique ont permis d'identifier des liens entre formes urbaines et consommation énergétique (Raineau, 2011 ; Jouffe et Massot, 2013 ; Lallemand, 2007 ; Rosey, 2009 ; Favrat, 1990 ; Bobin, 2013). En outre, en recourant notamment au concept thermodynamique d'exergie il est possible d'introduire une approche plus précise des fonctionnements énergétiques dans les organismes du vivant (Toussaint, 2011). Si l'énergie est relative à la capacité d'un système à produire un travail au sens physique, l'exergie représente quant à elle, le travail physique maximal récupérable. Elle fait ainsi plus référence à un critère qualitatif que quantitatif et distingue les niveaux d'énergie nécessaire pour que les transformations se réalisent. Ces travaux montrent notamment les relations étroites existant entre distribution des densités de population et consommations énergétiques dans tous les domaines (transports, mobilités, climatisation- chauffage, production...). Validant les principes de la thermodynamique, ils identifient un lien entre entropie⁵ et consommation d'énergie.
- 14 Dans une étude conduite portant sur la transition énergétique pour le compte de la Caisse des Dépôts, Salat et al. (2013) précisent ce lien entre entropie et consommation d'énergie :
- « Ces deux variables agissent dans des sens opposés. Plus le système urbain se structure, plus il utilise l'énergie efficacement et moins il a besoin d'énergie. Plus le système se déstructure, plus il s'homogénéise et plus il a besoin d'énergie pour fonctionner. Ce résultat est général et traduit pour les villes une loi fondamentale de la physique, celle de la création de hiérarchie complexe par les structures dissipatives loin de l'équilibre ».
- Écosystème, métabolisme et territoire

Territoire et écosystème

- 15 Le territoire pourrait donc être assimilé à un système dissipatif d'énergie. Cette hypothèse nous permet de faire le lien entre structures et organisations territoriales et principes thermodynamiques des systèmes dissipatifs. Ainsi, les systèmes énergétiques apparaissent comme des instruments d'auto-organisation des territoires susceptibles d'en améliorer l'efficacité par une augmentation de l'exergie.
- 16 Organisation complexe de composantes biotiques et abiotiques en interaction, le territoire peut-il être qualifié d'écosystème, c'est-à-dire un assemblage d'espèces interagissant dans un environnement auquel elles sont adaptées ? En corollaire, les écosystèmes peuvent-ils être assimilés à des systèmes dissipatifs ?

- 17 La définition du concept d'écosystème donnée par Odum (1953) proposant que « L'écosystème constitue la plus grande unité fonctionnelle en écologie, puisqu'il inclut à la fois les organismes vivants et l'environnement abiotique (c'est-à-dire non vivant), chacun influençant les propriétés de l'autre » permet notre première analogie. On remarque aussi l'intérêt des travaux de Georgescu - Roegen (1986) et ceux d'Ayres (1998) qui, à partir de l'approche économique, abordent le parallèle entre les phénomènes observés dans la nature et les procédés de production industriels ou les fonctionnalités urbaines. Quels sont alors, dans ce cadre, les liens existants entre énergie et écosystème ? Et plus largement, les phénomènes d'auto-organisation mis en évidence par les lois de la thermodynamique existent-ils au sein des écosystèmes ? Les réponses à cette question sont à rechercher du côté des théories énergétiques de l'écologie. Les biologistes formulent dès la moitié du XXe siècle une théorie de l'évolution des systèmes vivants répondant aux principes de la thermodynamique des systèmes ouverts, fondée sur une croissance de la complexité de leurs structures et fonctions. Lindeman (1942), cité par Fléty (2014) considère tous les éléments d'un écosystème, biotiques comme abiotiques, avant tout comme des formes d'échanges, notamment énergétiques. Les écosystèmes sont alors assimilés à des structures traversées par des flux de matière et d'énergie et de ce fait sont assimilés à des structures dissipatives (Morowitz, 1968 ; Prigogine, 2000). Vivien (2005) propose notamment d'examiner les écosystèmes comme des organisations fonctionnelles qui s'ordonnent, se développent et évoluent dans le temps grâce aux différents flux qui les traversent.
- 18 En biologie, ces différents processus s'expriment à travers le métabolisme, celui-ci étant défini comme l'ensemble des processus de transformation de matière et d'énergie dans la cellule ou l'organisme. L'étude du métabolisme recouvre l'analyse des flux de matière et d'énergie. Plus précisément, il s'agit de l'ensemble des réactions de synthèse, génératrices de matériaux (anabolisme), et de dégradations, génératrices d'énergie (catabolisme), qui s'effectuent au sein de la matière vivante à partir des constituants chimiques fournis à l'organisme par l'alimentation et sous l'action de catalyseurs spécifiques. Ces phénomènes d'auto-organisation du vivant alimentés par les flux d'énergie et de matière, compréhensibles et appréhendables par le biais de l'étude des métabolismes sont-ils transposables aux systèmes territoriaux ? Cette recherche de processus communs, à la physique, la biologie, la sociologie... et les questions qu'elle sous-tend sont anciennes et ont alimenté de nombreux travaux, parmi lesquels nous pouvons citer les écrits de Teilhard de Chardin (1956), les ouvrages de généticiens tels que « le gène égoïste » de Dawkins, du physicien Ilya Prigogine (Prigogine et Wiame, 1946) et plus récemment et plus proche de nos champs de recherche, les travaux de géographes et d'économistes comme Pumain D et al. (1989), Nijkamp et Reggiani (1995) ou Goergescu-Roegen (1986). Nos recherches s'inscrivent résolument dans ces courants de pensée avec l'objectif de valider l'hypothèse de l'intérêt des processus génériques en cause en matière de régulation énergétique des systèmes territoriaux.
- 19 Le concept de métabolisme est aujourd'hui mobilisé notamment en tant que support d'analyse de modes de fonctionnement aussi complexes que ceux qui affectent nos systèmes sociaux. Ainsi, Fischer, Kolawski et al. (1998) définissent par exemple le métabolisme sociétal comme l'ensemble des processus d'entrée-sortie de matières et d'énergie qui ont lieu dans une société, c'est-à-dire l'extraction des ressources naturelles, leur transformation, leur conservation dans le cadre social et, finalement, leur rejet sous forme de déchets et d'émissions. Pourtant, malgré les nombreux travaux s'intéressant

aux interactions entre écosystèmes « naturels » et systèmes socio-spatiaux peu d'approches s'appuient véritablement sur le concept d'écosystème territorial intégrant ces deux composantes. On reconnaît par exemple les services écosystémiques rendus dans les territoires urbains (Balez et Reunkrilerk, 2013), mais en limitant l'analyse aux relations entre écosystèmes et territoires et aux gains en termes de bien-être apporté aux citoyens. Le terme d'écosystème territorial est mobilisé également dans le cadre de réflexions sur l'Économie sociale et solidaire, avec une entrée essentiellement centrée sur les organisations et les modes de fonctionnements socio-économiques cette fois-ci sans réelle prise en compte de composantes biotiques et abiotiques au sens propre.

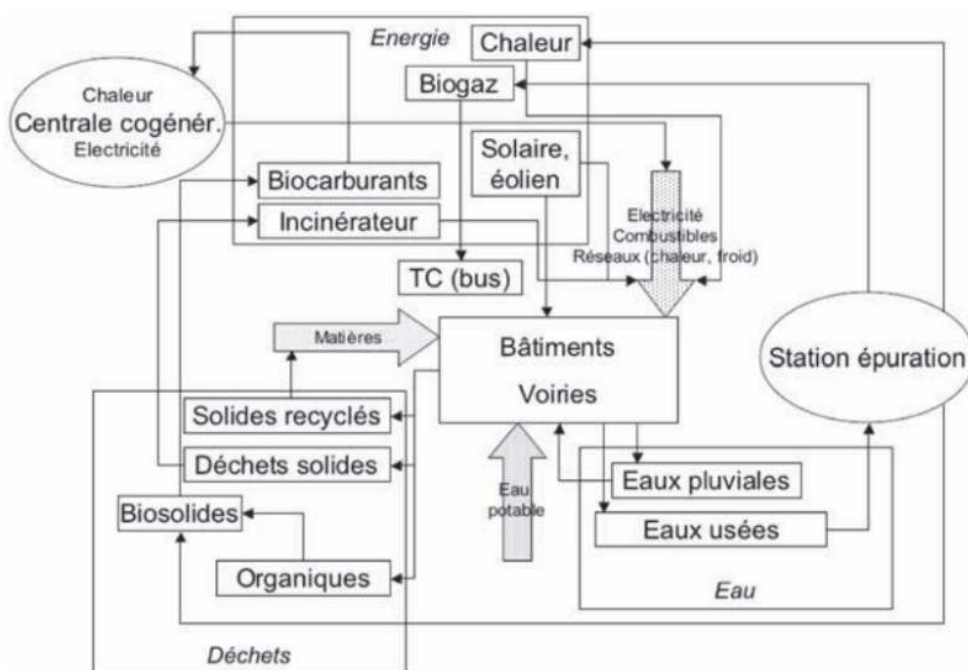
- 20 Mais c'est dans le domaine industriel que les références au concept d'écosystème se sont largement diffusées. En assimilant les systèmes industriels à des systèmes biologiques, « dont les principaux objectifs sont la valorisation systématique des déchets, la minimisation des pertes par dissipation (création de réseaux d'utilisation des ressources et des déchets), la dématérialisation de l'économie (optimisation de l'utilisation de la matière) et la décarbonisation de l'énergie » (Diemer et Labrune, 2007), l'écologie industrielle mobilise un socle théorique emprunté à la fois aux sciences de l'ingénieur, à la biologie, à l'économie⁶ et aux sciences sociales. Ainsi, Gérald Hess (2009) propose une vision globale, intégrée, de tous les composants du système industriel et de leurs relations avec la biosphère. En prenant appui sur les dynamiques technologiques, cette stratégie s'efforce d'optimiser les flux de matière et d'énergie du système industriel selon le fonctionnement des écosystèmes naturels. Dès lors faire le parallèle entre les cycles de matières et matériaux au sein de processus industriels avec les cycles biologiques naturels présente un intérêt. Il est certainement possible d'aborder les évolutions de capacités de production (croissance décroissance) ou d'innovation des ensembles industriels et de les comparer avec les mécanismes observés pour les espèces naturelles. Il en est certainement de même pour les différents processus de traitements des résidus et des déchets dans les circuits de production industrielle. Dans ce domaine, le site danois de Kalundborg (Diemer et Labrune, 2007) est un cas d'école. Constitué d'un réseau d'unités industrielles et d'unités de production (production d'électricité, raffinerie de pétrole, puis cimenterie, unités de fertilisants agricoles, élevage bovin, ferme aquacole...) cet écosystème industriel s'est développé avec l'appui des autorités locales qui ont cherché à optimiser la consommation en eau, à réduire la consommation d'énergie, à organiser le recyclage des résidus matériels et des sous-produits en remplacement de matières premières (Beaurain, 2012).
- 21 Si l'exemple du site de Kalundborg constitue un cas remarquable, il existe aujourd'hui nombre de systèmes de ce type concernant généralement des plateformes industrielles dans différents domaines, notamment en chimie ou pétrochimie, associant par des liens fonctionnels, des équipements de traitement de déchets producteurs d'énergie à des équipements industriels. Ces approches prennent appui sur une analyse du métabolisme industriel défini comme l'analyse des flux et des stocks de matière et d'énergie liés aux activités industrielles. Cependant, l'emploi du terme d'écosystème industriel est à ce titre réducteur dans la mesure où il relève de l'activité industrielle seule, véhiculant ainsi une vision restrictive du système territorial intégrant des composantes biotiques et abiotiques, naturelles et anthropiques, organisationnelles et fonctionnelles.
- 22 Enfin, ces approches, cantonnées au domaine industriel, auxquelles sont également « reprochées » une véritable coupure avec la sphère sociale et une entrée par trop technologique et économique ont contribué à l'émergence et à la diffusion du concept

d'écologie industrielle et territoriale (Beurain et Brulot, 2011). Ce dernier, replace l'écologie industrielle dans une perspective de développement local, jugée indispensable dans l'optique du développement durable et met notamment en avant l'importance dans les projets d'écologie industrielle des relations et interactions entre les acteurs et les principes de la gouvernance territoriale (Brulot et al., 2014). Idéalement, l'idée avancée est le développement de véritables symbioses industrielles entre les acteurs sur la base d'une optimisation de la circulation de l'information, des flux de matière, d'eau et d'énergie (Ehrenfeld, 1997).

Métabolisme territorial

- 23 L'étude du métabolisme des écosystèmes industriels s'appuie sur une approche essentiellement stock-flux. Mais quels sont les principes qui prévalent plus globalement à l'étude du métabolisme territorial ?
- 24 Premier constat, les analogies avec les processus métaboliques sont généralement appliquées au territoire urbain. Cette approche est notamment proposée par Newman (1999) qui assimile la ville à une forme d'écosystème auquel il applique des principes métaboliques d'échanges de flux et de matière. Dans ce type d'approches, les territoires sont considérés comme des espaces caractérisés par des flux d'énergie, de matière et d'information (Erkman, 2004). Ces approches peuvent être qualifiées de globales, intégrant l'ensemble des composants du territoire et leurs interactions. L'ambition affichée est d'optimiser les usages des différentes ressources nécessaires au fonctionnement des systèmes territoriaux, notamment en jouant sur leurs possibles complémentarités, à l'image du système présenté en figure 1.

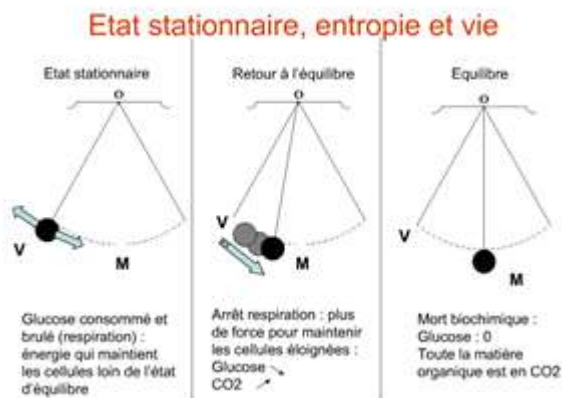
Figure 1. Complémentarité d'activités de l'État de West Virginie / Complementarity of activities of the State of West Virginia.



Source : Querrien et Mattei, 2007, p. 39

- 25 Barles (2008) quant à elle aborde le métabolisme urbain en lien avec l'empreinte environnementale au sein des villes. Elle propose une approche bilancielle qui, sans décrire les mécanismes de transformation dans le détail, s'applique à un ensemble territorial ouvert en lien avec d'autres territoires. Ainsi, la notion de métabolisme territorial aborde l'ensemble des flux de matières et/ou matériaux qui entrent au sein d'un espace territorial défini, qui sont transformés, stockés, consommés et qui sont exportés. Le métabolisme reflète donc la matérialité du fonctionnement d'une société. Barles (2014) parle du métabolisme révélateur des caractéristiques socio-naturelles et montre notamment l'intérêt de l'analyse des flux de matières en regard des enjeux de la dématérialisation. Un résultat important de ce bilan global réside dans le fait qu'il indique les quantités d'éléments qui sont émises dans l'environnement. Cependant, cette approche ne précise ni les mécanismes mis en œuvre dans l'ensemble des réactions au sens physico-chimique, émettrices et consommatrices d'énergie ni, en lien avec la thermodynamique, le rôle de ces flux, notamment énergétiques sur les structures et fonctionnements territoriaux.
- 26 Pourtant, si l'on se réfère aux processus à l'œuvre en biologie, ces réactions sont à la base des mécanismes d'organisation et de régulation par le contrôle de « paramètres » physico-chimiques autour de valeurs optimums (par exemple la régulation de la température du corps ou le maintien des constantes biologiques chez les mammifères). Les organes jouent le rôle de réacteurs permettant le transport et les transformations d'éléments nécessaires aux fonctionnements de l'organisme et assurant un niveau « normal » des constantes biologiques qui régulent l'ensemble du système vivant (Toussaint, 2012), loin de l'équilibre thermodynamique menant pour les organismes vivants à la mort biochimique (Figure 2).

Figure 2. Stationarité et régulation chez les organismes vivants / Stationarity and regulation in living organisms.



- 27 Pour poursuivre l'analogie, le vecteur du transport des éléments nutritifs et donc de l'énergie nécessaire au fonctionnement du système est, pour les vertébrés en tout cas, le réseau sanguin et plus largement le système cardio-vasculaire. Les mécanismes de régulation agissent à la fois sur les flux de nutriments et donc d'énergie (d'un point de vue quantitatif et qualitatif) et sur « l'infrastructure de transport » donc les réseaux, notamment par le processus d'angiogenèse, désignant une ramification et une extension des capillaires. Des travaux menés en biologie tentent notamment d'établir un lien entre métabolisme et distribution de l'énergie notamment par le biais du réseau sanguin. L'un

des objectifs poursuivis est d'établir une corrélation entre forme et taille du réseau et croissance de l'organisme vivant sur la base de raisonnement s'appuyant sur les lois d'échelles ou en ayant recours à la géométrie fractale. Dans tous les cas, quelles que soient les approches mises en œuvre, ces recherches ont mis en avant le fait que le métabolisme, défini comme la dépense énergétique de base par unité de temps, était proportionnelle à la masse de l'organisme confirmant ainsi la pertinence de la loi de Kleiber⁷. Le rôle de l'architecture des réseaux de distribution n'a pas encore été clairement formalisé malgré les nombreux travaux menés dans ce domaine et les modèles proposés. Cependant, la pertinence des relations entre métabolisme, taille et température de l'organisme mise en avant dans le cadre des théories métaboliques des écosystèmes (MTE en anglais) semble actée (Price et al., 2012).

Réseaux de distribution de l'énergie, sobriété et régulation énergétique des systèmes territoriaux

Auto-organisation, métabolisme, forme et distribution de l'énergie, quels apports dans l'optique de la régulation des systèmes énergétiques territoriaux

- 28 Les principes de la thermodynamique démontrent, comme nous l'avons vu, l'inévitabilité des phénomènes d'auto-organisation des systèmes ouverts avec pour finalité une optimisation de la dissipation de l'énergie (Roddier, 2012). Les avancées dans les domaines de la biochimie, de la biologie et de la médecine valident l'importance du rôle des réseaux de distribution de l'énergie dans les dynamiques de croissance cellulaire et plus largement dans les processus de régulation permettant, de la cellule à l'organisme, le maintien d'un état stationnaire. L'idée de raisonnements analogiques, s'appuyant sur des principes et des processus physiques et biologiques, appliqués à l'évolution des systèmes ouverts que constituent les territoires et à leur capacité d'auto-organisation, a dans ce contexte, motivé le développement de nombreux travaux de recherche notamment dans les domaines de la géographie, de l'urbanisme et de l'aménagement, des transports et de la mobilité :
- La modélisation des formes urbaines et de leurs dynamiques, misant sur le rôle des interactions entre formes urbaines et mobilité, avec le développement des modèles LUTI⁸ ;
 - Les travaux menés sur les villes fractales (Batty et Longley, 1994) ; Frankhauser et al., 2007), et plus largement la recherche de modèles de croissance urbaine sur la base de formes et de structures optimisant les déplacements (Tannier, 2009) ;
 - Une approche métabolique des territoires basée sur la réalisation de bilans (bilans matières, bilans énergie, eau), ayant ouvert la voie aux approches de type Analyse de cycle de vie (ACV) et visant à comprendre, mesurer voire réguler le fonctionnement de systèmes territoriaux, d'en simuler l'empreinte environnementale et d'en évaluer la durabilité (Barles, 2014). L'analyse du métabolisme urbain apparaît aujourd'hui comme une piste de recherche pertinente pouvant potentiellement améliorer l'efficacité en termes énergétique, de cycle de vie des matériaux, de gestion des déchets ainsi que d'architecture et d'organisation des infrastructures urbaines (Decker et al., 2000).
- 29 Cependant si dans le cadre de travaux menés sur les formes urbaines, des liens implicites sont faits avec la dimension énergétique, notamment par le biais des consommations induites par la mobilité, peu de recherches à l'interface entre géographie et énergie

portent spécifiquement sur les liens entre les formes et les sources d'énergie utilisées, caractéristiques des réseaux de distribution de cette ressource et morphologie urbaine et plus largement organisation des territoires. Concernant les approches métaboliques, l'objet est davantage de comprendre voire de transformer les métabolismes urbains révélateurs de la « matérialité des sociétés » (Barles, 2008), dans une logique d'écologie territoriale. La majorité des travaux développent ainsi des approches bilanciées caractérisant les flux de matière et d'énergie entrant et sortant des territoires étudiés et les stocks qui les caractérisent. En revanche, les flux d'informations à l'origine de la régulation de ces systèmes ne sont pas pris en compte, excluant de fait le rôle des processus et organisations sociales. Les liens potentiels entre caractéristiques morphologiques et fonctionnelles des réseaux énergétiques et consommation d'énergie des territoires ne sont que peu explorés (Maïza, 2008) alors même que ces pistes de recherche pourraient s'avérer pertinentes dans le cadre de la régulation des consommations énergétiques.

- 30 Enfin, d'un point de vue épistémologique, établir des similitudes et des analogies entre des systèmes de natures différentes devrait permettre d'améliorer la compréhension globale de ces derniers, à l'instar des similitudes avec les réseaux électriques qui sont souvent utilisés dans le domaine des équations différentielles, par exemple en physique du bâtiment (Boyer, 1993) et à identifier des dynamiques générales (Berthou et al., 2012). Il n'est nullement intention ici d'établir des conclusions sur la base de ressemblances, mais bien d'élargir les approches pour identifier des solutions provenant, en fait, d'autres disciplines scientifiques.

Les réseaux, supports des flux énergétiques et d'informations

Différences et similitudes entre les réseaux énergétiques et métaboliques

- 31 Au sein des zones urbaines ou périurbaines, on distingue trois types de réseaux transportant des vecteurs énergétiques. Un historique holistique de ces derniers, en lien avec d'autres réseaux urbains comme ceux acheminant les eaux, a notamment été proposé par G. Dupuy (1984). D'une part, différentes typologies de réseaux électriques – distinguées principalement par le niveau de tension – assurent le transport et la distribution d'énergie électrique entre les stations de transformation reliées aux réseaux à haute tension et les consommateurs finaux en bout de chaîne. Les réseaux transportant le gaz naturel – qu'il soit de nature fossile ou renouvelable, voire incluant une certaine proportion d'hydrogène – sont très similaires aux réseaux électriques et sont répertoriés selon la pression à laquelle le vecteur énergétique sous forme gazeuse est transporté d'un ou plusieurs postes de détente aux points de consommation résidentiels ou industriels (Puerto et al., 2015). Enfin, les réseaux de chauffage ou de refroidissement à distance transportent un caloporteur – pratiquement toujours de l'eau – entre un échangeur – source (chaude ou froide) et une multitude d'échangeurs – puits ; ils sont caractérisés par leur débit volumique et par les deux températures aller et retour depuis l'échangeur – source, déterminantes pour établir l'efficacité énergétique du système (Marechal et al., 2008). D'une manière générale, on associe aux trois types de réseaux la capacité de transporter une certaine quantité d'énergie (ou une quantité d'énergie par unité de temps, ce qui équivaut à une puissance du point de vue dimensionnel) avec des pertes le long de leur tracé topologique (ohmiques, de charge, massiques ou thermiques). Selon leurs caractéristiques et les besoins auxquels ils doivent répondre, les réseaux

énergétiques sont construits selon des topologies différentes (en étoile, maillés ou autres, mais de nombre limité, à l'instar des systèmes métaboliques (Jeong et al., 2000) permettant non seulement d'assurer la livraison, mais, souvent, aussi la redondance en cas de failles (notamment pour les réseaux électriques).

- 32 Au sein du métabolisme des vertébrés, plusieurs réseaux de transport existent également, mais avec la distinction que seul l'un d'entre eux possède, comme fonction principale, mais non - exclusive, le transport d'énergie sous forme de différentes molécules biochimiques - notamment du glucose : le réseau sanguin. Ce dernier possède aussi un rôle central dans le maintien - et donc de la régulation - de la température corporelle, en couplage avec la structure complexe du derme vers l'extérieur. Par contre, les réseaux lymphatiques et neuronaux n'ont pas de rôle énergétique au sens propre, même si ces derniers transportent de l'information - pour partie - sous forme d'impulsions électriques. Tout au long de la vie, les réseaux métaboliques se développent de manière limitée et notamment dans les zones périphériques (par exemple, les micro-vaisseaux) : la structure artérielle et veineuse reste topologiquement stable (certaines parties de la structure pouvant par contre ne plus être utilisées à cause d'une pathologie locale), de même que le réseau lymphatique. En cas de blocage d'un segment du réseau veineux, par exemple, le flux sanguin est dévié de manière à contourner l'obstacle, démontrant ainsi un haut degré de redondance, une caractéristique de base du design des réseaux énergétiques liée à la sécurité d'approvisionnement. En effet, à l'instar du réseau sanguin, l'organisation en boucle du réseau électrique sur la base d'une structure maillée, activée par la différence de potentiel (jouant le rôle de la pompe cardiaque), permet un acheminement du courant même en cas de coupure accidentelle ou permanente d'une ou plusieurs branches (dans une certaine proportion en dessous d'un seuil de percolation équivalent), de manière très similaire au réseau veineux.
- 33 Plusieurs analogies ou similitudes peuvent ainsi être avancées à partir de ces descriptions, des caractéristiques respectives des réseaux énergétiques et métaboliques et notamment de leurs morphologies. Cette similitude sert notamment à souligner l'importance des outils géomatiques appliqués à l'énergie sur les territoires, en tant que véritables approches diagnostiques à mettre en parallèle avec les techniques modernes d'imagerie médicale. En ce sens, on peut citer l'outil MEU (ADEME 2016) qui est une plateforme web géo-référencée qui permet de réaliser à la fois le monitoring et la planification énergétique des zones urbaines, tant du point de vue de la demande énergétique (bâtiments) que de l'approvisionnement (réseaux), de manière très détaillée (Darmayan et al., 2016). Un exemple de visualisation « diagnostique » d'une zone urbaine est donné à la figure 3.

Figure 3. Exemple de traitement du réseau de distribution de gaz naturel au sein de l'outil cartographique MEU / Example of treatment of the natural gas distribution network within the mapping tool MEU.



Source : Puerto et al., 2015.

Les évolutions futures des réseaux énergétiques

- 34 Les réseaux de transport et de distribution d'énergies sont au cœur du fonctionnement des territoires dans les pays dits industrialisés, axes d'approvisionnement essentiels et multiformes qui alimentent les villes, les sites industriels et les services, tel que décrit plus haut en lien à l'approche thermodynamique du métabolisme. Pour toute une série de raisons - notamment liées aux changements réglementaires, mais aussi à la pénétration d'énergies renouvelables de nature intrinsèquement stochastiques et décentralisées et à des exigences accrues en termes d'efficacité énergétique et aux coûts de construction, de maintenance ou d'extension - les trois types de réseaux se trouvent dans une phase de profonde mutation. Ces évolutions rendent l'approche métabolique encore plus pertinente afin de faciliter la nécessaire lecture systémique des réseaux énergétiques et de leur rôle territorial.
- 35 Dans le cas des réseaux de chauffage à distance centralisés, particulièrement développés dans plusieurs pays européens, deux tendances se dessinent clairement. D'une part, la volonté de baisser les températures de distribution encore souvent supérieures à 100 °C est clairement affichée - en parallèle à la construction d'un nombre limité de réseaux à basse température alimentant par exemple des éco quartiers -, tout en tentant de tirer profit des réseaux de retour avec des applications chaleur basse température.
- 36 D'autre part, un effort de densification important est en cours. Il vise soit :
- À exploiter au maximum la puissance disponible dans les réseaux par le biais de la recherche de nouveaux raccordements sur le ou à proximité du tracé actuel des réseaux (Marechal et al., 2008) ;
 - À augmenter l'efficacité énergétique des raccordements existants ou des points d'alimentation - par exemple des usines d'incinération d'ordures ou des chaudières à gaz/bois ;
 - À optimiser les systèmes de contrôle et de distribution (p. ex. au niveau des pompes), afin de libérer de la puissance en aval pour augmenter le nombre de preneurs.

- 37 Dans ces approches, une vision conservatrice de la topologie et du dimensionnement du réseau est prédominante, à savoir d'exploiter les structures existantes au maximum de leurs dimensionnements géographiques, topologiques, physiques et énergétiques, c.-à-d. d'éviter de véritables extensions et de minimiser/optimiser les coûts d'investissement et opérationnels d'exploitation (Fazlollahi, 2014).
- 38 Les réseaux de distribution de gaz naturel en milieu urbain ou périurbain se sont considérablement développés dans plusieurs pays industrialisés au cours des trente dernières années, tant en termes d'extension géographique que de contribution au mix énergétique global, notamment du point de vue des besoins en chaleur résidentielle. Le gaz naturel est devenu un vecteur énergétique incontournable notamment en Europe, ouvrant la voie à des technologies de conversion à très haute efficacité, tant centralisées (Combined Cycle Gaz Turbine CCGT) que décentralisées (p. ex. installations (Couplage Chaleur-Force CCF), piles à combustible) et permettant une diminution des émissions de Gaz à effet de serre (GES). Néanmoins, les réseaux de gaz urbains se trouvent pour une majeure partie dans une phase d'extension très limitée, voire de retrait à cause de :
- La diminution marquée de la consommation de chaleur – ou, plus précisément, du besoin de chaleur par unité de surface chauffée – dans le secteur résidentiel par le biais des rénovations ou des nouvelles constructions BBC (Bâtiments Basse Consommation) ;
 - L'implémentation de régulations locales restrictives par rapport à des technologies de conversion énergétiques alimentées par des énergies fossiles.
- 39 Cette tendance de non-croissance se traduit donc par des efforts de densification et d'optimisation des réseaux de gaz naturel relativement similaires à ceux des réseaux de chauffage à distance décrits plus haut. Parallèlement, la vision du réseau en tant qu'infrastructure se détache peu à peu du gaz naturel d'origine fossile. Ainsi, les quantités de biogaz ou de gaz synthétique produit à partir de sources renouvelables (p. ex. de matière ligno-cellulosique) injectées dans le réseau augmentent constamment. La pénétration massive de systèmes dits *power-to-gas*⁹ va encore augmenter le caractère renouvelable – que ce soit sous forme d'hydrogène ou de méthane de synthèse – du vecteur énergétique gazeux qui sera transporté dans le futur dans les réseaux de gaz. Cette infrastructure, développée initialement pour distribuer une énergie d'origine fossile, est en train de devenir une autoroute pour des vecteurs énergétiques renouvelables, souvent produits de manière décentralisée ; sa nature va donc s'approcher toujours plus d'équivalents homothétiques métaboliques, comme les réseaux lymphatiques par exemple, dans une approche qui voit le contenu changer de nature chimico-physique mais qui conserve essentiellement le contenant du point de vue structurel, physique et topologique. Alors que ces dernières décennies ont vu une course effrénée (Dupuis, 2011 ; Bergmeier, 2003) – mais néanmoins cohérente tant du point de vue énergétique, économique qu'environnemental – à l'extension des réseaux énergétiques et à l'augmentation de leurs capacités (DBDH, 2016), la similitude avec des réseaux au sein d'organismes vivants vient apporter une lumière intéressante sur une croissance des structures énergétiques qui ne se mesurera plus en longueurs ou en puissance, mais en services délivrés et en valeur ajoutée en termes d'efficacité énergétique accrue. Les dissemblances physiques ne doivent pas masquer le fait qu'un réseau peut être utilisé de manière efficace même sans augmentation de sa taille ; de plus, la biologie peut aider les ingénieurs à mieux comprendre quels systèmes de redondance et de contrôle sont les plus appropriés.

- 40 Les réseaux électriques se trouvent au cœur de ce qui pourrait devenir un véritable changement de paradigme aux contours encore vagues, même du point de vue sémantique, à savoir les concepts de smartgrids ou de réseaux intelligents, ces derniers incluant aussi, bien qu'à des degrés différents, les réseaux de gaz naturel (smart pipe). Cette révolution est en train de s'opérer sous l'effet de la pénétration croissante des technologies de l'information dans la gestion de tels réseaux, de la multiplication des productions décentralisées (p. ex. les installations photovoltaïques dans le secteur résidentiel) et délocalisées (p. ex. l'éolien off-shore) et des contraintes spécifiques aux réseaux transportant du courant alternatif (contrôle rigide de la fréquence). La première de ces dynamiques, c.-à-d. la nature progressivement décentralisée de la production notamment en milieu urbain et périurbain, entre en contradiction avec la nature unidirectionnelle et stellaire qui caractérise encore une grande partie du réseau électrique dans les pays industrialisés. Ainsi, afin d'éviter de lourds investissements dans la restructuration du réseau de distribution, des solutions se dessinent privilégiant l'utilisation locale de la production et/ou le stockage sous forme électrochimique (typiquement pour le PV résidentiel) ou d'autres formes (p. ex. power-to-gas), voire la constitution de micro-grids totalement ou partiellement désolidarisés du réseau ; une comparaison critique des solutions de réseaux centralisés par rapport aux configurations décentralisées, voire îlotées, a été récemment proposée par Coutard et Rutherford (Coutard, 2009). Maïza a présenté une vision globale des structures énergétiques et topologiques qui peuvent être mises en place, afin d'accroître l'efficacité énergétique et les solutions basées sur des énergies renouvelables décentralisées (Maïza, 2008). À nouveau, l'approche se révèle être globalement conservatrice du point de vue de la structure physique et topologique du réseau, car l'on opère une série de changements importants sur les entités venant se greffer sur ce dernier, au lieu de le modifier directement, voire on procède à la réalisation de micro réseaux indépendants. L'analogie avec les systèmes métaboliques et notamment avec le système vasculaire des mammifères prend dans ce cas une signification particulièrement précise et peut participer à la compréhension du comportement des réseaux électriques de distribution, notamment du point de vue des stratégies de redondance et de contrôle, qui peuvent établir la sécurité d'approvisionnement des clients finaux.
- 41 Dans les trois cas décrits ci-dessus, il a été démontré que, d'un point de vue morphologique et physique, les infrastructures de transport et de distribution d'énergies se trouvent dans une phase stationnaire, par opposition à une phase de croissance telle celle qui a caractérisé la période de l'après-guerre, tendant à minimiser les investissements lourds et à optimiser le fonctionnement sans intervention sur les réseaux eux-mêmes. Cette situation va être renforcée par la convergence des réseaux énergétiques territoriaux, sur la base de l'interopérabilité. À moyen terme, notamment dans les zones urbaines denses, les vecteurs énergétiques vont tendre à devenir complémentaires les uns aux autres, dans une approche qui combine leurs avantages respectifs et l'optimisation des investissements lourds et à ne plus être considérés dans une approche « en silos indépendants » (Liu et al., 2014). Les avantages économiques et environnementaux (impacts directs et indirects, c.-à-d. aussi en termes d'énergie grise) de cette approche intégrée sont considérables, alors que les premiers territoires pilotes se lancent dans une telle dynamique, à l'instar des villes de Vevey, Genève, Lyon (avec la mise en place d'un Schéma directeur de l'énergie) ou encore Stockholm¹⁰. Par contre, la mise en place d'outils permettant d'évaluer les opportunités d'intégration des réseaux

énergétiques urbains nécessite d'importants efforts en termes de collection de données territoriales détaillées jusqu'au niveau du bâtiment. Le projet IntegrCiTy¹¹ représentera un retour d'expérience intéressant en ce sens, soulignant la nécessité d'une connaissance détaillée comme prémisses d'une planification efficace, dans une analogie de diagnostic puis de stratégie thérapeutique dans le monde médical.

- 42 Cette intégration croissante des réseaux énergétiques renforce la pertinence de l'analogie entre systèmes de distribution des vecteurs énergétiques et réseaux métaboliques des vertébrés. En effet, ces derniers fonctionnent intrinsèquement, de manière intégrée et coordonnée s'adaptant aux conditions de manière à répondre aux besoins des tissus vivants et de leurs fonctionnalités. Ainsi, l'approche métabolique fait sens tant du point de vue structurel que fonctionnel et pourrait contribuer ainsi à une meilleure compréhension des réseaux énergétiques, de leurs dynamiques et de leurs interactions avec leurs environnements infrastructurels et sociétaux, favorisant ainsi la régulation des systèmes énergétiques territoriaux. Les similitudes avec les réseaux métaboliques permettront notamment d'imaginer de nouvelles approches au niveau de la régulation, de la gestion des redondances et des mécanismes de contrôle des réseaux énergétiques, avec une valeur ajoutée certaine en termes de résilience accrue de ces derniers, un facteur-clé à court et long terme.

Les technologies de l'information et la géomatique pour le diagnostic des systèmes énergétiques territoriaux

- 43 Les systèmes énergétiques territoriaux ont acquis une complexité croissante dans le courant des trente dernières années (Cherix, 2015). Afin de comprendre la dynamique temporelle et spatiale de la demande énergétique, d'analyser les potentiels de production d'énergies renouvelables et d'actions d'efficacité énergétique, d'identifier les synergies entre les réseaux d'approvisionnement énergétique, les méthodes et outils des sciences de l'information géographique se révèlent nécessaires, voire indispensables. En première intention, les méthodes de gestion et d'analyse spatiale qu'ils proposent peuvent répondre non seulement à des besoins en termes de planification et de prospective, mais aussi de monitoring opérationnel des entités énergétiques relevant de la demande aussi bien que de l'approvisionnement, des autorités en charge du territoire et de ses constituants physiques (bâtiments, sites industriels) comme des entreprises assurant l'alimentation énergétique de ces derniers (Capezzali et al., 2014).
- 44 Par ailleurs, les outils de gestion et d'analyse de données spatio-temporelles peuvent, en couplant traitement de données vectorielles et matricielles¹² (à l'image des systèmes d'imagerie médicale), permettre d'effectuer un dépistage des dysfonctionnements d'un territoire donné et, sur la base d'approches multi-scalaires, d'analyser les réseaux locaux de distribution (Puerto et al., 2015). Ce type d'analyse permettrait notamment de mettre en évidence des problèmes divers (par rapport à un ensemble d'indicateurs) en lien avec la morphologie du réseau, les structures spatiales, les rythmes et caractéristiques de consommation, ou encore de quantifier l'impact d'un changement affectant la distribution ou la consommation. À ce titre, l'interopérabilité entre systèmes d'information territoriaux et systèmes d'information énergétiques apparaît comme un atout, tant pour l'élaboration de diagnostics que dans le cadre de la planification énergétique et de la gestion « quotidienne » de l'équilibre distribution - consommation. Tout comme la médecine moderne ne peut plus se passer des technologies les plus

avancées d'exploration et d'analyse de données et d'imagerie médicale (y compris les aspects liés à la communication électronique des résultats), les systèmes énergétiques territoriaux devraient tirer avantage d'outils informatiques couplant géomatique, gestion de données complexes (multi-sources et hétérogènes) avec des méthodes d'analyse et d'intégration énergétique et territoriale.

Conclusions et perspectives de recherche

45 Les exigences que nous imposent aujourd'hui les enjeux énergétiques et environnementaux et les immanquables interrogations qui se posent face aux difficultés que nous avons à infléchir les courbes de consommation d'énergie doivent nous amener à revoir notre vision des relations énergie et territoire. Ces relations nous conduisent, sur la base d'approches systémiques, transdisciplinaires et multi-échelles, à repenser les organisations et les structures territoriales au filtre d'une lecture plus énergétique des processus à l'œuvre. Dans ce contexte, et à l'instar de nombreux travaux menés dans les domaines de l'urbanisme, des transports/mobilité et de la géographie, les pistes de recherche ouvertes par les analogies existant entre fonctionnements biologiques et principes thermodynamiques d'une part et entre structures et processus territoriaux d'autre part laissent entrevoir des perspectives innovantes pour mener à bien les processus de transition énergétique :

- En améliorant la compréhension du rôle des réseaux de distribution d'énergie dans les territoires et leur influence sur les dynamiques d'auto-organisation qui les caractérisent, nous pensons pouvoir proposer des pistes d'action en matière de gestion des réseaux, d'organisation, de fonctionnement et de déploiement et/ou de conservation des infrastructures. Cet objectif implique de valider l'hypothèse que la structure, la forme et les modes de fonctionnement des réseaux énergétiques ont une influence sur l'évolution des territoires par le biais de mécanismes d'anabolisme/catabolisme. Cette validation est envisagée à partir de l'étude diachronique de l'évolution conjointe de réseaux de distribution d'énergie, de données renseignant les phénomènes de croissance urbaine et d'informations sur l'évolution démographique, l'activité économique et la production/consommation d'énergie et de matière, en mobilisant notamment les méthodes issues de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Nous excluons cependant de cette approche la ressource énergétique que constitue l'approvisionnement alimentaire qui, même si cette ressource représente une composante fondamentale du système énergétique territorial, nous imposerait de démultiplier nos champs de recherche. Nous proposons d'appliquer notre approche à trois territoires, deux d'entre eux permettront de caractériser une situation urbaine dense, et une situation à dominante mixte (rurbaine) dans un pays industrialisé. Un troisième territoire où les réseaux et les technologies énergétiques sont émergents ou encore peu développés complétera l'application. Au-delà du choix de profils de territoires fortement discriminants, nous devons prendre en considération le caractère nécessairement multi-échelles de nos zones d'étude, l'entrée énergétique imposant de fait de raisonner sur la base de la prise en compte de systèmes ouverts entretenant des relations fortes avec leurs environnements du local au global.
- En proposant à terme des modèles de régulation et d'adaptation des flux énergétiques au regard de l'évolution des systèmes territoriaux au-delà de l'efficacité des techniques d'adaptation de l'offre à la demande, partant du double constat d'une régulation des réseaux par la consommation et d'une régulation de la consommation par les réseaux. Cette

approche de la régulation s'appuie sur trois éléments principaux : la géométrie des infrastructures de distribution énergétique influençant les consommations des territoires et ses propriétés permettant redondance et de ce fait sécurisation et adaptation, notamment par la mise en place de délestage ; les caractéristiques de l'énergie distribuée, notamment sa densité¹³ et son prix, qui influencent fortement les consommations¹⁴ ; l'environnement et notamment les structures de consommation et de distributions préexistantes qui conditionnent l'évolution des infrastructures.

- 46 Ces propositions impliquent une maîtrise à large spectre des bases informationnelles renseignant les systèmes énergétiques territoriaux, à l'image du dispositif Observatoire et prospective territoriale énergétique à l'échelle régionale (OPTTEER)¹⁵ et plus spécifiquement les réseaux énergétiques d'une part et la production de données territoriales nécessaires à la régulation des flux d'autre part (de Sède-Marceau et Servigne, 2017 ; à paraître). Sur ce volet¹⁶ nous proposons la formalisation et le prototypage d'une approche de monitoring énergétique territorial. Au-delà du suivi « offre/demande » que permettent les dispositifs de smart metering, cette approche, basée sur l'interopérabilité de systèmes d'information territoriaux et énergétiques et de ce fait sur une intégration des dimensions sociétales, technologiques et environnementales, pourrait contribuer par la régulation, au maintien d'un état stationnaire énergétiquement sobre des systèmes territoriaux autour d'un équilibre thermodynamique.
- 47 Enfin, au-delà de ces réflexions et propositions conceptuelles, tant méthodologiques que techniques, notre approche et les hypothèses qui la sous-tendent doivent nous amener à nous questionner sur les implications épistémologiques d'une telle posture. Comme nous l'avons souligné, le recours aux analogies, à commencer par l'analogie, aux origines de l'écologie, entre systèmes économiques et systèmes naturels, doit être discuté comme l'a été la transposition des principes de fonctionnement des systèmes naturels aux systèmes industriels. Les réflexions concernant cette analogie ont montré, comme le souligne (Opoku et al., 2006), combien ce parti pris, en plaçant le produit au cœur des approches d'écologie industrielle, révèle les idéologies à l'œuvre. S'adossant au « déterminisme technologique et au « libéralisme de marché », elles induisent notamment une coupure forte entre les sphères sociales et la technologie en confiant de manière plus ou moins affirmée les enjeux liés aux interactions entre industries et environnement à la sphère de l'ingénierie. Bien que l'on constate l'absence de consensus concernant les pratiques, notamment politiques (Dupuy, 2011), nos travaux de recherche s'inscrivent, en amont des idéologies et des enjeux politiques et économiques, dans une démarche explicative, de décryptage d'un système complexe dont nous posons l'hypothèse que la structure et les dynamiques sont conditionnés par les flux énergétiques qui le traversent¹⁷. Notre ambition est davantage d'identifier les variables déterminantes des systèmes énergétiques territoriaux pour une meilleure identification des leviers capables d'influencer leurs dynamiques et de favoriser ainsi la mise en œuvre d'approches d'aide à la décision « non idéologique ».
- 48 Ainsi, au-delà de la pertinence même de l'analogie, c'est bien des systèmes de représentation dont il s'agit, prouvant si cela était nécessaire, leur poids dans la conception des concepts et au-delà des méthodes élaborées par nos systèmes sociétaux pour se maintenir et évoluer. Le postulat central de nos travaux est organiciste. Il repose sur l'hypothèse que nos systèmes territoriaux doivent être appréhendés comme un tout organique et sont caractérisés par des processus et des organisations répondant aux

principes énoncés par la biologie et soumis aux lois de la thermodynamique des systèmes ouverts. Ce parti pris, s'il doit encore être argumenté, s'appuie sur un faisceau d'éléments validés par un large spectre disciplinaire. Et c'est là toute la difficulté à la fois de sa formulation et de son opérationnalité. Sur quelles bases en effet construire ce nouvel édifice alors même que nous ne disposons pas toujours des moyens d'en capter les fondements par manque de transdisciplinarité voire d'intégration sémantique et conceptuelle ? Les limites d'une telle approche tiennent donc tout autant aux barrières disciplinaires et aux méthodes et outils qu'elles mobilisent qu'aux modèles de représentations qui les sous-tendent et qui en limitent la portée. C'est pourquoi, en complément des concepts et des solutions méthodologiques proposées visant à une meilleure compréhension du rôle des systèmes énergétiques dans les territoires, nous affirmons l'intérêt de développer les moyens informationnels d'interopérabilité et d'intégration sémantique nécessaires à la mise en œuvre de ce nouveau paradigme.

BIBLIOGRAPHIE

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), B. Bailly, H. Hainaut, L.-A. Mazaud et C. Suaud, 2016, Approche intégrée et multicritère de la modélisation – Éléments de cadrage pour la gestion des données territoriales, Rapport d'étude, 82 p., [en ligne] URL : <http://www.ademe.fr/approche-integree-multicriteres-outils-daide-a-decision-a-vocation-territoriale-elements-cadrage-gestion-donnees-territoriales>
- Ayres Robert, U., 1998, Eco-thermodynamic : Economic and second law, Ecological economic, pp. 189-209
- Balez, A. et J. Reunkrilerk, 2013, Écosystèmes et territoires urbains : impossible conciliation ?, Développement durable et territoires [En ligne], vol. 4, n 2 | Juillet 2013, URL : <http://developpementdurable.revues.org/9853>; DOI : 10.4000/developpementdurable.9853
- Barles, S., 2008, Comprendre et maîtriser le métabolisme urbain et l'empreinte environnementale des villes. Responsabilité et environnement, n 52, Octobre 2008.
- Barles, S., 2014, L'écologie territoriale et les enjeux de la dématérialisation des sociétés : l'apport de l'analyse des flux de matières, Développement durable et territoires [En ligne], vol. 5, n 1 | Fév.2014, URL : <http://developpementdurable.revues.org/10090>; DOI : 10.4000/developpementdurable.10090
- Batty, M. et P. Longley, 1994, Fractal Cities, A Geometry of Form and Function. London and San Diego, Académie Press.
- Beaurain, C., 2008, La construction d'un territoire à partir des ressources environnementales : l'exemple de l'agglomération dunkerquoise, Géographie, économie, société [En ligne], vol. 10 n 3, p. 365-384, URL : www.cairn.info/revue-geographie-economie-societe-2008-3-page-365.htm. DOI : 10.3166/ges.10.365-384
- Beaurain, C. et S. Brulot, 2011, L'écologie industrielle comme processus de développement territorial : une lecture par la proximité, Revue d'Économie Régionale & Urbaine [En ligne], vol 2,

- avril 2011, p. 313-340, URL : www.cairn.info/revue-d-economie-regionale-et-urbaine-2011-2-page-313.htm, DOI : 10.3917/reru.112.0313
- Bergmeier, M., 2003, The history of waste energy recovery in Germany since 1920, *Energy* 28-2003, p. 1359-1374
- Berthou, T., P. Stabat, R. Salvazet et D. Marchio, 2012, Comparaison de modèles linéaires inverses pour la mise en place de stratégies d'effacement, XXXe Rencontre AUGCIBPSA Chambéry, Savoie.
- Bertrand C. et G. Bertrand, 1992, La géographie et les sciences de la nature, Encyclopédie de Géographie, éditions Economica, pp. 109-127.
- Bobin, J-L., 2013, Perspectives énergétiques à l'horizon 2100, EDP Sciences, 277 p.
- Boyer, H., 1993, Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles, INSA Lyon, HAL Id : tel-00757022, version 1
- Broc, J-S., 2006, L'évaluation ex-post des opérations locales de maîtrise de la demande en énergie - Etat de l'art, méthodes bottom-up, exemples appliqués et approche du développement d'une culture pratique de l'évaluation. Énergie électrique, Thèse de l'École nationale supérieure des mines de Paris.
- Brulot, S., M. Maillefert et J. Joubert, 2014, Stratégies d'acteurs et gouvernance des démarches d'écologie industrielle et territoriale, Développement durable et territoires [En ligne], vol. 5, n 1 | Février 2014, URL : <http://developpementdurable.revues.org/10082>; DOI : 10.4000/developpementdurable.10082
- Capezzali, C., G. Cherix, L. Darmayan, S. Restani et P. Puerto, 2014, Evolution of and additional functionalities to the city energy planning platform MEU, International Gas Union Research Conference (IGRC 2014), Copenhagen, Denmark, 2014
- Cherix, G., M. Capezzali et J. Rager, 2015, Territorial energy system : A methodological approach and case study. Proceedings of the 10th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, SDEWES2015.0700, 1-20 (2015)
- Claval, P., 1969, Chroniques de géographie économique IV : la localisation des activités industrielles, *Revue de géographie de l'Est*, 1969, Vol 9, n 1, p. 187-214.
- Clergeau, P., 2011, Ville et biodiversité : les enseignements d'une recherche pluridisciplinaire, Presses Universitaires de Rennes, pp. 105-122
- Coutard, O., 2009, Les réseaux transformés par leurs marges : développement et ambivalence des techniques « décentralisées », *Flux* 2009 2-3, no 76-77
- Danish Board of District Heating (DBDH), 2016, District heating history, [En ligne] URL : <http://dbdh.dk/district-heating-history/>
- Darmayan, L., P. Puerto, G. Cherix et M. Capezzali, 2016, Une plateforme web cartographique pour la planification de la politique énergétique locale, *Aqua & Gas* n 6, Réseau et distribution 57, 10 p.
- Decker, E. H., S. Elliott, F. A. Smith, D. R. Blake et F. Sherwood Rowland, 2000, Energy and material flow through the urban ecosystem, *Annu. Rev. Energy Environ*, 25, pp. 685-740
- de Sède-Marceau, M-H., 2015, Les verrous informationnels de la transition énergétique, communication orale : Rencontres Décryptageo, Jun 2015, Marne-la-Vallée, France.
- de Sède-Marceau M-H. et S. Servigne, 2017, Introduction du numéro spécial : La transition énergétique. Enjeux informationnels et cognitifs, *Revue Internationale de Géomatique*, Vol 27 n 1, janvier-mars 2017

- de Sède-Marceau M-H., S. François et B. Pauc, (à paraître), OPTEER, une expérience de construction collective d'un dispositif de connaissance et d'analyse territoriale par et pour les acteurs de la transition énergétique, à paraître dans la Revue Internationale de Géomatique
- Diemer A. et S. Labrune, 2007, L'écologie industrielle : quand l'écosystème industriel devient un vecteur du développement durable, Développement durable et territoires [En ligne], Varia, URL : <http://developpementdurable.revues.org/4121>; DOI: 10.4000/developpementdurable.4121
- Dupuy, G., 1984, Villes, systèmes et réseaux : Le rôle historique des techniques urbaines Réseaux 1984.
- Dupuy, G., 2011, Fracture et dépendance : l'enfer des réseaux ?, Flux [En ligne], 2011/1 n 83, p. 6-23, URL : <http://www.cairn.info/revue-flux1-2011-1-page-6.htm>
- Ehrenfeld, J.R., 1997, Industrial Ecology : a framework for product and process design, Journal of Cleaner Production, vol. 5, n 1-2, pp. 87-95.
- Erkman, S., 2004, Vers une écologie industrielle – Comment mettre en pratique le développement durable dans une société hyper-industrielle, Ed Charles Léopold Mayer, 258 p.
- Favrat, D., 1990, La gestion énergétique face à l'environnement, Leçon inaugurale, Polyrama n 87, L'homme, la ville, les nombres, la mémoire, l'énergie, EPFL
- Fazlollahi S., 2014, Multi-objectives, multi-period optimization of district energy systems : 1 selection of typical operating periods, [En ligne] URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135414000751>
- Fléty, Y., 2014, Vers une mise en observation des systèmes énergétiques territoriaux. Une approche géographique pour territorialiser l'énergie. Thèse de géographie, laboratoire ThéMA, UMR-6049, CNRS et Université de Franche-Comté
- Frankhauser, P., C. Tannier, G. Vuidel et H. Houot, 2007, Approche fractale de l'urbanisation - Méthodes d'analyse d'accessibilité et simulations multi-échelles, communication orale : 11th World Conference on Transportation Research - Septièmes rencontres francophones Est-Ouest de socio-économie des transports, Jun 2007, Berkeley, Californie, Etats-Unis. P. 21, [En ligne] URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/halshs-00461655>
- Garabuau-Moussaoui, I. et M. Pierre (dir.), 2016, Pratiques sociales et usages de l'énergie , Paris, Lavoisier, Editions Tec & Doc, coll. « Socio-économie de l'énergie », 253 p.
- Gentelle, P., 1992. Géographie et archéologie, Encyclopédie de Géographie, éditions Economica, pp. 222-233
- Goergescu -Roegen, N., 1986, The entropy law and the economic process in Retrospect Vol XII n 1.
- Godinot, S., 2011, Les plans climat énergie territoriaux : voies d'appropriation du facteur 4 par les collectivités et les acteurs locaux ?, Développement durable et territoires [En ligne], vol. 2, n 1 Mars 2011, URL : <http://developpementdurable.revues.org/8874>; DOI : 10.4000/developpementdurable.8874
- Grasland, C. et S. de Ruffray, 2014, Chroniques mar(S/L)iennes : le territoire comme agrégateur spatio-temporel de trajectoires, Proceeding : 2e colloque international « Fronts et frontières des sciences du territoire - Frontiers and boundaries of territorial sciences, 27, 28 mars 2014, GIS Collège international des sciences du territoire, Paris, pp. 210-217, URL : <https://calenda.org/280882?file=1>

- Hess, G., 2009, L'écosystème industriel. Difficulté épistémologique d'une telle analogie, *Natures Sciences Sociétés* [En ligne], vol. 17 n 1, URL : <http://www.cairn.info/revue-natures-sciences-sociétés-2009-1-page-40.htm>
- Jeong H., B. Tombor, R. Albert, Z. N. Oltvai et A.-L. Barabási, 2000, The large-scale organization of metabolic networks, *Nature* 407, pp. 651-654
- Jouffe Y. et M.-H. Massot, 2013, Vulnérabilités sociales dans la transition énergétique aux croisements de l'habitat et de la mobilité quotidienne, dans : Van Ypersele, J.-P. et M. Hudon (dir.), 1er Congrès interdisciplinaire du Développement Durable, Quelle transition pour nos sociétés ? Thème 3 - Logement et aménagement du territoire, Namur, Belgique.
- Laigle, L., M. Peter, A.S. Fulda, T. Bachmann, J. Laterrasse, M. Farah, S. Poutrel et S. Aulagnier (Coord.), 2012, État de l'art en Europe : apports et limites des Plans climat-énergie territoriaux à l'aune des connaissances scientifiques. Tome 1 : État des connaissances scientifiques : quelles relations entre formes urbaines, mobilités, consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre ?, ANR Aspect 2050, nov. 2012, 140 p.
- Lambert, M.-L., C. Demazeux et M. Gallafrio, 2016, Climat urbain, énergie et droit de l'urbanisme - le SCOT, 2016, [En ligne] URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354275>
- Lallemand, A., 2007, Énergie, Exergie, économie, thermodynamique, [En ligne] URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/ HAL-00189701>
- Lindeman, R. L., 1942, The trophic dynamic aspect of ecology, *Ecology* 23 num 4, pp. 399-417.
- Liu, X., N. Jenkins, J. Wu et A. Bagdanavicius, 2014, Combined Analysis of Electricity and Heat Networks, *Energy Procedia* 61, pp. 155-159
- Maïza, M., 2008, Énergie, réseaux et formes urbaines, *Cahier de l'IAURIF* n 147, pp. 174-179
- Marechal, F., C. Weber et D. Favrat, 2008, Multi-Objective Design and Optimisation of Urban Energy Systems, dans : E. N. Pistikopoulos, M. C. Georgiadis et E. S. Kikkinides (Eds), *Energy Systems Engineering*, Série : Process Systems Engineering 5, Weinheim : Wiley, 2008, p. 39-81.
- Morowitz, H., 1968, *Energy flow in biology ; biological organization as a problem in thermal physics*, New York (N.Y.) : Academic press, 179 p.
- Newman, P. et J. Kenworthy, 1989, Gasoline Consumption and Cities : A Comparison of U.S. Cities with a Global Survey, *Journal of the American Planning Association*, vol. 5 num 1 , pp. 24-37
- Newman, P.W.G., 1999, Sustainability and cities : extending the metabolism model, *Landscape and Urban Planning*, vol 44 num 4, pp. 219-226.
- Nijkamp, P. et A. Reggiani, 1995, Non-linear evolution of dynamic spatial systems. The relevance of chaos and ecologically-based models, *Regional Science and Urban Economics*, Vol 25 num 2, April 1995, pp. 183-210.
- Noucher, M. et M.-H. de Sède-Marceau, 2010, Toward a socio-cognitive approach of spatial data co-production. "Grand Ouest" days of Territorial Intelligence IT-GO, ENTI 24-25 mars 2010, Mar 2010, Nantes-Rennes.
- Odum, E. P., 1953, *Fundamentals of ecology*, W. B. Saunders, Philadelphia, xii + 384 p.
- Opoku Hilde, N. et M. Keitsch Martina, 2006, Une approche objective de la durabilité ? Théorie des implications scientifiques et politiques de l'écologie industrielle, *Ecologie & politique* [En ligne], vol 1 no 32, pp. 141-152, URL : www.cairn.info/revue-ecologie-et-politique1-2006-1-page-141.htm;
- DOI : 10.3917/ecopo.032.0141.

- Palensky, P. et D. Dietrich, 2011, Demand Side Management : Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol 7 no 3, pp. 1551-3203
- Pecqueur, B. et V. Peyrache-Gadeau, 2010, Fondements interdisciplinaires et systémiques de l'approche territoriale Introduction, Revue d'Économie Régionale et Urbaine [En ligne], vol 4, octobre 2010, pp. 613-623, URL : www.cairn.info/revue-d-economie-regionale-et-urbaine-2010-4-page-613.htm. DOI : 10.3917/reru.104.0613
- Puerto, P., G. Cherix, L. Darmayan, M. Pernet et M. Capezzali, 2015, Towards pre-dimensioning of natural gas networks on a web-platform, 26th World Gas Conference (WGC 2015), Paris, France.
- Pumain, D., L. Sanders et T. Saint-Julien, 1989, Villes et auto-organisation, Paris, Economica.
- Pumain, D., 1998, Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain, Cahiers de géographie du Québec, Vol 42 num 117, pp. 349-366, <http://id.erudit.org/iderudit/022762ar>; DOI : 10.7202/022762ar
- Price, C. A., J. S. Weitz, V. M. Savage, J. Stegen, A. Clarke, D. A. Coomes, P. S. Dodds, R. S. Etienne, A. J. Kerkhoff, K. McCulloh, K. J. Niklas, H. Olff et N. G. Swenson, 2012, Testing the metabolic theory of ecology ; Ecology letters, vol 15 num 12, December 2012, pp. 1465-1474
- Prigogine, I. et J-M. Wiame, 1946, Biologie et thermodynamique des phénomènes irréversibles, Experiencia Vol 2 num 11, Nov. 1946, pp. 451-453.
- Prigogine, I. et I. Stengers 1979, La Nouvelle Alliance, Gallimard, Paris.
- Prigogine, I. 1994, Les lois du chaos. Editions Champs Flammarion.
- Prigogine, I., 2000, La thermodynamique de la vie, La recherche, n 331, mai 2000.
- Querrien A. et M. F. Mattei (Dir.), 2007, La ville dans la transition énergétique, dans : les annales de la recherche urbaine, num103, Plan urbanisme construction architecture (PUCA), 224 p.
- Raffestin, C., 1984, Ecogénèse territoriale et territorialité. Espace, jeux et enjeux, dans : Auriac F., Brunet R., (Dir.), Fayard et Fondation Diderot, pp. 175-185.
- Raineau, L., 2001, Vers une transition énergétique, Nature Sciences sociétés vol 19 num 2, pp. 133-143
- Rizet, C. et B. Keita, 2005, Chaînes logistiques et consommation d'énergie : cas du yaourt et du jean, Rapport de recherche 2005, 92 p., [En ligne] URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/hal-00546042>
- Roddier, F., 2012, Thermodynamique de l'évolution : Un essai de thermo-bio-sociologie, Parole Éditions,
- Rosey, A., 2009, Réduction de la consommation d'énergie : approche thermodynamique, Cahier IDées
- Ruwet, J-C., 2016, Territoire : Ethologie, dans : Encyclopedia Universalis
- Salat, S., L. Bourdic, F. Labbé et K. Levy, 2013, Réussir la transition énergétique dans les territoires, Institut des Morphologies Urbaines et des Systèmes Complexes, CdC, p. 4
- Santamouris, M., 2004, Sous la direction de, Cooling the city : rafraichir la ville, Ecoles des Mines de Paris,
- Schwarz, E., 1997, Summary of the main features of a holistic metamodel to interpret the emergence, the evolution and the functioning of viable self-organizing systems, Wilby J.M. (Eds),

Proceedings of the 40 th Annual Meeting of the International Society for the Systems Science, Budapest 1997, 16 p.

Tannier, C., 2009, Formes de villes optimales, formes de villes durables. Réflexions à partir de l'étude de la ville fractale, Espaces et sociétés [En ligne], vol 3 num 138, pp. 153-171, URL : www.cairn.info/revue-espaces-et-societes-2009-3-page-153.htm. DOI : 10.3917/esp.138.0153.

Toussaint, B., 2011, Thermodynamique du vivant, cours université Joseph Fourier-Grenoble, [En ligne] URL : http://www.uvp.univ-paris5.fr/wikni/docvideos/grenoble_112/toussaint_bertrand_P02/index.htm

Vivien, F.-D., 2005, Les théories énergétiques de l'écologie, Ecorev Revue critique d'écologie politique num 20, Énergie, à contre-courant, 88 p.

NOTES

1. Le concept d'intelligence territoriale vise à identifier, comprendre et intégrer l'ensemble des processus informationnels et cognitifs, leurs interactions et leurs impacts sur la décision, l'action et le territoire. C'est un domaine de recherche interdisciplinaire (Géographie – Systémique – Communication – Géomatique - Sociométrie...)
2. Sachant que l'énergie est définie comme ce qui permet d'effectuer un travail. Plus précisément, c'est une grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (loi de conservation) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction (Larousse).
3. La dissipation de l'énergie est le passage d'une forme d'énergie à une autre, caractérisée par un phénomène d'irréversibilité (on ne peut pas récupérer de l'énergie cinétique qui se dissipe en chaleur par exemple)
4. L'instabilité de Rayleigh-Bénard désigne des mouvements thermodynamiques convectifs apparaissant pour un fluide soumis à un gradient de température conditionné par l'atteinte d'une valeur de température critique correspondant au nombre de Rayleigh.
5. L'entropie désigne une fonction d'état servant à mesurer le désordre d'un système.
6. L'écologie industrielle, considérant le système économique comme un écosystème, vise à le faire évoluer vers des modes de fonctionnement en boucle, les déchets des uns devenant les ressources des autres, d'où le développement des approches bilanciées.
7. Kleiber a observé que la puissance P requise pour la survie d'un animal était proportionnelle à sa masse M à la puissance $3/4$: $P = k \cdot M^{3/4}$, où k est une constante de proportionnalité.
8. Les modèles « transports - urbanisme », que l'on trouve dans la littérature anglo-saxonne sous l'abréviation LUTI (Land Use Transport Interaction), ont pour objectif de modéliser les interactions entre les systèmes de transports et l'occupation des sols.
9. Stockage de la surproduction des énergies renouvelables grâce à leur transformation en hydrogène ou en méthane de synthèse.
10. Villes participant au projet européen « IntegrCiTy » (ERANET ENSCC, Joint Programming Initiative Urban Europe) coordonné par l'Energy Center de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), [en ligne] URL : <http://energycenter.epfl.ch/integr-city-fr>
11. IntegrCiTy est le résultat d'un appel à projets de ERA-NET Cofund Smart Urban Futures sur des sujets liés aux villes intelligentes : concepts et stratégies pour une transformation urbaine intelligente, croissance et grignotage ; nouvelle dynamique des services publics ; communautés urbaines inclusives, dynamiques et accessibles. Il fait partie de l'Initiative de programmation conjointe Urban Europe. Son but est de créer des zones urbaines attrayantes, durables et

économiquement viables, dans lesquelles les citoyens européens, leurs communautés et leur environnement peuvent prospérer.

12. Analyse d'image diachronique d'extension des réseaux et de croissance urbaine, application de la théorie des graphes à l'analyse des réseaux de distribution ...

13. La densité énergétique représente l'énergie par unité de volume

14. La régulation des consommations énergétiques par la tarification est déjà largement pratiquée

15. [en ligne] URL : <http://opteer.org/>

16. En référence au principe thermodynamique validant la relation entre information et augmentation de la dissipation de l'énergie et donc amélioration de l'exergie d'un point de vue thermodynamique et de l'efficacité d'un point de vue énergétique

17. Et même si certaines infrastructures sont conditionnées par des enjeux politiques, les réseaux énergétiques se sont développés indépendamment des régimes politiques.

RÉSUMÉS

Dans le contexte de transition énergétique et de crise environnementale actuel, les intérêts des approches territoriales et systémiques de l'énergie semblent aujourd'hui admis. Cependant et malgré les nombreuses avancées dans les domaines technologiques, en matière d'urbanisme et d'aménagement ou bien encore en termes d'approches psycho-sociales et comportementales, les courbes de consommations énergétiques peinent à s'infléchir. Fort de ce constat, nous posons l'hypothèse, sur la base d'éléments théoriques empruntés à la thermodynamique et à la biologie, du rôle potentiel que pourraient jouer les réseaux de distribution énergétique, leurs caractéristiques, leur morphologie et leur dynamique sur les comportements énergétiques des territoires favorisant ainsi des organisations et des fonctionnements territoriaux énergétiquement plus sobres.

In the context of energy transition and current environmental crisis, the interest of local and systemic approaches to energy issues seems admitted today. However, despite the many advances in all technology areas both in terms of planning and development or even in terms of psycho-social and behavioral approaches, the curves of energy consumption are struggling to curb. With this in mind, we hypothesize, based on theoretical elements from thermodynamics and biology, the potential role of energy distribution networks, their characteristics, their morphology and dynamics thus promoting increasingly efficient territorial organizations and operations.

INDEX

Keywords : energy networks, thermodynamic, territorial metabolism, rational use of energy, regulation

Mots-clés : réseaux énergétiques, thermodynamique, métabolisme territorial, sobriété énergétique, régulation

AUTEURS

PAUL-MARIE GUINCHARD

Laboratoire ThéMA, UMR-6049, Université de Bourgogne Franche-Comté. 32 rue Mégevand,
F-25030, Besançon, France, courriel : paul-marie.guinchard@univ-fcomte.fr

MARIE-HÉLÈNE DE SÈDE-MARCEAU

Laboratoire ThéMA, UMR-6049, Université de Bourgogne Franche-Comté. 32 rue Mégevand,
F-25030, Besançon, France, courriel : marie-helene.de-sede-marceau@univ-fcomte.fr

MASSIMILIANO CAPEZZALI

Haute école d'ingénierie et de gestion du Canton de Vaud, Département technologies
industrielles, Institut d'énergie et systèmes électriques, Route de Cheseaux 1 CH-1401 Yverdon-
les-Bains, France, courriel : massimiliano.capezzali@heig-vd.ch