

ÉCOLOGIE TERRITORIALE ET MÉTABOLISME URBAIN : QUELQUES ENJEUX DE LA TRANSITION SOCIOÉCOLOGIQUE

[Sabine Barles](#)

Armand Colin | « [Revue d'Économie Régionale & Urbaine](#) »

2017/5 Décembre | pages 819 à 836

ISSN 0180-7307

ISBN 9782200931346

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://www.cairn.info/revue-d-economie-regionale-et-urbaine-2017-5-page-819.htm>

Distribution électronique Cairn.info pour Armand Colin.

© Armand Colin. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

Écologie territoriale et métabolisme urbain : quelques enjeux de la transition socioécologique

Territorial ecology and urban metabolism: some issues at stake in socioecological transition

Sabine BARLES

UMR Géographie-Cités, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
sabine.barles@univ-paris1.fr

Mots-clés : dématérialisation, écologie territoriale, flux de matières et d'énergie, métabolisme urbain, transition socioécologique

Keywords : dematerialization, material and energy flows, socioecological transition, territorial ecology, urban metabolism

Classification JEL : Q0-01

Résumé

L'écologie territoriale permet de caractériser les régimes socioécologiques locaux, dont l'expression est le métabolisme territorial, ensemble des flux d'énergie et de matières mis en jeu par le fonctionnement des sociétés humaines ; elle contribue par là aux discussions sur la transition socioécologique. Posant la dématérialisation comme l'un des objectifs majeurs de cette transition, et après avoir décrit les spécificités du métabolisme urbain, cet article aborde les enjeux qui en découlent dans le cas particulier des villes, en traitant successivement des matières minérales, des éléments biogènes et des relations interterritoriales. Il insiste sur les limites du recyclage tout en mettant l'accent sur l'importance des mines urbaines pour certains matériaux ; sur la nécessaire réinscription des villes dans les grands cycles biogéochimiques ; enfin sur les externalités matérielles urbaines que les politiques locales ne devraient pas ignorer.

Abstract

Territorial ecology is an interdisciplinary field of research that allows for understanding local socio-ecological regimes. The territorial metabolism, i.e. the energy and material flows involved in a particular territory, is the expression of its socio-ecological regime ; its analysis can contribute to discussions on the socio-ecological transition, knowing that dematerialisation can be considered as a key to such a transition. This paper addresses the main issues related to dematerialisation in the particular case of cities and urban metabolism. It treats notably: mineral materials, biogenic substances, inter-territorial links and relationships. The limits of recycling and, at the same time, the importance of urban mines are emphasised, together with the need for reinserting cities in global biogeochemical cycles and to take into account urban material externalities.

- 1 - Introduction

L'écologie territoriale fait des interactions entre sociétés et biosphère l'une des clefs de compréhension du fonctionnement des territoires, et de la comptabilité matérielle et énergétique une alternative à – et *ad minima* le complément indispensable de – la comptabilité monétaire et la monétarisation tous azimuts. Ce champ de recherche se développe depuis quelques années en France et se démarque de l'écologie industrielle et de l'économie circulaire¹ par son ancrage interdisciplinaire, sa distance critique vis-à-vis d'approches à caractère prescriptif, normatif ou opérationnel, et son entrée à la fois sociale, écologique et spatiale, comme le montre l'ouvrage récent dirigé par BUCLET (2015) qui fait le point sur ces travaux.

Dans la perspective ouverte par les études socioécologiques (*socio-ecological studies*) telles que défendues par l'Institut d'Écologie Sociale de Vienne (Autriche) et illustrées dans l'ouvrage de FISCHER-KOWALSKI et HABERL (2007). L'écologie territoriale vise notamment à caractériser les régimes socioécologiques locaux, dont l'expression est le métabolisme territorial, qui désigne l'ensemble des flux d'énergie et de matières mis en jeu par le fonctionnement d'un territoire donné. Le métabolisme est ici conçu comme le produit de l'entrelacement de processus naturels (ou physiques), incluant en particulier les cycles naturels tels ceux de l'eau, du carbone, de l'azote, *etc.*, et de techniques (entendues au sens anthropologique²) issues des sociétés humaines. Par ailleurs, le terme « local » ne présuppose pas d'une échelle pertinente ; il met l'accent sur l'existence, au-delà des caractéristiques globales du régime socioécologique pour une période donnée, sur les spécificités que ce régime peut revêtir dès lors que l'on analyse un territoire particulier.

En effet, si les approches globales identifient, à l'échelle de l'humanité, trois régimes successifs (du feu, agricole et industriel), comme l'ont montré DE VRIES et GOULDSBLOM (2002), ces régimes ne se déclinent ni ne s'enchaînent de la même manière ici ou là (BARLES, 2015 ; BARLES *et al.*, 2015). Cette distinction est d'importance dès lors qu'est abordée la transition socioécologique, qui renvoie à des enjeux tant globaux que locaux, tout en appelant des politiques, des dispositifs et des actions multiscalaires voire interscalaires (EMELIANOFF, 2011). L'analyse des régimes et transitions socioécologiques ne se limite pas, par conséquent, à celle des flux d'énergie et de matières, mais comprend aussi celle de leurs déterminants.

Que la transition socioécologique soit constatée, subie ou encouragée, elle passe par définition (si l'on retient le cadre posé ci-dessus) par une profonde transformation du métabolisme territorial. C'est sur la nature de cette transformation que nous souhaitons nous attarder ici, dans le cas particulier des territoires urbains. En effet, malgré l'invocation constante de la transition comme voie du progrès, mode de sortie de crise, solution aux maux de toute nature qui affectent les sociétés, force est de constater que, d'un point de vue scientifique, les enjeux métaboliques de la transition socioécologique – en premier lieu la dématérialisation³ – demeurent peu explorés, en particulier aux échelles infranationales, ou envisagés de façon parcellaire, ce qui est souvent le cas pour les villes.

Ce texte se base sur des travaux antérieurs conduits par l'auteure, notamment sur l'agglomération parisienne, complétés par une revue sélective de la littérature. Dans un premier temps (2) on mettra en avant les spécificités du métabolisme urbain et l'enjeu majeur de la dématérialisation pour la transition socioécologique. Les modalités de la dématérialisation seront ensuite envisagées à travers trois thématiques essentielles : celle des matières minérales (3), celle des éléments biogènes (4), celle des relations interterritoriales et de l'aménagement (5).

- 2 -

Les spécificités du métabolisme urbain

D'un point de vue socioécologique et quel que soit le régime dominant, il est possible d'affirmer que la ville est le produit d'une spécialisation socio-spatiale engendrant un métabolisme spécifique. Historiens et urbanistes s'accordent à dire que la ville est née de la possibilité, pour une partie de ses habitants au moins, de se libérer de la production de leur subsistance, ce qui leur a permis de développer d'autres activités, d'échange notamment (on nous pardonnera ce raccourci, l'objet de ce texte n'étant pas de proposer une théorie de la naissance des villes), et a favorisé voire nécessité la proximité physique et donc la concentration de ses habitants. Ce constat a quatre conséquences directes en termes de métabolisme : d'une part, la densité des flux énergétiques et matériels entrants et sortants (en J/ha ou t/ha), liée à celle de la population et à l'importance des échanges (et dans certains cas de la production) ; d'autre part, la présence (et souvent la croissance) d'un important stock de matières lié aux nombreux artefacts qui caractérisent la ville (bâtiments, infrastructures, biens, *etc.*) ; en outre, la part significative, voire dominante, des consommations dites finales, souvent associées à des émissions vers la nature ; enfin, l'externalisation d'une partie au moins du métabolisme urbain : c'est d'autres lieux que les villes tirent leur nourriture et leur énergie et une bonne partie de leurs moyens de subsistance. Ces quatre caractéristiques sont consubstantielles aux villes et précèdent les révolutions industrielles. La dernière d'entre elles fait de l'autonomie urbaine en matière de métabolisme un oxymore, puisque la ville n'est possible que par cette externalisation.

Le régime socioécologique industriel s'est progressivement surimposé au régime socioécologique urbain qui a pris la forme que nous lui connaissons aujourd'hui. Le premier, basé sur les énergies fossiles, est caractérisé par un découplage entre la fourniture d'énergie primaire et l'usage des sols (contrairement au régime agraire), par une croissance physique – c'est-à-dire une augmentation des flux et stocks matériels –, et des impacts environnementaux considérables (KRAUSMANN *et al.*, 2008). Le métabolisme industriel est ainsi qualifié de linéaire, les sociétés puisant sans cesse des ressources neuves, souvent non renouvelables, au sein de la biosphère, avant de les lui restituer sous une forme dégradée.

L'industrialisation a eu plusieurs conséquences pour le métabolisme urbain. D'une part, elle a en quelque sorte exacerbé ses traits caractéristiques : les processus

d'urbanisation eux-mêmes se sont amplifiés, conduisant à l'augmentation de la population urbaine et à la multiplication des villes ; elle a de plus conduit à une croissance des flux et stocks urbains de matières. S'y est ajoutée l'externalisation totale du métabolisme urbain (dans les pays développés à tout le moins), si bien que les villes entretiennent des liens métaboliques avec des aires d'approvisionnement et d'émission qui forment un semis de par le monde. L'un des effets de l'industrialisation a en effet été l'éloignement et l'éclatement progressif de ces aires, au profit d'un métabolisme urbain mondialisé. Enfin, le métabolisme urbain n'a pas échappé à la linéarisation. Les *excreta* urbains, devenus au XX^e siècle inutiles, sont abandonnés à la nature, au mieux après avoir été partiellement traités. La linéarisation s'est donc ajoutée à l'externalisation.

Les premiers travaux explicites sur le métabolisme urbain à partir des années 1960 (ODUM, 1963 ; WOLMAN, 1965 ; DUVIGNEAUD, 1974) ont mis l'accent sur ces deux processus de linéarisation et d'externalisation, conçus comme ne faisant qu'un, et ont conduit à la dénonciation des villes tantôt qualifiées de parasites (ODUM, 1963), tantôt de « gigantesque animal immobile » (BOYDEN *et al.*, 1981), tantôt de cancer (AYRES et SIMONIS, 1994). Cette condamnation sans appel a empêché dans un premier temps toute réflexion de fond sur la transformation du métabolisme urbain, et l'on peut faire l'hypothèse que c'est la confusion entre les deux processus précités (linéarisation et externalisation) qui a constitué l'obstacle épistémologique majeur en la matière, au sens où l'entend BACHELARD (1938), puisqu'elle rendait en quelque sorte la ville irrécupérable.

Peut-on aller plus loin aujourd'hui et envisager la dimension urbaine d'une transition socioécologique dont l'objectif serait de rendre compatible le fonctionnement des sociétés avec celui de la biosphère ? Poser cette question revient à se demander quel serait le métabolisme qui permettrait d'atteindre un tel but, et quelle en serait la déclinaison urbaine. L'un des enjeux majeurs de ce point de vue tient en un mot : dématérialisation. En effet, si l'on se réfère aux neuf limites de la planète telles que définies par ROCKSTRÖM *et al.* (2009) – le changement climatique, l'acidification de l'océan, la diminution de la couche d'ozone, la pollution chimique, les aérosols atmosphériques, l'utilisation des eaux douces, le cycle du phosphore, le cycle de l'azote, les transformations de l'usage des sols et la perte de biodiversité –, force est de constater que toutes ou presque renvoient à des questions matérielles. On pourrait y ajouter l'épuisement des ressources aujourd'hui essentielles aux activités humaines, telles que les métaux. La dématérialisation signifierait donc une consommation moindre de matières, associée à une substitution autant que faire se peut du non renouvelable par le renouvelable.

Si nous observons maintenant le métabolisme urbain et ses principales composantes, nous constatons que les principaux flux matériels directs qu'il met en jeu sont au nombre de quatre : l'eau, les matériaux de construction, les combustibles fossiles et les produits agricoles et alimentaires – c'est ce que montrent les analyses de flux de matières conduites sur Paris et son agglomération (BARLES, 2009 et 2014), Genève (ERKMAN, 2005), Lisbonne (ROSADO *et al.*, 2014), et d'autres villes (KENNEDY *et al.*, 2007). En d'autres termes, la dématérialisation en grandes masses devrait porter en

priorité sur ces quatre flux, sans négliger les substances dont la consommation est moindre en masse mais auxquelles sont associés des enjeux en amont (l'extraction et ses effets en termes d'épuisement de la ressource, d'environnement ou de santé publique) et en aval (les rejets et leurs effets multiples) parfois considérables. Il en résulte aussi que le *water-energy-food nexus*⁴, récemment mis en avant dans la littérature scientifique et qui met l'accent sur l'interconnexion existante entre les problématiques de l'eau, de l'énergie et de l'alimentation, passe à côté d'un flux majeur, celui des matériaux de construction.

- 3 -

Recyclage, extraction, reconversion et formes urbaines

Utiliser les sous-produits d'une activité comme matières premières d'une autre est l'un des mots d'ordre que l'écologie industrielle a transmis à l'économie circulaire. L'écosystème industriel mature se caractériserait ainsi par des prélèvements de ressources et une production de déchets tous deux limités, grâce à la circulation matérielle interne au système formé par les sociétés humaines, entre tous les secteurs d'activité et à tous les stades, de la production à la consommation (ERKMAN, 2004). Cette vision s'inscrit dans la perspective plus large des 3 R (pour réduire, réutiliser, recycler), voire des 4 R (pour réduire, réemployer, réparer, recycler), qui prend acte du fait que moindre est la transformation subie par les objets, moindres sont les consommations et pertes énergétiques et matérielles associées à cette transformation. Elle est particulièrement mise en avant en contexte urbain, où l'importance de la consommation finale et les gisements de déchets associés semblent en effet propices à sa mise en œuvre.

La situation actuelle en la matière est loin d'être satisfaisante : pour les départements et/ou régions pour lesquels nous avons réalisé des analyses de flux de matières⁵, le recyclage représente moins de 10 % de la consommation intérieure physique de matière. En d'autres termes, il n'évite aujourd'hui que quelques pourcents de cette consommation. Indépendamment de l'insuffisance des politiques qui lui sont dédiées, l'une des raisons de ces faibles chiffres tient à la nature des flux que les territoires émettent vers la nature. Ils se composent majoritairement d'émissions atmosphériques, elles-mêmes majoritairement composées de dioxyde de carbone, phénomène particulièrement marqué en milieu urbain où les émissions vers l'air représentent plus de 70 % des flux vers la nature, et où elles sont elles-mêmes composées à plus de 95 % voire 98 % de CO₂. Le recyclage, comme les 3 ou 4 R seront donc très loin de permettre une dématérialisation massive, même s'ils sont systématisés.

Il ne faudrait pas en conclure que les politiques en la matière sont inutiles. La récupération sous toutes ses formes des matières internes au système est en effet fondamentale dans le cas des ressources non renouvelables non substituables (c'est-à-dire qui ne peuvent être remplacées par des ressources renouvelables), singulièrement

les matières minérales métalliques ou non métalliques (celle des éléments biogènes est elle aussi essentielle, elle sera abordée plus loin (4)).

Cette thématique est aujourd'hui principalement abordée à travers les politiques visant les matériaux de construction, notamment en France avec les schémas régionaux de carrières qui intègrent les principes de proximité entre production et consommation, de sobriété et de recyclage⁶. Les déchets du bâtiment et des travaux publics (BTP) représentent en effet la majeure partie des déchets urbains (environ les deux tiers en Île-de-France). Leur rôle potentiel en termes de dématérialisation est cependant très variable selon la nature des processus d'urbanisation caractéristiques de l'agglomération étudiée, que BRUNNER (2011) a schématiquement classés en trois grandes catégories : croissance, stabilité et rétraction, qui peuvent se succéder plus ou moins rapidement, et ne doivent pas être assimilés à une vision déterministe de l'urbanisation. Dans le premier cas, la demande de matériaux dépasse largement l'offre de déchets, si bien que la question qui se pose est celle de la dématérialisation absolue : comment mettre en œuvre un urbanisme peu consommateur de matériaux ? Les travaux exploratoires montrent le rôle de la croissance spatiale en la matière : en d'autres termes, il existe une corrélation positive entre étalement urbain et consommation de matériaux de construction (BARLES, 2014). La raison en est relativement simple : les infrastructures nécessaires sont alors plus importantes en termes de linéaires, voire, pour certains réseaux, de capacité. Ce n'est donc pas par le recyclage que la dématérialisation pourra être mise en œuvre, mais bien par une réflexion sur la morphologie et les formes urbaines, et sur une prise en compte du contenu matériel et de la masse de l'urbanisme. Les Suds sont ici particulièrement concernés, puisqu'ils accueilleront l'essentiel de l'urbanisation à venir⁷.

En revanche, pour les agglomérations caractérisées par une relative stabilité démographique et dont l'équipement en infrastructures et services est déjà ou en grande partie réalisé, le recyclage prend tout son sens puisque l'on y rencontre plus de renouvellement urbain que d'urbanisation *stricto sensu*. C'est vrai aussi des villes en situation intermédiaire, comme l'agglomération parisienne où la mise en décharge représente environ deux tiers de la consommation intérieure apparente de matériaux de construction⁸, mais où la demande pourrait significativement augmenter du fait des projets associés au Grand Paris. Pour les villes en décroissance ou rétraction, les démolitions peuvent dépasser la demande, ce qui inciterait à favoriser les échanges entre agglomérations. Dans tous les cas, on mesure l'importance de l'évaluation du gisement, c'est-à-dire du stock de matériaux de construction contenu dans les villes et de son rythme de déstockage, qui a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche depuis quelques années (on en trouvera un bilan dans : AUGISEAU et BARLES, 2017).

La notion de gisement urbain est associée à celle de mine urbaine ou d'extraction urbaine (*urban mining*)⁹. La maternité en est attribuée à JACOBS (1969), qui faisait des villes les principales mines du futur dans son *Economy of cities*, comme le soulignent GRAEDEL (2011) et WALLSTEN (2015). Elle concerne principalement les déchets du BTP et plus encore les métaux. L'enjeu est de taille si l'on considère les conditions géopolitiques associées aux gisements conventionnels dont on annonce par ailleurs l'épuisement à plus ou moins long terme – l'Europe a ainsi identifié

vingt substances critiques, essentiellement des métaux¹⁰. Les gisements urbains sont contenus dans des biens de consommation courante, dans ce cas leur extraction renvoie à la problématique classique du recyclage, ou dans les superstructures, infrastructures et sols urbains. Le stock souterrain, le *Urk World* de WALLSTEN (2015), semble être de loin le plus important, tant le sous-sol abrite de dispositifs techniques abandonnés (*Urk* est une abréviation du mot « déconnecté » en suédois). Ces métaux abandonnés, en coma ou en hibernation – pour reprendre la terminologie de GRAEDEL (2011) – pourraient jouer un rôle majeur à l'avenir, s'ils font l'objet de politiques systématiques (GRAEDEL, 2011), et malgré la relativisation de leur importance en contexte de croissance (LABBÉ, 2013) : ici aussi, la dématérialisation absolue semble s'imposer.

L'extraction urbaine renvoie à la problématique des 3 ou 4 R et pourrait susciter une réflexion plus avancée sur son application aux superstructures et infrastructures urbaines. Si le réemploi en architecture fait l'objet de discussions et a donné lieu à une exposition récente (CHOPPIN et DELON, 2014), il faudrait probablement introduire un continuum qui débiterait avec le réemploi et la réutilisation des bâtiments et des infrastructures eux-mêmes et se poursuivrait par ceux de leurs éléments constitutifs. Dans cette perspective, la reconversion des bâtiments et infrastructures, celle des sols aussi, font partie intégrante du projet de dématérialisation dont elles sont pour l'instant plus ou moins exclues. Pourtant, D'ARIENZO (2015) a bien montré la similitude qui existait dans la prise en charge des matières déchues et des structures délaissées depuis les révolutions industrielles : les *excreta* urbains, comme le bâti ou les infrastructures déclassées, ont fait l'objet d'une intense valorisation par réemploi et recyclage pour les uns, reconversion sous toutes ses formes pour les autres, avant de devenir, au XX^e siècle, des déchets ou des friches. L'abondance des infrastructures abandonnées (les *urks* de WALLSTEN, 2015) devrait nous interroger sur leur utilisation possible qui pour l'instant se fait le plus souvent par démantèlement partiel (comme par exemple lors de la conversion de voies de chemin de fer en promenades).

- 4 -

Des substances biogènes à enjeux

Les éléments ou substances biogènes sont ceux qui contribuent à la vie et constituent les organismes : carbone, hydrogène, oxygène, azote, phosphore, calcium, etc. Ils circulent en permanence entre le vivant et le non vivant, entre les différents compartiments de l'environnement aussi, formant des cycles biogéochimiques interdépendants qui mettent en jeu des pas de temps très variés. L'ouverture des cycles biogéochimiques est l'une des conséquences du métabolisme linéaire des sociétés humaines : les quantités mises en circulation augmentent et le bilan des éléments n'est plus équilibré, occasionnant pénurie ici et excès là. Le carbone illustre très bien cette situation : extraction massive des entrailles de la terre, émission toute aussi massive vers l'air par l'intermédiaire en particulier de la combustion, le tout contribuant au changement climatique et à l'épuisement progressif des ressources. Depuis quelques années, les politiques publiques et d'une façon générale l'attention

citoyenne se sont d'ailleurs concentrées sur le carbone, qui a motivé des politiques plus énergétiques que biogéochimiques ; le développement durable aurait ainsi été éclipsé par le changement climatique, comme l'a notamment montré BÉAL (2011) dans sa thèse portant sur les villes de Nantes, Saint-Étienne, Leicester et Manchester. Cette focalisation est en effet particulièrement sensible en milieu urbain. Elle ne devrait pas faire oublier que d'autres substances sont porteuses d'enjeux au moins aussi importants, parmi lesquelles l'azote et le phosphore, d'ailleurs pointés parmi les neuf limites de la planète de ROCKSTRÖM *et al.* (2009).

L'importance de ces deux substances, eu égard aux changements de l'environnement et à la perte de viabilité du système socioécologique contemporain, a été identifiée et discutée pour l'azote dans les années 1990 (pour une mise en perspective de ces travaux, voir GALLOWAY *et al.*, 2004). Elle est à l'origine de l'expression désormais consacrée de « cascade de l'azote » (GALLOWAY *et al.*, 2003) qui met l'accent sur l'augmentation des quantités d'azote réactif¹¹ mis en circulation par les activités humaines, sur les réactions en chaîne qui en résultent et sur les perturbations qu'elles engendrent. L'azote réactif d'origine anthropique représente aujourd'hui plus de la moitié de l'azote réactif en circulation dans la biosphère, ce qui fait du cycle de l'azote le plus perturbé de tous les cycles biogéochimiques. Son origine se trouve essentiellement – à environ 70 % selon COWLING *et al.* (2001) – dans l'utilisation du procédé Haber-Bosch (breveté en 1909, voir à ce sujet SMIL, 2001), qui permet la fabrication d'engrais et dans une moindre mesure d'explosifs à partir de l'azote de l'air, selon un procédé d'ailleurs très énergivore. Si l'épuisement du gisement n'est pas à craindre, les effets sont nombreux – on parle ainsi des neuf plaies de l'azote (SUTTON *et al.*, 2011) – et vont de la pollution acide à l'eutrophisation en passant par le changement climatique, l'effet sur la santé humaine, la perte de biodiversité, *etc.*

L'intérêt pour le phosphore a émergé au même moment, comme l'ont montré CORDELL *et al.* (2009) dans leur histoire du phosphore. Extraits depuis la seconde moitié du XIX^e siècle du sous-sol, les phosphates fossiles ont contribué, aux côtés de l'azote de l'air et de la potasse tirée du sous-sol, à la démultiplication des matières fertilisantes mobilisables et à l'augmentation sans précédent des rendements agricoles. La mise en circulation de quantités massives de phosphore a des effets environnementaux (eutrophisation notamment) et s'accompagne de l'épuisement progressif des gisements fossiles – il fait partie des substances critiques identifiées par l'Europe (*cf. supra*).

À l'échelle européenne, l'année 1991 a été celle des premières politiques sectorielles contemporaines¹² dédiées à l'azote et au phosphore, avec la directive dite « nitrates »¹³, déclinée en France sous la forme de plusieurs décrets et qui limite, dans les zones agricoles jugées vulnérables, les quantités d'azote épandables : près de la moitié du territoire français est aujourd'hui concernée, principalement au nord de la Loire. Simultanément, la directive relative au traitement des eaux résiduaires urbaines¹⁴ imposait le traitement tertiaire des eaux usées (dénitrification et déphosphatation) aux agglomérations de plus de 10 000 équivalents habitants déversant leurs eaux dans des zones sensibles en termes d'eutrophisation. Enfin, toujours en 1991, un accord cadre entre les entreprises et l'État français visait la teneur en

phosphates des détergents, qui a été considérablement réduite depuis – les rejets domestiques sont ainsi passés de 4 gP par habitant et par jour en 1990 à moins de 2 gP par habitant et par jour en 2010 (TARDIVO, 2013).

Cependant, la question du phosphore comme celle de l'azote demeurent cruciales aujourd'hui. Les politiques conduites sont marquées à la fois par leur caractère sectoriel – avec une déconnection complète entre l'urbain et le rural (cf. section suivante) – et, pour les villes, par des solutions dites de bout de tuyau (*end-of-pipe*, ERKMAN, 2004), c'est-à-dire le traitement des eaux usées, qui engendre lui-même des sous-produits dont la gestion n'est pas aisée (boues d'épuration en particulier). Aujourd'hui, les taux de récupération de l'azote alimentaire urbain restent très faibles : 4 % dans l'agglomération parisienne (rapport entre l'azote récupéré suite au traitement des déchets solides et liquides et l'azote entrant sous forme alimentaire), la stratégie d'épuration des eaux usées ciblant l'élimination (par dénitrification en azote atmosphérique) plutôt que la récupération. Les résultats pour le phosphore sont meilleurs : 33 % (ESCLIER *et al.*, accepté), mais, nous y reviendrons, ne changent pas fondamentalement les problèmes associés à cette ressource non renouvelable : à l'échelle nationale, on estime que la moitié du phosphore utilisé sous forme de fertilisant inorganique est dispersée dans l'environnement, malgré une réduction de la consommation ces dernières années (SENTHILKUMAR *et al.*, 2012).

Plus récemment, quelques frémissements se font sentir. Le Plan Énergie Méthanisation Autonomie Azote (EMAA, 2013) issu de la conférence environnementale de septembre 2012 est centré sur les territoires ruraux. S'il affiche une ambition territoriale, il vise surtout, dans une logique qui demeure finalement sectorielle et ponctuelle, à promouvoir la méthanisation à la ferme des effluents d'élevage et va probablement dans le sens d'une industrialisation accrue de celui-ci. Une approche similaire est en voie de développement en milieu urbain, avec une incitation de plus en plus forte à la récupération et la valorisation des matières organiques présentes dans les déchets, et en particulier avec le tri à la source des biodéchets des gros producteurs¹⁵. Dans le domaine des eaux usées, l'hypothèse d'une récupération à la source est explorée voire mise en œuvre dans plusieurs pays d'Europe (pour un panorama complet des techniques et de leur utilisation, voir : LARSEN *et al.*, 2013), généralement à petite échelle (au sens commun de l'expression). Elle est envisagée pour les bâtiments à construire dans la perspective du Grand Paris et d'une agglomération de quatorze millions d'habitants comme une alternative au traitement classique, dont la capacité atteint la saturation et qui serait par conséquent insuffisant en termes de rejet en Seine¹⁶.

Cependant, la focalisation sur l'énergie conduit parfois à des solutions paradoxales. Les aliments sont en quelque sorte des vecteurs énergétiques pour les citoyens qui les consomment – ils représentent environ 3 300 MJ par personne et par an. Les excréta rejetés ont de ce fait et par nature un faible contenu énergétique – environ 200 MJ par personne et par an (MEDA *et al.*, 2010), à comparer à la consommation actuelle d'énergie technique primaire : environ 160 000 MJ par personne et par an en France en 2015 (SOES, 2017) –, tandis qu'ils contiennent la quasi intégralité de l'azote et du phosphore initial. Pourtant, c'est sur l'énergie résiduelle (qui représente

donc 0,125 % de la consommation énergétique nationale) que portent aujourd'hui beaucoup de projets urbains de valorisation, et non sur les substances biogènes qui constituent un véritable gisement¹⁷.

Force est ainsi de constater qu'il n'existe aujourd'hui de politique intégrée ni pour l'azote, ni pour le phosphore, ni plus généralement de politique biogéochimique¹⁸. Nous avons vu plus haut l'importance de la dématérialisation dans la perspective d'une transition socioécologique. Comment cette notion se décline-t-elle vis-à-vis de substances telles que l'azote et le phosphore ? Quel rôle peuvent jouer les villes en la matière ? Le recyclage constitue certes, comme pour les minéraux évoqués à la section précédente, un enjeu auquel les villes peuvent contribuer, mais là aussi se pose la question de la dématérialisation absolue, seule à même de limiter la circulation des substances, donc à la fois des pratiques agricoles et des pratiques alimentaires¹⁹. La spécialisation des territoires agricoles d'une part, la part des produits animaux dans l'alimentation – dominante en termes de protéines en France, et croissante à l'échelle mondiale – d'autre part, l'industrialisation de l'agriculture, devenue une agriculture minière enfin, devraient être considérées simultanément, d'autant plus qu'elles forment un système. Dans cette perspective, les villes ont un rôle à jouer à la fois comme consommatrices d'aliments et comme productrices de nutriments, ces deux dimensions étant indissociables l'une de l'autre. La réinscription des systèmes agroalimentaires dans les cycles biogéochimiques, dont ils se sont partiellement extraits, passe par là.

- 5 -

Flux indirects, politiques territoriales et interterritoriales

Lier consommation alimentaire et agriculture suggère que si la transition socioécologique passe par la ville, elle ne peut être entièrement contenue en elle. En effet, l'externalisation du métabolisme urbain a un corollaire : l'importance des flux indirects qui lui sont associés. Les consommations matérielles engendrées par l'extraction et la transformation des ressources interviennent pour l'essentiel hors de la ville et les rejets vers la nature qu'elles provoquent viennent s'ajouter à ceux qui sont directement émis par celle-ci. Pour les régions françaises dont les bilans ont été établis, les flux indirects s'élèvent deux à quatre fois l'entrée directe de matières (ressources extraites localement et matières importées sous toutes les formes), et beaucoup plus pour l'eau (quarante-deux fois dans le cas de Bruxelles (ATHANASSIADIS, 2016)). Plus le territoire est dépendant d'autres, plus les flux indirects sont importants : en d'autres termes, la matérialité urbaine s'exprime plus à l'extérieur des villes qu'à l'intérieur de celles-ci. Ne considérer le métabolisme urbain et les politiques susceptibles d'y être dédiées qu'à l'aune des flux directs reviendrait à passer à côté de l'essentiel de cette matérialité.

Les villes peuvent-elles contribuer à la maîtrise de ces flux ? Il faudrait pour cela ne pas limiter la pensée au métabolisme interne – ce qui s'accompagne souvent de

la notion d'autonomie, dont on a vu la contradiction qu'elle porte dès lors que l'on s'intéresse aux territoires urbains –, mais bien les relations métaboliques qui unissent les villes aux territoires qui les approvisionnent. Si nous admettons, comme cela a été indiqué en introduction, que le métabolisme résulte de l'entrelacement de processus naturels et de techniques humaines, nous pouvons en conclure que ces relations métaboliques contiennent une part naturelle et une part technique, technique qui met en jeu ici un grand nombre d'infrastructures qui orientent et écoulent les flux. Les infrastructures jouent ainsi un double rôle dans le métabolisme urbain : d'une part, elles engendrent pour leur construction et leur maintenance des consommations matérielles importantes (*cf. supra*), d'autre part elles contribuent à l'organisation du métabolisme urbain. Issues de la pensée réticulaire du XIX^e siècle, elles sont conçues par certains comme le moyen privilégié de transformer le métabolisme urbain. C'est le parti pris du groupe de travail dédié aux villes de l'International Resource Panel, une émanation du Programme des Nations Unies pour l'Environnement, qui y a consacré un rapport (SWILLING *et al.*, 2013). La critique du modèle réticulaire visant à offrir un accès universel aux ressources (et aux services), en tout lieu et en tout temps est d'ailleurs partiellement expliquée par la montée en puissance des enjeux environnementaux, comme l'a montré COUTARD (2010), puisque ce modèle n'interroge à aucun moment la demande, dont il encourage la croissance, entraînant celle des prélèvements de ressources et des rejets. Cependant, la situation actuelle se caractérise probablement, à l'échelle mondiale, par la poursuite de la réticulation à grande échelle – les projets énergétiques internationaux en sont l'expression la plus emblématique²⁰ –, malgré l'émergence de formes alternatives (sur celles-ci, voir COUTARD et RUTHERFORD, 2015). Quoi qu'il en soit, faire des infrastructures l'outil de la dématérialisation nécessite que celles-ci soient gouvernées en ce sens et de penser la reconfiguration des réseaux et infrastructures de l'écologie territoriale en y intégrant pleinement les enjeux de cette dématérialisation.

Mais poser la question des relations entre fournisseurs et consommateurs et finalement – à travers les flux indirects – de la dette écologique²¹ contractée par les seconds vis-à-vis des premiers, et des moyens de la réduire ou au moins de ne pas l'augmenter, va au-delà. Elle interroge en effet les liens qui existent (ou pas) entre les acteurs de ces deux sphères (la production et la consommation) et de ces deux types de territoires. Le préalable en est la connaissance effective des territoires d'approvisionnement urbains et de la circulation des matières : celle-ci est aujourd'hui lacunaire, malgré le développement de méthodes en la matière²². Cependant, dans la plupart des cas, les liens matériels établis entre les territoires (parce que l'un émet des flux vers l'autre) ne sont pas assortis de liens sociaux (au sens large du terme). Ceci est bien entendu la conséquence de la complexification des marchés, de la multiplication des acteurs de toute nature agissant à des échelles très variées (voire à distance), de la disparité et de la diversité des politiques qui les visent, qui sont souvent très cloisonnées²³. Le grand nombre des acteurs intermédiaires impliqués aux différentes étapes de la gestion des flux annule en quelque sorte le lien matériel direct qui existe entre les territoires, ce d'autant plus que ces acteurs peuvent être a-territoriaux ou extérieurs aux territoires concernés, ou les deux. La marge de manœuvre est donc très faible pour qui voudrait intervenir sur ces liens qui, souvent, n'existent pas, et qu'il faudrait d'abord créer.

L'intérêt pour ces questions semble pourtant émerger à travers quelques initiatives locales. On peut ainsi citer les partenariats (qui prennent des formes très diverses) mis en œuvre pour les circuits courts alimentaires ou la protection des bassins d'alimentation de captage d'eau potable, qui donnent d'ailleurs naissance, dans ce dernier cas, à des politiques qui sont à la fois intersectorielles (entre adduction en eau et agriculture) et interterritoriales (entre ville et campagne), et traduisent par conséquent de nouvelles formes d'interactions entre sectoriel et territorial. Émergent aussi un certain nombre de réflexions autour de l'inter-territorialité (VANIER, 2008), du dialogue secteur-territoire (voir à ce sujet DEBRIE, 2011, p. 184 notamment) et des relations ville-campagne (voir la thèse en cours de Laetitia Verhaeghe, qui porte précisément sur ce sujet). Ces travaux n'abordent cependant pas (encore ?) frontalement le métabolisme urbain. Ils incitent pourtant à penser la nature des relations qui seraient susceptibles de se nouer, ce qui renvoie à l'alternative proposée lors des premières journées du réseau des territorialistes français tenues à Lyon en mars 2016 : « biorégion urbaine vs métropolisation »²⁴ et à la discussion de l'urbain généralisé tel qu'énoncé par Neil BRENNER et l'Urban Theory Lab de l'Harvard Graduate School of Design – qui stipule une généralisation de l'urbain, notamment (mais pas seulement) au motif du contrôle par des acteurs urbains de l'ensemble des ressources planétaires (BRENNER, 2014). En effet, si l'un des enjeux de la transition socioécologique et de la dématérialisation est la réinscription du métabolisme urbain dans des cycles biogéochimiques fermés, et donc la réduction des activités minières et extractives au profit des ressources renouvelables, des liens devront bien être créés pour soutenir ces circulations matérielles alternatives. Cette « mise en politique des flux et circulations », pour reprendre le titre d'une journée d'étude tenue à Lyon en février 2016²⁵, reste largement à faire.

Cet enjeu a une autre conséquence : celle de (re)faire de l'énergie solaire la base de la production des ressources. Celles-ci devraient donc (re)devenir surfaciques en ce sens que leur gisement dépendra de la surface qui leur sera allouée. Cette surface a vocation à augmenter et place sur le devant de la scène l'enjeu de l'affectation des sols, non plus dans la perspective du zonage fonctionnel et abiotique tel qu'il a prévalu au XX^e siècle, mais dans celle du fonctionnement écologique (au sens scientifique du terme) des territoires. De plus, rien ne s'oppose à ce que ces surfaces soient multifonctionnelles et soient aussi bien des lieux de production que des lieux de consommation (c'est ce que l'on observe déjà, mais de façon anecdotique, lorsque l'on dispose des panneaux solaires sur un bâtiment). Les travaux conduits par l'association Négawatt, puis l'ONG Solagro, illustrent cette nécessité. Le scénario Aferres 2050, élaboré par Solagro, explore la possibilité, à l'échelle nationale, d'une utilisation des espaces agricoles et forestiers permettant l'approvisionnement en aliments, énergie et matériaux renouvelables (SOLAGRO, 2014). Il montre l'importance de l'affectation des sols et de l'aménagement, au sens initial et forestier du terme, et renouvelle les relations entre réseaux et flux d'une part, entre territoires d'autre part, entre énergie et matière enfin. Cette question, partiellement abordée lorsque sont dénoncés les effets indirects de la production d'agrocarburants²⁶, reste peu traitée.

Conclusion

Ces quelques pages ne constituent que quelques pistes de réflexion sur la transition socioécologique envisagée à l'aune du métabolisme urbain. Elles contribuent à montrer la distance qui existe entre les politiques qui sont aujourd'hui engagées sous la bannière de l'économie circulaire et les enjeux de la dématérialisation des sociétés. Il faudrait bien sûr aller plus loin dans chacune des directions explorées et en identifier d'autres, pour donner plus de corps à l'analyse : c'est l'invitation sous-jacente à ce texte.

Si les politiques mises en œuvre méritent d'être discutées, si leurs limites sont partiellement connues et résultent notamment de la collision entre les intérêts économiques et les impératifs écologiques, il nous semble que les difficultés de la dématérialisation ont aussi une dimension scientifique. Le chemin semble en effet semé d'obstacles épistémologiques qu'il conviendrait de mieux jauger afin d'éventuellement les surmonter.

La consolidation d'une écologie territoriale telle que nous l'avons définie en introduction passe probablement par là. Si elle nécessite une meilleure connaissance du métabolisme territorial et de ses déterminants naturels et anthropiques, mobilisant par là de nombreuses disciplines scientifiques, elle engage avant tout sur la voie d'une interdisciplinarité radicale. Nous peinons cependant à dépasser, ou tout simplement faire avec, les dichotomies théorique/empirique, expliquer/comprendre, descriptif/prédictif, observation/expérimentation, *etc.* qui contribuent à partager les sciences. Pourtant, le suivi des flux énergétiques et matériels ne peut plus être l'apanage d'un seul champ disciplinaire tant ses déterminants sont imbriqués, si bien qu'il n'est souvent plus possible d'attribuer à l'une ou à l'autre (la nature, la société) la façon du métabolisme territorial. Établir ou rétablir des continuités là où dominent les solutions de continuité, les limites, les frontières constitue ainsi un enjeu aussi bien scientifique que d'action.

Références bibliographiques

- ARNSPERGER C, BOURG D (2016) Vers une économie authentiquement circulaire. Réflexions sur les fondements d'un indicateur de circularité. *Revue de l'OFCE* 145 (1) : 91-125.
- ATHANASSIADIS A (2016) *Toward more comprehensive urban environmental assessments. Exploring the complex relationship between urban and metabolic profiles*. Thèse en art de bâtir et urbanisme, Université libre de Bruxelles et Université de Melbourne.
- AUGISEAU V (2017) *La dimension matérielle de l'urbanisation. Flux et stocks de matériaux en Île-de-France*. Thèse en urbanisme et aménagement, Université de Paris 1.
- AUGISEAU V, BARLES S (2017) Studying construction materials flows and stock: A review. *Resource Conservation and Recycling* 123: 153-164.
- AYRES R-U, SIMONIS U-E (1994) Introduction. In : Ayres R-U, Simonis U-E (eds.) *Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development*. United Nations University Press, Tokyo [en ligne] <http://archive.unu.edu/unupress/unupbooks/80841e/80841E01.htm#Introduction>

- BACHELARD G (1938) *La formation de l'esprit scientifique*. Vrin, Paris.
- BARLES S (2005) *L'invention des déchets urbains, France, 1790-1970*. Champ Vallon, Seyssel.
- BARLES S (2009) Urban Metabolism of Paris and its Region. *Journal of Industrial Ecology* 13(6): 898-913.
- 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 des territoires* 5(1) [en ligne] <http://developpementdurable.revues.org/10090>
- BARLES S (2015) The Main Characteristics of Urban Socio-Ecological Trajectories: Paris (France) from the 18th to the 20th Century. *Ecological Economics* 118: 177-185.
- BARLES S, CERCEAU J, DEBUISSON M (2015) Aussois et la Maurienne, une approche par les trajectoires socioécologiques, XIX^e-XXI^e siècles. In : BUCLET N (dir.) *Essai d'écologie territoriale : L'exemple d'Aussois en Savoie*. Presses du CNRS, Paris : 47-103.
- BÉAL V (2011) *Les politiques du développement durable. Gouverner l'environnement dans les villes françaises et britanniques (1970-2010)*. Thèse de sciences politiques. Université Jean Monnet de Saint-Étienne.
- BILLEN G, GARNIER J, THIEU V, SILVESTRE M, BARLES S, CHATZIMPIROS P (2012) Localising the nitrogen imprint of the Paris food supply: the potential of organic farming and changes in human diet. *Biogeosciences* 9: 607-616 [en ligne], <http://www.biogeosciences.net/9/607/2012/bg-9-607-2012.html>
- BOGNON S (2014) *Les transformations de l'approvisionnement alimentaire dans la métropole parisienne. Trajectoire socioécologique et construction de proximités*. Thèse d'aménagement. Université Paris 1.
- BOYDEN S, MILLAR S, NEWCOMBE K, O'NEILL B (1981) *The Ecology of a City and its People: The Case of Hong Kong*. Australian National University, Canberra.
- BRENNER N (eds) (2014) *Implosions/Explosions. Towards a Study of Planetary Urbanization*. Jovis, Berlin.
- BRUNNER P-H (2011) Urban Mining, A Contribution to Reindustrializing the City. *Journal of Industrial Ecology* 15(3): 339-341.
- BUCLET N (dir.) (2015) *Essai d'écologie territoriale : L'exemple d'Aussois en Savoie*. Presses du CNRS, Paris.
- CAIRNS R, WILSDON J, O'DONOVAN C (2017) *Sustainability in Turbulent Times: Lessons from the Nexus Network for supporting transdisciplinary research*. The Nexus Network, Brighton.
- CHOPPIN J, DELON N (2014) *Matière grise*. Pavillon de l'Arsenal, Paris.
- COMMISSION EUROPÉENNE (2017) *Critical raw materials* [en ligne] <http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical/indexen.htm>
- CORDELL D, DRANGERT J-O, WHITE S (2009) The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change* 19(2) : 292-305.
- COUTARD O (2010) Services urbains : la fin des grands réseaux ? In : COUTARD O, LÉVY J-P (dir.) *Écologies urbaines*. Economica/Anthropos, Paris : 102-129.
- COUTARD O, RUTHERFORD J (eds.) (2015) *Beyond the Networked City: Infrastructure reconfigurations and urban change in the North and South*. Routledge, Abingdon/New York.
- COWLING E, GALLOWAY J-N, FURINNESS C, ERISMAN J-W (2001) Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production and Environmental Protection. Second Nitrogen Conference, Potomac, octobre.
- D'ARIENZO R (2015) *Restes comme ressources. Recycler l'urbain entre « ville sanitaire » et « ville durable » : Naples, 1884-2004*. Thèse d'architecture. Université Paris 8 et Université Frédéric II de Naples.
- DE VRIES B, GOUDSBLOM J (eds) (2002) *Mappae Mundi. Humans and their Habitats in a Long-Term Socio-Ecological Perspective*. Amsterdam University Press.
- DEBOUTIÈRE A, GEORGEAULT L (2016) *Étude socio-économique et bilan matière de la région... [Aquitaine, Bretagne, Haute-Normandie, Rhône-Alpes]*. Institut de l'économie circulaire, Paris.
- DEBRIE J (2011) Contribution à une géographie de l'action publique : le transport entre réseaux et territoires. Mémoire pour Habilitation à Diriger des Recherches. Université Paris 1, 209 p.
- DUVIGNEAUD P (1974) *La synthèse écologique : Populations, communautés, écosystèmes, biosphère, noosphère*. Doin, Paris.

Écologie territoriale et métabolisme urbain

- EMAA (2013) *Plan Énergie Méthanisation Autonomie Azote*. Ministère de l'Agriculture, Paris [en ligne] <http://www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr/documents/5planassainissement22022013r%C3%A9duction%20phosphore%C3%A9tergents.pdf>.
- EMELIANOFF C (2011) *Les pouvoirs locaux dans la mondialisation écologique : remodeler l'environnement planétaire et urbain*. Mémoire pour Habilitation à Diriger des Recherches, Université du Mans.
- ERKMAN S (2004) *Vers une écologie industrielle*. Charles Léopold Mayer, Paris.
- ERKMAN S (2005) *Écologie industrielle à Genève. Premiers résultats et perspectives*. GEDEC, Service cantonal de gestion des déchets [en ligne] <http://ge.ch/environnement/ecologie-industrielle>
- ESCLIER F, LE NOË J, BARLES S, BILLEN G, CRÉNO B, GARNIER J, LESAVRE J, PETIT L, TABUCHI J-P (soumis) The biogeochemical imprint of human metabolism in Paris Megacity: a regionalized analysis of a water-agro-food system. *Journal of Hydrology*.
- FISCHER-KOWALSKI M, HABERL H (eds.) (2007) *Socioecological Transitions and Global Change: Trajectories of Social Metabolism and Land Use*. Edward Elgar, Cheltenham.
- GALLOWAY J-N, ABER J-D, ERISMAN J-W, SEITZINGER S-P, HOWARTH R-W, COWLING E-B., COSBY B-J (2003) The nitrogen cascade. *AIBS Bulletin* 53(4): 341-356.
- GALLOWAY J-N, DENTENER F-J, CAPONE D-G, BOYER E-W, HOWARTH R-W, SEITZINGER S-P, ASNER G-P, CLEVELAND C-C, GREEN P-A, HOLLAND E-A, KARL D-M, MICHAELS A-F, PORTER J-H, TOWNSEND A-R, VÖOSMARTY C-J (2004) Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry* 70(2): 153-226.
- GRAEDEL T-E (2011) The prospect for urban mining. *The Bridge* 41(1): 43-50.
- JACOBS J (1969) *The economy of cities*. Vintage, New York.
- KENNEDY C, CUDDIHY J, ENGEL-YAN J (2007) The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology* 11(2): 43-59.
- KRAUSMANN F, SCHANDL H, SIEFERLE R-P (2008) Socio-ecological regime transitions in Austria and the United Kingdom. *Ecological Economics* 65(1): 187-201.
- LABBÉ J-F (2013) La « mine urbaine » pourra-t-elle suffire à couvrir nos besoins en métaux ? Cycle de Conférence EnSciTerre, Orléans, octobre [en ligne] <http://www.univ-orleans.fr/osuc/expos%C3%A9s-2013-2014>
- LARSEN T-A, UDERT K-M, LIENERT J (eds) (2013) *Source Separation and Decentralization for Wastewater Management*. IWA Publishing, London.
- LEMONNIER P (2004) Technique. In : BONTE P, IZARD M (dir.) *Dictionnaire de l'ethnologie et de l'anthropologie*. 3^e éd. PUF, Paris : 697-698.
- MAUSS M (1935) Les techniques du corps. *Journal de Psychologie* 32(3-4) : 271-293.
- MEDA A, CORNEL P, HENKEL J (2010) Wastewater as a source of energy - Can wastewater treatment plants be operated energetically self-sufficient? Colloque de l'IWA, Phoenix, juin.
- ODUM E-P (1963) *Ecology*. Holt, Rinehart and Winston, New York.
- POUCHAIN D (2014) La dette écologique : d'une notion philosophique à un concept philosophique ? Développement durable et territoires 5(1) [en ligne] <http://developpementdurable.revues.org/10208>
- ROCKSTRÖM J, STEPHEN W, NOONE K, PESRSON A, CHAPIN F-S, LAMBIN E-F, LENTON T-M, SCHEFFER M, FOLKE C, SCHELLNHUBER H-J *et al.* (2009) A safe operating space for humanity. *Nature* 461(7263): 472-475.
- ROSADO L, NIZA S, FERRÃO P (2014) An urban material flow accounting case study of the Lisbon Metropolitan Area using the Urban Metabolism Analyst method. *Journal of Industrial Ecology* 18(1): 84-101.
- SENTHILKUMAR K, NESME T, MOLLIER A, PELLERIN S (2012) Conceptual design and quantification of phosphorus flows and balances at the country scale: The case of France. *Global Biogeochemical Cycles* 26(2) [en ligne] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011GB004102/full>
- SILVESTRE M, BILLEN G, GARNIER J (2015) Évaluation de la provenance des marchandises consommées par un territoire. In : JUNQUA G, BRULLOT S (dir.) *Écologie Industrielle et Territoriale, COLEIT 2012*. Presses des Mines, Paris.
- SMIL V (2001) *Enriching the Earth. Fritz Haber, Carl Bosch and the Transformation of World Food Production*. MIT Press, Cambridge.

- SOES (2017) Chiffres clés de l'énergie, édition 2016. Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, La Défense.
- SOLAGRO (2014) *Afterres 2050. Un scénario soutenable pour l'agriculture et l'utilisation des terres en France à l'horizon 2050*. Solagro, Toulouse.
- SUTTON M-A, HOWARD C-M, ERISMAN J-W, BILLEN G, BLEEKER A, GRENNFELT P, VAN GRINSVEN H, GRIZZETTI B (eds.) (2011) *The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects, and Policy Perspectives*. Cambridge University Press.
- SWILLING M, ROBINSON B, MARVIN S, HODSON M, HAJER M (2013) *City-Level Decoupling: Urban resource flows and the governance of infrastructure transitions. A Report of the Working Group on Cities of the International Resource Panel*. UNEP [en ligne] <http://www.unep.org/resourcepanel/Publications/City-LevelDecoupling/tabid/106135/Default.aspx>
- TARDIVO B (2013) *La réduction du phosphore dans les détergents*. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, La Défense.
- VANIER M (2008). *Le pouvoir des territoires. Essai sur l'interterritorialité*. Anthropos, Paris.
- WALLSTEN B (2015) *The Urk World. Hibernating Infrastructures and the Quest for Urban Mining*. Thesis. Université de Linköping.
- WOLMAN A (1965) The Metabolism of Cities. *Scientific American* 213(3): 179-190.

Notes

- 1 - À ne pas confondre avec l'économie authentiquement circulaire telle que défendue par ARNSPERGER et BOURG (2016).
- 2 - Définie par MAUSS (1935), la technique est « un acte traditionnel efficace » (traditionnel en tant que faisant l'objet d'une transmission), et, précise LEMONNIER (2004), « une action socialisée sur la matière, mettant en jeu les lois de la physique ». Elle constitue en particulier le médium entre les humains et leur environnement proche ou lointain. Elle s'étend du geste aux dispositifs infrastructurels et numériques, et participe de la constitution d'une interface toujours plus épaisse entre les sociétés humaines et la biosphère.
- 3 - Ou réduction de l'intensité matérielle des sociétés, nous y reviendrons plus loin. À ne pas confondre avec la dématérialisation telle qu'abordée dans le cadre de la numérisation des documents.
- 4 - Voir par exemple le rapport final du projet britannique Nexus Network (CAIRNS *et al.*, 2017). Un grand merci à Olivier Coutard pour avoir attiré mon attention sur ce réseau et ce *nexus*.
- 5 - L'Île-de-France et ses départements, Midi-Pyrénées et ses départements, Loire-Atlantique, Savoie (BARLES, 2009 et 2014, et résultats non publiés). Les résultats récemment obtenus par DEBOUTIÈRE et GEORGEAULT (2016) vont dans le même sens pour l'Aquitaine, la Haute-Normandie, la Bretagne, seule Rhône-Alpes présentant un taux supérieur (20 %).
- 6 - Loi 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové.
- 7 - Cette question est par exemple abordée dans le cadre du projet REFURB (Researching Resource Futures for Urbanisation) du Programme des nations unies pour l'environnement (International resource panel), en cours de réalisation sous la direction de Mark Swilling (SWILLING *et al.*, 2013).
- 8 - Selon les premiers résultats obtenus par Vincent AUGISEAU dans le cadre de sa thèse consacrée à l'analyse des flux et du stock de matériaux en région Île-de-France (AUGISEAU, 2017).
- 9 - L'extraction urbaine fait l'objet de l'action européenne COST (European cooperation in science and technology) Minea (<http://www.cost.eu/COSTActions/ca/CA15115>, consulté le 19 avril 2016).

- 10 - Antimoine, Béryllium, Borates, Chrome, Cobalt, Charbon cokéifiable, Fluor, Gallium, Germanium, Indium, Magnésite, Magnésium, Graphite, Niobium, Platine, Phosphates fossiles, Terres rares (lourdes), Terres rares (légères), Silicium-métal, Tungstène (COMMISSION EUROPÉENNE, 2017).
- 11 - Par opposition au gaz azote N₂, qui est inerte, sans vie (a-zoo), ce qui est à l'origine de son appellation en langue française dans les années 1780, l'azote réactif interagit avec les écosystèmes et les organismes, en bien comme en mal.
- 12 - Contemporaine parce que le XIX^e siècle a été marqué par une politique de l'azote et, dans une moindre mesure, du phosphore, en raison de l'enjeu représenté par ces substances pour la production alimentaire (BARLES, 2005).
- 13 - 91/676/CEE du 12 décembre 1991.
- 14 - 91/271/CEE du 21 mai 1991.
- 15 - Décret n° 2011-828 du 11 juillet 2011 portant diverses dispositions relatives à la prévention et à la gestion des déchets et application de la loi Grenelle 2 du 12 juillet 2010.
- 16 - Dans le cadre du projet OCAPI conduit par Fabien ESCULIER pour le Syndicat Intercommunal d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie.
- 17 - Je remercie Fabien ESCULIER d'avoir attiré mon attention sur ce point.
- 18 - Le sujet semble si peu intéresser qu'il ne fait l'objet d'aucune entrée sur Google ni sur Google Scholar (au singulier comme au pluriel), et trois en langue anglaise sur Google Scholar (consultation du 4 octobre 2017).
- 19 - Voir à ce sujet l'article de BILLEN *et al.* (2012) qui explore l'hypothèse d'une conversion en agriculture biologique du bassin de la Seine, assortie d'un passage au régime demitarien (comportant deux fois moins de produits carnés) pour ses habitants.
- 20 - Câble électrique sous-marin destiné à relier l'Islande à la Grande Bretagne en vue de l'approvisionnement en ressources renouvelables ; *Asia Pacific Super Grid* reliant l'Australie à l'Asie du sud-est afin de lui fournir de l'énergie d'origine solaire ; *Asia Super Grid* distribuant l'énergie éolienne issue du désert de Gobi de Vladivostok à Mumbai en passant par Singapour et Pékin.
- 21 - Sur ce sujet, on pourra se reporter à POUCHAIN (2014).
- 22 - Par exemple l'application Amstram, qui permet de déterminer les aires d'approvisionnement alimentaires des départements français (SILVESTRE *et al.*, 2015).
- 23 - Pour une analyse de cette situation dans le cas de l'approvisionnement alimentaire parisien, voir BOGNON (2014).
- 24 - <http://www.reseau-territorialistes.fr/seminaire-de-lyon/>, consulté le 8 mai 2016.
- 25 - <http://calenda.org/354786>, consulté le 15 mai 2016.
- 26 - Se substituant à des productions alimentaires, elle induit dans certains cas le défrichage de nouvelles terres destinées à compenser cette perte, et donc aggrave la déforestation. La littérature relative au *indirect landuse change* et à ses effets est très abondante.