INDISCIPLINES

# L'affaire est dans le flux

## Métabolisme social, économie circulaire et pouvoir en ville

**Jean-Baptiste Bahers**

*Préface de Sabine Barles*

éditions Quæ

# L'affaire est dans le flux

## Métabolisme social, économie circulaire et pouvoir en ville

**Pour citer cet ouvrage**
Bahers J.-B., *L'affaire est dans le flux. Métabolisme social, économie circulaire et pouvoir en ville*, Versailles, éditions Quæ, 120 p.,
https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4406-5

Cet ouvrage est en partie issu de l'habilitation à diriger des recherches de l'auteur :
L'affaire est dans le flux : enquête interdisciplinaire sur le métabolisme territorial.
Université de Nantes, 2025.

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication dont la procédure est décrite ici : https://www.quae.com/store/page/199/processus-d-evaluation

Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes et des textes potentiellement générés par intelligence artificielle.

La diffusion en accès ouvert de cet ouvrage a été soutenue par l'UMR 6590 Espaces et Sociétés du CNRS. Il a bénéficié du financement de l'Agence nationale de la recherche au titre de France 2030, dans le cadre du PEPR Recyclage portant référence ANR-22-PERE-0011.

Cet ouvrage est diffusé sous licence CC-by-NC-ND 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

© Éditions Quæ, NSS-Dialogues, 2026
ISBN papier : 978-2-7592-4405-8
ISBN PDF : 978-2-7592-4406-5
ISBN epub : 978-2-7592-4407-2
ISSN : 1772-4120

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles Cedex
www.quae.com – www.quae-open.com

INDISCIPLINES

# L'affaire est dans le flux

## Métabolisme social, économie circulaire et pouvoir en ville

Jean-Baptiste Bahers

éditions Quæ

INDISCIPLINES

**Coéditée avec l'association NSS Dialogues (Natures Sciences Sociétés Dialogues), cette collection accueille des ouvrages pluridisciplinaires traitant des rapports que l'homme entretient avec la nature. Abordant une grande diversité de thèmes, elle s'adresse à des scientifiques ainsi qu'à un public intéressé par les questions d'environnement et de développement durable.**

**L'association est également éditrice de la revue *Natures Sciences Sociétés* (https://www.nss-journal.org/fr).**

# *Sommaire*

**Préface** ..... 7

**Introduction. La vie matérielle de nos sociétés** ..... 9
L'intérêt d'une approche par la métaphore du métabolisme ..... 10
Le métabolisme comme concept vivant : un pont entre disciplines ..... 11
Qui contrôle les flux ? Interdépendances et pouvoirs ..... 12
À métabolisme ouvert ..... 13

**Chapitre 1. Une idée qui circule : le métabolisme, de la critique du capitalisme à l'écologie de la ville** ... 15
Critiques métaboliques du capitalisme et du productivisme : du XIXe siècle à nos jours ..... 15
Quantifier et modéliser le métabolisme : des outils pour mesurer l'économie écologique ..... 18
Réparer et refonder le métabolisme : des approches interdisciplinaires pour une écologie des territoires ..... 22
Conclusion. Vers une écologie interdisciplinaire du métabolisme ..... 26

**Chapitre 2. Penser la ville à travers ses flux, ses inégalités et ses infrastructures** ..... 27
Spatialités du métabolisme urbain : que voit-on quand on regarde la ville par ses échanges ? ..... 28
Vers un cadre des inégalités socio-métaboliques ..... 33
Futurs des infrastructures métaboliques ..... 37
Conclusion ..... 42

**Chapitre 3. Des villes circulaires en tension : métabolisme des métropoles intermédiaires de Nantes et de Göteborg** ..... 45
Les métropoles de Nantes et de Göteborg ..... 45
L'empreinte matérielle de Nantes et de Göteborg ..... 46
Relations métaboliques entre villes et *hinterlands* : la spatialisation des flux ..... 53
Le rôle des politiques urbaines d'économie circulaire ..... 58
Tensions et contradictions dans la mise en œuvre de la ville circulaire ..... 71
Quelles inégalités socio-métaboliques à Nantes et à Göteborg ? ..... 74

**Chapitre 4. Être une île : la matérialité contrainte comme révélateur** ..... 81
Le métabolisme insulaire : un archipel scientifique ..... 82
Ndzuwani (Comores) et la Nouvelle-Calédonie : des métabolismes dans différents contextes coloniaux ..... 84
Spécificité des métabolismes insulaires ..... 87
Flux contraints, dépendances et vulnérabilités socio-métaboliques ..... 94
Conclusion. Résister aux vulnérabilités des îles ..... 100

**Conclusion générale. Vers un nouveau régime métabolique ?** ..... 101

**Bibliographie** ..... 107

# *Préface*

Cent quarante-huit millions de tonnes. Ce chiffre représente l'empreinte matières de la région Île-de-France pour l'année 2021 (CitéSource, 2024) : il correspond à la consommation apparente, celle qui est effectivement effectuée au sein de la région, soit 61 millions de tonnes, et à toutes les autres consommations matérielles qui ont été engendrées par l'extraction, la production et le transport de ces biens, produits finis et semi-finis avant leur entrée dans la région, soit 87 millions de tonnes. Avec ces quelques chiffres, tout est dit ou presque : les territoires urbanisés attirent d'énormes flux de matières. Ils en contiennent aussi une quantité considérable, à travers les stocks de bâtiments, d'infrastructures, de biens de consommation durables. En somme, les territoires urbanisés pèsent très lourd.



Cette masse est doublement invisible. D'une part, parce que l'attention à la matérialité des sociétés humaines reste ténue : on ne caractérise pas une ville par son stock de matières, cet indicateur étant cantonné à un petit cercle de chercheurs et d'experts. On connaît (en France et dans les Nords à tout le moins) sa population, sa superficie, son produit intérieur brut (PIB). Mais qui connaît sa masse ? On sait combien d'actifs travaillent à l'extérieur de ses limites, et combien, au contraire, viennent de l'extérieur pour y travailler. Mais qui connaît ses importations et ses exportations matérielles ? Peu de monde en fait. C'est une première forme d'invisibilité, assez paradoxale puisque, où que nous portions le regard, cette matérialité se donne à voir dans sa part immobile – notre logement, notre lieu de travail, la gare – ou mobile – le camion de livraison, la péniche chargée de pondéreux, le wagon de marchandises.

Ces matières mobiles et immobiles sont, d'autre part, associées à des flux et stocks invisibles car ils sont loin et peu pensés. Ce sont non seulement les flux indirects qui composent l'empreinte matières précédemment citée, mais aussi les infrastructures diverses qui, à travers le monde, permettent la circulation des flux et organisent le métabolisme urbain ou territorial. Nous n'y pensons guère et, pourtant, comme le montrent les chiffres cités plus haut, l'effet matériel du métabolisme urbain est plus important à l'extérieur des limites urbaines qu'à l'intérieur de celles-ci. Ces 87 millions de tonnes ne sont ni plus ni moins que des flux de déchets et des pertes de toute nature, engendrés ici et là, souvent loin, par la consommation intra-urbaine. Ils ont des conséquences sanitaires, sociales et écologiques considérables.

Ces flux et stocks énergétiques et matériels sont l'expression d'un régime socio-écologique industriel insoutenable qui conduit au dépassement des limites planétaires, sans pour autant offrir à chaque humain et à chaque humaine des conditions de vie décentes. J'ai dit qu'ils étaient invisibles, mais il faut admettre qu'ils commencent à attirer l'attention, des politiques publiques en particulier. L'économie circulaire en est l'expression la plus répandue, qui s'invite dans les politiques européennes comme nationales et infranationales. En apparence, l'économie circulaire prend acte de la finitude des ressources en proposant de prélever moins grâce à l'écoconception, au recyclage, au réemploi,

à l'allongement de la durée de vie des produits, pour n'en citer que quelques cibles. Cependant, dans sa version dominante, elle conduit peut-être à une troisième forme d'invisibilisation. En produisant le récit d'une transition orchestrée avec détermination et positivité, en mettant en avant les initiatives les plus entraînantes – qu'elles prennent la forme de *start-up* dynamiques ou de recycleries sympathiques –, elle cache l'essentiel : l'augmentation de la pression sur les ressources, l'échec du technosolutionnisme, l'impossibilité de transformer le régime socio-écologique dominant sans engager une refondation politique majeure.

L'ouvrage de Jean-Baptiste Bahers paraît dans ce contexte, et c'est son premier mérite : il tombe à pic. Cette *enquête interdisciplinaire* révèle les multiples dimensions du métabolisme urbain et montre la nécessité de l'extraire d'une approche purement technique et comptable – indispensable cependant, et c'est aussi ce que montre l'ouvrage –, afin d'en analyser les arcanes, voire d'en envisager la reconfiguration effective. Il donne à voir cette empreinte matérielle dans ses déclinaisons territoriales ; il montre comment, grâce à l'approche métabolique, on peut mettre au jour les contradictions des politiques publiques, voire dessiner les contours de celles qui pourraient conduire à une dématérialisation effective des sociétés humaines (au sens de consommation moindre de matières). Il permet de comprendre en quoi le métabolisme, dans sa forme actuelle, peut créer ou accentuer des inégalités ou des vulnérabilités socio-spatiales et, par là, de sortir de l'antagonisme entre environnemental et social (ce qui se ferait pour l'environnement se ferait contre le social).



*L'Affaire est dans le flux* (« et dans le stock », ajouterais-je), mais l'affaire est mal connue. Jean-Baptiste Bahers montre en définitive le besoin de (re)fonder une connaissance matérielle des sociétés humaines et urbaines en particulier, une connaissance qui se doit, comme il le souligne, d'être interdisciplinaire. Il engage à envisager une transformation profonde et informée de cette base matérielle. On ne peut que le suivre.

*Sabine Barles*
*Professeure d'urbanisme et d'aménagement*
*à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne*

# *Introduction. La vie matérielle de nos sociétés*

Depuis cinquante ans, notre monde s'est emballé. La population a doublé, la richesse produite a quadruplé et la quantité de matières extraites du sol a été multipliée par trois. Jamais dans l'histoire nous n'avons autant puisé, transformé, consommé, rejeté. L'International Resource Panel (IRP), un groupe d'experts de l'Organisation des Nations unies (ONU), le résume sans détour : l'extraction et le traitement des ressources naturelles sont responsables de plus de 90 % de la perte de biodiversité et du stress hydrique, et de la moitié de notre impact sur le climat. Et surtout, depuis un demi-siècle, la demande mondiale de matières n'a jamais cessé d'augmenter (IRP, 2019). Pas une pause, pas de stabilisation, pas même un ralentissement.



Nous vivons dans un monde où l'extraction, la consommation et le rejet des ressources s'accélèrent sans fin, au point de menacer les conditions mêmes de l'habitabilité de la Terre. Derrière les discours sur la transition écologique se cache une question plus profonde : comment repenser le métabolisme social, c'est-à-dire la manière dont nos sociétés produisent, transforment et partagent l'énergie et la matière ?

Ces flux ne sont pas abstraits. Ils traversent nos territoires, nos villes, nos corps. La nature nous fournit ce dont nous avons besoin, tel que la biomasse, l'énergie, les minerais, l'eau et, en retour, nous rejetons des excédents : déchets solides, eaux usées, gaz, boues, chaleur. Tout circule, rien ne disparaît. Et ce que nous rejetons finit toujours par revenir dans l'air, dans les sols, dans nos océans, partout. L'affaire est donc bien dans les flux. C'est là qu'entre en jeu la notion de métabolisme des territoires, qui est une manière d'observer et de décliner les interactions entre nature et sociétés. Elle permet de comprendre comment chaque territoire absorbe, consomme, transforme et rejette, et comment ces processus dessinent une géographie des inégalités. Certains espaces sont emplis d'énergie et de matières, d'autres sont vidés, surexploités, pollués. Réfléchir à ce métabolisme, c'est donc réfléchir à la justice écologique : à la répartition des ressources, des efforts et des dégâts.

Les villes en particulier concentrent cette tension par leurs poids matériels et énergétiques. Elles représentent près de 80 % de la consommation d'énergie mondiale, environ 40 milliards de tonnes de matières par an, et 65 % des émissions de dioxyde de carbone ($CO_2$) (Swilling *et al.*, 2018). Elles sont à la fois les lieux où s'inventent de nombreux futurs et où se concentrent les plus grandes consommation et transformation de la planète. Sont-elles pour autant condamnées à être des parasites écologiques ? La réponse est non, mais l'idée inverse, celle d'une ville parfaitement circulaire, autonome et sans déchets, relève tout autant de l'utopie. Il ne s'agit donc pas de rêver une pureté impossible, mais de repenser des villes et des territoires capables de limiter leurs dépendances, de partager équitablement les ressources et d'assumer les transformations nécessaires. C'est tout le sens de ce travail qui est de comprendre le métabolisme des

sociétés et des territoires, afin de visibiliser le poids des villes, pour ne pas rendre la Terre inhabitable.

Pour cela, il faut croiser les regards. Le métabolisme n'est pas seulement une question de biologie ou de technique. Il relève à la fois des sciences de la nature, qui éclairent les processus écologiques, et des sciences humaines et sociales, qui interrogent les choix politiques, économiques et culturels qui les produisent. Car il s'agit aussi d'une affaire de pouvoir. Pour le dire plus clairement : aucune discipline ne peut, seule, comprendre ce que nous faisons circuler et pourquoi. C'est en reliant ces savoirs, en tissant une véritable pensée interdisciplinaire, que l'on pourra imaginer un autre régime matériel pour nos sociétés. Un métabolisme plus sobre, plus juste, plus vivable.



## L'INTÉRÊT D'UNE APPROCHE PAR LA MÉTAPHORE DU MÉTABOLISME

Le métabolisme est d'abord un mot du vivant : il désigne la circulation constante de la matière et de l'énergie dans un corps, ce va-et-vient vital entre ce que l'on absorbe et ce que l'on rend au monde. Mais, au fil des siècles, ce mot a voyagé. De la biologie, il a glissé vers la ville, vers l'économie, vers l'écologie. Aujourd'hui, on parle du métabolisme urbain, du métabolisme planétaire, du métabolisme social. Cette métaphore est puissante. Elle permet de mettre la focale sur la manière dont les villes se nourrissent, dont les territoires échangent, dont les ressources circulent. Cependant, elle est aussi dangereuse car elle fait oublier que ce fonctionnement n'est ni harmonieux ni égalitaire.

L'idée de métabolisme urbain trouve ses racines dans les travaux des chimistes du XIX^e^ siècle. Des scientifiques comme Justus von Liebig et Jean-Baptiste Dumas ont étudié les cycles des nutriments et l'impact des *excreta* urbains sur l'agriculture, cherchant à répondre aux défis de la croissance démographique et des pénuries alimentaires. Ces recherches ont inspiré Karl Marx, qui a développé la notion de *Stoffwechsel* (« métabolisme ») pour décrire les échanges complexes entre sociétés et nature, soulignant notamment les ruptures écologiques causées par l'industrialisation.

Au début du XX^e^ siècle, le biologiste et anarchiste Patrick Geddes a poussé plus loin cette réflexion en proposant une économie fondée sur les flux d'énergie et de matières plutôt que sur la monnaie. Dans *Cities in Evolution* (Geddes, 1915), il appelle à une transition des villes « paléotechniques » (polluantes et gaspilleuses) vers des villes « néotechniques » durables, alimentées par des énergies renouvelables et organisées autour de coopérations territoriales. Cette vision a influencé les biorégionalistes et les pionniers de l'écologie urbaine.

Dans les années 1960-1970, l'écologie urbaine s'est emparée de cette métaphore, avec des travaux comme ceux d'Eugène Odum ou d'Abel Wolman, qui ont modélisé les flux de matières et d'énergie des villes. Cependant, cette approche a été critiquée pour son organicisme excessif, qui néglige les dimensions sociales et culturelles. Des chercheurs comme Mathew Gandy ou Donna Haraway ont souligné les limites de cette analogie biologique, tout en reconnaissant son utilité pour interroger les relations entre humains et nature. Aujourd'hui, la métaphore du métabolisme urbain est réinterprétée de manière plus critique et interdisciplinaire. Plutôt que de voir la ville comme un organisme autonome, on l'étudie comme un système socio-écologique complexe, où les flux de matières et d'énergie s'inscrivent dans des dynamiques politiques et territoriales. Des propositions

comme celle de « métabolisme de l'écosystème urbain » (Newell et Cousins, 2015) visent à intégrer ces dimensions, tout en restant ancrées dans une perspective engagée.

En somme, le métabolisme urbain reste un outil puissant pour penser la durabilité des villes, à condition de l'enrichir d'une analyse sociale et politique, et de l'inscrire dans une vision relationnelle et terrestre, comme le propose Haraway (2016). Son ouvrage propose de regarder ce métabolisme des sociétés pas seulement du point de vue biologique : il est aussi social, économique et politique. Il résulte de la manière dont nous produisons, échangeons, décidons, aménageons nos espaces, bref, dont nous voyons la nature. L'urbaniste Sabine Barles parle du métabolisme comme d'un entrelacement entre les processus naturels et les techniques inventées par les sociétés humaines (Barles, 2017). Ce travail s'inscrit dans cette perspective : croiser les savoirs, dépasser les frontières entre disciplines et replacer la réflexion au plus près des territoires, là où les flux prennent forme et deviennent réels.



## LE MÉTABOLISME COMME CONCEPT VIVANT : UN PONT ENTRE DISCIPLINES

L'interdisciplinarité constitue un enjeu primordial pour l'analyse du métabolisme territorial. Cependant, elle est souvent entendue aux prismes pratique et méthodologique, se concentrant sur la juxtaposition de méthodes disciplinaires. Il faut ainsi éviter le « discours de la méthode sur l'interdisciplinarité entre SHS [sciences humaines et sociales] et sciences de la nature » afin d'envisager « la mise à l'épreuve à même de faire apparaître ses apports heuristiques tout autant que les mésententes qu'elle peut susciter » (Pecqueux, Poupin et Vuillerod, 2022). Cette mise en acte de l'interdisciplinarité est dès lors très liée à des objets émergents, ou à des dispositifs d'enquête particuliers, et souvent à des dispositifs institutionnels.

Pour étudier comment les villes fonctionnent et interagissent avec leur environnement, il faut croiser les regards de différentes disciplines. L'interdisciplinarité ne se limite donc pas à juxtaposer des méthodes, mais permet de révéler des liens inattendus entre les dimensions politiques, techniques et écologiques. Par exemple, l'analyse des déchets urbains montre comment des enjeux pratiques (gestion des ordures) se mêlent à des questions sociales (inégalités d'accès) et environnementales (pollution).

Cette approche peut aller plus loin en combinant sciences naturelles et sciences humaines pour comprendre comment les villes consomment les ressources et produisent des déchets. Certains chercheurs parlent même d'une « interdisciplinarité indisciplinée » (Bognon *et al.*, 2020) qui brise les frontières entre disciplines pour mieux saisir la complexité des villes contemporaines.

Il s'agit donc bien d'une question socio-matérielle contre des réflexes disciplinaires dichotomiques. L'interdisciplinarité radicale consiste donc à se demander comment dépasser le constructivisme social, tout en rejetant les approches physico-centrées des flux matériels. La philosophe des sciences Anna Tsing en fait un constat sévère :

> « Les chercheurs en sciences humaines sont des têtes sans corps, flottant dans la stratosphère de la philosophie, quand les scientifiques sont des orteils fouillant la boue empirique. Même quand ils s'intéressent au concret, les chercheurs en sciences humaines s'arrêtent à une discussion autour de la "matérialité" avant même d'en arriver à la matière. Les chercheurs en sciences naturelles ignorent ces discussions

> — mais à leur péril. Mal informés des savoirs produits par les humanités en politique, en histoire, et en culture, les scientifiques s'emparent trop souvent de paradigmes simplistes ou trompeurs pour prendre la mesure de l'humanité. Aucune de ces habitudes ne laisse beaucoup de place à la conversation. En l'absence de ce dialogue, la dichotomie erronée d'une Nature soumise et d'une Culture dominante continue d'être affirmée[1] » (Tsing *et al.*, 2020).

Ainsi, la matérialité telle qu'on peut l'observer est aussi un construit social dont il faut pouvoir analyser les contours. En sens inverse, l'analyse sociale doit permettre de s'attarder véritablement sur les interdépendances matérielles qui sont au cœur des relations socio-économiques. C'est l'appel de Vanessa Castan-Broto *et al.* (2012) qui utilise le métabolisme urbain pour pousser les frontières disciplinaires et engager des dialogues théoriques pour dépasser les barrières méthodologiques. C'est, par exemple, situer les études sur les flux de matières et d'énergie dans des contextes historiques et politiques bien définis afin d'interroger la circulation des ressources, et, simultanément, de mobiliser la quantification matérielle pour argumenter les tensions rurales et urbaines et la reproduction des modèles d'inégalité urbaine (Broto, Allen et Rapoport, 2012). C'est là un programme dans lequel ce travail se reconnaît parfaitement.



## QUI CONTRÔLE LES FLUX ? INTERDÉPENDANCES ET POUVOIRS

Le territoire ne se limite pas ici à une surface délimitée ou à une entité administrative, mais c'est un lieu d'enjeux, un terrain d'observation où les flux matériels (d'énergie, d'eau, de déchets, de marchandises…) rencontrent les choix politiques et les rapports de pouvoir. Contrairement à une économie qui raisonne à l'échelle mondiale et oublie souvent les particularités locales, cette approche invite à regarder les réalités situées, concrètes, multiples. Ainsi, il ne faut pas enfermer le territoire derrière des frontières, mais étudier sa dimension vivante et relationnelle. C'est la même logique qui s'applique à la ville : non pas comme une entité isolée, mais comme un acteur parmi d'autres dans le grand réseau des échanges entre les espaces. En cela, nous nous rapprochons de la perspective d'« appréhender l'urbain en tant qu'objet socio-écologique [qui] revient peut-être d'abord à rendre compte de la pluralité des configurations socio-écologiques au sein des régions urbaines et d'une région à l'autre » (Barles *et al.*, 2020, p. 158). Comprendre l'urbain, c'est d'abord reconnaître la diversité des manières d'habiter et de transformer les environnements.

La transformation de la matière est réalisée grâce à un ensemble d'infrastructures, que l'on peut également nommer les « réseaux techniques ». Historiquement, ces réseaux ont été pensés pour être vastes, centralisés et efficaces. Ils reposent sur l'idée d'une maîtrise totale des flux et d'une extension permanente : plus de canalisations, plus de routes, plus de connexions. Néanmoins, cette logique, héritée de l'ère industrielle, est aujourd'hui remise en cause, notamment par un modèle fondé sur des cycles courts, sur des réseaux plus locaux et sur une meilleure autonomie énergétique et matérielle des territoires (Coutard et Rutherford, 2009). Entre ces deux visions que sont le grand réseau centralisé expansif et le métabolisme « écocyclique » se joue une tension essentielle pour penser les villes de demain.

1. Traduction de Pauline Briand, relue par Marin Schaffner.

Pour autant, il ne suffit pas d'observer seulement les villes, il faut aussi regarder ce qui se passe au-delà, dans les zones qui les nourrissent et les approvisionnent. Les territoires ruraux, agricoles ou industriels qui entourent les métropoles, et que l'on appelle leurs « *hinterlands* » (Brenner, 2009), fournissent nourriture, énergie, matériaux, et reçoivent souvent en retour les déchets ou les pollutions. Ces relations sont complexes. Elles peuvent être fondées sur la coopération, sur la complémentarité… ou, au contraire, sur la domination et sur l'injustice (Baka et Bailis, 2014 ; Martínez-Alier *et al.*, 2016). Ainsi, certains territoires sont mis au service d'autres, absorbés dans le rythme et dans les besoins des grandes villes. Toutefois, l'inverse existe aussi : des territoires qui inventent leurs propres stratégies métaboliques, qui refusent d'être de simples zones de service ou de sacrifice. Le métabolisme des territoires, c'est donc aussi une question de pouvoir : qui contrôle les flux ? Qui décide de ce qui circule, de ce qui est prélevé, de ce qui est rejeté ? Et surtout : comment rendre ces échanges plus justes ?



Plutôt que d'opposer les villes et les campagnes, les centres et les périphéries, il s'agit donc de reconnaître leurs interdépendances (Charmes, 2023). Les flux de matières et d'énergie tracent des liens invisibles entre les lieux : ce que nous consommons ici est souvent extrait, produit ou transformé ailleurs. Regarder le monde à travers son métabolisme, c'est rendre visibles ces relations cachées et ouvrir la possibilité d'un autre équilibre entre territoires.

## À MÉTABOLISME OUVERT

Ce livre est né d'un travail de recherche, mais il ne s'adresse pas seulement aux chercheurs. Il est aussi né d'études sur le terrain : à Nantes et à Göteborg, deux villes portuaires prises dans les logiques mondiales de la circulation ; aux Comores et en Nouvelle-Calédonie, deux îles où les flux de subsistance (matériaux, énergie, nourriture) deviennent parfois des chaînes de vulnérabilités. Ces lieux racontent des réalités différentes, mais une même histoire qui est celle d'un monde de flux, où chaque territoire est traversé, dépendant, exposé.

Pour comprendre cela, il m'a fallu croiser les disciplines que sont la géographie, l'écologie, l'économie, l'urbanisme, l'ingénierie, et surtout me laisser bousculer par leurs regards croisés. Car penser le métabolisme des territoires, c'est aussi dépasser ses propres frontières intellectuelles et éviter l'écueil du réflexe disciplinaire, visant à discréditer ce qui n'est pas semblable à ses propres habitus de recherche. Ces croisements sont donc une nécessité indispensable pour comprendre notre monde matériel et social.

Ce travail cherche donc à créer un dialogue entre différentes manières de comprendre le monde, entre plusieurs écologies scientifiques : celles qui viennent des sciences de la nature, et celles issues des sciences sociales. En effet, il ne s'agit pas seulement d'ajouter des données, mais de croiser des regards. L'enjeu est de dépasser deux visions limitantes : le constructivisme social, qui considère tout comme social comme si la nature n'existait qu'à travers les humains, et l'essentialisation naturaliste, qui affirme que tout est physique et matériel et qui ne voit dans le monde qu'une réalité technique, mesurable, détachée des rapports humains. Entre ces deux pôles, une approche socio-matérielle cherche à comprendre la ville et les territoires comme de véritables écosystèmes sociaux, où la matière et les relations humaines s'entremêlent. Cette perspective est donc bien celle de suivre les flux, comme l'approche *follow the thing* inspirée des études matérielles

(Choplin, 2020a), avec un point de vue social et dans l'espace, mais en y associant une entrée physique importante.

Étudier le métabolisme ne revient donc pas seulement à suivre des tonnes de matières ou des kilowattheures, mais c'est aussi suivre les histoires qu'il transporte et ses effets sociaux et politiques. Observer ces flux, c'est comprendre comment les sociétés se transforment, comment les inégalités se fabriquent et comment certaines manières de faire monde deviennent insoutenables. L'idée n'est donc pas de choisir entre la science de la nature et la réflexion sociale, mais de les faire dialoguer. Car, au fond, raconter le métabolisme des territoires, c'est raconter l'histoire matérielle et vivante de nos sociétés, c'est-à-dire une histoire où l'environnement et les humains ne peuvent plus être pensés séparément.

L'ouvrage est structuré en six chapitres. Il montre donc l'histoire cachée de nos flux, afin de faire voyager le lecteur dans les coulisses matérielles du monde, en partant de gestes simples de consommation pour remonter vers les territoires, vers les infrastructures et vers les inégalités qu'ils cachent. Dans le chapitre 1, nous nous attacherons à développer cette idée qui circule : le métabolisme, des flux aux territoires. Il s'agira de présenter les trois écologies du métabolisme, vers une possible construction interdisciplinaire. L'accent sera mis sur les conflits épistémologiques et sur les apports croisés des différentes écoles du métabolisme. Dans le chapitre 2, nous montrerons comment penser la ville à travers ses flux. En effet, les spatialités du métabolisme urbain abordent différents types d'échanges entre ville et nature. Une analyse bibliométrique sera destinée à montrer également comment la recherche évolue et quels sont les chantiers à venir, notamment dans le chapitre 3 dans lequel nous évoquerons la notion d'inégalité socio-métabolique. La question des infrastructures sera également soulevée en lien avec l'accès aux ressources et avec la justice environnementale, pour poser les bases d'une interdisciplinarité située du métabolisme. Le chapitre 4 nous aidera à nous appuyer sur ces notions pour interroger les tensions des métropoles intermédiaires qui développent des politiques urbaines pionnières en matière d'économie circulaire : Nantes et Göteborg. En effet, ces villes dites « circulaires » présentent de fortes contradictions quand on étudie notamment le rôle des infrastructures et le lien avec leurs *hinterlands*. Enfin, dans le chapitre 5, nous mettrons en évidence les spécificités des métabolismes insulaires, aux Comores et en Nouvelle-Calédonie : entre flux contraints, dépendances et vulnérabilités. Il s'agira aussi de montrer les liens entre colonialité et matérialité. La conclusion aboutira à une réflexion sur la vie sociale des flux métaboliques et sur la rupture du régime dominant.

# Chapitre 1
# Une idée qui circule : le métabolisme, de la critique du capitalisme à l'écologie de la ville



Le concept de « métabolisme urbain » est un objet-frontière qui permet d'explorer les frictions entre épistémologies, méthodologies et cadrages disciplinaires variés. Il est pensé différemment selon trois écologies principales : l'écologie industrielle, l'écologie sociale et l'écologie politique urbaine. Ces courants, bien que distincts, partagent un objectif commun : comprendre comment les sociétés humaines transforment et sont transformées par les flux de matières et d'énergie.

Dans ce chapitre, nous proposerons une lecture transversale des enjeux socio-métaboliques, en nous appuyant sur les apports de ces trois écologies. Plutôt que de décrire successivement chaque courant théorique, nous aborderons d'abord les critiques métaboliques du capitalisme et du productivisme, puis les efforts pour quantifier et modéliser le métabolisme, avant d'explorer les pistes de réparation et de refondation des sociétés.

## CRITIQUES MÉTABOLIQUES DU CAPITALISME ET DU PRODUCTIVISME : DU XIX$^{E}$ SIÈCLE À NOS JOURS

### La rupture métabolique : controverse chez les éco-marxistes

Les éco-marxistes comme John Bellamy Foster, Paul Burkett et Brett Clark ont développé la notion de « rupture métabolique » pour décrire la dégradation des sols et de l'environnement (Foster, 1999). Cette rupture est liée à l'intensification de l'agriculture, à l'industrialisation et aux déconnexions entre les espaces urbains et ruraux. Marx s'en est inspiré en observant la pollution de la Tamise à Londres dans les années 1870, où les *excreta* urbains, au lieu d'être réutilisés comme engrais, étaient rejetés dans les cours d'eau, rompant ainsi le cycle naturel des nutriments.

Cette rupture est liée à l'aliénation des êtres humains par rapport à leur environnement et à leur propre travail, un processus central dans la critique marxiste du capitalisme. Foster et ses collègues montrent que Marx ne se limitait pas à la critique du cycle des nutriments, mais qu'il analysait aussi la déforestation, la marchandisation des espèces, la pollution industrielle et l'épuisement des ressources. Pour les éco-marxistes, le capitalisme se développe en externalisant ses déchets et ses dégradations environnementales, créant ainsi une crise écologique systémique.

Jason Moore, dans son approche de l'écologie-monde, conteste la théorie de la rupture métabolique. Pour lui, la dégradation de l'environnement n'est pas une conséquence du capitalisme, mais elle est constitutive de son fonctionnement même. Il considère l'opposition entre nature et société comme dépassée : « Premièrement, la théorie de la rupture métabolique — en particulier l'"école de l'Oregon" représentée par John Bellamy Foster,

Brett Clark et Richard York — est fondée sur un paradigme cartésien qui place les crises biophysiques dans une boîte et les crises d'accumulation dans une autre. Selon ce point de vue, la dégradation de l'environnement est une conséquence du développement capitaliste, un résultat du système. Mais elle n'est pas constitutive du capitalisme en tant que système historique[2] » (Moore, 2011, p. 2). Le capitalisme ne se contente pas d'exploiter la nature ; il la produit activement, en intégrant les écosystèmes dans des stratégies d'accumulation. Moore critique ainsi le dualisme cartésien qui sépare les crises biophysiques des crises d'accumulation, et plaide pour une vision post-dualiste où nature et société sont indissociables.

Prenons l'exemple des déchets, tel que l'analyse Moore : chaque nouvelle phase du capitalisme produit toujours plus de déchets, et ceux-ci deviennent toujours plus toxiques. Néanmoins, le capitalisme a cette particularité de savoir transformer certains déchets — même les plus dangereux — en produits commerciaux lucratifs, qu'il vend ensuite à grande échelle.



Cette réflexion sur les déchets s'inscrit dans une vision plus large de Moore : pour lui, il est essentiel de comprendre d'abord ce que la nature apporte au capitalisme, avant d'étudier ce que le capitalisme fait subir à la nature. Elle évoque aussi les résistances face à ces stratégies d'accumulation sans limites, et leurs échecs relatifs. En effet, si les travailleurs ont lutté pour leurs droits, l'exploitation des migrants, des esclaves ou des enfants existe toujours aujourd'hui ; si les écologistes ont mené des combats pour protéger l'environnement, le capitalisme continue de contourner ces protections pour étendre ses zones de destruction. Pour autant, Moore met en garde car il ne faut pas voir les luttes des travailleurs et celles des écologistes comme séparées, alors que ces combats doivent au contraire s'unir.

Cette position post-dualiste, dans la lignée de Bruno Latour, entend surmonter, par des approches hybrides, cette opposition. Ainsi, Moore propose de mettre l'accent sur les caractéristiques écologiques inhérentes à l'urbanisation capitaliste : c'est l'articulation entre les villes, la production et la transformation de la nature et l'émergence d'une économie mondiale intégrée qui est constitutive du métabolisme urbain. Cette position est différente d'une vision dualiste qui ne comprendrait l'économie politique de la ville que dans le sens de productrice de dégradations environnementales.

Pour continuer sur cette controverse, un auteur va à l'encontre des théories post-dualistes comme celles de Moore. Il s'agit d'Andreas Malm dans son ouvrage *The Progress of this Storm. Nature and Society in a Warming World* (Malm, 2018). Prenant l'exemple du dérèglement climatique, il commence son argumentation par le principe d'une indépendance des processus climatiques qui sont incontrôlables par les sociétés humaines. Il explique que, si le climat était contrôlable, les techniques de géo-ingénierie fonctionneraient. C'est donc bien les processus climatiques qui provoquent un déséquilibre métabolique, entendu comme relation du climat vis-à-vis des sociétés. Selon Malm, la nature n'est donc probablement pas si irréductible aux processus sociaux et elle a sa propre autonomie. Le métabolisme est donc bien le produit de mises en commun entre nature et société, mais aussi de leurs processus autonomes. En revanche, il exclut dans ses propositions toute initiative sociale

2. Traduction de la citation suivante : « *First, the theory of metabolic rift – especially the "Oregon school" represented by John Bellamy Foster, Brett Clark, and Richard York – is grounded in a Cartesian paradigm that locates biophysical crises in one box, and accumulation crises in another. Environmental degradation, in this view, is a consequence of capitalist development, an output of the system. But it is not constitutive of capitalism as a historical system.* »

d'alternatives, préférant développer des positions très fermes sur la réduction des impacts environnementaux de manière unilatérale par l'intervention de l'État.

Au-delà de la description de la rupture métabolique, quelles ouvertures et perspectives pour la réparer ? Gilbert Rist fait une critique acerbe des débouchés politiques de la révolution écologique du métabolisme social par Foster : « On se dirige plutôt vers une sorte de "capitalisme vert" qui atténue les excès et les nuisances du productivisme sans véritablement s'attaquer au système lui-même » (Rist, 2018). En effet, derrière l'analyse du problème de l'accumulation dans le métabolisme social actuel, il manque la remise en cause des racines du productivisme, et donc la réduction de la consommation et de la production, que l'économie socialiste de Foster ne pourrait résoudre. De même, l'économie planificatrice d'Andréas Malm souffre des mêmes apories, le conduisant, dans son combat contre les énergies fossiles, à évoquer les potentialités des technologies du stockage du carbone et de la géo-ingénierie tout en assumant de ne pas en maîtriser les contours[3].



**Productivisme et alternatives : décroissance, anarchisme et écoféminisme**

Face aux critiques évoquées précédemment, plusieurs courants proposent des alternatives radicales :

– la décroissance : Kohei Saito, dans « Marx and Engels: The intellectual relationship revisited from an ecological perspective » et *La nature contre le capital* (Saito, 2021), réhabilite l'antiproductivisme de Marx en s'appuyant sur les *Grundrisse*[4]. Il identifie trois dimensions métaboliques (naturelle, spatiale et temporelle) et propose un communisme décroissant, où la réduction de la production et de la consommation permettrait de restaurer les équilibres écologiques. Saito met en lumière les déplacements métaboliques (externalités technologiques, échanges écologiquement inégaux, décalages temporels des crises) qui masquent les impacts réels du capitalisme. Selon Saito, il y est élaboré une véritable théorie du métabolisme, qui conduit à l'identification de trois dimensions métaboliques :

> « La théorie du métabolisme de Marx s'intéresse à la manière dont le procès écologique naturel du métabolisme universel de la nature, en tant que condition matérielle fondamentale de la reproduction, est réorganisé sous la médiation de second ordre du métabolisme social. Il existe une grave tension entre le métabolisme social et le métabolisme naturel, et Marx a mis en garde contre les conséquences négatives de leur perturbation. Il ne se contentait cependant pas de reconnaître l'existence de la rupture, mais il s'intéressait bien davantage à la manière dont la rupture apparaît dans la nature et dont elle se répartit de manière disproportionnée dans l'espace et le temps » (Saito, 2021) ;

– l'anarchisme et l'écologie sociale : Murray Bookchin et Patrick Geddes ont imaginé des sociétés dans lesquelles le métabolisme serait créatif et non destructeur. Geddes, par exemple, proposait de remplacer l'économie monétaire par une économie fondée sur l'énergie et sur les ressources, où les villes deviendraient des écosystèmes autonomes. L'anarchisme de Bookchin récuse le productivisme métabolique et les rapports de

3. À écouter notamment dans l'interview disponible en ligne : https://www.arte.tv/fr/videos/103447-003-A/climat-qui-a-allume-le-feu/

4. Il s'agit de manuscrits de 1857-1858, rédigés par Karl Marx, qui sont une introduction générale à la critique de l'économie politique.

domination qui en découlent (Bookchin, 1990). Si la contrepartie négative du productivisme est bien analysée chez Marx, « il ne s'extrayait pas pour autant de la logique qui conduisait à la justifier : la sortie de la pénurie matérielle exigeait la domination de la nature qui justifiait elle-même la domination de l'homme par l'homme sous la forme de l'exploitation du travail » (Sauvêtre, 2021). Pour d'autres chercheurs anarchistes, l'approche métabolique est importante, car elle élargit les calculs économiques de l'utilisation des ressources et du pillage socio-écologique, mais reste qualitativement limitée pour documenter les profonds impacts psychosociaux et ontologiques de l'extractivisme et des modes d'organisation sociale technocapitaliste (Dunlap, 2021) ;

– l'écoféminisme : Donna Haraway et Anna Tsing élargissent la notion de métabolisme pour inclure les relations entre toutes les espèces. Haraway appelle à des alliances terrestres, où humains et non-humains coopèrent pour préserver les écosystèmes, plutôt que de les dominer : « Alternativement, nous pouvons participer aux transformations métaboliques entre et parmi les roches et les créatures pour bien vivre et bien mourir[5] » (Haraway, 2016). Tsing, quant à elle, explore les interdépendances entre espèces à travers l'exemple des champignons, montrant comment les relations symbiotiques peuvent inspirer des modèles de société plus justes. Un métabolisme indiscipliné et de compagnonnage qui se lie entre champignon et lichen, mais aussi avec les humains qui les cueillent sans relations de domination et d'exploitation, est à l'œuvre dans les ruines du monde capitaliste (Tsing, 2012) ;

– le tournant non humain : ce courant interroge la théorie du métabolisme en remettant en cause la séparation dualiste entre nature et société, inspirée par les travaux de Descola et Latour. Il intègre les non-humains comme acteurs à part entière du métabolisme social, critiquant ainsi l'approche marxiste, jugée trop centrée sur les rapports économiques et insuffisamment attentive au rôle des écosystèmes et des espèces. Selon Guillibert (2021), cette vision risque de reproduire un réductionnisme où les institutions politiques et les imaginaires ne sont que des reflets des rapports matériels, alors que l'irruption de Gaïa impose de repenser les interdépendances entre vivants. Pour ces auteurs, le métabolisme révèle comment les sociétés sont structurées par des dispositifs qui organisent les flux de matière et d'énergie, façonnant ainsi les ordres sociaux et les inégalités (Bonneuil, 2022). Il s'agit donc de « réenchasser » la nature dans les rapports sociaux et de construire des alliances interspécifiques pour dépasser le productivisme et inventer des relations plus symbiotiques avec les territoires (Balaud et Chopot, 2021).



## QUANTIFIER ET MODÉLISER LE MÉTABOLISME : DES OUTILS POUR MESURER L'ÉCONOMIE ÉCOLOGIQUE

### Les pionniers de la comptabilité métabolique actuelle

Dès les années 1960, des chercheurs comme Robert U. Ayres et Allan V. Kneese ont développé des méthodes pour mesurer les flux de matières et d'énergie dans les économies. Ces méthodes sont toujours utilisées actuellement et font encore référence. Leur approche visait à intégrer les externalités environnementales dans la comptabilité économique (Ayres et Kneese, 1969). Cela les conduit à développer une approche matérielle de l'économie sous l'intitulé de *material balance approach* (Kneese, Ayres et d'Arge, 1971). Néanmoins, Suren Ekerman explique que c'est surtout l'article de Frosch et Galloupoulos

5. Traduction de la citation suivante : « *Alternatively, we can join in the metabolic transformations between and among rocks and critters for living and dying well.* »

en 1989 dans le magazine de vulgarisation *Scientific American* qui va permettre la diffusion à grande échelle du champ, grâce à la reconnaissance des deux auteurs haut placés à la tête de l'entreprise General Motors et à l'avènement du développement durable avec le rapport Brundtland (Erkman, 2004). Pourtant, c'est une vision étriquée de l'écologie industrielle qui se concentre sur le développement écologique des industries. Depuis ces travaux pionniers des années 1960-1970 de Robert U. Ayres et Allan V. Kneese, d'autres travaux quantitatifs du métabolisme urbain sont apparus qui révèlent ou insistent sur d'autres aspects impliqués dans le fonctionnement global des villes, avec des chercheurs comme Ethan Decker, Marina Fischer-Kowalski, Gilles Billen, Herbert Girardet, Peter Baccini ou Paul H. Brunner (Baccini et Brunner, 1991 ; Billen, Toussaint et Peeters, 1983 ; Decker *et al.*, 2000 ; Fischer-Kowalski, 1998 ; Girardet, 1996). Ces travaux ont jeté les bases de l'écologie industrielle, qui cherche à optimiser les systèmes productifs en réduisant les déchets et en recyclant les ressources avec la notion de symbiose industrielle dans les villes, qui consiste à faire des déchets d'une activité une ressource pour d'autres à l'échelle d'agglomération urbaine (Clift et Druckman, 2016).



## L'école viennoise d'écologie sociale : des indicateurs pour une transition socio-écologique

L'école viennoise, avec des figures comme Marina Fischer-Kowalski et Helga Weisz, a affiné ces méthodes en développant des indicateurs de consommation intérieure de matières (DMC) et d'empreinte matérielle (MF). Ces outils permettent de comparer les pays et d'évaluer leur durabilité. Ainsi, les chercheurs de l'écologie sociale de Vienne pensent les sociétés en termes de régimes métaboliques, qui correspondent aux transitions socio-écologiques en tant que transformations historiques cruciales dans l'utilisation de la biosphère par les sociétés humaines. Sont notamment identifiés trois grands régimes : chasseurs-cueilleurs, agraire, puis industriel. Ils mettent aussi en évidence de manière flagrante les deux grandes accélérations de consommation de ressources et d'émissions de carbone à partir du début du XIX[e] siècle entre 1945 et 1975, puis entre 2002 et 2015. Pour cette école, « l'articulation entre les besoins sociométaboliques de la population et du territoire[6] » (Haberl *et al.*, 2016, p. 40) s'est affaiblie dans les sociétés industrielles contemporaines, et a cédé la place à des approvisionnements mondialisés. En effet, le lien étroit de soutenabilité qui existait entre les ressources d'un territoire et la taille de la population s'appliquait particulièrement aux sociétés agraires, puisque leur base énergétique était presque entièrement constituée d'énergie solaire stockée dans la biomasse dépendante du territoire. Ce constat n'est plus applicable aujourd'hui pour une société reposant sur les énergies fossiles.

Enfin, ce modèle sociométabolique permet de développer une approche de recherche socio-écologique sur le long terme qui fait le lien entre urbanisation, industrialisation et métabolisme. Ces indicateurs révèlent aussi les inégalités spatiales du métabolisme : les pays riches externalisent leur empreinte écologique vers les pays du Sud, où sont extraites les ressources et où sont rejetés les déchets. Il en est déduit la nécessaire décroissance comme perspective de transition (Duro, Schaffartzik et Krausmann, 2018 ; Schaffartzik,

6. Traduction de la citation suivante : « *the interlinkage between the sociometabolic requirements of the population and the territory has weakened and given way to globalized supplies* ».

Duro et Krausmann, 2019). Les chercheurs de l'écologie sociale ont également collaboré avec Joan Martínez-Alier, l'auteur de l'œuvre classique d'écologie politique *L'écologisme des pauvres*, pour connecter les questions de métabolisme aux luttes sociales. Pour ce qui nous intéresse, Martínez-Alier montre très bien le lien entre l'évolution des profils métaboliques et l'augmentation des conflits environnementaux (Martínez-Alier, 2012). Ce dernier appelle ainsi à un mouvement en faveur de la décroissance du métabolisme industriel qui tend à pousser à la transformation socio-écologique, à la recherche de nouveaux modes de vie et de relations sociales repensées dans des sociétés alternatives (Martínez-Alier, 2012). Cette définition de la décroissance est élaborée à partir de la notion de métabolisme :

> « La décroissance signifie une société avec un métabolisme plus petit, mais surtout une société avec un métabolisme qui a une structure différente et qui remplit de nouvelles fonctions. La décroissance n'appelle pas à faire moins de la même chose[7] » (D'Alisa, Demaria et Kallis, 2014, p. 4).



Enfin, il faut mentionner le rôle important de certains chercheurs en économie écologique au-delà de ce réseau, car ils ont participé à la mise au point de la méthode dite « Eurostat d'analyse des flux de matières (MFA) » qui est devenue obligatoire pour les pays de l'Union européenne à partir de 2013 (règlement européen nº 691/2011 relatif aux comptes économiques européens de l'environnement). Ils ont également concouru aux travaux de l'IRP du Programme des Nations unies pour l'environnement (Pnue) qui a publié son premier rapport majeur sur les flux de matières à l'échelle mondiale en 2016, intitulé « Global material flows and resource productivity ». Ce rapport s'appuie sur une base de données MFA compilée à partir de données internationales, et il marque une étape importante dans l'évaluation des flux de matières au niveau mondial par l'IRP. En France, il n'existe pas d'obligation légale nationale imposant aux régions de réaliser une analyse des flux de matière à ce jour, mais la méthodologie a été adaptée et promue pour une application à l'échelle infranationale (régions et départements) dès 2014, avec la publication du « Guide méthodologique : Comptabilité des flux de matières dans les régions et les départements » par le Commissariat général au développement durable.

Ce modèle sociométabolique, qui a été construit par cette communauté, permet de développer des indicateurs quantitatifs d'extraction de ressources, de consommation matérielle et énergétique, et de rejets atmosphériques et dans l'environnement (figure 1.1 ci-dessous). Il s'agit ainsi d'établir des bilans matériels et énergétiques, des entrées et sorties de flux d'un territoire. Sont ainsi considérés les extractions intérieures (avec les volumes de déchets d'extraction inutilisée), les importations et exportations, et les flux indirects associés à ces importations et exportations, l'accumulation au stock (*via* les infrastructures et biens durables), le recyclage local et extérieur, les rejets externes (émissions dans l'air, l'eau, les déchets), et les éléments d'équilibrage (*balancing inputs* [BI] et *balancing outputs* [BO]) liés, par exemple, à la consommation de dioxygène lors de la combustion d'énergies fossiles. Ce modèle permet ainsi de travailler sur des indicateurs métaboliques, notamment la consommation de ressources par territoire et/ou par habitant (DMC), et également sur leur empreinte matérielle (MF).

---

7. Traduction de la citation suivante : « *Degrowth signifies a society with a smaller metabolism, but more importantly, a society with metabolism which has a different structure and serves new functions. Degrowth does not call for doing less of the same.* »

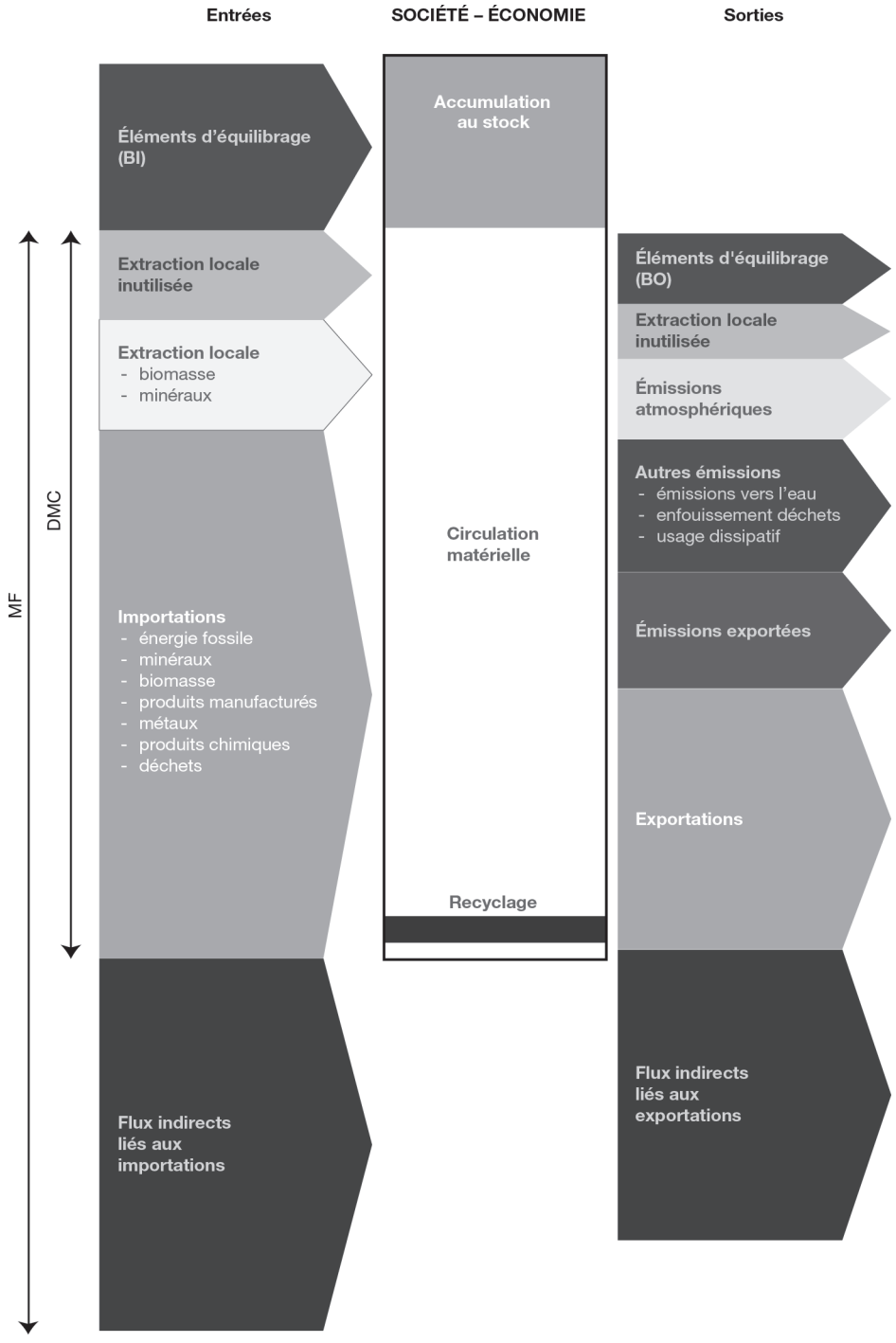



**Figure 1.1. Représentation du modèle métabolique.**

DMC : *domestic material consumption* (consommation matérielle intérieure). DMC = extraction locale + importations – exportations. MF : *material footprint* (empreinte matérielle). MF = DMC + flux indirects liés aux importations – flux indirects liés aux exportations. BI : *balancing inputs* (éléments d'équilibrage en entrée). BO : *balancing outputs* (éléments d'équilibrage en sortie).

L'IRP a également publié un rapport sur les enjeux du métabolisme urbain, intitulé « The weight of cities » (Swilling *et al.*, 2018). Ce document, qui compile de nombreuses recherches, montre que, du fait de l'augmentation de l'urbanisation et de la population urbaine, le poids matériel et énergétique des villes est en tension et ne cesse de croître. À l'échelle mondiale, cela représente environ 80 % de l'énergie, 40 milliards de tonnes de matières et les villes sont responsables de 65 % des émissions atmosphériques (Swilling *et al.*, 2018). Le rapport plaide donc pour une perspective de métabolisme circulaire à l'échelle de la ville-région. Précédemment, le rapport « City-level decoupling » (Swilling *et al.*, 2013) interrogeait le rôle des villes, en tant que système sociotechnique ayant une fonction dans la gouvernance des transitions infrastructurelles plus durables. Cela pose l'enjeu de la durabilité, qui est important dans les transitions du métabolisme urbain.



### Les limites des approches quantitatives

Ces méthodes, bien qu'utiles, présentent des limites. Tout d'abord, elles ne permettent pas d'ouvrir suffisamment la « boîte noire » des territoires étudiés (souvent des nations depuis 2009). Cela conduit à une « déspatialisation » de leur *hinterland*, c'est-à-dire qu'elles ne rendent pas compte des relations de domination entre les villes et les territoires d'où proviennent les ressources ou où sont rejetés les déchets. En abordant l'économie politique à une échelle trop macroscopique, ces approches échouent à analyser finement la diversité des territoires infranationaux.

Une deuxième source de désaccord porte sur le fait que les écologistes industriels accordent peu d'attention aux facteurs socio-économiques ou aux profils métaboliques, et que leurs recherches, dans l'ensemble, restent dépolitisées. Ce techno-centrisme s'appuie surtout sur une approche qui ne remet pas en cause le régime métabolique dominant, mais vise simplement à optimiser et à améliorer l'efficacité des systèmes industriels. En définitive, l'écologie industrielle ignore les rapports de pouvoir sociaux et en vient à ne pas questionner le rôle des réseaux et des infrastructures, alors qu'ils favorisent pourtant l'augmentation des flux de matières et d'énergie.

Pourtant, ces outils restent essentiels pour éclairer les décisions politiques et sensibiliser le public aux enjeux métaboliques. Cette recherche produit des bilans matériels et énergétiques, en développant des méthodes robustes qui peuvent être très utiles pour faire l'évaluation environnementale des systèmes et infrastructures métaboliques.

## RÉPARER ET REFONDER LE MÉTABOLISME : DES APPROCHES INTERDISCIPLINAIRES POUR UNE ÉCOLOGIE DES TERRITOIRES

Les trois écologies scientifiques présentées ci-avant, que sont l'écologie politique, l'écologie sociale et l'écologie industrielle, sont différentes et importantes pour répondre aux défis liés aux flux de matières et d'énergie. On note ainsi des travaux (écologie politique urbaine) plus concentrés sur les relations intra-urbaines, en termes d'inégalités et d'accès aux ressources, qui vont au-delà d'une sociologie urbaine très orientée sur les rapports sociaux en révélant l'enchâssement matériel de ces rapports. D'autres travaux (écologie industrielle et sociale) se focalisent plus sur le contexte extra-urbain, c'est-à-dire sur ce qui relie matériellement les territoires entre eux, et dont les apports sont de prolonger la comptabilité économique en prenant en compte les externalités matérielles et en produisant des

évaluations environnementales des systèmes techniques. Ces deux approches ayant des apports distincts, de nouveaux travaux plaident en faveur des regards hybrides et croisés, notamment par l'extension des études physiques des flux aux dimensions sociales, politiques et culturelles (Bahers, 2021).

Deux autres champs émergent pour faire le pont entre ces approches théoriques et méthodologiques : l'écologie territoriale et l'écologie politico-industrielle. La première est née en France et rassemble urbanistes, aménageurs, économistes, historiens et chercheurs en sciences de l'environnement qui veulent s'interroger autant sur le métabolisme territorial que sur leurs déterminants spatio-temporels. Selon Sabine Barles, l'écologie territoriale a ainsi pour ambition dans une perspective historique de :

> « caractériser les régimes socioécologiques locaux, dont l'expression est le métabolisme territorial […] 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 issues des sociétés humaines » (Barles, 2017).



Il s'agit d'un métabolisme qui associe les déterminants naturels et anthropiques des systèmes urbains, et notamment les interactions entre sociétés et biosphère. Il est ainsi envisagé dans une perspective historique pour renseigner les régimes socio-écologiques sur le long terme, du régime agraire au régime industriel notamment. Le métabolisme est ici territorial, car il évoque l'ensemble des flux d'énergie et de matières mis en jeu par le fonctionnement d'un territoire particulier. Un des objectifs de la caractérisation du métabolisme territorial est également d'envisager sa dématérialisation, c'est-à-dire de réduire les consommations de matières et d'énergie en entrées et sorties de ce territoire. Pour cela, l'étude du métabolisme par les chercheurs de l'écologie territoriale mobilise les méthodes de comptabilité matérielle, notamment celles développées par l'école d'écologie sociale, mais aussi des outils d'analyses sociales et spatiales :

> « Les études sur le métabolisme urbain doivent également aller au-delà de la comptabilité énergétique et matérielle. […] Les analyses doivent prendre en compte les contextes spatiaux et territoriaux, ainsi que le triptyque agriculture-industrie-ville. Il est ainsi possible d'interroger les concepts de proximité, spatiale et sociale, la gouvernance des flux, y compris le rôle des modes de vie et des pratiques urbaines dans les échanges de matières, et le rôle des acteurs locaux et territoriaux. À ce jour, ce champ de recherche interdisciplinaire est fragmentaire[8] » (Barles, 2010).

Au cœur des relations analysées figurent celles des liens de proximité entre agriculture, industrie et ville. Ce triptyque permet d'aborder le contexte spatial des acteurs des filières productives d'un territoire. Ainsi, cette approche interdisciplinaire du métabolisme entend associer la question de flux à la gouvernance des acteurs qui les pilotent. Pour la comptabilité matérielle, la méthode d'analyse des flux de matières est plébiscitée, car elle s'applique à différentes échelles et produit des indicateurs comparables

8. Traduction de la citation suivante : « *Urban metabolism studies must also go beyond energy and material accounting. […] The analyses must consider the spatial and the territorial contexts, as well as the agriculture – industry – city triptych. In this way, it is possible to question the concepts of proximity, both spatial and social; the governance of flows, including the role of lifestyle and urban practices in material exchanges; and the role of local and territorial stakeholders. To date, this field of interdisciplinary research is fragmentary.* »

(Barles, 2009), en fournissant des indicateurs de non-durabilité et en contribuant à des propositions de politique environnementale publique.

Par ailleurs, le champ de recherche de l'écologie territoriale se développe depuis quelques années en France, avec de nombreuses thèses qui portent sur des études en dehors des métropoles, ou sur les questions qualitatives du métabolisme ainsi que sur les jeux d'acteurs et les relations de pouvoir (Bognon, 2014 ; Debuisson, 2014 ; Herbelin, 2018 ; Joxe, 2021 ; Vialleix, 2019). Par ailleurs, l'écologie territoriale est différente de l'écologie industrielle notamment par son ancrage interdisciplinaire et par « sa distance critique vis-à-vis d'approches à caractère prescriptif, normatif ou opérationnel, et son entrée à la fois sociale, écologique et spatiale » (Barles, 2017) :



> « Écologie industrielle et écologie territoriale se rejoignent néanmoins par la méthode. Elles veulent comprendre le système identifié (système industriel ou système territorial) à travers l'analyse de son métabolisme. Dans les deux cas, par métabolisation des flux, il faut entendre la transformation fonctionnelle de ces flux, puis le stockage de matière et d'énergie ainsi transformées. Il faut également considérer le rejet de flux issus du processus de transformation des matières et de l'énergie. Ce raisonnement assimile donc un système d'interactions sociales à un écosystème, ensemble indissociable d'un environnement avec lequel il est en interaction. L'écologie territoriale propose en outre d'approfondir cette compréhension du métabolisme en intégrant, au-delà des flux et des ressources matériels, des flux et des richesses immatériels qui participent du fonctionnement territorial » (Buclet, 2015, p. 19).

En définitive, ces travaux sur l'écologie territoriale proposent une nouvelle façon de gérer le métabolisme urbain, en le réorganisant pour réduire fortement les flux de matières et d'énergie. On observe, par exemple, que la gestion des déchets, sous l'influence croissante des grands groupes multinationaux et des éco-organismes, est organisée pour renforcer les grandes infrastructures centralisées (incinération, enfouissement, recyclage industriel), grâce à un flux continu et durable de déchets urbains (Bahers, 2012 ; Monsaingeon, 2017). Ces recherches montrent que les infrastructures urbaines jouent un double rôle dans l'intensification du métabolisme urbain : d'une part, elles consomment énormément de ressources pour leur construction et leur entretien ; d'autre part, leur fonctionnement en réseau stimule la demande en services et en ressources, en les rendant accessibles à tout moment et en tout lieu.

Une autre approche récente du métabolisme porte le nom d'« écologie politico-industrielle ». Elle est développée par des géographes et par des écologistes politiques formés aux outils de l'évaluation environnementale. Son principe ? Utiliser les méthodes quantitatives de l'écologie industrielle pour nourrir une critique radicale des processus métaboliques, du point de vue de l'écologie politique urbaine. Cette approche va plus loin en combinant une analyse marxiste approfondie, qui lie les dynamiques socio-politiques à des méthodes principalement qualitatives et spatiales, permettant de révéler les flux cachés de consommation de matières et d'énergie. L'objectif est de territorialiser le métabolisme urbain : par exemple, en traçant le lien entre Walmart aux États-Unis, des entreprises forestières russes qui détruisent des écosystèmes primaires dans la région du Primorsky et des fabricants chinois de revêtements de sol (Goldstein et Newell, 2020). Ces travaux cherchent à répondre à une question centrale : quelles filières d'approvisionnement

détruisent quoi, où et quand ? Il s'agit donc de mettre en lumière les chaînes d'approvisionnement et leurs conséquences en termes d'injustices environnementales et sociales.

L'émergence de l'écologie politico-industrielle provient d'un groupe de travail de l'American Association of Geographers qui s'est réuni en 2015, en 2016 et en 2021, puis d'une conférence d'écologie industrielle (Gordon Research Conference on Industrial Ecology) en 2016. L'article fondateur de ce champ est publié dans le journal *Progress in Human Geography* en 2015 et s'intitule « The boundaries of urban metabolism: Towards a political–industrial ecology » (Newell et Cousins, 2015). Un numéro spécial du journal interdisciplinaire *Geoforum* fut ensuite publié en 2017 (Newell, Cousins et Baka, 2017) qui pose les fondements du champ : il y a un mouvement cloisonné de l'écologie industrielle et de l'écologie politique, alors qu'il y aurait des confluences possibles :

> « Ces deux traditions se complètent et leurs forces respectives peuvent être exploitées pour une compréhension plus riche et plus inclusive des relations métaboliques entre la société, la nature et l'espace[9] » (Newell, Cousins et Baka, 2017).



Ainsi, l'écologie politico-industrielle se concentre sur la manière dont les flux et les stocks de ressources (par exemple : les matériaux et l'énergie) façonnent (et sont façonnés par) les processus et les modèles environnementaux, socio-économiques et politiques dans le temps et dans l'espace. En cela, ce champ se réfère aux travaux de la géographie économique sur les *global production networks* qui étudient les process de transformation de la matière incluant l'extraction et les géographies du pouvoir dans lesquelles et à travers lesquelles la production et la consommation de ressources ont lieu. Il s'agit notamment de coupler l'analyse de cycle de vie avec des systèmes d'information géographique (Cousins et Newell, 2015), de politiser les études de flux de matières (Guibrunet, Sanzana Calvet et Castán Broto, 2016), et d'articuler justice sociale et métabolisme énergétique (Pincetl, 2012).

Enfin, l'écologie politico-industrielle a l'ambition de contribuer à faire progresser les géographies de l'énergie, mais également d'autres catégories de flux, de trois manières essentielles : (1) rapprocher les perspectives prescriptives et critiques des études sur l'énergie, (2) révéler les flux discursifs, matériels et de subsistance « cachés » et (3) aider à élaborer des politiques énergétiques et environnementales plus justes et plus inclusives (Baka, 2017).

Pour finir, si ces deux champs émergents semblent très proches dans leur acception interdisciplinaire du métabolisme urbain, il y a quelques différences entre l'écologie territoriale et l'écologie politico-industrielle :

– dans leurs fondements disciplinaires : l'écologie territoriale est revendiquée en urbanisme, en aménagement, en histoire de l'environnement et en ingénierie environnementale, alors que l'écologie politico-industrielle s'inspire de la géographie économique et de l'écologie politique ;

– dans leurs influences : l'écologie territoriale est un mélange entre l'écologie sociale et l'écologie urbaine, alors que l'écologie politico-industrielle est une fusion entre l'écologie industrielle et l'écologie politique ;

– dans leurs méthodes : les chercheurs de l'écologie politico-industrielle utilisent souvent l'analyse de cycle de vie pour mesurer les effets externalisés du métabolisme urbain, alors qu'en écologie territoriale, l'analyse des flux de matières est mobilisée.

---

9. Traduction de la citation suivante : « *these two traditions complement each other and that respective strengths can be harnessed for a richer and more inclusive understanding of the metabolic relations between society, nature, and space* ».

## CONCLUSION. VERS UNE ÉCOLOGIE INTERDISCIPLINAIRE DU MÉTABOLISME

Le métabolisme urbain n'est pas qu'une question technique : c'est un enjeu social, politique et écologique. Nous avons montré qu'il y a des appréhensions très différentes selon le champ, selon le positionnement théorique dans lequel la recherche se place, et au sein même des écologies politiques, sociales et industrielles. La notion de métabolisme est plurielle tant dans ses fondations théoriques que dans ses exutoires. L'écologie politique présente des prescriptions radicales, qui remettent en cause le système économique. Les éco-marxistes interrogent les relations nature-sociétés, les « réparateurs » de la rupture métabolique voient, par exemple, dans l'agriculture urbaine une manière de reconnecter le métabolisme, tandis que les tenants du tournant non humain veulent considérer le rôle de tous les vivants dans le métabolisme social. On y trouve également une critique libertaire et anarchiste du métabolisme considéré comme trop productiviste et qui reproduit une approche dominante. Enfin, les travaux vers une écologie politique urbaine, et notamment leurs liens avec la pensée lefebvrienne (extension du droit à la ville d'Henri Lefebvre) comme droit au métabolisme, sont plus proches des enjeux urbains.



L'écologie sociale se situe plus dans une perspective transformative afin de mieux prendre en charge les externalités physiques pour les réduire. Les enjeux de justice environnementale sont bien présents et évoluent récemment vers les questions de décroissance. L'écologie industrielle développe des outils de comptabilité approfondis dans une optique d'optimisation des systèmes productifs et a permis la publication de grands rapports internationaux qui touchent un large public.

Ces trois écoles d'écologies scientifiques sont complémentaires pour répondre aux défis des flux de matière et d'énergie. En effet, les apports se concentrent autant sur les inégalités et sur l'accès aux ressources en milieu intra-urbain, en mettant en lumière les dimensions matérielles des rapports sociaux, que sur les liens matériels avec les territoires extra-urbains, intégrant les externalités dans les analyses économiques et environnementales. Face à ces perspectives distinctes, des recherches récentes plaident pour une approche croisée, élargissant l'étude des flux physiques aux dimensions sociales, institutionnelles et culturelles.

Deux autres courants jouent ainsi de l'interdisciplinarité : l'écologie politico-industrielle, à l'interface de l'écologie politique urbaine et de l'écologie industrielle, et l'écologie territoriale entre écologie sociale et écologie urbaine. Ces courants présentent des similitudes et des différences dans leurs approches théoriques et méthodologiques. Un début de dialogue entre ces appréhensions est donc établi, afin d'en retirer des lignes de force et des perspectives d'apports supplémentaires.

Dans le chapitre suivant, nous nous focaliserons sur un des types de métabolisme : le métabolisme urbain. En effet, le métabolisme urbain permet de situer l'analyse socio-matérielle dans un espace qui permet la circulation des ressources et implique l'étude des processus sociotechniques et sociopolitiques sous-jacents. Les activités humaines à l'origine des consommations et rejets sont ainsi comprises sous le prisme des mécanismes sociaux et politiques à l'œuvre dans nos sociétés. Cette focalisation permet ainsi d'interroger les systèmes humains, sociaux, politiques et économiques qui structurent et gouvernent les processus métaboliques urbains.

# *Chapitre 2*
# *Penser la ville à travers ses flux, ses inégalités et ses infrastructures*

Un aspect récurrent que l'on retrouve dans chacune des écoles du métabolisme est la reconnaissance de l'importance de la dimension spatiale. Réciproquement, le métabolisme urbain est considéré par certains auteurs comme « une série d'intersections entre le capital et la nature, englobant les infrastructures, les réseaux technologiques et d'autres composantes fonctionnelles de l'espace urbain[10] » (Gandy, 2018, p. 102). L'espace urbain englobe donc le métabolisme comme composante fonctionnelle, de même que l'infrastructure, les réseaux technologiques et le capital. Pourtant, si l'importance de la dimension spatiale est reconnue et soulignée par des chercheurs issus des différentes écologies, ils utilisent le terme d'« espace » de manière très variable pour décrire des phénomènes différents. La polysémie de ce terme illustre non seulement le large éventail d'études et d'applications des recherches métaboliques, mais aussi les différentes portées politiques. Cette variabilité implique la production et la consolidation des connaissances éparses et rend difficile leur application dans l'élaboration des politiques dans les domaines de l'urbanisme, du développement économique, de la gestion des ressources et des déchets.

Dans ce chapitre, nous soulignerons comment les chercheurs en métabolisme ont intégré cette approche spatiale dans leurs travaux et ce que cette intégration peut apporter au concept plus large du métabolisme urbain. En effet, il apparaît qu'un nombre croissant de recherches se réfère à cette notion et s'arrime à elle, à tel point que nous pouvons nous demander quelle est la place de l'espace dans la recherche sur le métabolisme urbain et s'il y a un tournant spatial dans les études sur le métabolisme urbain.

Ainsi, la dimension spatiale du métabolisme urbain ne devrait pas être considérée comme universelle et uniforme, car elle peut être fortement politisée et renvoie à de nombreux processus socio-économiques et territoriaux contextuels. La dimension spatiale du métabolisme urbain concerne donc tout ce qui a trait à l'espace dans les processus métaboliques urbains, dans leur lien avec la réalité sociale et des actions par les opérateurs des sociétés dans l'espace et qui ont un effet sur l'espace. Il s'agit donc d'établir un état de l'art de la recherche sur la spatialisation du métabolisme urbain, en incluant un large spectre de disciplines (et pas seulement les domaines dominants de la comptabilité et de la modélisation) et en en tirant une nouvelle définition intégrative de l'espace dans le métabolisme urbain.



10. Traduction de la citation suivante : « *a series of intersections between capital and nature encompassing infrastructure, technological networks, and other functional components of urban space* ».

## SPATIALITÉS DU MÉTABOLISME URBAIN : QUE VOIT-ON QUAND ON REGARDE LA VILLE PAR SES ÉCHANGES ?

### Le métabolisme urbain et les rapports de domination entre territoires

Comment les villes organisent-elles leur approvisionnement en ressources, et à quel prix pour les territoires qui les fournissent ? Cette question est au cœur des recherches sur les inégalités spatiales du métabolisme urbain. Les villes ne fonctionnent pas en vase clos : elles dépendent de vastes réseaux d'approvisionnement (nourriture, énergie, matériaux) qui s'étendent bien au-delà de leurs limites, souvent jusqu'à des régions lointaines. Ces dynamiques créent des rapports de domination entre métropoles et leurs *hinterlands* (les territoires qui les alimentent), dans lesquels les premiers imposent leurs logiques aux seconds.

Matthew Gandy souligne que le métabolisme urbain n'est pas qu'une question technique, mais c'est aussi une dimension politique de l'espace (Gandy, 2018). Il révèle les vulnérabilités et les conflits liés à l'accès inégal aux ressources. Par exemple, les déchets d'une ville peuvent devenir une charge pour les territoires voisins, tandis que les ressources naturelles extraites ailleurs alimentent son développement. Pourtant, ces recherches peinent encore à quantifier précisément les flux et à les intégrer dans les politiques publiques, car elles se concentrent davantage sur les dynamiques sociales que sur les mesures techniques.



Un autre problème est le « *methodological cityism* » (« urbano-centrisme ») (Angelo et Wachsmuth, 2015) : les études se focalisent souvent sur les villes elles-mêmes, en négligeant les logiques internes des territoires d'approvisionnement. Certains travaux récents tentent de corriger ce biais en étudiant, par exemple, les espaces d'extraction (mines, forêts, zones agricoles) qui subissent les impacts du métabolisme urbain (Arboleda, 2016b).

### Relocaliser le métabolisme : un défi économique et territorial

Face à la mondialisation des flux de ressources, une question émerge : peut-on relocaliser le métabolisme urbain ? Historiquement, les villes ont externalisé leur approvisionnement, mais des initiatives récentes cherchent à réinternaliser certains flux, comme les terres excavées, les déchets organiques ou le bois local (Kampelmann, 2020). Ces démarches s'inscrivent dans une logique de relocalisation métabolique, où les ressources sont réutilisées localement plutôt que jetées ou importées.

Cependant, ces approches se heurtent à plusieurs limites :

– Elles manquent souvent d'une approche géographique des réseaux dans leur ensemble et étudient principalement les ressources par la chaîne de valeur ou par le produit marchand (privilégiant un seul flux/service/produit plutôt que leurs échanges et interactions dans la ville).

– Elles manquent d'une vision géographique : à quelle échelle relocaliser ? À l'échelle d'un quartier, d'une ville, d'une région ? Les stratégies actuelles se contentent souvent de l'échelle administrative, sans toujours correspondre aux réalités économiques. La plupart des actions d'économie circulaire se concentrent sur la valorisation et sur le recyclage des ressources à l'échelle territoriale, mais elles négligent souvent les échelles géographiques mondialisées qui peuvent être impliquées dans ces processus. La revendication récurrente de relocaliser le métabolisme urbain ne s'appuie que rarement sur un questionnement de l'échelle spatiale à laquelle cela devrait être mis en œuvre. C'est souvent implicitement à l'échelle du territoire qui produit la stratégie, même si, parfois, cela ne correspond pas à la réalité du marché des ressources.

Des travaux en géographie économique commencent à combler ces lacunes en analysant, par exemple, comment les proximités territoriales influencent la relocalisation (Bahers, Durand et Beraud, 2017 ; Bognon, 2017).

### Les régimes métaboliques et leur ancrage spatial

Les sociétés ont organisé leur métabolisme au fil du temps, et l'espace y a toujours joué un rôle important. Les recherches en écologie socio-économique distinguent plusieurs régimes historiques. Durant le régime socio-écologique agraire, les villes dépendaient des campagnes voisines pour leur nourriture, avec une externalisation partielle des flux (Billen, Garnier et Barles, 2012 ; Haberl *et al.*, 2016). Avec le régime socio-écologique industriel, les villes ont délocalisé massivement leur approvisionnement, s'appuyant sur des réseaux mondiaux (Barles, 2015).



Pourtant, ces analyses considèrent rarement l'espace comme un enjeu politique. Les conflits liés à l'accès aux ressources, les luttes pour leur contrôle ou les alliances entre acteurs locaux sont peu étudiés. Certains travaux récents intègrent une dimension politique, en croisant écologie et économie politique (Cahen-Fourot et Magalhães, 2020 ; Schaffartzik, Duro et Krausmann, 2019), mais ils restent souvent limités aux échelles nationale ou régionale, sans toujours saisir les dynamiques locales.

Une autre limite est l'absence d'analyse multi-scalaire : comment les flux locaux s'articulent-ils avec les réseaux globaux ? Comment les villes interagissent-elles avec leurs *hinterlands* ? Ces questions restent souvent en suspens.

### Métabolisme urbain et planification : un dialogue difficile

Comment intégrer le métabolisme urbain dans la planification des villes ? Les urbanistes et les concepteurs peinent à prendre en compte la complexité spatiale des flux (Ramaswami *et al.*, 2012). Plusieurs obstacles se dressent. Il y a d'abord un manque de formation car les professionnels de l'urbanisme ne sont pas toujours familiarisés avec les enjeux métaboliques (Galan et Perrotti, 2019). Puis il demeure une vision homogène des flux. Le métabolisme est souvent traité comme un ensemble uniforme à l'échelle métropolitaine, sans distinguer les spécificités locales. Enfin, il réside une focalisation sur le bâtiment. En effet, les études se concentrent sur la gestion des déchets de chantier ou sur l'efficacité énergétique des constructions, mais négligent les interdépendances entre flux (eau, énergie, nourriture) et les acteurs locaux qui les gèrent.

Pourtant, les infrastructures urbaines (réseaux d'eau, d'énergie, de transport) jouent un rôle clé dans le métabolisme (Coutard, Hanlet et Zimmerman, 2004 ; Meilinger et Monstadt, 2022 ; Rutherford, 2020). Elles « métabolisent » les ressources à l'échelle des villes, mais leur gouvernance reste souvent technocratique, sans toujours intégrer les dimensions sociales et environnementales. Une approche plus globale devrait analyser les impacts des villes sur les écosystèmes productifs (forêts, zones agricoles, mines), mais cela reste rare.

### Modéliser les flux : une approche spatialement explicite, mais encore limitée

Une petite communauté de chercheurs en écologie industrielle tente de cartographier les flux métaboliques au-delà des villes, en identifiant leurs *hinterlands*. Ces travaux produisent des visualisations fines des stocks et des flux (par exemple : les matériaux

de construction d'un bâtiment, les entrées et sorties d'une station d'épuration ou d'un marché alimentaire) (Bradshaw *et al.*, 2020 ; Wielemaker *et al.*, 2020 ; Zhang *et al.*, 2016), mais ils butent sur plusieurs limites :

– une « boîte noire » territoriale : les *hinterlands* sont souvent traités comme des espaces vagues, sans analyser les acteurs locaux (humains et non humains) qui y vivent.

– une approche descendante : les modèles restent souvent technocentrés, sans intégrer les dynamiques sociales et politiques des territoires.

– un manque de différenciation : les inégalités entre acteurs dominants et dominés (par exemple : entre multinationales et petites exploitations agricoles) sont rarement prises en compte.

Ces méthodes pourraient pourtant ouvrir la boîte noire des villes en croisant données quantitatives et analyses socio-politiques. Par exemple, comment les décisions locales (comme la construction d'une usine de recyclage) influencent-elles les flux métaboliques ? Comment les conflits d'usage (entre agriculture et urbanisation) redessinent-ils les territoires ? Ces questions restent largement inexplorées.



## Pour une définition de la spatialité du métabolisme urbain

Il existe plusieurs appréhensions du rôle de l'espace dans les recherches. Un cadre théorique et interdisciplinaire de la spatialité du métabolisme urbain doit intégrer ces différentes dimensions de l'espace. En effet, il est important de spatialiser le métabolisme urbain, d'une part, pour comprendre ce que le métabolisme urbain fait avec l'espace et ce que cela produit sur l'espace et, d'autre part, pour envisager des interfaces entre plusieurs approches qui se complètent plus qu'elles ne s'opposent.

Par ailleurs, ici, nous ne différencions pas les villes des territoires urbains, car ce n'est pas une redéfinition du territoire qui est en jeu, mais la dimension spatiale de l'organisation, le fonctionnement et l'évolution des territoires au prisme du métabolisme. La ville est un lien d'enjeux propice à une analyse matérielle située, en évitant d'écraser l'hétérogénéité des territoires. En cela, nous nous rapprochons de la perspective d'appréhender l'urbain comme un objet socio-écologique et donc comme une projection sociale sur l'espace pour rendre compte de la pluralité des configurations métaboliques (Barles *et al.*, 2020).

Pour faciliter l'articulation de ces différentes représentations de l'espace et accélérer leur consolidation et leur conceptualisation par les disciplines qui les développent, une définition est proposée :

*L'espace dans le métabolisme urbain est une construction physique et conceptuelle qui considère l'espace comme 1) un espace politique, dans le sens où se jouent les relations matérielles de domination, les inégalités écologiques et les stratégies des acteurs, 2) un espace économique territorial dans lequel s'organisent les chaînes de valeurs des matières premières, des marchandises et des déchets, 3) un espace socio-écologique qui reflète les interactions société-nature à travers les cycles biogéochimiques locaux et globaux, 4) un espace de planification des infrastructures métaboliques urbaines et des réseaux sociotechniques et 5) un espace de flux qui concerne la circulation des matières, de l'énergie et des déchets entre la ville et son* hinterland *(y compris l'empreinte spatiale de l'utilisation des ressources urbaines et des émissions polluantes).*

Ainsi, pour synthétiser ces approches, on peut donc dire que « *la spatialisation du métabolisme urbain se concentre sur la dimension spatiale des processus écologiques, économiques, sociotechniques et politiques qui sont à l'origine des flux de matières et d'énergie mis en jeu dans le fonctionnement d'un territoire en lien avec son* hinterland*, et qui réciproquement transforment cette organisation* ».

Cette définition intégrative et interdisciplinaire combinant les flux, les acteurs, la gouvernance, les infrastructures et les techniques de modélisation tente de fournir une interface sur laquelle les recherches peuvent converger et construire de nouvelles perspectives cumulatives. Un schéma simplifié de l'espace dans les études sur le métabolisme urbain (figure 2.1) permet d'illustrer les différentes approches de l'espace identifiées. Il comprend l'espace politique (en violet), représenté par les relations matérielles de domination entre la ville et l'*hinterland*, et les inégalités écologiques au sein de la société, qu'elle soit urbaine ou rurale. L'espace économique territorial (en bleu) renvoie à l'organisation de la chaîne d'approvisionnement qui traverse les territoires, des *hinterlands* aux zones de consommation. L'espace socio-écologique (vert) est représenté par les interactions société-nature à travers l'externalisation du métabolisme urbain dans les *hinterlands*. Cela comprend l'approvisionnement externe en nourriture, en minéraux et en énergie. L'espace de planification (marron) englobe les infrastructures urbaines et les réseaux sociotechniques tels que les bâtiments, les réseaux de transport, les services de gestion des déchets et de l'énergie, à l'intérieur de la ville, mais aussi à l'extérieur, *via* l'infrastructure d'extraction et de transformation des matériaux. Enfin, l'espace des flux (gris) est représenté par les flèches entre l'*hinterland* et la ville (et vice versa), qui montrent les échanges de marchandises et de matières secondaires, de produits agricoles et de déchets organiques, d'importations et d'exportations d'énergie, de matériaux de construction et de déchets en vrac, de produits manufacturés et de déchets d'équipement, de bois et de déchets de bois.

En l'état, cette définition est cumulative et notre argument n'est pas de préconiser un amalgame entre toutes les perspectives possibles sur le métabolisme urbain. Il s'agit plutôt de montrer et de reconnaître la diversité des approches comme un moyen d'identifier des questions communes pouvant générer un dialogue interdisciplinaire. Ces interfaces dépendent fortement des questions qui sont posées. Par exemple, il serait opportun de rapprocher les approches socio-écologiques et infrastructurelles lorsqu'on veut aborder le cas de la circulation urbaine d'azote des humains aux non humains qui est un enjeu métabolique. De même, l'analyse des paysages urbains, qui illustre la transformation des écosystèmes naturels dans le tissu urbain et l'environnement bâti, pourrait être mieux révélée en mobilisant une approche métabolique de l'espace politique sur les thématiques d'appropriation foncière et une approche de modélisation des conséquences écologiques de ces transformations.

En conclusion, nous avons montré dans ce chapitre qu'il y a un certain dynamisme de ces recherches sur la dimension spatiale du métabolisme urbain. Dans la section suivante, nous proposerons deux notions qui permettent une friction entre différentes approches spatiales du métabolisme urbain à même de produire des connaissances interdisciplinaires. Il s'agit des inégalités socio-métaboliques et des infrastructures métaboliques

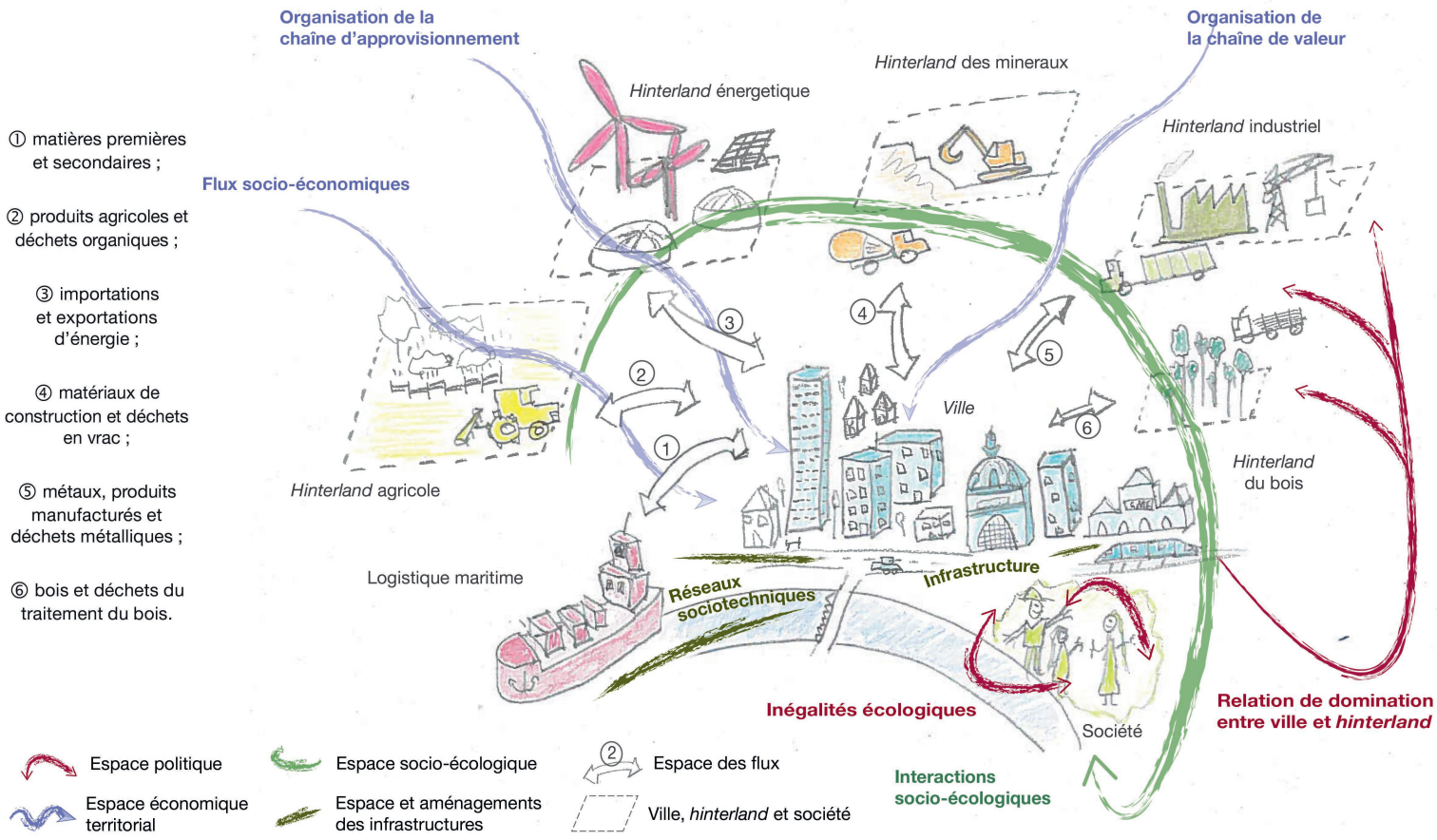



**Figure 2.1. Représentation graphique de l'espace dans le métabolisme urbain (source : Bahers *et al.*, 2022).**

## VERS UN CADRE DES INÉGALITÉS SOCIO-MÉTABOLIQUES

L'étude du métabolisme urbain peut révéler des nœuds infrastructurels propices aux nuisances environnementales et des empreintes matérielles différentes selon les populations. Elle permet aussi de comprendre des dépendances entre les villes et les territoires pour l'extraction des ressources et la production, ainsi que pour la gestion des déchets. Il serait donc opportun d'avancer la notion d'inégalités socio-métaboliques comme une interface interdisciplinaire des approches métaboliques. En quoi le métabolisme urbain permet-il d'appréhender les inégalités sociales et territoriales ?

Selon nous, les inégalités socio-métaboliques désignent les inégalités sociales dans la production, dans la circulation, dans l'appropriation et dans les impacts des flux de matière et d'énergie qui rendent possible le fonctionnement des sociétés (eau, nourriture, énergie, matériaux, déchets, sols, biomasse, etc.). Elles soulèvent des questions cruciales : qui extrait les ressources ? Qui en profite ? Qui subit les nuisances, les risques et les déchets ? Enfin, qui détient le pouvoir de contrôler les infrastructures et les décisions liées à ces flux ?



Le terme « métabolique » renvoie ici à l'idée que les sociétés fonctionnent comme des systèmes métaboliques, transformant en permanence des ressources naturelles en biens, en services, en déchets et en pollutions. Ces inégalités sont donc structurelles, inscrites dans les modes de production, de consommation et d'aménagement. Elles ne se limitent pas à l'exposition, mais interrogent l'ensemble de la chaîne métabolique, depuis l'extraction jusqu'aux déchets, et les rapports de pouvoir qui la structurent.

Quatre approches du lien entre inégalités et métabolisme sont possibles :

1. le voisinage d'infrastructures métaboliques, en lien avec la proximité aux nuisances et infrastructures ;
2. l'inégalité dans la contribution au métabolisme liée à l'impact écologique de la consommation sur un territoire (notamment selon les revenus des habitants) ;
3. les inégalités socio-métaboliques en lien avec les relations entre villes et hinterlands ;
4. le renforcement des inégalités par les politiques urbaines de transformation du métabolisme.

Le voisinage d'infrastructures métaboliques, en lien avec la proximité aux nuisances et infrastructures, renvoie notamment aux inégalités environnementales qui ont fait l'objet de nombreux travaux (Durand et Jaglin, 2012 ; Emelianoff, 2008 ; Faburel, 2012). Les registres d'inégalités environnementales se sont concentrés sur l'accès aux aménités urbaines, sur les risques environnementaux liés aux infrastructures, sur les nuisances environnementales en lien avec des seuils d'exposition et sur l'incapacité d'influence sur les politiques environnementales et urbaines (Villalba et Zaccai, 2007) et y associant « les comportements des habitants qui influent sur la nature des expositions » (Charles *et al.*, 2007).

Premièrement, la notion d'inégalité environnementale conduit à s'intéresser aux rapports des populations et groupes sociaux à leur environnement, qu'il s'agisse de l'exposition aux risques et nuisances, ou de l'accès aux ressources naturelles et aux aménités. Deuxièmement, les inégalités environnementales révèlent aussi l'impact social des politiques publiques à visée environnementale. Ainsi :

> « Comme les inégalités en matière de santé ou d'éducation, elle [l'inégalité environnementale] est pour le sociologue une forme d'inégalité sociale en tant qu'elle se

> cumule et se mêle à d'autres formes d'inégalités économiques et sociales » (Deldrève et Candau, 2014).

Il y a donc un cumul entre inégalités sociales et inégalités environnementales, qu'il est important de révéler. Cela renvoie directement à la problématique de la justice environnementale, et aux effets des politiques publiques sur le renforcement des discriminations sociales et environnementales.

Cyria Emelianoff différencie les notions d'inégalités écologiques et environnementales. Les inégalités écologiques se rapportent, selon elle, plus aux impacts écologiques de la consommation. Il s'agit, d'une part, de prendre en compte l'empreinte différenciée selon les niveaux de vie, ainsi que les droits à polluer :



> « L'inégalité écologique a une signification plus large que l'inégalité environnementale. On peut considérer que les individus et les groupes sociaux sont inégaux sur un plan écologique, et non seulement environnemental, par les impacts qu'ils génèrent sur les écosystèmes, c'est-à-dire par les quantités de polluants relatifs à leurs modes et niveaux de vie, ou encore la taille de leur empreinte écologique, si l'on choisit un indicateur simplifié. La redistribution des droits à polluer ou à utiliser les capacités auto-épuratrices des écosystèmes, ce qu'on appelle les "puits", est au cœur des réflexions relatives à l'équité écologique à une échelle planétaire, depuis notamment les travaux d'Anil Agarwal. La notion d'inégalité écologique renvoie donc à une distribution inégale de biens, de maux environnementaux et de droits à polluer » (Emelianoff, 2008).

Il s'agit donc de s'intéresser aux inégalités des contributions aux impacts écologiques, ou, autrement dit, aux inégalités dans la contribution au métabolisme. Toutes les populations n'ont en effet pas les mêmes empreintes écologiques. Le Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie (Credoc) a, par exemple, montré, au travers des enquêtes de tendances de consommation en 2019, que l'impact écologique d'un consommateur (notamment par ses émissions de gaz à effet de serre) dépend largement de son revenu et plus généralement de son capital économique (Sessego et Hébel, 2019). Par conséquent, les inégalités environnementales et écologiques peuvent se répondre : les populations les plus précaires subissent plus les nuisances environnementales, alors qu'elles ne sont pas celles qui contribuent le plus aux impacts écologiques qui affectent un territoire. C'est aussi vrai dans le contexte des pays du Sud comme l'a montré Mathieu Durand en étudiant la proximité des infrastructures de traitement des déchets à Lima (Pérou) avec les quartiers de grande pauvreté, alors que ce sont les quartiers des classes aisées qui produisent le plus de déchets et qui bénéficient d'un haut niveau de service en termes de collecte des ordures (Durand, 2012).

Certains chercheurs explorent par ailleurs les inégalités de consommation matérielle entre les pays, directement corrélées au PIB d'un pays et aux revenus de leurs habitants (Duro, Schaffartzik et Krausmann, 2018 ; Schaffartzik, Duro et Krausmann, 2019). Ainsi, l'inégalité de la consommation matérielle par habitant est déterminée par l'intensité matérielle et par la richesse d'un pays, mais différemment selon les catégories de matières (surtout les matériaux de construction, puis les métaux et les énergies fossiles). L'IRP des Nations unies a, par exemple, publié le travail de Julia K. Steinberger sur les données de taux métaboliques (Steinberger, Krausmann et Eisenmenger, 2010), c'est-à-dire sur la consommation de ressources par habitant, permettant de comprendre notamment

la corrélation globale entre l'utilisation des ressources et le revenu de 175 pays dans le monde. Plus le pays est riche (mesuré avec le PIB), plus le pays consomme de ressources par personne par an.

Pour continuer à propos du travail de Julia K. Steinberger, il s'agit aussi de regarder au-delà des frontières urbaines pour réduire la consommation matérielle (Weisz et Steinberger, 2010). En effet, l'approche par l'empreinte métabolique attribue à la ville considérée tous les flux d'énergie et de matières amont, c'est-à-dire tous les flux tout au long de la chaîne de production des biens et services consommés, qu'ils se situent à l'intérieur ou à l'extérieur des limites territoriales de la ville. Ainsi, une question centrale porte sur le rôle du commerce dans l'inégalité métabolique, en prenant en compte les flux d'approvisionnement, mais aussi les flux liés à l'extraction et à la production de biens conçus pour être exportés vers d'autres territoires (Duro, Schaffartzik et Krausmann, 2018).



Par ailleurs, l'urbanisation en soi n'est peut-être pas à blâmer pour sa consommation matérielle et énergétique élevée, mais c'est plutôt le mode de vie des personnes à revenu élevé habitant principalement dans les villes qui est à évaluer (Weisz et Steinberger, 2010). Ces recherches indiquent qu'à revenus égaux, les habitations urbaines consomment moins de ressources en termes d'utilisation directe d'énergie par les ménages que les habitations de type rural, et que l'on peut s'attendre à des potentiels de réduction significatifs grâce à une meilleure conception des formes urbaines, des infrastructures et des bâtiments.

Il s'agit, avec les inégalités socio-métaboliques, de s'intéresser à l'extraction, à la production et à la circulation des ressources, que ce soit à l'échelle mondiale ou locale. En quoi la connaissance de la circulation des flux de matière et d'énergie qui traversent un territoire permet-elle de mieux saisir les inégalités qui en résultent ? Les rapports de force et de pouvoir entre villes et territoires d'approvisionnement et de rejets doivent donc aussi être analysés.

Ainsi, les inégalités socio-métaboliques ne peuvent pas être réduites à l'échelle urbaine, tout comme les flux matériels. Dans le cas des infrastructures de traitement des eaux usées à Mumbai, McFarlane affirme que la lutte contre les inégalités socio-métaboliques ne se limite pas à la question de l'eau, mais elle concerne aussi les processus qui affectent l'utilisation de l'eau, tels que le logement, les pratiques d'économie d'eau, des stratégies d'entreprise, des tuyaux d'irrigation ou la politique agricole (McFarlane, 2013).

Ces inégalités socio-métaboliques peuvent donc se comprendre dans les relations entre ville et *hinterland*. Comme l'expliquent Broto, Allen et Rapoport :

> « En tant que centres d'accumulation de capital et de structures dissipatives, les zones urbaines auront une demande croissante de ressources provenant de la périphérie, ce qui contribuera à l'inégalité structurelle entre le centre et la périphérie dans le système mondial[11] » (Broto, Allen et Rapoport, 2012).

Ces relations métaboliques interterritoriales sont une voie de recherche qui pourrait également être explorée en lien avec les inégalités. La territorialisation du métabolisme urbain peut révéler les interconnexions et les dépendances entre les territoires pour l'extraction des ressources et la fabrication, ainsi que pour la gestion des déchets. Elle révèle

11. Traduction de la citation suivante : « *as centers of capital accumulation and dissipative structures, urban areas will have an ever-increasing demand for resources from the periphery, contributing to structural inequality between the core and the periphery in the world system* ».

parfois un métabolisme inégal centré sur la ville qui hiérarchise des territoires proches en fonction de leur position et de leur rôle dans les opérations d'extraction et de logistique des flux de matériaux et de déchets (Blaszkiewicz et Choplin, 2024). Ces relations sont, dans certains cas, caractérisées comme prédatrices, coloniales et unidirectionnelles (Arboleda, 2016a). Cela rejoint également la théorie de l'« échange écologiquement inégal » qui prend explicitement en compte les aspects matériels du commerce international et postule qu'il existe des transferts nets asymétriques de ressources (y compris de main-d'œuvre) des pays à bas salaire vers les pays riches (Hornborg et Martínez-Alier, 2016). L'échange écologiquement inégal permet aux zones à revenu élevé (notamment les villes des pays riches) de s'approprier simultanément des ressources et de générer un excédent monétaire par le biais du commerce international, ce qui a des répercussions considérables sur la durabilité mondiale (Dorninger *et al.*, 2021).



Néanmoins, il existe aussi des relations dans des modèles de coopération plus interterritoriaux. En effet, les *hinterlands* ne sont pas seulement dominés par les métropoles. Ces territoires sont aussi dans la capacité à formuler des stratégies socio-économiques et collaboratives avec les métropoles, ou, au contraire, des stratégies de rupture et d'opposition. Il s'agit, par exemple, de développer une filière locale de production écologique à destination d'un bassin urbain de proximité dans des volumes négociés entre les territoires. À l'opposé, une stratégie de rupture consiste au refus d'approvisionner une infrastructure urbaine comme une chaudière à biomasse par l'extraction excessive d'une ressource (en l'occurrence du bois ou des déchets de bois). Quel type de gouvernance des relations interterritoriales peut être proposé au niveau local et quelles formes de négociations restent éventuellement à analyser pour réduire ces inégalités socio-métaboliques ? Il s'agit aussi de reconnaître que les villes n'ont pas vocation à devenir complètement autonomes et doivent construire leur interterritorialité avec les territoires environnants.

Enfin, la quatrième approche du lien entre inégalités et métabolisme concerne les politiques urbaines de transformation du métabolisme, notamment *via* les infrastructures, qui renforcent des inégalités et que la connaissance du métabolisme urbain permet de révéler. Les politiques ont un impact sur les métabolismes et sur les questions de distribution à toutes les échelles. La redistribution physique des flux matériels s'accompagne souvent d'un changement dans le mode d'organisation sociale. Ainsi, certains choix politiques d'infrastructures peuvent conduire à recréer des discriminations en avantageant des quartiers favorisés ou des pratiques industrielles, et, à l'opposé, peuvent permettre de désenclaver des quartiers populaires. C'est particulièrement le cas pour l'eau :

> « Alors que les élites urbaines bénéficient d'un approvisionnement en eau relativement abondant et abordable grâce à des infrastructures en réseau, les citadins pauvres n'ont généralement qu'un accès limité aux réseaux d'approvisionnement en eau et dépendent plutôt de vendeurs d'eau qui pratiquent des prix beaucoup plus élevés […] les conditions matérielles des environnements urbains sont contrôlées par les élites et servent leurs intérêts, au détriment des populations marginalisées[12] » (Broto, Allen et Rapoport, 2012).

12. Traduction de la citation suivante : « *While urban elites benefit from a relatively plentiful and affordable water supply coming from networked infrastructure, the urban poor typically have limited access to water supply networks, relying instead on water vendors who charge much higher prices* […] *the material conditions of urban environments are controlled by and serve the interests of elites, at the expense of marginalized populations.* »

Ainsi, les groupes favorisés auraient une influence plus importante dans une circulation paroxystique des flux et dans un régime métabolique dominant et croissant. Par ailleurs, si les groupes sociaux favorisés et les institutions puissantes peuvent dominer la gouvernance des flux urbains, ils peuvent être remises en question ou subverties par les pratiques quotidiennes des individus et des groupes (Bulkeley, Castán Broto et Maassen, 2014). Ainsi, il est intéressant d'étudier les politiques de transformation des infrastructures urbaines pour comprendre si elles accentuent (ou réduisent) les inégalités sociales, spatiales et environnementales.

En conclusion, l'analyse métabolique spatialisée permet des apports complémentaires sur les enjeux d'inégalités environnementales et écologiques, grâce aux méthodes de suivi et de mesure des flux de matières et d'énergie. L'approche métabolique révèle, par exemple, que les populations ayant les plus faibles empreintes matérielles sont aussi les plus précaires qui subissent plus les nuisances environnementales. De plus, la notion d'inégalité socio-métabolique enrichit le débat sur les inégalités, car l'analyse spatiale des empreintes matérielles permet de comprendre et de mesurer des relations inégales entre villes et *hinterlands*. En retour, l'entrée par les inégalités socio-métaboliques permet de révéler que les politiques urbaines de transformation du métabolisme peuvent renforcer les échanges écologiques inégaux entre ville et *hinterland*, ou les réduire en développant des stratégies de complémentarités et de synergies, par le développement de filières courtes et écologiques d'approvisionnement, ou d'infrastructures qui engagent de la sobriété matérielle.



## FUTURS DES INFRASTRUCTURES MÉTABOLIQUES

Olivier Coutard et Daniel Florentin, dans l'introduction de l'ouvrage *Handbook of Infrastructures and Cities* qu'ils coordonnent, expliquent l'origine de la notion d'infrastructure urbaine à partir des travaux pionniers de Joel Tarr et Gabriel Dupuy dans les années 1980 et aboutissent à la définition suivante :

> « le terme "infrastructure" a, jusqu'à récemment, désigné spécifiquement les grands réseaux technologiques développés pour assurer, notamment, l'approvisionnement en énergie et en eau, la collecte et le traitement des déchets et des eaux usées, ainsi que les services de transport et de communication qui sous-tendent le fonctionnement des économies, des sociétés, des villes et des territoires contemporains. À ce titre, les infrastructures sont conçues comme l'expression matérielle de choix et d'organisations sociopolitiques qu'elles contribuent à leur tour à façonner[13] » (Coutard et Florentin, 2024).

Si on peut dire que toutes les infrastructures transforment les matières et ont, à ce titre, un rôle dans l'évolution des régimes métaboliques, nous voulons mettre l'accent sur cette relation entre métabolisme et infrastructures urbaines, c'est pourquoi nous parlons d'infrastructures qui métabolisent les ressources ou plus simplement d'infrastructures métaboliques. Ainsi, le régime socio-écologique urbain de l'ère industrielle a comme caractéristique majeure « l'importance de la partie infrastructurelle du métabolisme, qui

13. Traduction de la citation suivante : « *The term "infrastructure" has, until recently, referre d specifically to the large technological networks developed to ensure, especially, energy and water supply, waste and wastewater collection and treatment, and transportation and communications services that underpin the functioning of contemporary economies, societies, cities and territories. As such, infrastructures are conceived as material expressions of sociopolitical choices and organisations, which they in turn contribute to shape.* »

s'inscrit dans un processus de mise en réseau généralisé développé par les ingénieurs et qui crée des dépendances techniques urbaines » (Barles, 2015).

Dès 2013, certains auteurs abordent la question de la reconfiguration des infrastructures pour une gouvernance des flux de ressources plus durables (Swilling *et al.*, 2013). En effet, les infrastructures construites aujourd'hui affecteront les flux de ressources à l'échelle de la ville pour les décennies à venir. Le rapport préconise donc des actions publiques et privées. Du côté des pouvoirs publics qui détiennent la majorité des infrastructures, les urbanistes et autres concepteurs devraient donc se concentrer sur l'efficacité des ressources urbaines en s'appuyant sur des perspectives de durabilité à long terme et non sur le « *business as usual* ». Du côté des acteurs privés, ils doivent jouer un rôle pour tirer des enseignements des innovations et pour renforcer les capacités de gestion du changement à l'échelle de la ville, ainsi qu'en tant qu'investisseurs afin de transposer à grande échelle des innovations de niche éprouvées qui pourraient être traduites en nouveaux projets de démonstration d'infrastructures urbaines durables à l'échelle d'une ville.



L'importance du rôle des infrastructures conduit à rematérialiser les questions infrastructurelles pour prolonger les liens entre approches par les ressources et par l'écologie politique urbaine. En effet, les infrastructures sont dites « métaboliques » car elles transforment la matière pour les sociétés, ont un impact prépondérant dans la production de l'espace lié à leurs externalisation, expansion et mise en globalité. Cette entrée permet également d'interroger les futurs métaboliques car les infrastructures sont projetées dans des imaginaires technologiques.

## Matérialité et écologie politique urbaine

Des débats récents ont eu lieu dans le domaine de l'écologie politique urbaine pour repenser et redéfinir conceptuellement les infrastructures. Parmi plusieurs perspectives, Wiig *et al.* (2022) mentionnent celle de la transformation métabolique dans l'introduction du numéro spécial intitulé « Splintering urbanism at 20: mapping trajectories of research on urban infrastructures ». L'objectif est de mettre en évidence les politiques de gestion et d'utilisation des ressources dans le contexte d'une circulation et d'une accrétion inégales *via* les infrastructures. Dans ce numéro, Coutard et Florentin (2022, p. 2) appellent « à un "tournant métabolique" plus sensible aux ressources dans les études sur les infrastructures ». En effet, si la production scientifique de l'écologie politique urbaine est prépondérante sur le sujet des processus métaboliques circulatoires qui s'organisent à travers les infrastructures urbaines (Swyngedouw, 2005, 2006), il y a un angle mort dans la matérialité des ressources qui transitent par les infrastructures (plus que dans le bâtiment lui-même). Or, ce sont ces ressources qui permettent le fonctionnement du métabolisme urbain, de plus en plus croissant et inégalitaire, qu'il convient d'interroger dans le sens d'une rematérialisation des enjeux de la gouvernance urbaine (Coutard et Florentin, 2022). Il serait donc nécessaire de s'interroger sur l'empreinte matérielle et énergétique qu'impliquent les grands systèmes d'infrastructures, de prendre en compte l'épuisement des ressources naturelles qui pose des questions d'égalité et d'appropriation de ces ressources.

Ce programme de recherche conduit à équilibrer la théorie urbaine critique en tenant compte de la matérialité (Demaria et Schindler, 2016) et à remettre l'infrastructure et son impact environnemental au cœur des problématiques de recherche (Hetherington, 2018). Comme l'explique John Rutherford :

> « D'un point de vue méthodologique, l'infrastructure peut être un lieu fructueux et bien ancré à partir duquel on peut étudier l'émergence matérielle de ces futurs. Cette émergence concerne la reconfiguration "de l'intérieur" d'infrastructures pour la plupart existantes afin de répondre à de nouvelles contraintes et exigences écologiques[14] » (Rutherford, 2020, p. 175).

Les questions de l'épuisement des ressources et des limites planétaires seraient donc intégrées dans ces réflexions sur « l'émergence matérielle » des infrastructures urbaines. Cette perspective de recherche s'inscrit également dans une ligne d'enquête sur la façon dont les villes sont produites par des flux métaboliques socio-naturels provenant d'« ailleurs », qui ont de fortes implications sur la façon dont les natures non humaines sont urbanisées (Tzaninis *et al.*, 2021). Ainsi, la reconfiguration des infrastructures est un processus de redéfinition des limites de la durabilité urbaine, s'étendant vers l'extérieur aux nouvelles ressources disponibles (Rutherford, 2020). Sabine Barles appelle ainsi à utiliser les infrastructures comme un outil de réduction des empreintes matérielles et à penser la reconfiguration des réseaux et des « infrastructures d'écologie territoriale » en intégrant pleinement les enjeux de cette dématérialisation (Barles, 2017 ; Barles et Bahers, 2019). Cela nous conduit à proposer la notion d'« infrastructure métabolique », afin de combiner les approches matérielles et infrastructurelles et de mettre en évidence le rôle de ces objets dans les processus sociotechniques qui régissent la circulation de la matière et de l'énergie.



## Externalisation, expansion, globalité des infrastructures métaboliques

Les infrastructures métaboliques sont centrales dans ce que l'on appelle l'« externalisation » du métabolisme urbain : un processus où les villes puisent leurs ressources et rejettent leurs déchets dans des territoires de plus en plus éloignés. Comme l'écrivent Lawhon, Nsangi Nakyagaba et Karpouzoglou :

> « Ces infrastructures facilitent les visions modernes des métabolismes urbains dans lesquels les matériaux entrent et sortent de la ville : les déchets générés dans la ville doivent être déplacés vers l'extérieur, pour être déposés ailleurs[15] » (Lawhon, Nsangi Nakyagaba et Karpouzoglou, 2022).

Les relations sociales et les besoins sont transformés par ces infrastructures, notamment en modifiant ce qui est considéré comme des espaces au-delà de la ville. Ces espaces deviennent les empreintes géographiques d'une réalité urbaine élargie où les réseaux d'infrastructures urbaines ont atteint une dimension globale (Arboleda, 2016b). Cette expansion du métabolisme urbain est en constante croissance géographique et économique. Pour une grande partie des ressources, cette expansion est :

> « dans une certaine mesure, de nature planétaire, faisant partie d'une infrastructure en réseau subaquatique et transocéanique qui relie les ports du monde entier » (Gustafson, 2021).

---

14. Traduction de la citation suivante : « *Methodologically, infrastructure can be a fruitful, grounded location from which to study the material emergence of these futures. This emergence concerns reconfiguration of mostly existing infrastructure from "within" to meet new ecological constraints and requirements.* »

15. Traduction de la citation suivante : « *Such infrastructure facilitates modern visions of urban metabolisms in which materials flow in and out of the city: waste generated in the city is to be moved outwards, to be deposited elsewhere.* »

Ce réseau d'infrastructures permet la mondialisation des ressources, de l'extraction à la marchandisation. Ces circuits sont rendus opérationnels par des méga-infrastructures logistiques, telles que les ports, les pipelines, les routes et les chemins de fer. Des travaux sur ces méga-infrastructures ont vu le jour pour interroger ces corridors interocéaniques et ces réseaux logistiques pour le commerce des ressources (Arboleda, 2020). Il serait également très pertinent de considérer les villes intermédiaires comme des formes urbaines d'avant-postes infrastructurels éloignés (Gandy, 2022), qui alimentent d'autres grandes métropoles. Elles font également partie de ce réseau d'infrastructures métaboliques. L'externalisation, la sous-traitance, l'expansion, l'éloignement, la globalité sont donc les nouveaux déterminants de la conception actuelle des infrastructures métaboliques contemporaines.



De nouvelles questions se posent dans les études infrastructurelles pour interroger la ville au-delà de ses frontières, notamment pour comprendre les relations entre les villes et le capitalisme mondial. Gastón Gordillo analyse la matérialité de ce continuum qui déplace la matière d'un continent à l'autre afin de reproduire et d'étendre le métabolisme des plus grandes agglomérations urbaines de la Terre. Le rôle des infrastructures est donc d'organiser ce mouvement afin d'établir des rapports de force par les classes dominantes. Cette recherche montre aussi que les nœuds urbains attirent les flux d'une myriade de marchandises à travers leurs infrastructures et les expulsent sous forme de déchets qui conduisent au fonctionnement possible du capitalisme mondial (Gastón Gordillo dans Hetherington, 2018). Les infrastructures peuvent être considérées comme les lignes de front de l'anthropocène, que le système capitaliste livre aux écosystèmes, créant un monde urbanisé et standardisé. Cela fait écho à l'analyse des réseaux financiers qui extraient la rente du métabolisme urbain à travers les réseaux d'infrastructures (Loftus et March, 2016). Les flux financiers et les structures de pouvoir sont directement liés à la circulation des flux physiques.

## Futurs métaboliques technocentriques

Les infrastructures métaboliques sont au cœur de la construction des imaginaires sur les futurs de villes économes en ressources, circulaires ou résilientes. Il s'agit en effet de systèmes sociotechniques qui fournissent des services essentiels pour permettre, maintenir ou améliorer les conditions de vie dans les villes (Monstadt *et al.*, 2022). De nombreux futurs urbains sont construits autour d'imaginaires technocentrés et la modernisation des infrastructures métaboliques n'échappe pas à ces nouveaux paradigmes. Par exemple, Meilinger et Monstadt (2022) ont montré que les récits d'économie circulaire à Los Angeles se sont construits en soutenant des solutions techniques prometteuses, telles que le recyclage des eaux usées, dans les débats d'ingénierie. Ces ambitions renouvellent le rôle de l'infrastructure dans la politique urbaine, en particulier dans la gestion circulaire. Par conséquent, la notion de régime technopolitique (Hecht, 2011) aide à comprendre comment les politiques du métabolisme urbain sont conceptualisées à travers des perspectives infrastructurelles. Les concepts techniques de la gestion circulaire des ressources doivent donc être examinés en tant que formes émergentes de gouvernance de l'espace urbain et de l'infrastructure métabolique (Meilinger et Monstadt, 2022).

Ces futurs métaboliques urbains sont donc étroitement liés aux politiques de modernisation des infrastructures. Comme l'explique Jonathan Rutherford :

> « L'organisation du système sociotechnique et les flux et interconnexions métaboliques produisent et font circuler non seulement des fluides et des matériaux pour l'accès et l'utilisation locale, mais aussi des visions particulières, des modèles, des modes écologiques de résidence, des mesures et des possibilités d'apprentissage. En bref, je soutiens que les futurs et les possibilités urbaines circulent à travers et entre les tuyaux de chauffage, les entrées d'évacuation des déchets, les systèmes d'eau et les usines de recyclage, ce qui explique pourquoi ils sont toujours déjà de la matière politique[16] » (Rutherford, 2020, p. 145).

Selon la construction des récits du métabolisme urbain, on peut voir le triomphe de l'ingénierie verte moderne ou la mise en œuvre de réseaux financiers et politiques fragiles sur lesquels reposent les nouvelles infrastructures (Loftus et March, 2016). Ce sont les infrastructures en tant qu'instruments politiques qui sont mobilisées pour transformer les imaginaires verts, durables et écologiques (Gandy, 2022 ; Rutherford, 2020). Une critique radicale est menée par ces chercheurs pour montrer que ces imaginaires ne prennent jamais en compte les aspects sociotechniques de la vie quotidienne, pour qui ils fonctionnent et les habitants non humains de l'espace urbain (Lawhon *et al.*, 2018). Il s'agit également de comprendre comment et par qui ces imaginaires d'infrastructures métaboliques sont contestés et produisent de l'exclusion et des conflits dans les espaces urbains (Ernstson et Swyngedouw, 2018). Il existe en effet des mécanismes contradictoires et conflictuels qui transforment le flux socio-écologique des déchets urbains (Ernstson *et al.*, 2021).



Ce sont donc des récits produits par une multitude d'acteurs de la modernisation écologique, publics ou privés, urbains et pas seulement, mais il y a également des travaux de prospective qui proposent des solutions alternatives. Ainsi, au-delà des études réputées de Solagro (Duru et Therond, 2023) et Negawatt (Salomon *et al.*, 2005), le Piren-Seine a produit des scénarios de transition alimentaire (Billen *et al.*, 2017) et post-métropolitain (Barles *et al.*, 2022) qui sont des recherches radicales de transformation des infrastructures métaboliques, de même que l'institut Momentum (Mallet et Thévard, 2022) ou des coalitions de chercheurs (Hickel *et al.*, 2021).

### Interroger de manière interdisciplinaire le rôle des infrastructures métaboliques

Interroger le rôle des infrastructures métaboliques au sein d'un territoire permettrait donc de caractériser les réseaux qui concourent à la transformation et à la circulation paroxystique des flux dans et entre les villes. Ces infrastructures peuvent également déterminer qui a droit à certains flux, mais aussi droit à la production de la ville (au sens lefebvrien) et l'espace urbain (Gandy, 2014). Elles peuvent conduire à renforcer les inégalités (Schaffartzik, Duro et Krausmann, 2019) qui existent entre les individus et les groupes sociaux. Ce positionnement permettrait de dépasser la critique selon laquelle les travaux sur les infrastructures ne sont pas assez politisés. En outre, localiser et mieux caractériser ces infrastructures permet également de comprendre si une ville a la capacité

16. Traduction de la citation suivante : « *Socio-technical system organization and metabolic flows and interconnections produce and circulate not just fluids and materials for local access and use, but also particular visions, models, ecological modes of residence, measures and learning possibilities. In short, I maintain that urban futures and possibilities are circulated through and between the heating pipes, waste removal inlets, water systems and recycling plants, which explains why they are always already political matter.* »

suffisante pour devenir autosuffisante et dans quelle mesure elle est dépendante des chaînes d'approvisionnement externes.

Ainsi, une connaissance approfondie des infrastructures métaboliques actuelles et futures est une étape nécessaire pour planifier et orchestrer l'utilisation des sols, l'économie et la planification des réseaux. La localisation des infrastructures métaboliques, qu'il s'agisse des déchets, de l'énergie, de l'eau ou des usines de fabrication, permet d'ouvrir la « boîte noire » des études actuelles sur le métabolisme urbain et de relier les flux aux utilisateurs et aux activités. Par exemple, le rôle des « services » que les infrastructures fournissent pour atténuer la demande d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre dans les villes constitue l'une des pistes critiques de la recherche. Des preuves de plus en plus nombreuses montrent que l'évaluation des impacts socio-écologiques des infrastructures sur le métabolisme des villes contribue à une compréhension plus approfondie de la dynamique des flux et des stocks au sein des systèmes urbains et fournit des voies alternatives vers une gestion durable des ressources au niveau de la ville (Perrotti et Stremke, 2018). Cette notion implique une sensibilité accrue aux ressources dans les études sur les infrastructures (Coutard et Florentin, 2022), qui peut contribuer à l'agenda de l'écologie politique en plaçant les questions de ressources, dans leurs dimensions matérielles, politiques et spatiales, au centre de l'attention problématique. Les études métaboliques spatialement explicites peuvent informer de nouvelles politiques d'infrastructures vertes et bleues pour répondre conjointement aux objectifs de performance environnementale et à la réalisation du bien-être humain et de la santé des écosystèmes (Galan et Perrotti, 2019).



## CONCLUSION

Ce chapitre a permis, à partir d'une définition de la spatialité du métabolisme, de présenter deux notions qui peuvent faire interdisciplinarité : les infrastructures et les inégalités socio-métaboliques. Une certaine forme de construction de l'interdisciplinarité du métabolisme a donc été décrite, discutée et envisagée. Nous voulons éviter l'écueil de l'interdisciplinarité sous un volet essentiellement pratique : comment faire, quelle pratique du temps, quelles stratégies de publication. Il s'agit en revanche de questionner les ressorts théoriques et épistémologiques du métabolisme. L'ambition est de dépasser le constructivisme social, c'est-à-dire le tout social, de même que l'essentialisation naturaliste, qui considère que tout est physique et matériel. La socio-matérialité, ici, a pour ambition de « comprendre la ville comme socio-écosystème » (Barles *et al.*, 2020, p. 157) et donc d'envisager le métabolisme de la ville comme un objet socio-écologique. Josh Newell parle d'un objet-frontière qui permet d'explorer les frictions entre les épistémologies, les méthodologies et les cadrages variés disciplinaires (Newell et Cousins, 2015). En effet, la consommation de ressources est structurelle et ne peut être réduite uniquement par une utilisation plus efficace des déchets et de l'énergie *via* une approche positiviste, techno-centrée et prescriptive. Il faut donc étendre les études sur les flux physiques à l'intégration des forces sociales, institutionnelles et culturelles dans la recherche sur le métabolisme. À l'opposé, une focalisation anthropocentrique des processus techniques, spatiaux et politiques ne permet pas d'interroger la nature des matières ni celle des vivants qui sont en jeu, qui sont affectés ou sont décontaminés par les transformations du métabolisme urbain. Ainsi, l'histoire environnementale d'une ressource est aussi une

histoire sociale, dont le croisement permet de mieux comprendre les interconnexions, les relations et les causalités, tel l'exemple de la vie sociale des flux de sédiments (Parrinello et Kondolf, 2021). Il s'agit donc bien d'envisager une « interdisciplinarité radicale […] qui passe par une étude approfondie des techniques, mais aussi par une grande ouverture théorique » (Barles *et al.*, 2020, p. 157).

Il ressort de ces deux premiers chapitres une ambition d'interdisciplinarité qu'il s'agira de mettre en pratique dans les deux prochains chapitres. Le parti pris est de coupler les méthodologies issues des différentes écologies, d'interroger les dimensions spatiales et d'aborder les enjeux épistémologiques pour mobiliser les différentes approches. Enfin, quelques notions aideront à développer des problématiques communes. Concrètement, notre ambition est de rompre le décalage entre les études sur les flux de ressources et les études sur l'organisation sociale et sur la dynamique politique urbaine des ressources (Hodson *et al.*, 2012), pour les réunir de manière plus comparative et systématique. L'objectif est bien de mettre en œuvre cette ambition avec des objets à métaboliser.

# *Chapitre 3*
# *Des villes circulaires en tension : métabolisme des métropoles intermédiaires de Nantes et de Göteborg*



Ce chapitre a pour ambition de mettre à l'épreuve empirique les perspectives scientifiques présentées précédemment. L'objectif est donc de surmonter le décalage entre les études sur les flux de ressources et celles sur l'organisation sociale et la dynamique politique urbaine des ressources, en les abordant de manière plus comparative et systématique. Dans ce chapitre, nous comparerons les métabolismes de deux métropoles intermédiaires, Nantes et Göteborg, à partir d'une approche méthodologique mêlant des entretiens auprès d'acteurs socio-économiques et une analyse des flux de matières spatialisée. Quels sont les mécanismes de la matérialité de la ville ? Quel rôle pour les infrastructures, comment sont-elles gouvernées et pourquoi ? Quelles relations métaboliques entre villes et infrastructures ? Qu'est-ce que cela implique concernant les inégalités socio-métaboliques ? Il en résulte ainsi d'abord la mesure des empreintes matérielles et spatiales des deux aires urbaines, en lien avec leur *hinterland*, et leur comparaison. Puis seront discutés les rôles des infrastructures « déchets-énergie » et des infrastructures « sociales », d'initiatives citoyennes. Nous montrerons ainsi les lignes de tension dans les infrastructures métaboliques de Göteborg et de Nantes sur les registres de l'externalisation, de la technopolitique et de l'imaginaire. La dernière section concernera le rapport des inégalités au métabolisme urbain des deux villes.

## LES MÉTROPOLES DE NANTES ET DE GÖTEBORG

Les métropoles de Nantes et de Göteborg sont toutes les deux des aires urbaines d'environ 1 million d'habitants (0,92 million d'habitants dans l'aire urbaine de Nantes et 1,25 million dans celle de Göteborg), constituées d'une zone urbaine et d'une zone industrialo-portuaire. Elles sont considérées comme des métropoles de taille intermédiaire à l'échelle mondiale, ce qui correspond à des villes ayant une population d'environ un million d'habitants qui jouent un rôle d'intermédiation dans leur territoire régional ou national selon l'organisation « United cities and local governments » (UCLG)[17]. Cette catégorie de villes recouvre 20 % de la population mondiale et un tiers de la population urbaine totale. Elles se distinguent des grandes métropoles ou mégalopoles mondiales par des dynamiques d'urbanisation très différentes (relatives notamment à l'étalement urbain, à l'allongement des réseaux, à la densification ou à la place de la nature en ville). Elles semblent également avoir des liens plus directs avec leur *hinterland* spatialement restreint, ce qui donne plus de poids au lien entre la ville et son espace environnant. En revanche, à l'échelle nationale, elles sont considérées comme

17. https://intermediarycities.uclg.org/le-forum

des métropoles principales : Nantes fait partie des douze aires urbaines métropolitaines qui concentrent 47,5 % de la population française et Göteborg est la deuxième ville la plus peuplée de Suède.

Nantes-Saint-Nazaire est le quatrième port de France (30 millions de tonnes [Mt] par an) et se compose d'un réseau complexe de sites industriels à haute intensité énergétique opérant dans les secteurs de la sidérurgie, de la pétrochimie et de l'agroalimentaire. Le port abrite notamment la deuxième raffinerie de pétrole brut de France.

Le pôle métropolitain de Nantes-Saint-Nazaire est une structure intercommunale, qui fédère la métropole appelée Nantes Métropole, la communauté d'agglomération autour de Saint-Nazaire (CARENE) et trois communautés de communes environnantes (Erdre et Gesvres, Estuaire et Sillon et Pays de Blain). C'est un territoire de projet d'aménagement. En effet, dans les prochaines années, il doit mettre en œuvre des actions dans plusieurs domaines de compétences (développement économique, développement de services et d'infrastructures de transports, protection de l'environnement, accompagnement pré-opérationnel de projets urbains). Il a également des prérogatives concernant les cadres de référence des politiques de territorialisation de l'économie circulaire.



Göteborg est le plus grand port de Suède (39 Mt par an). L'industrie du port de Göteborg est plus orientée vers les produits manufacturés, notamment vers les voitures de la marque nationale Volvo, mais c'est aussi un port d'entrée pour les combustibles fossiles, qui accueille un grand cluster d'industries chimiques, et qui reçoit des déchets qui alimentent un incinérateur relié à un grand réseau de chauffage urbain.

Nantes et Göteborg ont aussi en commun d'être des références en matière de développement durable. En effet, le pôle métropolitain de Nantes-Saint-Nazaire a obtenu le label « éco-cité » en 2009 par le ministère de la Transition écologique comme une ville exemplaire en matière de développement durable, et la ville de Nantes est nommée « Capitale verte » en 2013 et a organisé le sommet « Climate Chance » en 2016, qui fut un grand rassemblement des organisations non gouvernementales sur la question du réchauffement climatique. La métropole de Göteborg est également citée comme une ville exemplaire en termes de durabilité, notamment par le GDSI (*Global destination sustainability index*) qui lui a décerné le prix de la ville la plus durable du monde pendant cinq ans (2016-2021). Elle est également nommée « capitale européenne du tourisme durable » en 2020. Pour finir, Nantes et Göteborg font partie des « 100 villes intelligentes vers la neutralité climatique 2030 » de l'Union européenne (European Commission, 2022).

Nous avons donc choisi d'étudier ces deux villes dites « de référence » et d'apporter un regard croisé sur l'émergence de leurs politiques d'infrastructures métaboliques et sur leur matérialisation au travers d'une analyse socio-matérielle, afin de comprendre les réussites et tensions de ces solutions.

## L'EMPREINTE MATÉRIELLE DE NANTES ET DE GÖTEBORG

### Pourquoi mesurer l'empreinte des villes ?

Pour comprendre la matérialité de ces villes, on pense souvent aux transports propres, au recyclage ou aux énergies renouvelables. Néanmoins, une question reste rarement posée : d'où viennent les ressources que nos villes consomment, et quel est leur vrai coût pour la planète ? Pour y répondre, nous avons étudié deux villes portuaires, Nantes-Saint-Nazaire et Göteborg, en utilisant deux indicateurs clés :

1. La consommation intérieure de matières (DMC, pour « *domestic material consumption* » en anglais) : il s'agit de ce que la ville extrait, importe et consomme directement (catégorisé en quatre grands flux que sont la biomasse, les minéraux et matériaux de construction, les métaux et produits manufacturés et les énergies fossiles). Contrairement à ce qu'on pourrait penser, cet indicateur ne permet pas de mesurer la performance écologique d'une ville, d'une région ou d'un État. Il est surtout utile pour évaluer le profil métabolique, c'est-à-dire s'il s'agit d'une économie extractive, parasitaire ou autonome (Krausmann, 2013 ; Magalhães *et al.*, 2019).

2. L'empreinte matérielle (MF, pour « *material footprint* » en anglais) : cet indicateur désigne la quantité totale de ressources nécessaires pour produire ce que la ville importe et consomme, y compris celles extraites à l'autre bout du monde. Il s'agit donc d'inclure explicitement les flux indirects liés aux matières et à l'énergie (provenant de l'extraction, de la distribution, de la fabrication) nécessaires à l'importation et à la consommation (Wiedmann *et al.*, 2015).



Ces indicateurs révèlent un décalage frappant : ce que nous voyons (la consommation locale) ne représente qu'une partie de l'histoire. L'essentiel de l'impact se cache dans les territoires lointains qui fournissent les ressources et subissent les dégâts environnementaux.

Un bilan matériel et énergétique est d'abord réalisé, à partir de la méthode d'analyse des flux de matière (MFA) présenté dans la figure 1.1, sur une année afin de vérifier que l'équilibre des flux est bien respecté. La figure 3.1 montre donc les entrées, sorties, accumulations et recyclage des deux métropoles.

Plusieurs caractéristiques peuvent être observées à partir de ces bilans matériels qui sont tout à fait comparables.

Les villes de Göteborg et de Nantes-Saint-Nazaire dépendent énormément des importations : 67 % des ressources entrantes pour la première et 83 % pour la seconde (sans compter les flux indirects). À l'inverse, les exportations sont tout aussi importantes, ce qui confirme leur rôle de plates-formes logistiques majeures. En revanche, l'extraction locale de matériaux (comme les matériaux de construction ou la biomasse) reste très faible par rapport à ces importations. Ces villes ont un potentiel d'autosuffisance matérielle faible et comblent leurs besoins surtout grâce à ces échanges constants de marchandises.

Un autre point marquant est que les villes rejettent énormément de déchets dans la nature. À Göteborg, chaque habitant produit en moyenne 7,78 tonnes par an de ces émissions et 8,66 tonnes par an à Nantes-Saint-Nazaire. La grande majorité de ces rejets sont des émissions atmosphériques, principalement du $CO_2$ issu de la combustion d'énergies fossiles (voitures, chauffage, incinération, industries…). Cela signifie qu'une grande partie de ce que consomment les villes disparaît sous forme de pollution, sans possibilité de récupération ni de recyclage. Les autres déchets (solides ou liquides, issus des activités économiques ou des ménages) pèsent aussi lourd dans la balance. Pourtant, seule une petite partie est recyclée, et ces matériaux recyclés ne suffiraient pas à remplacer les importations. Ainsi, à la lecture de ces bilans, il est illusoire de croire que les importations pourraient être substituées par les matériaux recyclés.

Enfin, il y a un enjeu méconnu qui concerne l'accumulation de matériaux dans les villes. Chaque année, des tonnes de matériaux s'ajoutent aux infrastructures (bâtiments, routes, réseaux…) et aux biens durables (voitures, électroménager…). Ce stock ne cesse de grandir et deviendra la principale source de déchets à gérer dans le futur. Qui plus

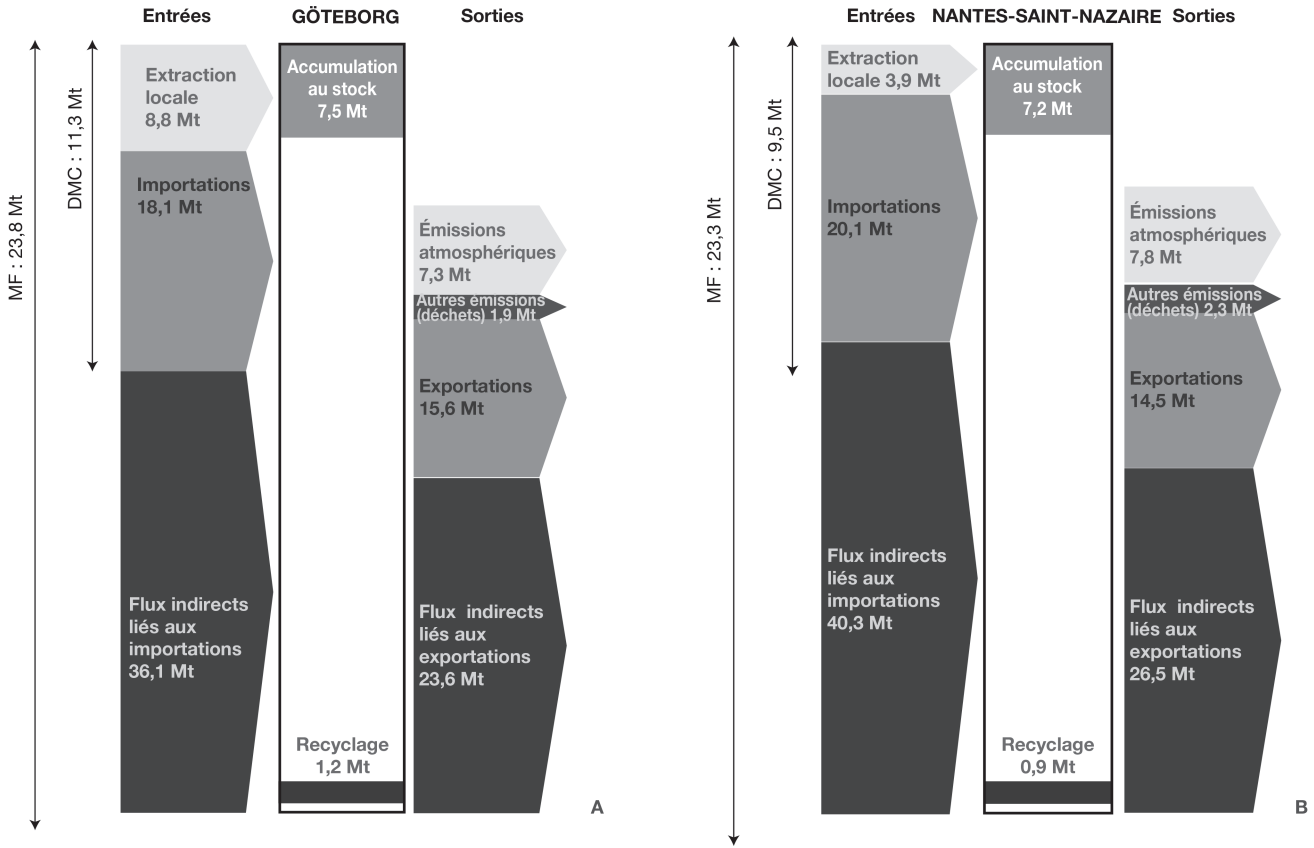



**Figure 3.1. Bilan matériel (MFA) en millions de tonnes de : (A) Göteborg (données de 2011) et (B) Nantes-Saint-Nazaire (données de 2018).**
DMC = extraction locale + importations – exportations. MF = DMC + flux indirects liés aux importations – flux indirects liés aux exportations.

est, ces infrastructures et équipements nécessitent toujours plus de ressources pour leur entretien, pour leur maintenance ou pour leur remplacement. Un cercle vicieux qui pose question pour l'avenir.

### Des villes qui consomment bien plus qu'elles n'en ont l'air

La figure 3.2 présente les résultats, exprimés en millions de tonnes (Mt), de la consommation matérielle (DMC) et de l'empreinte matérielle (MF) des deux villes à partir de leurs bilans matériels et énergétiques (figure 3.1) : les courbes représentant Nantes-Saint-Nazaire sont en gris et les courbes représentant Göteborg sont en orange. Nous pensons également qu'il est important de montrer les trajectoires de ces courbes, c'est pourquoi les lignes en pointillé montrent une régression linéaire simple.



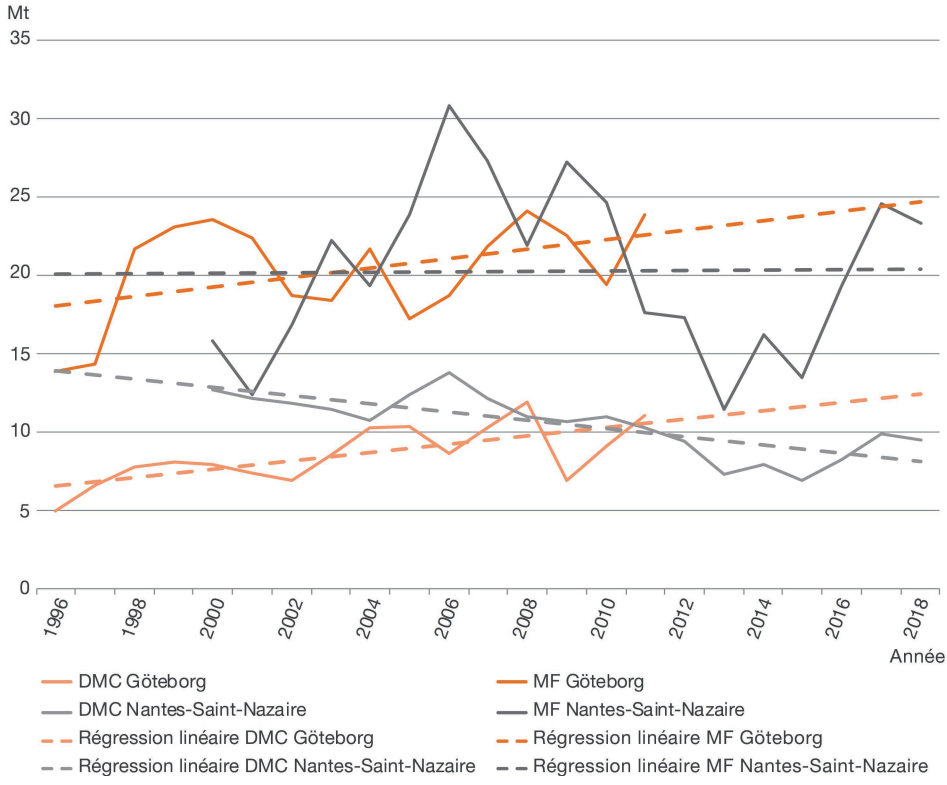



**Figure 3.2. Consommation matérielle intérieure (DMC) et empreinte matérielle (MF) pour Göteborg et Nantes-Saint-Nazaire de 1996 à 2018 (source : Bahers et Rosado, 2023).**

Ces courbes révèlent plusieurs éléments. D'abord, la MF est en moyenne 2 fois plus élevée que la DMC. À Göteborg, la MF est 2,4 fois supérieure à la DMC et, à Nantes-Saint-Nazaire, elle est 1,9 fois supérieure en moyenne.

Ensuite, la consommation locale peut stagner ou baisser, mais l'empreinte globale, elle, continue d'augmenter. En effet, à Nantes-Saint-Nazaire, la DMC a chuté de 13,7 (2006) à 6,9 Mt (2015), mais la MF, elle, est passée de 15,7 (2000) à 23,3 Mt (2018). À Göteborg, la DMC est en forte augmentation de 1996 à 2004 (de 5 à 10 Mt) et, après

une forte baisse en 2008, en légère augmentation après 2009 jusqu'à 11 Mt en 2011 d'après les valeurs observées et 12 Mt en 2018 selon la tendance). La MF passe de 13,8 en 1996 à 23,8 Mt en 2011. Par ailleurs, il est important de noter que ces courbes subissent des variations ponctuelles importantes, comme de grands projets de développement des métropoles qui nécessitent un volume important d'importation de matériaux (comme la réhabilitation de la friche industrielle de l'île de Nantes), ou à l'évolution des structures économiques des territoires (par exemple : la crise économique de 2008 qui a fortement affecté les secteurs de la construction).

Ces écarts s'expliquent car les villes externalisent une grande partie de leur consommation. Elles importent des produits finis (voitures, smartphones, vêtements) dont la fabrication a nécessité des ressources extraites ailleurs. Ainsi, la pollution et la dégradation des écosystèmes ont lieu hors de nos frontières, mais restent liées à la consommation des territoires.



**D'où viennent les ressources ? Le rôle des importations**

À Göteborg, l'augmentation de la DMC a été faible entre 2004 et 2011, tandis que l'augmentation de la MF a été très importante. La question est donc de savoir ce qui s'est passé après 2011. Selon les indicateurs nationaux (tirés de la base de données EORA[18]), la DMC en Suède est restée stable, tandis que la MF a continué à augmenter fortement. Cela indique donc une très forte externalisation du métabolisme, expliquée par l'augmentation de l'approvisionnement en dehors des frontières de Göteborg. Ainsi, l'approvisionnement à partir de sources internationales représente le double de l'approvisionnement à partir de sources nationales (moyenne sur la période) et, par conséquent, l'empreinte matérielle des approvisionnements a augmenté de manière significative entre 1996 et 2011 (1,8 fois).

L'augmentation de l'empreinte matérielle des deux villes indique une très forte externalisation du métabolisme, expliquée par la croissance de l'approvisionnement en dehors des frontières. Ainsi, les deux villes dépendent fortement des importations internationales : Nantes-Saint-Nazaire importe 72 % de ses ressources de l'étranger et Göteborg en importe 65 %. Cela s'explique par leurs rôles de hub logistique et portuaire, qui en font des plaques tournantes du commerce international.

Par ailleurs, les exportations sont surtout régionales. En effet, les deux villes exportent davantage vers leur propre pays ou vers leur région qu'à l'international.

Pour conclure cette section, il convient de rappeler le contexte de la deuxième grande accélération de consommation de ressources mondiales depuis 2002. Selon nos résultats, cette accélération métabolique n'est pas directement visible dans la consommation intérieure, mais davantage dans l'empreinte matérielle. Ce constat est cohérent avec le fait que cette grande accélération est plus susceptible de se matérialiser dans les économies émergentes, en particulier dans les BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud, mais surtout en Chine) (Görg *et al.*, 2019). Cependant, il existe des liens entre ces *hinterlands* et les villes européennes. En effet, les biens de consommation durables achetés à Nantes-Sant-Nazaire et à Göteborg impliquent une empreinte ailleurs dans les économies émergentes, mais aussi dans le reste du monde, et contribuent directement à

18. La base de données Eora (Eora Global Supply Chain Database) est un modèle de tableaux entrées-sorties multi-régionaux (MRIO) (Lenzen *et al.*, 2013).

cette deuxième grande accélération. En résumé, actant que le métabolisme urbain s'étend bien au-delà des frontières urbaines, l'indicateur MF permet de rendre compte du poids métabolique du lien entre la ville et les *hinterlands* mondiaux.

**Empreintes des grandes catégories de matières**

Si l'on pouvait décomposer l'empreinte matérielle de Nantes-Saint-Nazaire et celle de Göteborg comme un gâteau, on découvrirait quatre ingrédients bien distincts, chacun avec son histoire, avec son poids et avec ses conséquences cachées. Ces quatre catégories de ressources sont les biomasses (produits alimentaires et agricoles), les métaux (appareils manufacturés et minéraux métalliques), les minéraux non métalliques (matériaux et minéraux de construction) et les combustibles fossiles (produits pétroliers, charbon et gaz). Ces quatre catégories dessinent le portrait matériel de nos villes. Cependant, derrière ces chiffres, se cachent des réalités bien plus complexes : des terres lointaines exploitées, des flux commerciaux invisibles, et un paradoxe troublant où moins consommer localement ne signifie pas avoir moins d'impacts environnementaux.



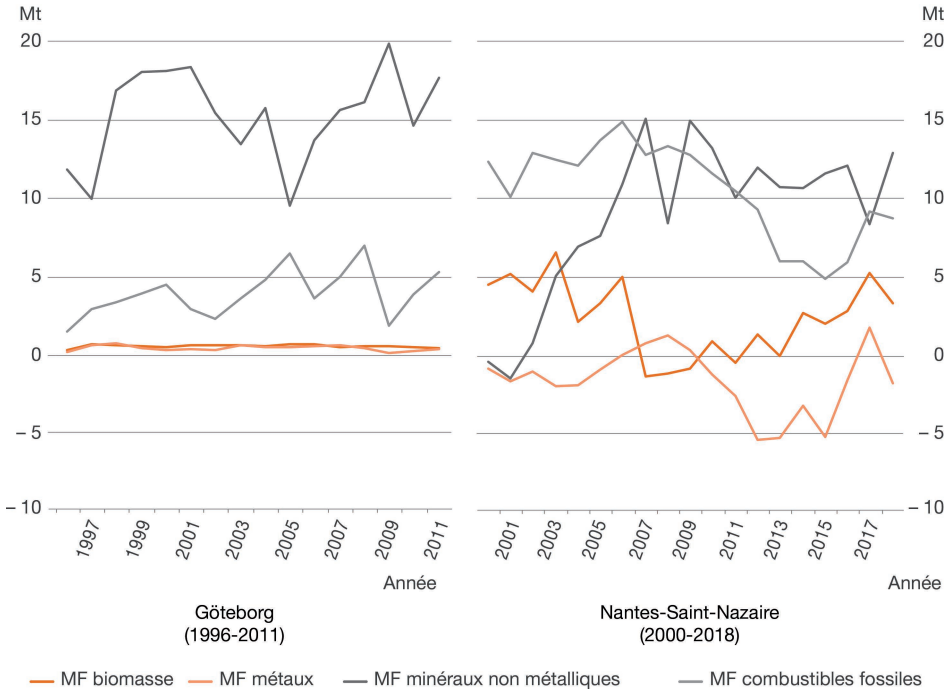



**Figure 3.3. Empreinte matérielle (MF) par catégorie pour Göteborg et Nantes-Saint-Nazaire (source : Bahers et Rosado, 2023).**

*La biomasse : l'empreinte discrète mais révélatrice*

À première vue, la biomasse, que sont ces produits agricoles, alimentaires et forestiers, semble presque anodine. Avec 2 Mt par an à Nantes-Saint-Nazaire et seulement 0,6 Mt à Göteborg, son empreinte est la plus légère des quatre catégories (figure 3.3). Pourtant, elle est 2,3 fois plus élevée que la consommation locale à Nantes et 1,12 fois plus à Göteborg.

Cet écart s'explique parce que Nantes-Saint-Nazaire, comme d'autres villes de l'ouest de la France, joue le rôle d'un carrefour logistique. Les céréales, le bois ou les produits laitiers y transitent, y sont stockés, y sont transformés avant d'être réexportés. Cette ville n'est pas seulement un lieu de consommation, mais elle constitue aussi un nœud dans un réseau global de flux agricoles. Göteborg, en revanche, importe et exporte moins de biomasse, ce qui reflète une économie plus locale.

Derrière ces chiffres se cache une réalité plus large : celle de l'augmentation de l'empreinte foncière (O'Brien, 2006). Chaque tonne de blé, de soja ou de bois importée représente des terres arables utilisées à l'étranger. Si une stratégie urbaine vise à renforcer la bioéconomie locale (Buck et While, 2021), elle permettra mécaniquement de réduire l'empreinte des approvisionnements en biomasse.



*Les métaux : un marché global aux équilibres fragiles*

Les métaux, eux, racontent une autre histoire qui est celle d'une économie mondialisée où les flux s'équilibrent parfois de manière surprenante. À Nantes-Saint-Nazaire, l'empreinte des métaux est si faible qu'elle devient négative certaines années (figure 3.4) : la ville exporte plus de produits métalliques (voitures, machines, pièces industrielles) qu'elle n'en importe. Un paradoxe apparent, qui s'explique par son rôle industriel et portuaire. Les usines locales transforment des métaux importés sous forme brute (acier, aluminium) pour les réexporter sous forme de produits finis.

Göteborg, elle, affiche une empreinte métallique stable mais modeste. Dans les deux cas, les métaux ne pèsent pas lourd dans le bilan matériel global. Pourtant, leur trajectoire révèle une vérité plus large : les villes européennes ne sont plus des lieux d'extraction, mais elles servent de plaques tournantes de la transformation et du commerce. Les mines en Amérique, en Afrique ou en Océanie alimentent les industries européennes, tandis que les déchets et la pollution restent là-bas.

*Les combustibles fossiles : le paradoxe de la consommation qui baisse… et de l'empreinte qui monte*

Les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz) constituent une catégorie lourde et troublante. Ils représentent entre 8,7 et 12,3 Mt par an à Nantes-Saint-Nazaire, et entre 3,9 et 5,3 Mt à Göteborg (figures 3.4 et 3.5). Pourtant, leur DMC diminue légèrement, grâce aux économies d'énergie et aux politiques climatiques.

Cela témoigne d'un dangereux paradoxe dans le secteur des combustibles fossiles : alors que la consommation diminue dans les villes, l'empreinte augmente. Le découplage entre la croissance économique et les impacts environnementaux, c'est-à-dire le fait que le taux de croissance économique soit décorrélé du taux de consommation des ressources, et ce, considéré comme un horizon du développement durable des villes, a souvent été discuté en mettant en regard l'augmentation du PIB avec l'augmentation de la consommation, des émissions de $CO_2$ ou de la production de déchets (Conrad et Cassar 2014 ; Fischer-Kowalski *et al.* 2011b ; Kalmykova Rosado et Patrício, 2015). Dans notre cas, nous observons un découplage inverse entre la consommation et l'empreinte matérielle : même si la consommation diminue, l'empreinte matérielle continue d'augmenter. Ainsi, l'externalisation de la consommation de combustibles fossiles et d'énergie ne peut exonérer les pays développés de la responsabilité de leurs impacts (Krausmann, 2013 ; Tanguy, Bahers et Athanassiadis, 2020). C'est pourquoi il est important de calculer l'empreinte carbone réelle des villes (Chen *et al.*, 2020 ; Porse *et al.*, 2016 ; Wiedmann *et al.*, 2016), et pas seulement la consommation d'énergie locale des villes.

*Les minéraux non métalliques : le poids invisible des villes*

La catégorie la plus importante est celle des minéraux non métalliques. En moyenne, la MF des minéraux non métalliques est de 15,3 Mt à Göteborg et de 10,6 Mt à Nantes-Saint-Nazaire (depuis 2002) (figures 3.4 et 3.5). Cela illustre l'accumulation de technomasse et le rôle de l'interaction locale-globale dans l'urbanisation (Augiseau et Barles, 2017 ; Inostroza, 2014 ; Inostroza et Zepp, 2021). Le poids des minéraux directement importés s'accumule dans le logement et dans les infrastructures urbaines. Cependant, il s'accumule également ailleurs, notamment par le biais des déchets d'extraction qui restent dans les zones d'extraction et ne passent donc pas par les villes, et dans les infrastructures externalisées nécessaires à la fabrication et à la distribution des biens consommés dans les villes. Ainsi, la courbe MF des minéraux non métalliques à Göteborg a augmenté de manière significative sur la période 1996-2011, comme à Nantes-Saint-Nazaire de 2000 à 2018.



## RELATIONS MÉTABOLIQUES ENTRE VILLES ET *HINTERLANDS* : LA SPATIALISATION DES FLUX

L'étape suivante consiste à étendre l'analyse de l'empreinte matérielle des villes en étudiant les flux d'un point de vue spatial. Cela permet de mieux comprendre l'ampleur de l'externalisation de la consommation due aux villes. D'où proviennent l'extraction et la production des matériaux ? Quelles sont les chaînes d'approvisionnement responsables des échanges commerciaux de matériaux ? Nous utilisons la catégorie des minéraux non métalliques pour fournir des informations pour notre discussion. Comme abordé dans la section précédente, les minéraux non métalliques représentent le flux le plus important de l'empreinte matérielle urbaine. Ce flux révèle également un secteur de la construction qui est parmi les plus responsables des émissions de gaz à effet de serre (Stephan et Athanassiadis, 2018 ; Unep, 2019). Les principaux flux d'importation de ce secteur sont le ciment et le sable. Nous avons également regardé le cas des déchets urbains pour montrer que leur cycle de vie ne s'arrête pas à la première infrastructure urbaine de traitement. En effet, un réseau complexe d'infrastructures les exporte au-delà des frontières administratives de la Métropole. Les données d'importation utilisées proviennent d'Eurostat et concernent les importations *via* les deux ports en 2017 (Eurostat, 2018). Ces données sont ensuite reliées à la base de données commerciales Comtrade (UN Comtrade : International Trade Statistics, 2022), qui est une base de données des Nations unies sur les statistiques du commerce des produits de base et des statistiques détaillées sur les importations et les exportations communiquées par les autorités statistiques de près de 200 pays ou régions.

Les figures 3.4 et 3.5 représentent les besoins en matières premières des minéraux non métalliques le long des chaînes d'approvisionnement des biens et services qui satisfont la demande finale de Göteborg et de Nantes-Saint-Nazaire. On constate que les *hinterlands* sont situés partout dans le monde. Aucun continent n'échappe à la circulation de ces matières, pas même l'Océanie, qui semble bien loin pour le transport de matières lourdes et à faible coût.

À Göteborg, les échanges sont très denses autour de la mer Baltique. L'empreinte matérielle de la consommation de minéraux est donc importante en Norvège, en Finlande, en Pologne, en Lituanie, au Danemark et en Allemagne. Toutefois, une grande partie du sable provient également de régions beaucoup plus éloignées, de l'Inde, de

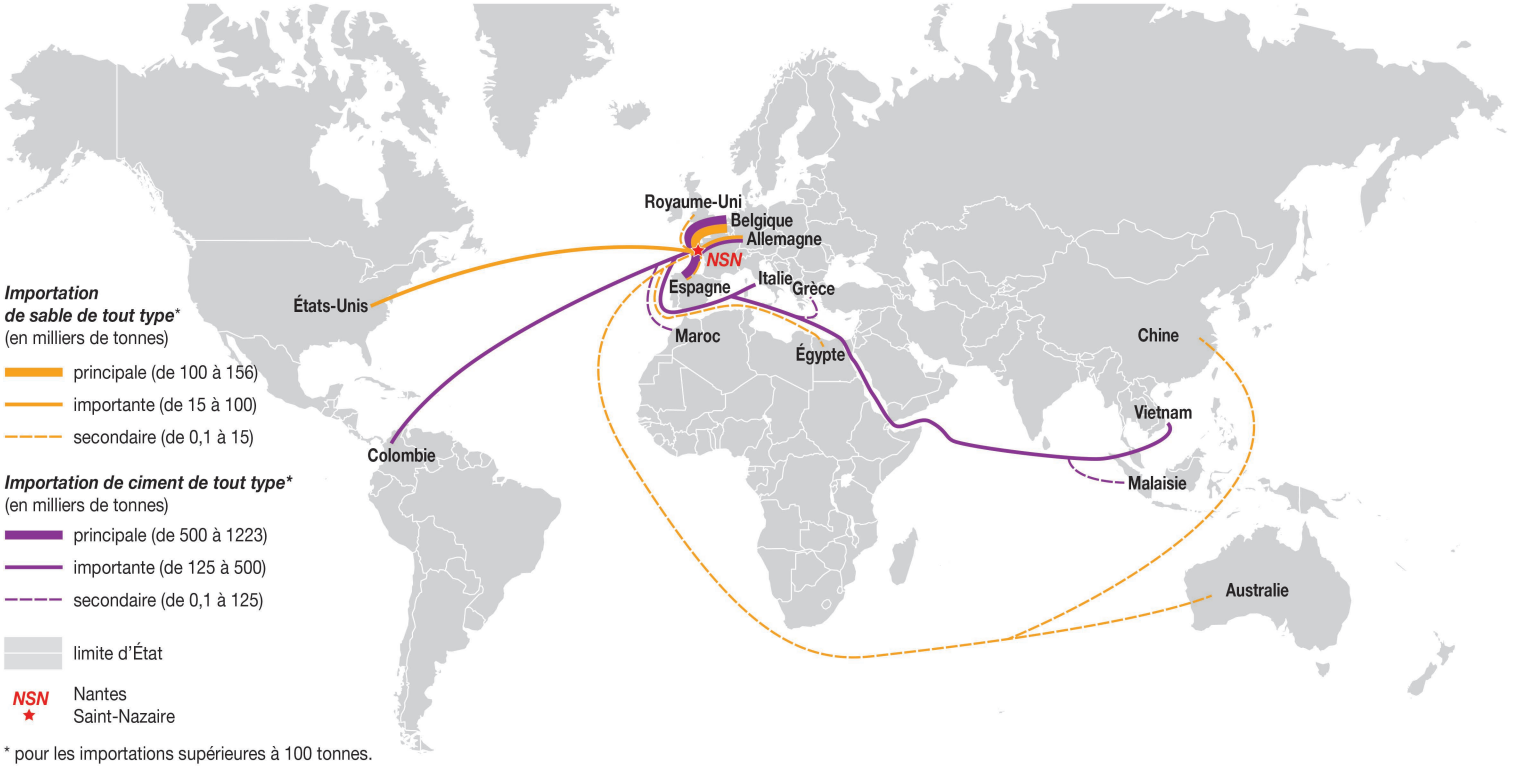



**Figure 3.4.** ***Hinterlands*** **de l'empreinte matérielle des minéraux non métalliques à Nantes Saint-Nazaire (source : Bahers et Rosado, 2023).**

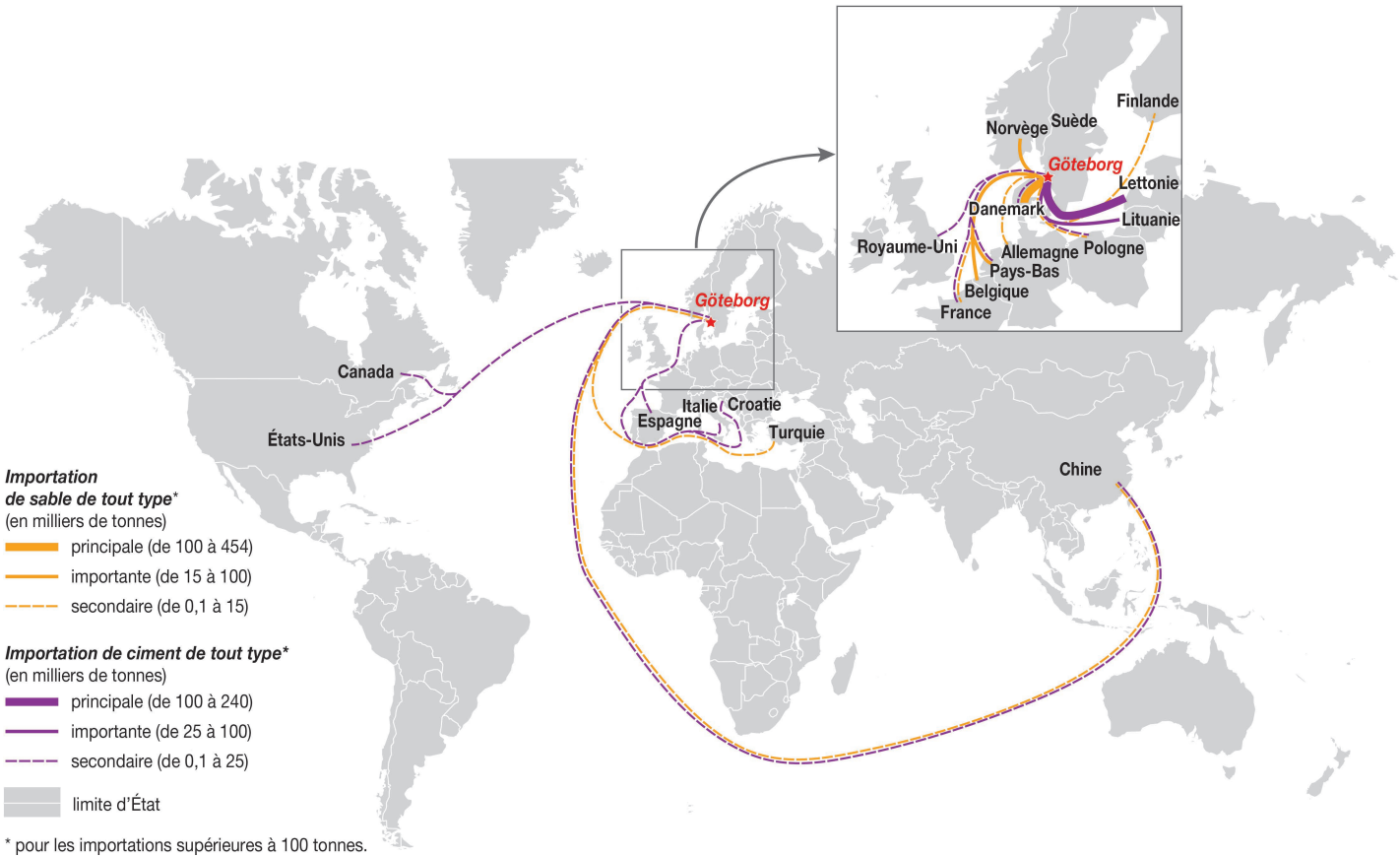



**Figure 3.5. *Hinterlands* de l'empreinte matérielle des minéraux non métalliques à Göteborg (source : Bahers et Rosado, 2023).**

la Chine ou de l'Afrique du Sud. En 2017, la majorité du ciment provenait des États-Unis, du Canada, de l'Espagne, de l'Italie et de la Chine. Ce trafic met en évidence les circulations complexes de flux, et les *hinterlands* qui vont au-delà du dernier vendeur de marchandises. Évidemment, ces flux sont encore plus compliqués à tracer.

À Nantes-Saint-Nazaire, certains flux ont des origines similaires à ceux de Göteborg, notamment le sable de Belgique ou d'Allemagne et le ciment d'Espagne. Des points névralgiques mondiaux sont également impliqués, comme le sable en provenance des États-Unis, de Chine ou d'Australie, et le ciment en provenance du Vietnam, de Malaisie ou de Colombie. Il est important de noter que ces flux sont régis par le marché mondial des matières premières et que les origines changent au fil du temps. La comparaison avec des années précédentes montre que certains flux sont stables mais que les *hinterlands* peuvent changer (par exemple : la Slovaquie, le Portugal ou le Japon ne sont plus des territoires d'approvisionnement).



Pour le cas des déchets urbains, contrairement aux idées reçues et véhiculées par les omniprésentes campagnes nationales et locales de sensibilisation, les déchets des ménages ne représentent qu'une part tout à fait minoritaire (14 %) du total des déchets produits du métabolisme urbain, comme l'illustre le cas de Nantes Métropole. En 2017, les déchets ménagers représentent 475 kilogrammes par habitant (kg/hab.), c'est-à-dire 309 kt — en légère baisse de 6 % depuis 2010 —, ce qui est inférieur aux déchets des activités économiques (366 kt) et surtout du seul secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) (1 535 kt). À Göteborg, les déchets ménagers représentent 492 kg/hab., c'est-à-dire 461 kt en 2011, alors que les déchets des activités économiques BTP compris (majoritairement d'origine industrielle et de la construction) sont de 3 403 kt, donc 3 625 kg/hab. Ainsi, ce sont des quantités considérables en jeu : les déchets urbains à Nantes correspondent à 22 % de la consommation matérielle et à 35 % à Göteborg.

En réalité, le parcours des déchets urbains ne se limite pas à la première étape de traitement, comme l'illustre l'exemple de Nantes (figure 3.6). Un réseau complexe d'installations permet en effet d'exporter ces déchets bien au-delà des limites administratives de la métropole.

Par exemple, les résidus solides issus des incinérateurs nantais (les mâchefers) finissent enfouis ou utilisés comme sous-couche routière dans les départements voisins, tandis que les résidus hautement toxiques des fumées d'incinération sont envoyés dans un centre d'enfouissement de déchets dangereux en Mayenne, à 130 km de Nantes… sans parler des émissions de $CO_2$. Même les déchets verts ne retournent que peu à la terre localement, les agriculteurs étant de plus en plus réticents à accepter le compost urbain. Il faut aussi trouver des carrières à remblayer pour les gravats.

Les centres de tri de la métropole nantaise, publics ou privés, approvisionnent des centres de recyclage qui alimentent des usines en France et en Europe, ou, *via* des porte-conteneurs, les filières mondiales de matières recyclables comme les métaux non ferreux, la ferraille, le papier-carton ou les plastiques. Or, cette stratégie, fondée sur l'exportation des déchets, se heurte aujourd'hui aux réticences croissantes de pays comme la Chine ou les Philippines, qui refusent désormais d'accueillir ces résidus. Par ailleurs, le recyclage reste limité (0,6 Mt à Nantes, contre 1,7 Mt à Göteborg) et, pour l'essentiel, exporté, ce qui contribue finalement peu à réduire les impacts environnementaux locaux (Bahers, Batardy et Barbe, 2019).

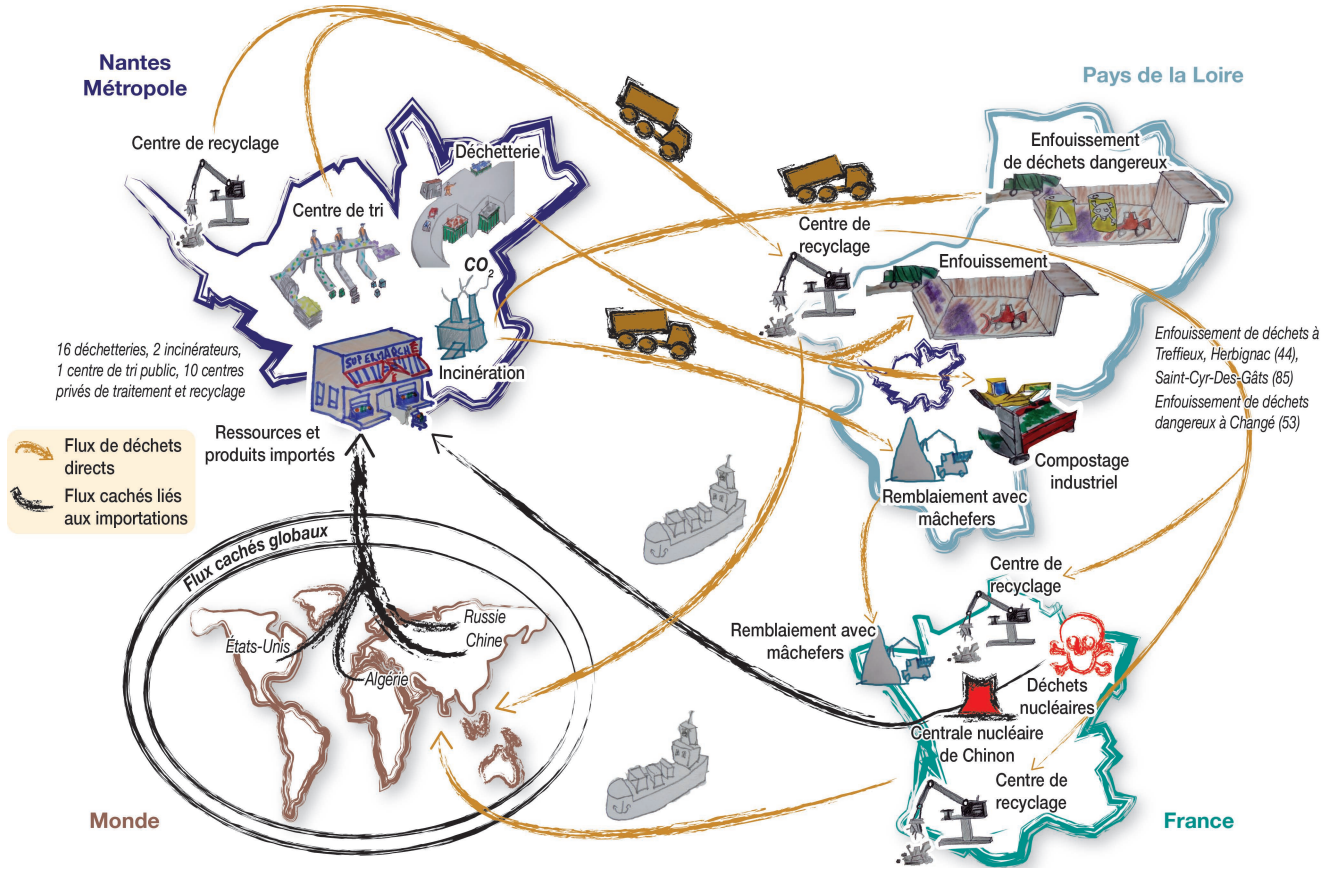



**Figure 3.6. Exportation des déchets nantais à quatre échelles géographiques (urbaine, régionale, nationale et mondiale) et origine des flux indirects (source : Bahers, Batardy et Barbe, 2019, © UMR ESO Nantes – Université de Nantes).**

S'agissant des produits et objets consommés sur le territoire nantais, ils cachent la part des ressources utilisées sur d'autres territoires. Ce sont les « flux indirects » liés à l'empreinte matérielle (vue plus haut), et donc liés aux importations de marchandises, qui sont en partie des déchets de l'extraction, de la fabrication et de la distribution qui ne transitent pas par le territoire urbain, mais qui restent dans les *hinterlands*. Par exemple, les déchets d'extraction dans les mines du monde restent à proximité des sites industriels et représentent 85 % de la matière extraite (Wiedmann *et al.*, 2020). Ainsi, ces déchets de l'extraction et de la transformation sont l'extension urbaine de la consommation et sont stockés dans les décharges des pays extractivistes.

Cette spatialisation de l'empreinte matérielle est cruciale pour comprendre l'interdépendance des pays extracteurs et consommateurs. Le sable est aujourd'hui un symbole du problème de la gouvernance des ressources, car c'est un matériau qui tend à s'épuiser à un rythme très rapide. Le Pnue appelle ainsi à une gouvernance mondiale sur cette question (Unep, 2019), ce qui corrobore les données présentées sur nos cartographies (figures 3.4 et 3.5) : bien qu'il s'agisse d'un produit bon marché et lourd, il est transporté sur des milliers de kilomètres pour répondre aux demandes finales urbaines, notamment en Europe. De même, les déchets continuent de traverser le monde sur la route des océans (Lacoste et Chalmin, 2007).



Il serait intéressant de prolonger cette analyse en identifiant les conflits environnementaux liés à l'extraction des matériaux et à l'export de déchets dans le monde. La base de données EJAtlas (The Environmental Justice Atlas), qui documente et localise les conflits sociaux autour des enjeux environnementaux, pourrait être utilisée à cette fin (Martínez-Alier, 2021). Cependant, il manque actuellement de données permettant de relier les pays d'origine aux entreprises extractives et de mise en décharge. Cela permettrait d'identifier des liens avec les conflits listés dans l'EJAtlas mais nécessiterait une enquête dédiée comme l'étude des chaînes d'approvisionnement des entreprises (Goldstein et Newell, 2020) pour identifier les entreprises listées dans les conflits comme exportant des matériaux vers Göteborg et vers Nantes-Saint-Nazaire.

## LE RÔLE DES POLITIQUES URBAINES D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Une grande partie de la littérature politique et normative récente identifie un potentiel énorme de l'économie circulaire pour la gestion du métabolisme urbain. La promotion est faite pour la gestion métabolique des matières et énergie à tous les niveaux de la société et de l'économie (Ghisellini, Cialani et Ulgiati, 2016 ; Homrich *et al.*, 2018 ; Korhonen, Honkasalo et Seppälä, 2018). Cette circularité se veut l'antithèse de la linéarité des cycles, structurée par des extractions illimitées de ressources et par la production de quantités prodigieuses de déchets (Garcier, Rocher et Verdeil, 2017). Pour l'Union européenne, l'accent est mis dans les directives européennes de 2014 et de 2015 sur l'efficacité de l'utilisation des ressources afin de maximiser la croissance économique européenne. Après le paquet « économie circulaire » de 2018, la Commission européenne a adopté un nouveau « plan d'action pour l'économie circulaire » en 2020, qui est l'un des principaux éléments du « Green Deal » pour l'Europe, appelé à être le nouveau programme de croissance durable de l'Europe. Ce nouveau plan d'action comprend des mesures pour l'ensemble du cycle de vie des produits, de nouveaux droits pour les consommateurs, et met l'accent sur la conception et la production, ce qui « vise

à garantir que les ressources utilisées restent le plus longtemps possible dans l'économie de l'UE » (European Parliament, 2022, p. 5). Ce nouveau plan n'a pas vocation à mettre en œuvre l'économie circulaire dans les villes, mais il a pour but d'influencer les secteurs de production, ce qui a pour conséquence que la dimension territoriale de ces nouvelles réglementations est relativement absente. Cependant, il existe également l'initiative « Villes et régions circulaires » dans le cadre du plan d'action européen pour l'économie circulaire, qui vise à soutenir les villes pour « la mise en œuvre de solutions systémiques circulaires » (European Commission, 2022). Il s'agit essentiellement de créer un réseau de villes européennes engagées dans cette transition, qui leur permette d'échanger de bonnes pratiques. Plus généralement, l'économie circulaire est devenue un cadre de référence pour la question des déchets et des approvisionnements auprès de tous les acteurs, publics ou privés, lucratifs ou associatifs, en faveur de la protection de l'environnement ou du développement de l'économie verte (Kirchherr, Reike et Hekkert, 2017). En effet, de nombreux grands groupes internationaux et villes (dont Paris, Bruxelles et Rotterdam) (Gravagnuolo, Angrisano et Fusco Girard, 2019), ainsi que des groupes de citoyens ou des structures de l'économie sociale et solidaire, revendiquent cette nouvelle forme d'économie qui remet en cause la vision linéaire de la gestion des matières.



À l'échelle de la ville, l'application de l'économie circulaire est critiquée comme étant insuffisante et posant de nombreuses difficultés (Hobson, 2016 ; Williams, 2019). Elle est actuellement cantonnée à des aspects de développement de modèle d'affaires, alors qu'« une ville circulaire, c'est bien plus que la création d'une économie circulaire et de modèles d'entreprise circulaires dans le contexte urbain[19] » (Williams, 2019, p. 2759). Elle est souvent réduite à une question de mise en œuvre technique de modèles économiques circulaires à l'échelle urbaine, comme l'utilisation de déchets industriels comme matériaux secondaires ou le retour au sol de nutriments qui n'est pas réalisé localement (Corvellec, Stowell et Johansson, 2022 ; Winslow et Coenen, 2023). Par ailleurs, l'économie circulaire urbaine est considérée comme « a-territoriale » car elle n'est pas connectée à une stratégie spatiale, consistant à développer une valorisation économique au plus près des intérêts des filières de traitement des déchets (Bahers, Durand et Beraud, 2017). Gregson *et al.* (2015) utilisent notamment la dimension spatiale pour critiquer ces approches incapables de garder tous leurs déchets sur leur territoire et de les transformer en ressources. Les ressources urbaines continuent de circuler à différentes échelles, notamment dans le système économique mondial, ce qui est ignoré dans la conceptualisation commune des villes circulaires (Williams, 2019). Ainsi, les stratégies urbaines circulaires offrent une solution spatiale pour maintenir la croissance économique face aux défis environnementaux (Bassens *et al.*, 2020).

Cette section vise donc à comprendre les politiques et initiatives émergentes en matière de circularité urbaine en se concentrant sur leurs logiques infrastructurelles, sur leurs modalités et sur leurs implications. En effet, les principes de l'économie circulaire ont pour ambition de constituer une « solution infrastructurelle », en tant que solution technique, significative et systémique produisant un changement potentiellement transformateur des villes. Ces initiatives sont entendues comme « terrestrialisantes » (Emelianoff, 2015), c'est-à-dire qu'elles inscrivent leur activité dans un environnement

19. Traduction de la citation suivante : « *A circular city is about a much more than creating a circular economy and circular business models within the urban context.* »

planétaire perçu dans leur fonctionnement écologique. Afin d'étudier en particulier leur potentiel de transformation et la multitude d'acteurs et d'intérêts divers qu'elles rassemblent, nous analyserons les politiques d'économie circulaire à Nantes-Saint-Nazaire et Göteborg qui régissent les infrastructures métaboliques urbaines et la manière dont elles sont mises en œuvre. Les « futurs » infrastructurels que ces politiques imaginent seront également discutés. Ces politiques d'économie circulaire ont-elles permis de renouveler les infrastructures urbaines dans les deux villes ? En particulier, cette section examinera s'il existe des bifurcations dans le régime métabolique urbain. Quels sont les cadres de réflexion sur ces futurs des infrastructures métaboliques urbaines ? Enfin, les lignes de tension dans les infrastructures métaboliques de Göteborg et de Nantes-Saint-Nazaire sont décrites sur les registres de l'externalisation, de la technopolitique et de l'imaginaire.



Cette section sera alimentée par des entretiens semi-directifs que nous avons conduits dans les deux villes portuaires, pour mettre en regard l'analyse quantitative des empreintes matérielles urbaines, ainsi que par une étude approfondie des documents et rapports politiques en lien avec le développement durable et l'économie circulaire depuis l'émergence de ces cadres au fil du temps. Les entretiens ont été réalisés à Nantes-Saint-Nazaire et à Göteborg avec des ingénieurs et avec des responsables d'agences de gestion des déchets urbains à différentes échelles géographiques (ville, métropole, région), ainsi qu'avec des entreprises privées, avec des organisations environnementales et avec des spécialistes des secteurs. La grille d'entretien est structurée pour comprendre la représentation des acteurs économiques des dimensions spatiales, politiques et environnementales des stratégies locales d'économie circulaire en lien avec les infrastructures métaboliques.

## Formalisation d'une politique d'économie circulaire et actions à Nantes-Saint-Nazaire

L'histoire de la mise en œuvre de la circularité à Nantes commence par l'élaboration d'un Agenda 21 en 2004 et son adoption en 2006, sur la base des principes du développement durable érigés dans les années 1990. Cet Agenda 21 est porté par le député-maire Jean-Marc Ayrault (devenu Premier ministre de la France plus tard) qui souhaite « atteindre l'objectif de développement durable, solidaire et maîtrisé[20] » dans son éditorial pour le premier rapport de développement durable de Nantes Métropole. Cinq ans après, un nouvel Agenda 21 est adopté, avec notamment une priorité concernant le développement économique durable et les enjeux des « déchets comme de nouvelles ressources à maîtriser[21] », prémices de l'économie circulaire. Cette stratégie a conduit à la réhabilitation des déchetteries, à la collecte des encombrants et au développement des composteurs de quartiers. Grâce à ces efforts et à la mise en œuvre de ces politiques urbaines, Nantes devient la première ville française Capitale verte de l'Europe en 2013 et produit des rapports « développement durable » chaque année. En continuant à travailler sur la réduction et la valorisation des déchets, la métropole dépose un dossier dans le cadre de l'appel à projets du ministère de l'Environnement « Territoire zéro déchet, zéro gaspillage » dont elle est lauréate en 2014. La mise en œuvre de ces politiques a notamment conduit à des actions visant à faire disparaître tout déchet et dépôt sauvage dans l'espace

20. Agenda 21, 2006, https://agenda21accoord.files.wordpress.com/2013/04/agenda_21-nantes-mc3a9tropole.pdf

21. *Ibid.*

public, à l'organisation d'événements destinés à valoriser les initiatives du territoire sur le gaspillage alimentaire, et à un partenariat avec la chambre de métiers pour faire émerger des entreprises spécialisées dans la réparation. Enfin, la métropole a entrepris, entre 2013 et 2017, une importante extension du réseau de chaleur lié à une chaufferie alimentée par l'incinérateur de déchets et à une chaufferie à bois. Ce label « Territoire zéro déchet, zéro gaspillage » l'a aussi conduite à construire « un plan d'actions économie circulaire, axe stratégique fort de la politique de la métropole[22] », qui débouche sur l'élaboration d'une feuille de route pour l'économie circulaire adoptée en octobre 2018 (rapport Développement durable de Nantes Métropole, 2019)[23]. Elle s'organise autour de trois axes : la boucle organique « du champ à l'assiette aux champs » (avec le projet alimentaire territorial et la structuration d'une filière de gestion et de valorisation des biodéchets) ; la boucle technique « petits équipements » (réemploi, réparation des objets localement, développement de nouvelles filières et pratiques de recyclage) et la boucle technique « BTP durable et circulaire » (construire un écosystème BTP durable et local, utiliser des matériaux alternatifs, et renforcer les boucles locales de valorisation des déchets et de production d'énergie) (note « Feuille de route Économie circulaire », 2018, par la vice-présidente de Nantes Métropole chargée des déchets et de l'économie circulaire[24]). Pour ces actions, la métropole de Nantes Métropole a reçu en 2021 le label économie circulaire[25] de l'Agence de la transition écologique (anciennement appelée Ademe).



Pendant cette période, le pôle métropolitain de Nantes a également développé en parallèle, avec le Grand port maritime de Nantes Saint-Nazaire, une démarche d'écologie industrielle, lancée en 2014. C'est la rencontre entre deux techniciens de Nantes et du port lors d'une journée d'étude nationale sur l'économie circulaire qui a permis de faire émerger la démarche. Ils ont ensuite réussi à mobiliser 25 entreprises de la zone industrialo-portuaire, dans le but de lancer de nombreuses réflexions autour de la transition énergétique et de l'économie circulaire, et donc concrètement de développer des synergies industrielles, c'est-à-dire de recycler les déchets d'entreprises pour en faire des ressources pour les autres, ou de valoriser énergétiquement des déchets dans des chaudières pour alimenter un réseau de chaleur urbain. Ces actions ont été menées par les services de développement économique, qui a mandaté deux bureaux d'étude spécialisés dans le domaine, dans le but de « générer de nouvelles activités et valeurs[26] », notamment la mise en place d'un réseau de chaleur industrialo-urbain, qui transite entre la ville et le port industriel.

De plus, une multitude d'acteurs intervient dans la mise en œuvre urbaine de l'économie circulaire, ce qui produit un jeu d'acteurs complexe et en tension. Si la métropole de Nantes a des compétences opératoires en termes d'ingénierie urbaine (déchets, énergie), le Département et la Région ont des responsabilités de planification

22. Dossier « Nantes Métropole – Territoire lauréat. Appel à projets territoire "zéro déchet, zéro gaspillage" », 2014.

23. Rapport sur la situation en matière de développement durable 2018-2019 de Nantes Métropole, 2020. https://metropole.nantes.fr/files/pdf/environnement/developpement%20durable/NM_Rapport%20annuel%20developpement%20durable%202019%20WEB2c.pdf

24. Feuille de route « économie circulaire », 2018. https://entreprises.nantesmetropole.fr/une-economie-engagee/lechodesengagees/economie-circulaire-et-si-vous-rejoigniez-la-boucle

25. *Ibid.*

26. Stratégie « Durabilité des activités portuaires », https://www.nantes.port.fr/fr/nos-engagements/agir-en-faveur-de-lenvironnement/durabilite-des-activites-portuaires

et d'implantation d'infrastructures de traitement des déchets et de production d'énergie, alors que l'État élabore et contrôle la mise en œuvre des réglementations (françaises et issues de l'Europe). Ces acteurs interviennent donc à plusieurs échelles et cela génère des tensions. Par exemple, la collectivité régionale qui se revendique un « chef de filat de l'économie circulaire » (entretien avec un élu régional, 2018) n'est pas exempte de critiques par certains acteurs du territoire pour son manque de position franche : « Il faut mettre un arbitre car ce n'est pas trop piloté actuellement » (entretien avec le directeur prestataire déchets, 2018) et « Cela manque de visibilité politique à l'échelle de la région pour inciter les collectivités » (entretien avec le chargé de mission dans une association environnementale, 2018). En effet, la Région a de nombreuses compétences de planification en matière d'économie circulaire, à commencer par la planification régionale de prévention et de gestion des déchets et de l'économie circulaire intégrée au schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires. Or elle agit selon les acteurs plus comme une facilitatrice et une animatrice. Elle met en place des groupes de travail et organise des journées d'étude, mais ne fixe pas véritablement d'objectifs minimums à atteindre ni ne produit d'arbitrage qui tranche sur des solutions techniques. Elle n'a pas non plus le budget pour investir dans de nouvelles infrastructures, qui restent la prérogative des municipalités ou des entreprises privées.



Les questions économiques des infrastructures circulaires sont au cœur de ces politiques. En effet, les approches qui concernent le développement de modèles d'affaires ou d'innovation sont souvent mises en avant dans les discours politiques et dans les actions concrètes. À l'opposé, il est rare de lire ou d'entendre des arguments sur les perspectives sociales et écologiques. Par exemple, dans la feuille de route d'économie circulaire à Nantes, il est écrit : « Avec le Nantes City lab [dispositif d'accompagnement de projets innovants conçu comme un régime exploratoire de la fabrique urbaine (Chesnel et Devisme, 2020)], c'est tout le territoire de la métropole qui devient le terrain d'expérimentation pour l'innovation en économie circulaire » (rapport Développement Durable Nantes Métropole, 2019). Ainsi, à l'aide de la mise à disposition d'une très grande surface dans le port sur une ancienne friche industrielle détenue par le port de Nantes-Saint-Nazaire (4 hectares au cœur de l'agglomération)[27], une nouvelle plateforme industrielle de recyclage et de valorisation a été créée en 2020. Selon le groupe industriel propriétaire, ce projet « s'inscrit pleinement dans la feuille de route économie circulaire de Nantes Métropole[28] » avec une très grande capacité d'accueil de déchets du BTP pour les « transformer en nouvelles ressources[29] », c'est-à-dire collecter et trier des déchets pour les recycler ou les brûler dans une chaudière à combustion. Cette solution urbaine implique donc un fort investissement privé (6,6 millions d'euros)[30] par le groupe industriel, pour créer des économies d'échelle en traitant industriellement des quantités massives de flux de déchets.

L'économie circulaire à Nantes est donc véritablement perçue par certains acteurs comme un levier de développement économique de nouvelles solutions infrastructurelles,

27. Dossier technique d'autorisation environnementale de l'Écopôle de Cheviré, https://www.loire-atlantique.gouv.fr/contenu/telechargement/39401/264548/file/180221_PFS_Dossier_Tech_V3_100719_300919.pdf

28. Entretien de Yann Vincent, directeur général service aux entreprises du groupe Suez, dans *Presse Océan*, publié le 21 décembre 2021.

29. *Ibid.*

30. *Ibid.*

comme de nouvelles technologies mises en réseau. Cette perspective valide la multiplication d'infrastructures : « Avant on était dans le mono-solution, maintenant le multi-solution [avant, une seule infrastructure pour tous les déchets, maintenant plusieurs infrastructures par type de déchets] », mais il faut « faire attention à ce qu'il n'y ait pas trop de projets, trop de solutions pour pas assez de déchets ! » (entretien avec le directeur prestataire déchets, 2018). Ces nouvelles infrastructures urbaines de l'économie circulaire doivent créer du développement économique local avant tout et s'inscrivent donc dans un paradigme techno-optimiste : « L'intérêt est commun entre la collectivité qui souhaite traiter ses déchets et verdir son énergie, et l'énergéticien [le producteur ou distributeur d'énergie] qui souhaite verdir son image et nous [l'industriel] qui proposons une solution de gazéification des déchets[31] qui convient à tous » (entretien avec le directeur unité de gazéification, 2018).

La démarche d'écologie industrielle, portée par le Grand port maritime de Nantes Saint-Nazaire, a connu quelques difficultés car c'est un long processus qui peut décourager les acteurs industriels si aucun bénéfice économique n'en est retiré. Il faut donc passer de l'ambition à l'action du point de vue de l'animateur de la démarche : « Il y a quelques années, la démarche d'écologie industrielle intéressait tout le monde, mais maintenant il faut montrer du concret… par exemple tous les industriels ont participé, puis vient le problème du temps alloué et les temporalités sont différentes entre les projets, l'économie et le politique » (entretien avec le chargé de mission port, 2018). En effet, la mise en œuvre d'un projet est très différente selon le point de vue de l'industriel, du retour sur investissement, de la réglementation et de la volonté politique de la métropole. La sensibilisation des acteurs industriels fut longue à mettre en place, et ces derniers mettent une pression pour voir le temps alloué à leur participation à la démarche aboutir avec la concrétisation par les acteurs publics de projets comme le réseau de chaleur entre industries, qui permettrait de valoriser de la chaleur perdue d'une industrie vers une autre. Par ailleurs, ces projets dépendent, en plus de temporalités industrielles et politiques, des cours du marché mondial de l'énergie : « En ce moment les prix bas du gaz pénalisent les projets » et il faut être « pédagogue, bien vendre son projet […] pour convaincre les citoyens et les acteurs car il n'y a pas d'obligation de raccordement au réseau » (entretien avec un chargé de mission collectivité, 2018). Ainsi, si le retour sur investissement n'est pas assuré rapidement, les acteurs économiques risquent de s'éloigner. Pour autant, la démarche a abouti à la création de plusieurs activités, comme une station de gaz naturel pour véhicules composé à 95 % de méthane et, en 2027, à la mise en place d'un réseau de chaleur industrialo-urbain. Ainsi, la ville étudie la construction d'un réseau de près de 100 gigawatts de chaleur à partir de biomasse et de récupération de chaleur fatale des entreprises portuaires lors de processus industriels, pour desservir des logements du parc social.

Ainsi, l'approche par l'économie circulaire à Nantes s'intéresse fortement aux grandes infrastructures, notamment autour des déchets transformés en énergie.



## Les infrastructures « déchets-énergie » à Nantes-Saint-Nazaire au cœur des enjeux

La politique circulaire de Nantes soutient fortement les infrastructures énergétiques de traitement des déchets, au travers notamment de l'engagement n° 19 de la stratégie de

31. Ce procédé consiste à chauffer et à décomposer les déchets organiques en un gaz de synthèse qui peut être soit brûlé à des fins énergétiques, soit réutilisé comme du méthane ou de l'hydrogène.

transition énergétique, qui pose clairement l'objectif de « faire des déchets une source d'énergie renouvelable »[32]. Ainsi, les centrales d'incinération d'ordures ménagères, ainsi que les usines de méthanisation de déchets organiques et les chaudières à combustible issues de mélange de déchets solides, sont plébiscitées, en lien avec le développement des réseaux de chaleur urbains. À Nantes, l'extension du réseau entre 2013 et 2020 est de 68 km, pour atteindre 85 km au total au sein de plus d'une dizaine de quartiers de la ville. Ce réseau est alimenté par l'usine d'incinération et par une chaudière biomasse à bois. Un projet est en cours d'élaboration pour l'étendre encore.

Par ailleurs, une évolution importante de la valorisation matière, c'est-à-dire le recyclage industriel, est que cette activité n'est plus en croissance économique. D'une part, le coût des matières secondaires a connu de sévères baisses ces dernières années et, d'autre part, le taux de la part recyclable des déchets stagne. En effet, la part des déchets solides comme les emballages, cartons et métaux, qui peuvent échapper à l'incinération pour être valorisée économiquement dans les filières de recyclage industriel, n'augmente plus. Comme nous l'explique cette entreprise de traitement des déchets, « depuis 4-5 ans, les métropoles souhaitent aller plus loin du côté de la valorisation énergétique (incinération ou méthanisation), puis le recyclage s'essouffle. On est arrivé au maximum, on ne valorise quelques pouillèmes de plus en mettant beaucoup d'argent. Il n'y plus de révolution de ce côté » (entretien avec le directeur prestataire déchets, 2018).



Par ailleurs, la mise en œuvre de ces solutions infrastructurelles circulaires s'exprime par des divisions spatiales. Certaines activités industrielles sont repoussées dans des zones *ad hoc* des territoires, notamment dans les zones industrielles, ce que les acteurs économiques mentionnent : « C'est vrai que cette synergie entre ville et port, c'est un peu le port industriel qui s'occupe de ce qui sent mauvais [le traitement des déchets industriels] » (entretien avec le gestionnaire de déchets, 2018). D'autre part, les ressources puisées pour approvisionner ces infrastructures déchets-énergie proviennent de territoires parfois éloignés. Par exemple, la chaudière biomasse à bois qui alimente le réseau de chaleur urbain nantais collecte du bois dans un rayon de 150 km. Cela se traduit par des tensions entre acteurs, notamment ruraux face aux infrastructures urbaines : « En ce qui concerne la centrale thermique à biomasse urbaine, les gens sont fatigués de fournir aux "bobos" urbains leur centrale thermique écologique dont ils sont si fiers. S'il n'y avait pas de territoires (ruraux) comme nous, il n'y aurait pas de biomasse. D'ailleurs, ça commence à être très préoccupant parce que toutes les ressources en bois s'épuisent ! » (entretien avec un directeur de producteur d'énergie, 2018).

Enfin, le pôle métropolitain abrite à Cordemais une des dernières centrales thermiques à charbon de France, qui représente un fort enjeu de transition énergétique pour le territoire. En effet, depuis 2016, la centrale thermique de Cordemais doit être transformée pour qu'elle puisse fonctionner avec des déchets et de la biomasse au lieu du charbon, depuis la décision de l'État français de l'abandon du charbon. Cette infrastructure très lourde (environ 400 emplois directs à l'heure actuelle) est au centre des enjeux économiques de la région pour une majorité des acteurs économiques interrogés et dans la presse locale. Le charbon doit être remplacé par un mélange de déchets solides, de déchets verts et de déchets de bois. C'est ainsi que le P-DG de l'usine a eu l'idée de les appeler le nouveau « charbon vert », pensant répondre aux injonctions de durabilité.

32. Feuille de route transition énergétique « 33 engagements », 2018, https://fr.calameo.com/read/004590458d29eeb7b698c

Ainsi, la première étape est d'identifier les ressources disponibles, ici les déchets de bois et déchets verts. Cette question reste en suspens : « Cordemais pourrait siphonner les gisements et faire basculer le marché. Ce sont des gisements [les déchets] qui demain pourraient devenir rares ! » (entretien avec le dirigeant d'une entreprise de traitement des déchets, 2018). Certains acteurs des énergies renouvelables et du déchet voient la menace d'une opposition entre une grande infrastructure, qui doit continuer à exister malgré un modèle ancien, et les circuits courts énergétiques qui émergent progressivement et qui n'auront plus assez de ressources pour fonctionner. Il s'agit, par exemple, des collectivités périurbaines ou rurales qui investissent dans des chaudières à bois pour remplacer leurs chaudières à gaz. Un acteur industriel qui collecte le bois et les déchets de bois explique ainsi l'incompatibilité d'avoir ces deux types d'infrastructures sur le territoire : « Cordemais : on essaie de ne pas interférer, on n'est ni pour ni contre… mais les projets territoriaux de ce type et les circuits courts énergétiques ne vont pas dans le même sens » (entretien avec le dirigeant d'une entreprise de traitement des déchets, 2018). Il s'agit donc bien de maintenir le rôle d'une infrastructure métabolique dominante, qui répond à tous les canaux des grands réseaux techniques centralisés, qui deviendrait un gros producteur d'énergie à échelle régionale au détriment des circuits courts de production.



Ainsi, ces solutions infrastructurelles sont mises en avant par les politiques urbaines d'économie circulaire, au travers des feuilles de route « économie circulaire » et « transition énergétique » qui sont imbriquées et se recoupent, comme pour le recyclage des déchets du BTP pour laquelle « Nantes Métropole se donne une fonction d'animateur des démarches circulaires pour permettre notamment le développement de démonstrateurs de cette transition » (feuille de route « économie circulaire », 2018[33]). Ces « démonstrateurs de la transition », que sont donc ces solutions infrastructurelles, sont soutenus par les acteurs industriels comme publics à Nantes, non sans que cela crée de tensions et contradictions ou change profondément leur logique matérialiste et productiviste. D'un point de vue de l'empreinte matérielle urbaine, ce projet accentuerait fortement les importations et donc le poids de leur empreinte, étant donné que les ressources locales ne seront pas suffisantes. Ces infrastructures conduisent ainsi à renforcer l'externalisation du métabolisme, qui implique une croissance de l'empreinte des matériaux pour leur construction, et des énergies pour leur alimentation.

## Une nébuleuse d'initiatives d'infrastructures citoyennes et d'économie sociale et solidaire à Nantes-Saint-Nazaire

La politique de circularité urbaine de Nantes tente de favoriser également les initiatives associatives et citoyennes, notamment *via* « la boucle technique des petits équipements » et « la boucle organique du champ à l'assiette au champ » de la feuille de route sur l'économie circulaire[34]. Il existe ainsi une nébuleuse d'initiatives d'infrastructures plus citoyennes, qui sont recensées dans une cartographie par la « galerie du zéro déchet »[35], qui est un lieu de sensibilisation au zéro déchet et à l'économie circulaire. On en compte

33. https://entreprises.nantesmetropole.fr/une-economie-engagee/lechodesengagees/economie-circulaire-et-si-vous-rejoigniez-la-boucle

34. Feuille de route « économie circulaire », 2018.

35. La cartographie est disponible à l'adresse suivante : http://lagalerieduzerodechet.fr/nos-cartographies/

à Nantes Métropole environ 360, comme des ateliers de réparations, des magasins de seconde main, des épiceries en vrac ou des ressourceries comme celle d'« Environnements Solidaires » qui récupère des meubles afin d'aménager des appartements des nouveaux arrivants très défavorisés à Nantes. Il s'agit donc de « réutiliser dans le quartier entre personnes de faibles revenus » car « ici on fait l'économie circulaire des habitants ! » (entretien avec le chargé de mission association, 2019). L'association « Environnements Solidaires » a d'ailleurs étendu ses activités au lombricompostage de proximité « pour lutter contre l'injustice sociale d'accès au composteur à 30 euros, du coup on s'organise en *do it yourself* » (entretien avec le chargé de mission cité précédemment, 2019) en mettant en place un site de composteurs collectifs et jardins partagés dans le quartier. Cette association a notamment été aidée financièrement par Nantes Métropole dans le cadre de sa politique de réduction des déchets. Sur le reste du territoire, notamment à Saint-Nazaire, les activités sont recensées sur la carte collaborative des structures de l'économie sociale, solidaire et circulaire de la Chambre régionale de l'économie sociale et solidaire des Pays de la Loire. Sont notamment identifiées onze structures à Saint-Nazaire.



Pour autant, ces structures font face à de nombreuses difficultés. D'abord, elles sont associatives et doivent atteindre un équilibre financier, ce qui n'est pas assuré. Elles sont donc très dépendantes de subventions : « Cette subvention donnerait de l'oxygène à l'association. À cette subvention locale, s'ajoutent les 100 000 euros du ministère, et peut-être un projet local de taille moyenne. Alors l'association sera plus à l'aise financièrement ! » (entretien avec l'ingénieur-projet association en énergie renouvelable, 2018). De nombreuses associations qui avaient pourtant pignon sur rue et étaient très médiatisées ont dû déposer le bilan du fait de difficultés financières, comme La Tricyclerie qui a collecté des biodéchets de restaurants à vélo pendant six ans.

Par ailleurs, ces associations peuvent également se trouver dans une situation de contradiction par rapport à la prévention de la production de déchets. En effet, par leurs activités de réemploi et de réutilisation, elles font face à des paradoxes : « Nous sommes en fait dans un double discours : il faut produire moins de déchets, mais on en a besoin pour faire vivre la ressourcerie. C'est un effet rebond car, en un sens, on promeut la production de déchets » (entretien avec le chargé de mission ressourcerie, 2019). En fait, il s'agit du même type de tension sur les ressources que pour les grandes infrastructures déchets-énergie, pour des volumes très différents, avec de très faibles quantités pour ces infrastructures sociales. Cependant, cette nébuleuse d'initiatives est très créative dans le type d'activités qu'elles mettent en œuvre. Elles participent à la visibilisation du problème des déchets et de la réappropriation d'infrastructures de tailles modestes : « On ne récupère que ce qui est réemployable, on n'est pas une grosse infrastructure d'élimination » (entretien avec le chargé de mission ressourcerie, 2019).

### Formalisation d'une politique d'économie circulaire et actions à Göteborg

À Göteborg, une stratégie d'économie circulaire est mise en œuvre depuis 2016[36]. Ce mouvement vers l'économie circulaire provient d'abord de la mise en œuvre de la stratégie « Strategic Climate Program[37] » en 2006. En 2014, cette stratégie est renouvelée

36. www.goteborg.se/cirkularagoteborg

37. « Climate Programme for Gothenburg », 2015, https://www.goteborg.se

et il est y clairement inscrit comme objectif de réduire la quantité de déchets de 30 % d'ici 2030. Le programme s'attèle ainsi à intervenir sur la consommation des ménages (Hult et Larsson, 2016) et de la réparation (Ordonez et Hagy, 2019 ; Rask, 2022). Cette stratégie d'économie circulaire fait maintenant partie du programme-cadre « Environment and climate programme for the city of Gothenburg 2021-2030[38] ». L'échelle nationale suédoise a influencé et soutenu ces initiatives dès 1997 dans les rapports fondateurs Eco-cycle « Strategy for adopting materials and goods to eco-cycles », qui érigent les principes de réutilisation, recyclage, valorisation pour les ressources extraites de la nature, et « Circular economy report » de 2017 (Johansson et Henriksson, 2020).

Les objectifs du projet intitulé « Circular Gothenburg » de 2016 sont de « conduire, coordonner, soutenir et co-créer la transition vers une économie circulaire » dans les domaines de compétences de la ville de Göteborg (rapport « Samarbete för ett cirkulärt Göteborg 2030 », 2021). Cela inclut à la fois les processus internes de la municipalité et les activités qui aident les citoyens à vivre de manière circulaire. Les axes de la stratégie sont de réduire les déchets, de réduire l'impact sur le climat et d'augmenter l'efficacité des ressources. Des actions ont été mises en place, comme un nouvel accord-cadre (marché public) conclu pour la réutilisation et la reconception de meubles dans la ville, ainsi qu'un marché public pour favoriser la construction et la démolition circulaires De plus, ont été créés des ateliers de réparation Fixotek qui sont des lieux dotés de personnel, proches du lieu de vie des populations, ouverts à tous, dont les buts sont de s'y rencontrer, d'y apprendre, de réparer et de redessiner des objets, d'emprunter des outils, d'échanger des jouets, des vêtements et des livres.



Dans le périurbain de Göteborg, la multitude d'acteurs est moins prégnante que dans la ville-centre. Pourtant, une gouvernance multi-échelle est mise en œuvre. L'agence de l'environnement suédoise, qui établit une planification avec des objectifs nationaux, doit compter sur les régions pour accompagner les municipalités afin de réaliser ces objectifs de recyclage et de réduction des déchets (– 40 % par employé à temps plein) (rapport « Göteborgsregionen minskar avfallet », 2020)[39], même si les municipalités sont très autonomes. Ce mécanisme est expliqué par un ingénieur-projet de l'agence de l'environnement suédoise : « Les objectifs nationaux ne sont fixés qu'au niveau national. Mais c'est une grande source d'inspiration pour les municipalités de voir comment elles coopèrent pour atteindre les objectifs nationaux. Mais elles ne sont pas obligées de les mettre en œuvre dans leurs propres plans de gestion des déchets, car elles sont très autodéterminées » (entretien avec l'ingénieur-projet de l'Environmental Swedish Agency [déchets], 2020). Le plan régional des déchets répond à plusieurs objectifs en termes de prévention, de réemploi et de recyclage (notamment l'atteinte d'une réduction de 40 % de déchets produits cités plus haut). Ce plan est aussi axé sur la manière dont « les municipalités vont collaborer pour améliorer la gestion de leurs déchets d'ici 2030 » (rapport « Göteborgsregionen minskar avfallet », 2020)[40]. Ainsi, la collectivité

38. « Environment and Climate Programme » for the City of Gothenburg 2021–2030, 2017, https://goteborg.se/wps/wcm/connect/be800f8b-8c25-498e-80e8-b982d56ddc08/Environment+and+Climate+Programme+for+the+City+of+Gothenburg+2021%E2%80%932030.pdf?MOD=AJPERES

39. https://goteborgsregionen.se/styrande-dokument/2021-01-01-goteborgsregionen-minskar-avfallet---avfallsplan-till-2030

40. *Ibid*.

régionale met en place des groupes de travail et des plateformes de mutualisation pour favoriser les échanges de bonnes pratiques et la collaboration entre territoires à différentes échelles, comme l'explique le chargé de mission déchets à la région de Göteborg : « Notre principal focus c'est le plan régional des déchets, avec différents objectifs selon les municipalités. On ne peut pas prendre des décisions pour elles, mais on fait du conseil, on donne des faits, on aide avec le background. On a emmené ensemble les municipalités de la région dans le plan. Maintenant qu'il est voté, on les aide à atteindre les objectifs, avec des méthodes, des échanges d'expériences, aussi des échanges avec des chercheurs » (entretien avec l'ingénieur-projet de Gothenburgregionen [service des déchets], 2020).

Pour autant, les municipalités sont très puissantes et autonomes dans le système suédois. La métropole de Göteborg a voté des plans environnementaux, qu'elle doit respecter avec des cibles quantifiées à atteindre, notamment – 30 % de déchets ménagers et – 50 % d'empreinte carbone des secteurs de constructions et démolition d'ici 2030 (rapport « Samarbete för ett cirkulärt Göteborg 2030 », 2021)[41]. Elle a également la gestion de grandes infrastructures, notamment celles de l'incinérateur des déchets relié à un réseau de chaleur qui alimente 80 % de la ville et dont la chaleur provient à 80 % de l'incinérateur des déchets, mis en service en 1972 (Holmquist et Göteborg Energi, 2021). Ces taux sont vraiment importants et originaux, bien avant que ce soit une stratégie mise en avant par les principes d'économie circulaire. Ces infrastructures sont en plus structurées sur le modèle des *municipally-owned waste management companies* (« entreprises municipales de gestion des déchets ») qui jouissent d'un monopole sur les déchets urbains (Corvellec, Zapata Campos et Zapata, 2013). Les municipalités suédoises sont donc très puissantes sur le sujet des infrastructures des déchets urbains, car elles contrôlent tout le gisement. C'est clairement un acteur dominant du secteur des déchets. Par ailleurs, l'économie circulaire est vue comme un levier de production locale avec la mission de valoriser les ressources au maximum. Il est ainsi écrit dans la stratégie de circularité que : « La ville de Göteborg, en collaboration avec les acteurs économiques, proposera des solutions attrayantes qui encouragent la consommation durable. Mais aussi pour stimuler les acteurs économiques à concevoir et à produire des produits et services plus intelligents » (rapport « Samarbete för ett cirkulärt Göteborg 2030 », 2021)[42]. Cette démarche est confirmée dans les entretiens auprès des acteurs publics : « L'économie circulaire c'est réutiliser, recycler, valoriser mais pas réduire. Il faut autant de ressources possible à circulariser ! Tant qu'il y en a, mieux c'est » (entretien avec l'ingénieur-projet de Gothenburgregionen [service des déchets], 2020). Il s'agit donc moins d'économies, au sens d'économiser les ressources, que de productions circulaires pour optimiser l'usage des déchets.



## Les infrastructures « déchets-énergie » de Göteborg au cœur des enjeux

Les grandes infrastructures sont centrales à Göteborg pour le développement de la politique circulaire urbaine. Le projet GoBiGas de Göteborg est une démonstration de la production de biométhane à partir des déchets organiques par gazéification, que les acteurs de

41. https://goteborg.se/wps/portal/start/kommun-och-politik/sa-arbetar-goteborgs-stad-med/hallbarhet-och-agenda-2030/sa-gor-vi-staden-hallbar/cirkulara-goteborg

42. *Ibid.*

l'économie circulaire à Göteborg mettent en avant. Selon les porteurs du projet, il s'agit du premier projet au monde à utiliser du biogaz pour alimenter des véhicules grâce à une collaboration entre l'industrie et les autorités locales. Ce projet est financé par la compagnie énergétique municipale (*municipally-owned energy company*) Göteborg Energi AB et par l'agence de l'énergie suédoise (Swedish Energy Agency), dans le but de réduire la dépendance aux énergies fossiles pour la mobilité automobile dans la région de Göteborg. La planification régionale avance l'objectif de « 70 % des déchets alimentaires produits qui doivent être utilisés pour le recyclage des nutriments et la production de biogaz » (rapport « Göteborgsregionen minskar avfallet », 2020)[43]. Le développement du biogaz à Göteborg montre également les contradictions des futurs circulaires en Suède. Tout d'abord, le manager de l'agence publique régionale en charge du développement du biogaz montre que le problème n'est pas de remplacer les combustibles fossiles ou de réduire la consommation d'énergie, mais de trouver de nouvelles parts de marché : « Grâce aux SUV, le biogaz issu des déchets a le vent en poupe » (entretien avec le manager régional du développement du biogaz, 2020). Selon lui, le déterminant principal du développement de ces infrastructures n'est pas une volonté politique ou écologique, mais il repose sur des mécanismes liés aux coûts des déchets et de l'énergie : « Tout dépend du prix du pétrole. Si le prix du pétrole est très élevé, il y a beaucoup de projets. Mais maintenant il est bas et les projets sont bloqués ! » (entretien avec le manager régional du développement du biogaz, 2020). De plus, l'origine géographique des déchets organiques qui alimentent l'infrastructure n'est pas considérée comme un problème, l'important étant la concurrence dont font l'objet ces déchets : « Nous collectons les déchets jusqu'à 100 km de distance. » De même, le manager de l'agence publique régionale nous indique que : « Cette économie circulaire est un argument écologique, le fait d'être un pionnier vous permet de vendre à des personnes préoccupées par les questions environnementales. » Par ailleurs, comme le montrent très bien Corvellec, Zapata Campos et Zapata (2013), les incinérateurs sont comme un blocage pour les collectivités en Suède par des verrous politiques et institutionnels, comme les réglementations suédoises qui favorisent l'incinération des déchets et les contrats à long terme entre l'industriel et la municipalité. Ces verrous impliquent notamment que les collectivités ne veulent pas perdre leur statut de monopole sur les déchets au profit d'alternatives comme les projets industriels de biogaz. Il y a donc une compétition pour les ressources-déchets face aux incinérateurs.



Par ailleurs, l'incinération, qui est très présente à Göteborg, est également sujette à transition. Avec les politiques européennes de réduction des déchets appliquées aux territoires et aux habitants, les incinérateurs manquent de déchets pour alimenter les fours et produire de la chaleur domestique. Cette logique conduit d'ailleurs la chargée de mission de valorisation énergétique à Göteborg à déclarer que la collectivité est obligée d'importer des déchets d'autres pays d'Europe (surtout du Royaume-Uni et d'Italie) à travers la logistique portuaire notamment, selon leurs qualités calorifiques pour alimenter les incinérateurs : « Nous importons des déchets mais de bonne qualité » (entretien avec l'ingénieur-projet du centre d'incinération, 2020). Ainsi, le gestionnaire de cette *municipally-owned waste management company* choisit les déchets à importer et les achète en conséquence en nouant des partenariats avec d'autres collectivités européennes. De plus, la question de la disponibilité

43. https://goteborgsregionen.se/styrande-dokument/2021-01-01-goteborgsregionen-minskar-avfallet---avfallsplan-till-2030

des ressources à incinérer est encore plus sous tension avec les enjeux de réduction des objets plastiques à usage unique selon la Directive européenne 2019/904 : « Si la Suède interdit les plastiques (le "*plastic ban*"), il faudrait aller chercher d'autres déchets et plus loin pour les remplacer » (entretien avec l'ingénieur-projet du centre d'incinération, 2020). Ainsi, la perspective n'est pas de réduire la productivité des incinérateurs, dont dépendent les réseaux de chaleur. De plus, ces réseaux représentent la plus grande part de l'investissement pour le dispositif (Corvellec, Zapata Campos et Zapata, 2013).

## Une nébuleuse d'initiatives d'infrastructures citoyennes et d'économie sociale et solidaire à Göteborg



À côté des grandes infrastructures, de nombreuses initiatives citoyennes ou de l'économie sociale et solidaire ont vu le jour à Göteborg. Il existe ainsi des espaces ouverts et partagés de réparation d'objets, d'échanges et d'emprunts, comme les Fixotek, les *Bike kitchens*, ou *freeshop* à Göteborg. L'objectif de la ville est donc que « les habitants et les visiteurs de Göteborg puissent facilement recycler, partager et cuisiner » (rapport « Samarbete för ett cirkulärt Göteborg 2030 », 2021). Ces initiatives sont des exemples de participation d'habitants de tous statuts sociaux à des ateliers de réparation de quartier (Bradley et Persson, 2022 ; Ordonez et Hagy, 2019). L'objectif est également de « « travailler sur les relations sociales et économiques au travers de ces expériences » (entretien avec l'ingénieur-projet de Göteborg, 2020). Les services de la ville ont aussi créé une cartographie « *mapping sharing economy*[44] » de ces initiatives et surtout des objets de prêt et seconde main pour les habitants, qui promeuvent un futur à faible impact. Il existe aussi un centre de réemploi plus étendu comme celui présenté comme pionnier d'Återbruket. Il s'agit d'un grand centre à l'extérieur de la ville qui organise plusieurs espaces de réemploi, dons et recyclage. C'est aussi le « seul endroit [dans la région] à vendre des matériaux de construction de seconde main » (entretien avec le manager du centre de recyclage, 2020).

Pour autant, nous observons que ces futures circulaires s'appuient sur des expérimentations qui ne sont pas complètement pérennisées dans le temps long (Zapata et Zapata Campos, 2019 ; Zapata Campos et Zapata, 2017). Ces initiatives permettent de construire un discours sur ces nouvelles infrastructures locales et circulaires, comme Fixotek, qui sont parfois abandonnées : « Il y avait cinq super expériences de Fixotek pendant deux ans, mais seulement deux vont rester » (entretien avec l'ingénieur-projet de Göteborg, 2020). Comme l'indique un chercheur qui a travaillé sur la prévention des déchets à Göteborg jusqu'en 2018 : « La majorité de ces initiatives [circulaires] ont été annulées. La ville a fait ses manuels "comment le monter" mais ils n'ont pas trouvé l'intérêt de les prolonger » (entretien avec un expert académique en sciences politiques, 2021). En effet, la ville a interrompu une partie des subventions pour les reporter ailleurs. Il s'agit bien dès lors de bénéficier d'un retour d'expérience et de le valoriser, sans en faire une solution permanente urbaine. Parfois, c'est simplement le manque de soutien des métropoles qui ne permet pas de prolonger les initiatives :

« Un autre exemple est la maison "*solidarity fridge*" qui est un projet depuis 20 ans de récupération de nourriture. Cette association avait juste besoin d'un espace et pas d'un hangar pourri comme on leur a proposé. Mais la ville a dit "on ne peut les aider eux

44. https://www.smartakartan.se/ Cette cartographie s'est étendue depuis à d'autres villes de Suède.

plutôt que d'autres, c'est la législation européenne qui veut ça". Or on sait que si la ville le veut, elle le peut ! » (entretien avec un expert académique, 2021).

Dans d'autres cas, la divergence d'intérêt entre l'échelle nationale et l'échelle locale conduit à l'abandon de nouvelles infrastructures, plus citoyennes comme celles des ateliers de réparation dans les quartiers : « Au début c'était une ONG [organisation non gouvernementale] qui finançait les Fixotek, mais elle a perdu ses subventions nationales. La ville a dit, ok, mais vous devez faire un zoom arrière et penser plus large » (entretien avec un expert académique, 2021). Sur les cinq ateliers Fixotek, seulement « un ou deux ateliers vont rester » (entretien avec le chargé de mission en économie circulaire à Göteborg) du fait de l'injonction à l'indépendance économique, et aucun dans les quartiers populaires. De même, pour le centre pionnier de recyclage d'Återbruket, l'équilibre financier est aussi difficile à trouver : « On veut donner le bon prix [pour les matériaux de seconde main], mais des fois on finit par baisser. Sauf qu'il faut assurer nos revenus. Et parfois on donne gratuitement pour se désengorger » (entretien avec le manager du centre de recyclage, 2020). Enfin, comme le confirme cet entretien, cela peut engendrer des décalages entre les discours politiques qui soutiennent fortement ces initiatives et les contingences concrètes des équilibres financiers à trouver : « Les politiques ne se rendent pas compte de ce qu'ils ont signé sur les objectifs métropolitains d'économie circulaire » (entretien avec le responsable de l'économie circulaire à Göteborg, 2019).



## TENSIONS ET CONTRADICTIONS DANS LA MISE EN ŒUVRE DE LA VILLE CIRCULAIRE

Les deux études de cas de Nantes et de Göteborg ont montré certaines tensions et contradictions dans la mise en œuvre de la ville circulaire. Dans cette section, deux cas sont discutés à la lumière des questions que nous avons posées sur la relocalisation du métabolisme urbain, sur le rôle des infrastructures métaboliques, sur la prise en compte des empreintes matérielles et de ces futurs infrastructurels que les stratégies de circularité envisagent. Nous dégageons trois séries d'implications socio-spatiales de ces capacités et configurations infrastructurelles circulaires émergentes.

### Dimension spatiale, relocalisation, centralisation

Les stratégies des acteurs publics et privés à Nantes-Saint-Nazaire et à Göteborg en matière d'infrastructures circulaires reposent sur un argumentaire environnemental visant à faire la promotion des déchets comme ressources énergétiques. Cette logique les conduit à promouvoir les infrastructures « déchets-énergie », notamment celles qui sont connectées à un réseau de chaleur urbain. Ainsi les déchets sont incinérés dans des chaudières pour en extraire la chaleur. Les rapports publics des collectivités mettent donc en parallèle valorisation des déchets et transition énergétique. Cependant, à l'étude de ces infrastructures, un paradoxe apparaît : la mutation ou la création des infrastructures vers la filière « déchet-énergie » s'accompagne d'un approvisionnement de plus en plus lointain. En effet, les seuls déchets urbains ne suffisent pas à alimenter les infrastructures circulaires. À Göteborg, le gestionnaire de l'incinérateur doit récupérer des déchets dans toute l'Europe. De même, la nouvelle infrastructure de production de biogaz à partir de déchets organiques s'approvisionne dans toute la région du Västra Götaland et au-delà. À Nantes, la chaudière biomasse

et l'incinérateur collectent des déchets bien au-delà de l'aire urbaine, mais plutôt à l'échelle régionale, quand bien même il existe d'autres infrastructures de ce type dans ces territoires.

Il s'agit donc de projets qui nécessitent la collecte des déchets sur de longues distances, à l'opposé d'une relocalisation du métabolisme urbain. La spatialité de ces infrastructures est paradoxale : elles sont à la fois proches des lieux de consommation (les réseaux de chaleur profitent aux habitants des villes de Nantes et de Göteborg) et éloignées des lieux d'approvisionnement. Les processus métaboliques d'externalisation sont dans notre cas renversés : il ne s'agit pas, comme il a été étudié (Barles, 2010 ; Lawhon, Nsangi Nakyagaba et Karpouzoglou, 2022 ; Pincetl, Bunje et Holmes, 2012), d'exporter les déchets dans des espaces toujours plus éloignés, mais d'importer des déchets d'espaces toujours plus lointains pour remplir les objectifs d'économie circulaire urbaine. Cette circularité des déchets par les infrastructures urbaines est incompatible avec une ambition de relocalisation du métabolisme urbain et, en conséquence, affaiblit l'autonomie locale des villes. En effet, ces infrastructures participent de l'externalisation du métabolisme urbain, non pas en exportant les déchets urbains dans d'autres espaces, mais en favorisant l'exportation des déchets issus d'autres territoires, les mettant en difficulté pour développer leur capacité locale d'autonomie.



### Aspect exemplaire mais faible niveau de transformation

Une autre stratégie urbaine de circularité à Nantes et à Göteborg est de promouvoir les infrastructures de type citoyennes ou issues de l'économie sociale et solidaire. Ces initiatives concernent des ateliers de réemploi et réparation, des magasins de seconde main, des épiceries en vrac, ou des ressourceries, des espaces ouverts d'échanges et de partage. Il existe une myriade d'activités et de démarches dans ces deux villes qui sont recensées par des cartographies institutionnelles ou associatives. Les acteurs publics urbains de Nantes et de Göteborg encouragent et favorisent par leurs outils de subvention, de communication, de prêt d'espaces toutes ces initiatives. Ces infrastructures citoyennes fleurissent dans de nombreux quartiers des villes, et pas seulement dans les quartiers centraux ou plus riches. Elles peuvent également fonctionner en réseau et promeuvent un discours sur la prévention des déchets et la décroissance matérielle. Ainsi, ces démarches d'infrastructures circulaires *bottom-up* sont à l'opposé de modèles d'affaires circulaires urbains (Williams, 2019) ou d'un renouvellement de l'économie classique (Bolger et Doyon, 2019 ; Flynn et Hacking, 2019 ; Gregson *et al.*, 2015 ; Hobson, 2016). Les pouvoirs publics jouent un rôle de facilitateurs au-delà de l'accent mis sur les marchés (Corvellec, Stowell et Johansson, 2022) et il ne s'agit pas seulement d'accumuler des capitaux liés à l'économie circulaire (Bassens *et al.*, 2020).

Pour autant, nous voyons plusieurs limites au-delà de la revendication d'exemplarité de circularité urbaine. D'une part, si le changement sociotechnique envisagé est important, le niveau de transformation métabolique est faible car ces initiatives représentent des flux de déchets restreints et un poids économique très inférieur aux grandes infrastructures. D'autre part, les rapports publics et les acteurs confirment qu'il ne s'agit pour l'instant que de solutions à la marge du traitement des flux métaboliques, avec des budgets mis en œuvre très réduits. Le métabolisme urbain de Nantes et de Göteborg ne s'en trouve en l'état que très peu transformé, même si le potentiel pouvait être important. Cependant, pour les acteurs publics, il s'agit moins d'opérations de gestion des ressources et déchets que d'opérations sociales de sensibilisation à la matérialité de la consommation.

Ces configurations infrastructurelles n'ont donc pas vocation à transformer matériellement le métabolisme urbain, mais peut-être à médiatiser des alternatives. L'accent mis sur les efforts réels de changement d'infrastructure métabolique matérielle est donc faible par l'agencement des moyens alloués et des volumes de flux traités.

**Logique productiviste et empreinte urbaine**

Les infrastructures circulaires émergentes à Nantes et à Göteborg devraient contribuer à la réduction des empreintes matérielles et à la reconfiguration des « infrastructures de l'écologie territoriale en intégrant pleinement les enjeux de la dématérialisation » (Barles, 2017). Elles s'appuient, au moins dans les rapports publics et les discours d'acteurs, sur les principes d'économie circulaire en visant à favoriser la mutation de la gestion des ressources et déchets en limitant l'extraction sans limites des ressources et les gaspillages prépondérants. Les infrastructures à Nantes et à Göteborg ont notamment l'ambition de substituer les énergies fossiles par les déchets, par exemple en remplaçant le gaz naturel par du biogaz, ou du gaz de ville par des réseaux de chaleur urbains.



Pourtant, si la consommation matérielle diminue ou stagne à Nantes et à Göteborg (chap. 3, section « L'empreinte matérielle de Nantes et de Göteborg »), l'empreinte matérielle, qui intègre toutes les ressources utilisées pour la consommation, augmente (Bahers et Rosado, 2023). Ainsi, il faut inclure les flux indirects (ou dits « cachés ») qui sont constitués de la consommation de matières et d'énergie secondaire, comme l'extraction de métaux pour la fabrication d'équipements électriques et électroniques, l'énergie fossile pour transporter le bois ou le charbon ou les engrais et pesticides d'agriculture utilisés pour des produits alimentaires d'exportation. Ces flux indirects ne sont donc pas rejetés dans les villes, comme les effluents d'élevage ou les déchets de l'extraction de granulés de construction qui restent sur les lieux de production, mais dépendent de la consommation de la ville. Ce ne sont donc pas des déchets à gérer par les villes. À Nantes comme à Göteborg, ces flux indirects représentent deux fois le volume des flux consommés directement dans la ville (chap. 3, section « L'empreinte matérielle de Nantes et de Göteborg »). Cela signifie que la majorité des impacts environnementaux de ces villes sont situés à l'extérieur, ce qui renforce l'externalisation du métabolisme. Pour autant, les politiques urbaines et acteurs de l'économie circulaire à Nantes et à Göteborg n'intègrent pour le moment pas ces différents enjeux.

Enfin, ces nouvelles infrastructures circulaires sont construites dans une logique matérialiste et productiviste croissante. Ainsi, elles visent à produire de plus en plus de flux (notamment de production d'énergie pour les réseaux de chaleur) plus rapidement et de manière très centralisée. Elles ne sont pas conçues de manière à réduire leur consommation. On observe par exemple à Göteborg et à Nantes une extension du réseau de chaleur et une augmentation du niveau de production. Les politiques urbaines circulaires sont donc bâties sur ces imaginaires technocentriques visant à faire des infrastructures circulaires des éléments de la modernisation (Gandy, 2022 ; Rutherford, 2020 ; Tzaninis *et al.*, 2021). Ces conclusions confirment l'hypothèse d'une consolidation du régime métabolique dominant.

En conclusion, l'émergence de la circularité dans l'agenda des politiques urbaines est actuellement guidée par un biais technocentrique et de gestion, sans grande réflexion sur ces questions sociopolitiques (Corvellec, Stowell et Johansson, 2022 ; Kębłowski *et al.*,

2020). Il s'agit d'orienter les débats sur les mutations industrielles pour créer de nouvelles boucles matérielles, des innovations technologiques, sans remettre en cause l'utilisation croissante des ressources. La littérature critique s'intéresse notamment à cette dépolitisation de l'économie circulaire et à la manière dont ses représentations techno-scientifiques renforcent ainsi un agenda éco-moderniste (Corvellec, Stowell et Johansson, 2022). Elle devient un mode de justification de l'économie en permettant à cette dernière de valoriser les aléas négatifs de la croissance économique sans appropriation politique (Bolger et Doyon, 2019 ; Flynn et Hacking, 2019 ; Hobson, 2016).

## QUELLES INÉGALITÉS SOCIO-MÉTABOLIQUES À NANTES ET À GÖTEBORG ?

### Le voisinage d'infrastructures métaboliques, en lien avec la proximité aux nuisances et infrastructures



Cette section s'intéresse aux différentes inégalités socio-métaboliques décrites dans le chapitre 2 pour les cas d'étude de Nantes-Saint-Nazaire et Göteborg. Concernant la première inégalité socio-métabolique, elle consiste en la proximité des populations les plus pauvres avec les infrastructures et avec les risques environnementaux sous-jacents. Il est donc question de regarder la localisation des populations et des groupes sociaux dans leur environnement, qu'il s'agisse de l'exposition aux risques et nuisances. Sans surprise, les grandes infrastructures de traitement de déchets à Nantes-Saint-Nazaire et à Göteborg ne se situent pas dans les quartiers aisés. Il est, par contre, important de noter que ce sont les sites d'incinération qui ont été rattrapés par l'urbanisation, et pas l'inverse. Pour ce qui est de Göteborg, la grande usine d'incinération de Renova Sävenäs se trouve dans une zone industrielle isolée en bordure de ligne de chemin de fer, située dans le quartier d'Ostra Gothenburg qui a le taux de chômage le plus important de la ville. D'après un ingénieur de Renova Sävenäs, un flux de 300 camions par jour dessert le site d'incinération. De même, le grand centre de recyclage et réemploi Återbruket, évoqué dans la section précédente, est également localisé dans une zone industrielle éloignée du centre-ville, ce qui implique pour les clients d'y aller généralement en voiture. Il se trouve dans le quartier d'Angered qui a aussi un taux de chômage important (+ 10 %[45]), et fait partie des quartiers les plus pauvres de Göteborg.

L'incinérateur de Nantes se trouve dans le quartier de la prairie de Mauves, qui est un des arrondissements avec le plus fort taux de classes populaires (Batardy et Raimbault, 2022). De plus, il est en bordure d'un des bidonvilles les plus importants de l'agglomération (Barbe et Maillard, 2021). Ce site d'incinération est construit sur une ancienne décharge exploitée de 1969 à 1987 et l'urbanisation s'est développée autour. L'autre incinérateur de la communauté urbaine est situé à Couëron, qui est également un secteur avec un fort taux de classes populaires. Le grand centre de stockage des déchets de Loire-Atlantique, dans lequel une partie des déchets ménagers de Nantes est enfouie, est localisé à 50 km de la métropole dans une commune rurale avec un revenu médian parmi les plus bas de la région[46].

45. D'après un article de Richard Milne dans *Financial Times* mobilisant les sources statistiques de la ville de Göteborg, https://www.ft.com/content/567887ce-7b8e-11e8-8e67-1e1a0846c475

46. https://data.paysdelaloire.fr/explore/dataset/234400034_revenus_foyers_fiscaux/map/?sort=-revenu_fiscal_de_reference_des_foyers_fiscaux&location=9,47.7984,-1.46667&basemap=jawg.streets

## L'inégalité dans la contribution au métabolisme liée à l'impact écologique de la consommation sur un territoire

L'approche par l'inégalité dans la contribution au métabolisme s'intéresse à l'impact écologique des consommateurs sur un territoire notamment selon leurs revenus. Dans le cadre d'un premier travail, nous avons collecté les données concernant la production d'ordures ménagères et assimilés, qui ne concernent pas seulement les déchets ménagers, mais qui incluent également les emballages, les déchets (textiles, verre, papiers) en apport volontaire, et les déchets volumineux apportés en déchetteries.

On observe qu'à Nantes-Saint-Nazaire, d'une part, plus le taux de pauvreté est élevé dans les intercommunalités et moins la production de déchets ménagers est importante (figure 3.7). Cela révèle que les populations les plus précaires se débarrassent moins d'objets et matériaux désuets, parce qu'elles consomment moins et qu'elles ont donc moins à abandonner et à gaspiller. Ce résultat va à l'encontre d'un mépris commun sur le fait que les populations pauvres jetteraient plus de déchets et que ce sont toujours les populations reléguées qui sont les responsables des pollutions (Blot, 2018). En effet, lorsque l'on prend en compte tous les déchets et pas seulement les emballages ou ordures ménagères, ce cliché ne tient plus.



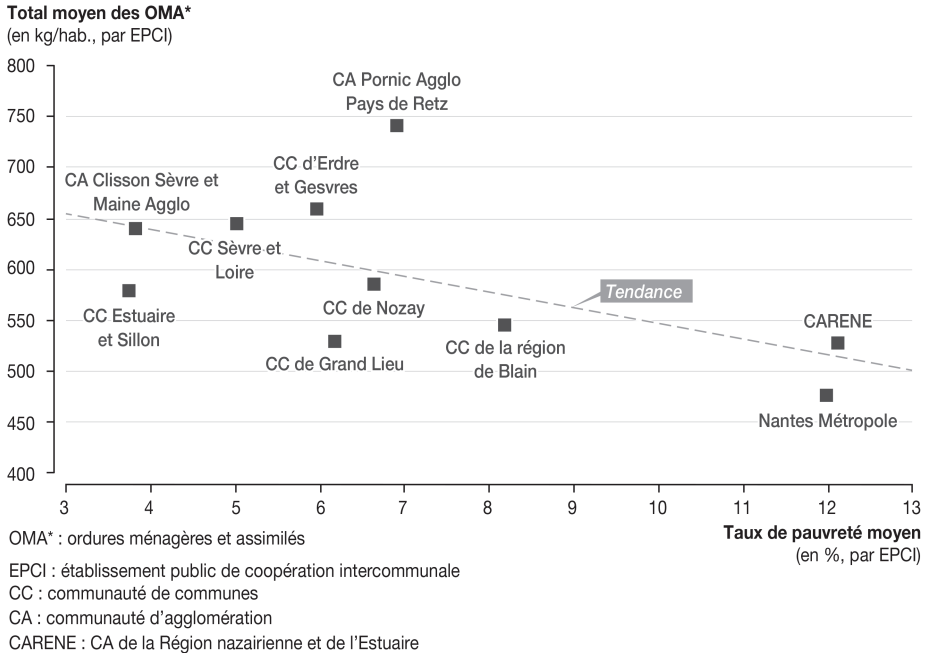



**Figure 3.7. Production d'ordures ménagères (y compris déchets jetés dans les déchetteries et emballages) par rapport aux taux de pauvreté moyens des intercommunalités de l'aire urbaine de Nantes-Saint-Nazaire (données : Observatoire des transitions écologiques – BASEMIS, 2016 ; source : Bahers, Batardy et Yobom, 2020).**

D'autre part, pour les communes où existe le raccordement au gaz de ville, est mis en corrélation le niveau de consommation de gaz, à partir des données de l'Agence Opérateur des réseaux d'énergie, avec les revenus médians par commune (Insee). Malgré un fort taux de résidus statistiques (points éloignés de la courbe de régression linéaire), on

observe que, plus le niveau de vie des habitants par commune est élevé, plus la consommation de gaz l'est également (figure 3.8). Cette tendance rejoint le constat plus général d'une plus grande consommation des énergies fossiles — et donc de rejets de gaz à effet de serre — par les populations aux revenus les plus élevés.

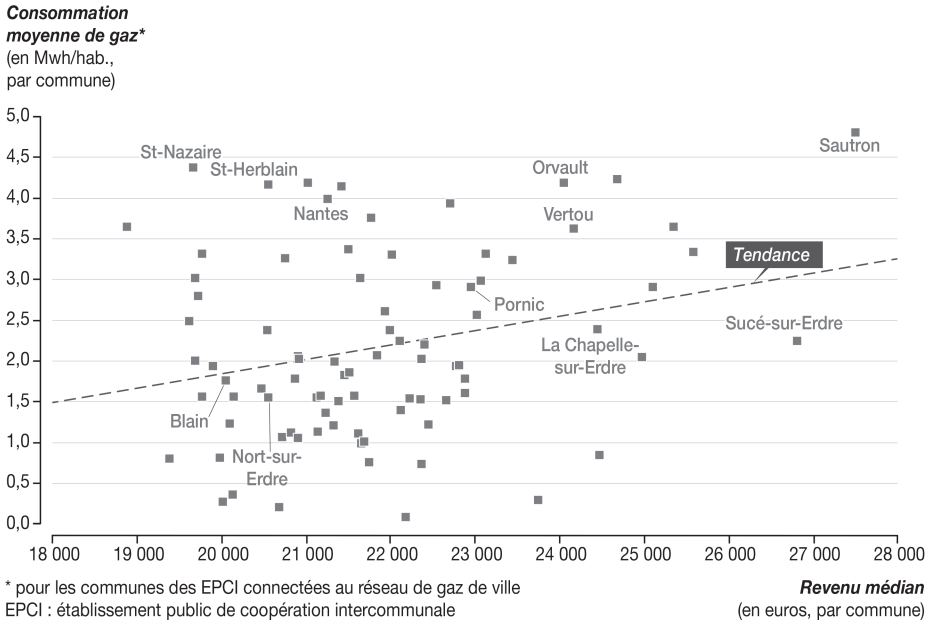



**Figure 3.8. Consommation de gaz par commune de l'aire urbaine de Nantes-Saint-Nazaire selon le revenu médian (données : Insee Base FiloSoFi, Agence ORE [Gestionnaire de réseaux électricité et gaz], 2017 ; source : Bahers, Batardy et Yobom, 2020).**

Les inégalités écologiques permettent donc de corréler l'impact écologique des habitants d'un territoire selon les revenus médians, le taux de chômage ou le taux de pauvreté, donc plus généralement du capital économique (Sessego et Hébel, 2019). Ainsi, inégalités environnementales et écologiques se répondent : les populations les plus précaires subissent plus les nuisances environnementales, alors qu'elles ne sont pas celles qui contribuent le plus aux impacts écologiques qui affectent un territoire.

## Les inégalités socio-métaboliques et liées aux relations entre villes et *hinterlands*

L'approche par les inégalités métaboliques se concentre plutôt sur les inégalités de consommation matérielle entre les pays, directement corrélées au PIB d'un pays et aux revenus de leurs habitants (Duro, Schaffartzik et Krausmann, 2018 ; Schaffartzik, Duro et Krausmann, 2019). Il est également intéressant de regarder les différences de DMC et de MF. La comparaison des cas d'étude montre que la DMC par habitant est plus élevée à Nantes-Saint-Nazaire qu'à Göteborg. Cette différence tend à se réduire depuis 2011 (11,8 t/hab. et 12,5 t/hab.), ce qui est également suggéré par les tendances. De même, la MF par habitant est un peu plus élevée à Nantes-Saint-Nazaire qu'à Göteborg, même si certaines années (2000, 2001, 2002, 2008, 2011), c'est l'inverse.

Ces différences soulèvent des questions sur la situation dans les deux pays. Selon la base de données EORA, les DMC par habitant en Suède sont passées de 11,8 t/hab. en 1996 à 17,2 t/hab. en 2011 (figure 3.9). Le ratio (DMC à Göteborg/DMC en Suède) est donc un facteur de 0,6. En France, la DMC par habitant était de 14,6 t/hab. en 2000 et de 12,6 t/hab. en 2011. Il y a donc un facteur moyen de 1,1 pour la DMC par habitant (même si elle a fortement diminué après 2011). Ces valeurs restent du même ordre de grandeur, comme les résultats d'autres études (Bahers, Barles et Durand, 2019 ; Liu *et al.*, 2021 ; Niza *et al.*, 2009 ; Rosado, Niza et Ferrão, 2016 ; Sastre *et al.*, 2015), ce qui confirme la cohérence de notre étude de l'analyse des flux de matières. L'écart s'explique principalement par la part plus importante de l'extraction intérieure dans les territoires ruraux qu'en ville. De même, les différences ne sont pas si importantes pour la MF : en Suède, la MF par habitant est passée de 20,5 t/hab. (en 1996) à 31,7 t/hab. (en 2011) ; en France, la MF par habitant était de 20 t/hab. en 2000 et de 21,2 t/hab. en 2015, ce qui est légèrement inférieur à la MF à Nantes-Saint-Nazaire.



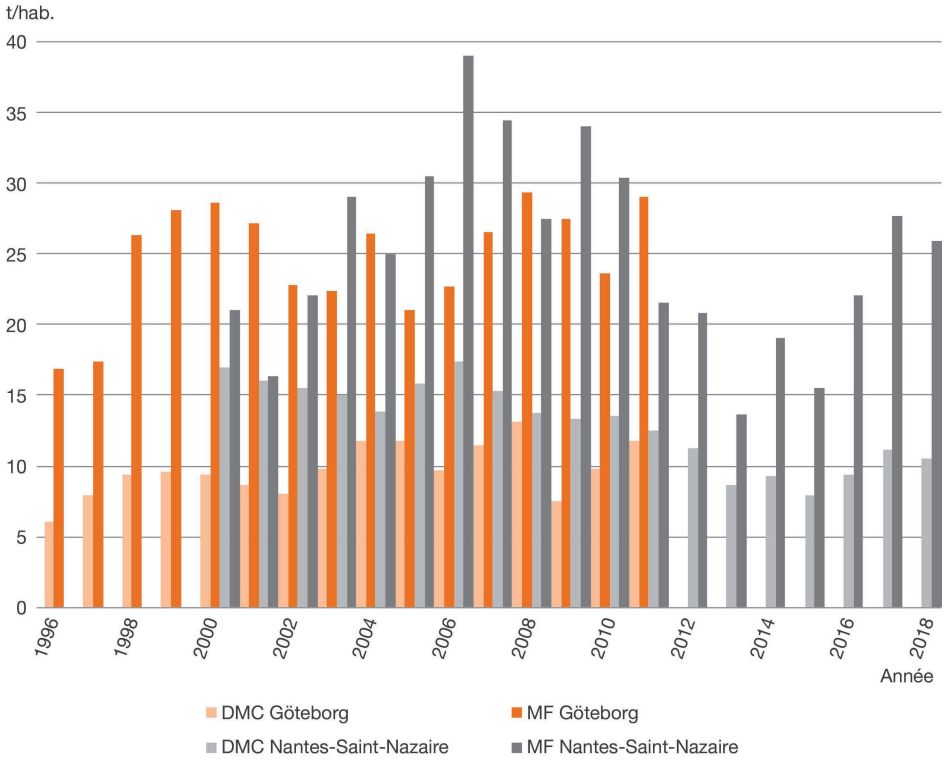



**Figure 3.9. Consommation matérielle intérieure (DMC) et empreinte matérielle (MF) par habitant pour Göteborg (1996-2011) et Nantes-Saint-Nazaire (2000-2018) (source : Bahers, Rosado, 2023).**

Ainsi, alors qu'une diminution de la consommation implique une réduction de l'intensité matérielle, une augmentation des MF a un effet complètement différent. En effet, l'intensité matérielle qui prend en compte les flux cachés (qui correspond à la MF) est en fait en augmentation et est beaucoup plus élevée (entre 1,9 et 2,6 fois plus élevée) que l'intensité matérielle de la consommation directe. Cette situation s'explique en partie

par l'importance des importations et des exportations vers les villes, les zones métropolitaines étant loin d'être autonomes en termes d'extraction (de matériaux ou de biomasse). Ce résultat est logique mais souligne l'importance de comprendre le rôle de l'*hinterland* dans le métabolisme urbain.

Le tableau 3.1 vise à comparer les résultats obtenus en matière de MF et de DMC avec ceux d'autres villes figurant dans la littérature. Bien que les méthodologies soient un peu différentes et que la comparaison avec d'autres études puisse être limitée, il semble que les résultats des MF d'autres villes soient du même ordre de grandeur que ceux de Bruxelles, mais qu'ils soient inférieurs aux valeurs de Pékin et de Shanghai. Les travaux de Jin *et al.* (2021) montrent que les empreintes matérielles de Pékin et de Shanghai sont dominées par les minéraux non métalliques, car ces villes subissent des changements morphologiques et une urbanisation continue, ce qui nécessite un flux de matériaux très important. Athanassiadis *et al.* (2016) expliquent, pour la MF de Bruxelles, que les villes sont souvent des centres de consommation avec de faibles capacités de production, qui dépendent fortement de leur *hinterland* pour répondre à leurs besoins. Ainsi, l'impact sur l'*hinterland* est beaucoup plus important pour les villes que pour les pays. Cette interprétation est également tout à fait appropriée pour notre étude de cas.



**Tableau 3.1. Comparaison des DMC et MF de villes selon le PIB par habitant et le revenu par habitant**

| Ville (année) | DMC (t/hab.) | MF (t/hab.) | PIB/hab.[c] | Revenu/habitant (OCDE)[c] |
|---|---|---|---|---|
| Göteborg (2011) | 11,8 | 29 | 45 632 | 30 707 (2014) |
| Nantes-Saint-Nazaire (2018) | 10,6 | 25,9 | 43 697 | 29 054 (2015) |
| Bruxelles (2007)[a] | 22 | 28 | 59 104 | 28 947 (2014) |
| Pékin (2015)[a] | - | 35 | 14 585 | 10 602 |
| Shanghai (2015)[a] | - | 38 | 14 215 | 10 903 |
| Rennes (2012)[b] | 11,2 | 37,7 | 40 108 | 28 958 (2014) |

a) utilisant l'approche *input-output* (entrées-sorties) (Athanassiadis *et al.*, 2016 ; Jin *et al.*, 2021) ; b) utilisant les coefficients du Wuppertal Institute (Bahers, Barles et Durand, 2019) ; c) source : Statistiques de l'OCDE, https://stats.oecd.org/Index.aspx?datasetcode=FUA_CITY

Ces empreintes matérielles urbaines sont donc importantes et renforcent les inégalités métaboliques liées aux relations entre villes et *hinterlands*. Les villes portuaires ont une forte fonction logistique, qui leur confère un rôle de hub national et international. Les conséquences métaboliques de cette fonction sont que les flux importés et exportés au-delà du territoire représentent la plus grande part des métabolismes des ports. De même, dans les territoires de Nantes-Saint-Nazaire et de Göteborg, la plupart des flux identifiés transitent par ces plateformes portuaires. En cela, le rôle des métropoles portuaires est indispensable à repenser, car, aujourd'hui, elles ont pour but de ventiler un maximum de flux le plus rapidement possible, dans des espaces toujours plus lointains.

## Les politiques métaboliques qui renforcent des inégalités

La quatrième approche des inégalités socio-métaboliques concerne les politiques urbaines de transformation du métabolisme, et notamment des infrastructures, qui renforcent les inégalités. Dans un premier temps, nous observons quelques obstacles auxquels les parties

prenantes sont confrontées lorsqu'elles intègrent les questions d'empreinte matérielle. Tout d'abord, les politiques d'économie circulaire des deux villes ne tiennent pas compte des effets externalisés de la consommation. Les acteurs restent très axés sur la ville et ne tiennent pas compte des relations entre les villes et leur *hinterland*. Ainsi, ces politiques n'intègrent pas réellement la réduction de l'impact externalisé des approvisionnements et des déchets : « Les flux cachés sont ce qui compte le plus dans le métabolisme. On le voit mais on ne l'intègre pas » (entretien avec un chef de projet d'une collectivité locale à Nantes-Saint-Nazaire, 2018). Il y a clairement un manque de connaissances précises sur les empreintes environnementales, afin de concevoir des actions ciblées : « Nous sommes très actifs sur l'empreinte matérielle, notamment avec des groupes d'experts, mais pour l'instant nous n'avons pas d'objectif spécifique » (entretien avec un responsable de l'Agence suédoise de protection de l'environnement, 2021). Les actions développées par les politiques circulaires (par exemple : les ateliers de réparation, les plans de recyclage des déchets de construction ou la symbiose industrielle des activités portuaires) ne sont pour l'instant pas orientées vers la réduction des inégalités environnementales et sociales, ni vers les relations entre la ville et l'*hinterland*. Les acteurs urbains découvrent à peine ces questions : « Actuellement, nous échangeons des connaissances et des méthodes avec les municipalités pour estimer les coûts et l'empreinte environnementale. Nous avons commencé par travailler sur dix produits » (entretien avec un gestionnaire de la région de Göteborg, 2021). Nous n'avons pas non plus trouvé dans les entretiens ou dans les politiques locales de réflexion sur la manière dont la ville utilise l'*hinterland* pour sa propre consommation. Cela reste un point aveugle de ces politiques. Ainsi, ces villes, *via* leur métropolisation, ont une demande croissante de ressources provenant d'autres territoires, ce qui contribue à l'inégalité structurelle entre le centre et la périphérie dans un système de plus en plus mondialisé (Boudreau *et al.*, 2006). Par ailleurs, ces nouvelles « politiques d'échelle » (Brenner, 2014) s'expriment par les divisions spatiales des fonctions d'approvisionnement des villes. Certaines activités industrielles sont également repoussées dans des zones *ad hoc* des territoires, ce que les acteurs économiques mentionnent également : « C'est vrai que cette synergie entre ville et port, c'est un peu le port industriel qui s'occupe de ce qui sent mauvais » (entretien avec le gestionnaire de déchets, 2018).



Enfin, la question de la justice sociale est un impensé de ces politiques. Aucun acteur ne le mentionne comme un enjeu important et, lorsqu'est pointée cette question, les réponses révèlent un angle mort des politiques. Par exemple, le centre de recyclage circulaire à Göteborg indique que « ce sont les plus riches qui déposent leurs déchets, et beaucoup d'Africains les rachètent pour les renvoyer au pays ». La question sociale est souvent reliée aux gestes écocitoyens, plus qu'à une démarche véritablement collective. Ainsi, la dimension sociale et conviviale de la *sharing economy* à Göteborg est souvent mise en avant, par exemple : la possibilité de partager des outils de réparation de vélos dans des *bike kitchen* ou d'autres produits dans des *freeshops*. Ces initiatives n'ont pas vocation à travailler dans les quartiers défavorisés : « La dimension sociale de notre action, ce n'est pas simplement pour les pauvres, avec toute la population » (entretien avec un chef de projet économie circulaire à Göteborg, 2020).

Cependant, il faut noter que de nombreux acteurs ont souligné leur volonté de travailler sur la proximité et sur l'autonomie énergétique et matérielle des villes, afin de reconstruire des relations interterritoriales fondées sur la coopération. Par exemple,

les acteurs de Nantes-Saint-Nazaire tentent de développer une « proximité géographique qui serait un modèle économique où l'énergie serait produite à proximité de sa consommation » (entretien avec le gérant d'une petite entreprise du secteur de l'énergie à Nantes-Saint-Nazaire, 2018). D'autres entretiens à Göteborg ont souligné l'importance d'une « économie inclusive et d'un partage des coûts », favorisés par « l'influence de l'aménagement du territoire » (entretien avec un chef de projet d'une autorité locale à Göteborg, 2020). Ces entretiens montrent que ces thèmes sont soutenus par les acteurs qui considèrent qu'une évolution vers plus de proximité et d'autonomie territoriale est souhaitable.

En conclusion, les quatre approches des liens entre inégalités et métabolismes sont applicables dans les deux villes. L'étude du métabolisme urbain peut révéler des nœuds infrastructurels propices aux nuisances environnementales, des empreintes matérielles différentes selon les populations et des relations entre ville et *hinterland*. Les inégalités socio-métaboliques sont ainsi une notion qui pourrait également être explorée plus avant. Le métabolisme urbain permet d'appréhender les inégalités sociales et territoriales selon les approches d'inégalités environnementales, d'inégalités écologiques d'inégalités liées aux relations entre villes et *hinterlands* et de politiques urbaines de transformation du métabolisme qui renforcent des inégalités. Pour s'attaquer à ces inégalités, il s'agirait de repenser le rôle des rapports sous-jacents à la circulation des flux métaboliques. Les rôles des infrastructures métaboliques et des empreintes matérielles seraient centraux dans cette réflexion, dans la perspective de les (re)concevoir vers une décroissance du volume de circulation des flux et vers un rapprochement des territoires.

# Chapitre 4
# Être une île : la matérialité contrainte comme révélateur



Les enjeux d'approvisionnement en ressources et de production et de traitement des déchets sont particulièrement exacerbés dans un contexte insulaire, notamment dans les petits États insulaires en développement (PEID) selon le terme onusien (Mohee *et al.*, 2015). Les îles sont donc un cas très saillant pour les études métaboliques, puisque les spécificités insulaires sont révélatrices des contraintes spatiales concernant la circulation des déchets et des ressources qui produisent des conflits et des situations de vulnérabilités socialement différenciées. Par ailleurs, il existe un imaginaire qui dépeint les îles comme des laboratoires de recherche idéaux et, plus récemment, comme des microcosmes isolés dans lesquels étudier et imaginer le développement durable (Taglioni, 2011). Pourtant, certains auteurs ont alerté sur la surestimation de la spécificité des territoires insulaires, soulignant plutôt leur diversité et leurs liens profonds avec le reste du monde et alimentant les « tournants relationnels et archipélagiques dans les études insulaires[47] » (Pugh, 2018).

Les îles sont ainsi des systèmes restreints spatialement, ce qui signifie que les déchets ne peuvent pas être stockés ou repoussés à l'infini. Selon le paradigme de l'économie circulaire, l'isolement et la distance pourraient être surmontés par des boucles fermées de production et de consommation. Néanmoins, le plus souvent, ces défis ne peuvent être relevés, de sorte que les îles risquent de devenir des cas désastreux en matière de traitement et de gestion des déchets. Certains archipels sont d'ailleurs connus pour leurs difficultés à gérer les déchets, comme Samoa, dont la décharge à ciel ouvert a plus qu'atteint sa capacité maximale, Nauru, pour ses déchets miniers et ses eaux polluées par les phosphates, et Corfou, où une montagne de 4 000 tonnes de déchets a été laissée par les touristes. D'autres îles sont entièrement dévolues aux déchets, comme les îles-poubelles de Thilafushi des Maldives (Magnan et Duvat, 2020) et de Semakau à Singapour, exemples du syndrome décrit dans le court-métrage dévastateur de Jorge Frutado, *Isle of Flowers*[48]. Ces difficultés sont à l'origine de nombreux conflits liés à la justice environnementale, par exemple : le déversement illégal de déchets industriels sur l'île de Teshima au Japon, ou le stockage de déchets nucléaires sur l'île des Orchidées à Taïwan. Il existe également de nombreuses îles dont les plages sont jonchées de déchets rejetés par les courants marins, comme Henderson dans le Pacifique Sud (Bond et Lavers, 2017).

Les îles sont directement liées à la consommation mondialisée et aux flux de déchets et la plupart d'entre elles sont donc loin de mettre en œuvre des métabolismes autonomes de production et de consommation. Le métabolisme insulaire est ainsi révélateur des contraintes insulaires concernant la circulation des déchets et des ressources qui produisent des conflits et des situations de vulnérabilités socialement différenciées.

---

47. Traduction de la citation suivante : « *relational and archipelagic turns in island studies* ».

48. *Ilha das Flores*, de Jorge Furtado, Brazil, 1989.

Cette section portera sur le métabolisme insulaire de l'archipel des Comores, situé dans le canal du Mozambique entre Madagascar et la côte swahilie en Afrique de l'Est, et de la Nouvelle-Calédonie dans le Pacifique. Ce travail interroge la notion de « vulnérabilité socio-métabolique », où la « vulnérabilité » est définie comme « la propension ou la prédisposition à subir des effets néfastes » (IPCC, 2014). L'analyse de la vulnérabilité est une fonction de l'exposition, des effets environnementaux et de la récupération (également appelée résilience ou capacité d'adaptation) (De Lange *et al.*, 2010 ; Turvey, 2007). Il existe plusieurs cadres d'évaluation de la vulnérabilité (Birkmann, 2006 ; Bohle, 2001 ; Bollin *et al.*, 2003), mais, parmi ces derniers, aucun ne prend réellement en compte la dynamique de l'utilisation des ressources. Les flux de matières et d'énergie sont essentiels à la survie et au bien-être de tout système socio-économique. En introduisant la notion de vulnérabilité socio-métabolique, nous examinerons l'extraction, la production et la circulation des ressources au sein du système, et par le biais du commerce, et la façon dont l'inégalité socio-spatiale est reproduite à l'échelle locale et mondiale (Schaffartzik, Duro et Krausmann, 2019). L'analyse de ces vulnérabilités « comprend plusieurs dimensions : les impacts, l'exposition, la sensibilité, la capacité d'adaptation et les réponses effectives[49] » (Romero Lankao et Qin, 2011). Un territoire peut ainsi être considéré comme « vulnérable d'un point de vue socio-métabolique » en raison des menaces potentielles qui pèsent sur son approvisionnement en ressources, de ses modes de fonctionnement socio-économiques et de la gestion des déchets et des émissions (Singh, Fischer-Kowalski et Chertow, 2020).



## LE MÉTABOLISME INSULAIRE : UN ARCHIPEL SCIENTIFIQUE

Comme pour les approches du métabolisme (voir chapitre 1), les chercheurs de l'écologie industrielle (*industrial ecology*), de l'écologie sociale de l'école de Vienne et de l'écologie politique (*political ecology*) ont étudié les territoires insulaires et ces courants sont pour l'instant très cloisonnés. Les objectifs avancés dans cette section sont justement de croiser les approches vers une analyse socio-matérielle des métabolismes insulaires.

Les chercheurs de l'écologie politique ont utilisé les territoires insulaires pour développer des corpus empiriques, que ce soit pour critiquer l'impact environnemental du tourisme (Gössling, 2003), la gestion de l'eau (Cole, 2012), la gestion forestière (Thompson, 2018) ou l'extraction matérielle (Allen, 2017). Ces situations de vulnérabilités sont exacerbées par la fonction touristique des îles, dont le poids économique minimise le problème des déchets (Kurniawan *et al.*, 2016 ; Ragazzi *et al.*, 2014). Ces conséquences conduisent certains auteurs à mobiliser l'écologie politique du tourisme insulaire (Cole, 2012 ; Gössling, 2003), qui n'est pas seulement un révélateur des conflits relatifs aux impacts environnementaux et à l'épuisement des ressources (financières ou matérielles), mais qui se compose également des dimensions de pouvoir et d'identité. Au-delà de l'étude des déterminants de la vulnérabilité aux changements climatiques des territoires insulaires (Pelling et Uitto, 2001), la notion de métabolisme énergétique insulaire est avancée par Harrison et Popke (2018) comme moyen de conceptualiser les relations entre les propriétés biophysiques de différentes sources d'énergie et les caractéristiques distinctives territoriales, infrastructurelles et géopolitiques des îles.

49. Traduction de la citation suivante : « *includes several dimensions: impacts, exposure, sensitivity, capacity to adapt, and actual responses* ».

Max Liboiron a également travaillé sur l'ingestion de plastiques par des poissons dans les îles Fogo et Newfoundland au Canada. Il y est alors mentionné un « colonialisme des déchets » (Liboiron, 2021). Si les premières mentions du colonialisme des déchets remontent à l'élaboration de la Convention de Bâle, qui réglemente les mouvements transfrontaliers de déchets dangereux, les réalités du colonialisme des déchets vont bien au-delà de l'élimination des déchets dans les pays pauvres ou mal équipés (Liboiron, 2018). Elles sont enracinées dans l'accès à la terre et opèrent à travers des modèles de gestion des déchets, tels que promus par des discours, des pratiques exemplaires, des normes réglementaires et des standards. En s'appuyant sur la définition du colonialisme ci-dessous, Liboiron (2018) encourage à considérer le caractère jetable en soi comme une forme de colonialisme :

> « Le pillage du pétrole et du gaz naturel de la terre pour créer des produits jetables en plastique et en papier est du colonialisme. Le recyclage, l'incinération et d'autres modes de gestion des déchets qui "s'occupent" des déchets pour que l'extraction et l'accès à la terre puissent se poursuivre, c'est du colonialisme. Exporter ces modèles dans d'autres endroits et reprocher ensuite aux populations locales de ne pas gérer correctement les puits coloniaux, c'est du colonialisme. Les solutions apparemment utiles et logiques aux déchets qui impliquent l'accès à la terre pour nettoyer les plages, éduquer les gens et construire des incinérateurs sont du colonialisme. Elles sont toutes fondées sur l'accès des colons à la terre pour atteindre les objectifs des colons, même si ces objectifs sont bien intentionnés[50]. »



Ainsi, il ne s'agit pas seulement d'exporter les déchets des pays à PIB élevé vers les pays à PIB faible, mais il est nécessaire d'exporter les ressources extraites des pays pauvres vers les pays riches tout en conservant les déchets d'extraction sur place, ainsi qu'en exportant leurs modèles pour la gestion de ces déchets (Lepawsky, 2015).

Concernant le champ de l'écologie sociale, on peut noter les travaux récents de l'Institut de l'écologie sociale sur l'Islande, Trinidad ou Samothraki en Grèce (Fetzel *et al.*, 2018 ; Krausmann, Richter et Eisenmenger, 2014 ; Petridis et Fischer-Kowalski, 2016 ; Singh *et al.*, 2001). Ces chercheurs ont mis au point des méthodes pour analyser les flux de matières à l'échelle des îles, en combinant l'indicateur de consommation nationale de matières avec des indicateurs économiques sur le long terme, afin d'évaluer la durabilité de ces territoires. Il apparaît que ces îles exploitent des ressources naturelles très dépendantes des marchés mondiaux. De plus, ces activités (mines, énergies fossiles, etc.) génèrent une quantité de déchets disproportionnée par rapport au nombre d'habitants. Dans ce contexte, la productivité des ressources devient donc une priorité. Ces territoires exportent ainsi l'essentiel de leur production, tout en important presque la totalité de leurs besoins en nourriture, en énergie et en matériaux.

De même, deux études ont analysé les politiques locales concernant la consommation de combustibles fossiles et la production agricole aux îles Galápagos (Cecchin, 2016),

50. Traduction de la citation suivante : « *The exaction of oil and natural gas from Land to create plastic and paper disposables is colonialism. Recycling, incineration, and other waste managements that take "care" of waste so that the extraction and access to Land can continue is colonialism. Exporting these models to other places and then blaming the local people for not properly managing colonial sinks is colonialism. Seemingly helpful and logical solutions to waste that involve access to Land for beach clean ups, to educate people, and to build incinerators is colonialism. They are all premised on settler access to Land for settler goals, even when those goals are well-intentioned.* »

ainsi que le métabolisme énergétique aux îles Baléares (Ginard-Bosch et Ramos-Martín, 2016). Elles aboutissent à des recommandations pour des îles dites « *low-carbon* » (à faibles émissions de carbone) et plus résilientes. Martinico-Perez *et al.* (2018) ont également étudié le métabolisme socio-économique de l'archipel des Philippines, en comparant la consommation de ressources à l'évolution du PIB pour comprendre comment les pressions environnementales évoluent. Pour cette économie émergente, ils montrent un découplage relatif entre l'intensité matérielle (la quantité de ressources utilisées) et la croissance économique. Ce phénomène s'explique en partie par la tertiarisation de l'économie (le développement du secteur des services).

Depuis les travaux de Marian Chertow (Deschenes et Chertow, 2004 ; Eckelman et Chertow, 2009), les chercheurs en écologie industrielle ont peu étudié les territoires insulaires, alors que ces derniers offrent des perspectives méthodologiques intéressantes grâce à leurs frontières géographiques naturelles. Pourtant, ces recherches restent principalement prescriptives : elles cherchent surtout à mettre en place des synergies industrielles, c'est-à-dire des échanges de co-produits ou de déchets entre les acteurs économiques des îles (Eckelman *et al.*, 2014). Elles s'intéressent peu aux moteurs socio-économiques de ces territoires ou, plus simplement, à leur profil métabolique. Cette lacune rend leurs analyses inefficaces pour comprendre les facteurs socio-spatiaux qui influencent les métabolismes insulaires.



## NDZUWANI (COMORES) ET LA NOUVELLE-CALÉDONIE : DES MÉTABOLISMES DANS DIFFÉRENTS CONTEXTES COLONIAUX

### Les îles de Ndzuwani et la Nouvelle-Calédonie

Ndzuwani (Anjouan en français) fait partie de l'archipel volcanique des Comores situé dans le canal du Mozambique, colonisé par les Français au XIX^e^ siècle pour l'exploitation agricole par l'esclavage. Les Comores sont composées de quatre îles — Ndzuwani (Anjouan), Ngazidja (Grande Comore), Mwali (Mohéli) et Maoré (Mayotte) — dont seule cette dernière ne fait pas partie de l'Union des Comores, qui a accédé à l'indépendance en 1975. En effet, Mayotte a voté à plusieurs reprises pour rester un territoire français (Taglioni, 2008), y compris lors du dernier référendum de 2009, au cours duquel 95 % des votants se sont prononcés en faveur de son accession au statut de département français d'outre-mer, statut qu'elle a obtenu en 2011. Cependant, en 1975, l'ONU a reconnu l'Union des Comores comme étant composée des quatre îles de l'archipel. Ainsi, aux yeux du gouvernement des Comores en particulier, Mayotte est toujours occupée par l'ancienne puissance coloniale française. L'Union des Comores fait partie des PEID, un groupe de pays particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique. Avec un PIB par habitant de 1 445 dollars américains, l'Union des Comores possède l'un des PIB nominaux les plus bas du monde et est classée par l'ONU parmi les pays les moins avancés, avec une économie principalement fondée sur la production alimentaire et sur l'exploitation de produits d'exportation tels que l'ylang-ylang. Selon une étude récente sur la déforestation (Boussougou, Brou et Mohamed, 2015), les forêts représentent 65 % de l'occupation des sols, les terres agricoles 30 % et les zones constructibles 2 %. Ndzuwani est aussi l'île la plus pauvre de l'archipel selon la Banque mondiale (Belghith *et al.*, 2018) et la plus proche de Mayotte, ce qui en fait un point de départ de migrations illégales pour des raisons économiques, familiales ou sanitaires (Peccia et Meda, 2017).

La mer entre les deux îles est devenue un cimetière maritime tristement célèbre, avec entre 10 000 et 20 000 morts au cours des vingt dernières années (Tchokothe, 2018). La population de Ndzuwani était d'environ 332 466 habitants en 2015 (estimations de l'ONU), ce qui en fait l'île la plus densément peuplée des Comores (784 hab./km$^2$).

La Nouvelle-Calédonie est un archipel du Pacifique, dont les deux tiers des 271 400 habitants recensés en 2019 vivent dans l'agglomération de Nouméa, le reste du territoire étant très peu peuplé. Selon l'accord de Nouméa (1998), la Nouvelle-Calédonie n'est plus un territoire d'outre-mer mais une collectivité *sui generis*, dotée d'un gouvernement propre et de pouvoirs étendus, l'État ne conservant que les compétences de souveraineté (défense, affaires étrangères, monnaie, ordre public et justice). Un processus référendaire sur la pleine souveraineté dans le cadre de l'accord de Nouméa est en cours depuis 2018. En raison de ce statut non résolu, la Nouvelle-Calédonie, sans faire partie de l'Union européenne, y est rattachée en tant que « pays et territoire d'outre-mer ». Selon l'ONU, c'est toujours un pays colonisé (sur la liste des territoires non autonomes de l'ONU). Cette colonisation religieuse et commerciale de l'archipel de la Nouvelle-Calédonie (Kanaky) par les Européens commence à la fin du XIX$^e$ siècle, jusqu'à 1853 date à laquelle l'île devient française.



La découverte du nickel en 1864 « a ouvert la voie à une nouvelle "accumulation par dépossession", renforçant l'importance géopolitique de l'île » (Batterbury, Kowasch et Bouard, 2020). L'extraction et la transformation du nickel ont d'abord été assurées par des capitaux français, avant de s'ouvrir aux capitaux et à la main-d'œuvre extérieurs au cours du XX$^e$ siècle. Les exportations de nickel soutiennent une économie globalement prospère de 1960 à 2010, très extravertie, mais aussi très dépendante de la fluctuation des cours mondiaux du nickel depuis 2010. Le PIB par habitant (34 932 dollars américains en 2019) résulte en partie des transferts de la France métropolitaine (environ 17 % du PNB) et de l'exploitation du nickel, qui a représenté en 2017 jusqu'à 7 % du PIB total. Le contrôle de cette ressource stratégique est au cœur des luttes de pouvoir politique autour du statut de ce territoire et de sa décolonisation (Batterbury, Kowasch et Bouard, 2020 ; Kowasch, 2018). Le tourisme est une activité marginale, tandis que l'exceptionnelle richesse environnementale et marine (le lagon est inscrit au patrimoine mondial de l'Unesco) est un facteur à la fois d'attractivité et de fragilité, notamment au regard du lourd impact environnemental de l'exploitation du nickel.

## Sources de données et méthodologie

Notre enquête sur les métabolismes insulaires s'inscrit dans la tradition de recherche de la MFA présentée dans les sections précédentes. Par contre, la spécificité de ces cas est qu'il est nécessaire de compléter la collecte de données statistiques par un travail de terrain qui permette un contact direct avec les acteurs et les parties prenantes. Il s'agit également d'obtenir des informations précieuses sur la dynamique du système grâce aux récits fournis par les parties prenantes, ce qui permet d'interpréter les données quantitatives dans un certain contexte socioculturel. Cette enquête met en évidence les flux problématiques susceptibles d'affecter négativement le système dans son ensemble et de générer des effets en cascade dans tout le système. À cet égard, le travail empirique est destiné à fournir un éventail d'expériences sur la manière dont les environnements locaux sont façonnés, contestés et rendus vulnérables.

Les données sur les flux physiques entrants et sortants du territoire ont été compilées dans la mesure du possible en utilisant des sources nationales et internationales. L'analyse des flux de matière offre une compilation cohérente de toutes les ressources entrant dans le système socio-économique, des changements dans les stocks biophysiques au sein du système et des flux sortants vers l'environnement (tels que les déchets et les émissions), ainsi que des exportations vers d'autres systèmes socio-économiques (Eurostat, 2018).

Concernant le cas de Ndzuwani, la collecte de données a été une combinaison de recherche de sources secondaires et de deux visites sur le terrain, l'une en février 2018 et l'autre, plus longue, entre mars et juin 2018. La recherche de sources secondaires a rapidement révélé un défi important : l'absence d'une base de données complète et consolidée. Les études internationales sur le métabolisme socio-économique utilisent généralement des statistiques nationales et internationales (Fischer-Kowalski *et al.*, 2011a ; Krausmann *et al.*, 2009). Dans notre cas, les statistiques disponibles ne couvrent pas tous les flux, en particulier l'extraction locale (production de biomasse et de minéraux), les produits transformés et les déchets. La principale base de données utilisée dans les études MFA pour les données minières est l'US Geological Survey (USGS) (Duro, Schaffartzik et Krausmann, 2018 ; Krausmann, Richter et Eisenmenger, 2014 ; Wiedenhofer *et al.*, 2019), mais la dernière édition (USGS, 2010) ne mentionnait aucune production locale de matériaux aux Comores, ce que l'enquête de terrain a infirmé par la suite.



Pour combler ces lacunes importantes dans les données (comme les carrières), une brève visite de terrain de trois semaines a été entreprise en février 2018. L'observation sur le terrain a montré qu'il existe deux carrières autorisées produisant environ 80 % des minéraux exploités sur l'île (sable de différentes granulométries, graviers et galets). Les autres limites des données ont été surmontées par un atelier de deux jours avec les acteurs locaux pour affiner et reconstituer les données manquantes pour l'analyse des flux de matières. Quarante organisations politiques, économiques et non gouvernementales ont été invitées à cet atelier et ont également participé à des enquêtes visant à identifier, à évaluer et à interpréter les flux importants. Il s'agissait par exemple des institutions comoriennes (douanes et port), des institutions de Ndzuwani (directeur économique et environnemental du gouvernorat de Ndzuwani, ministres locaux en charge de l'environnement, de l'économie et du développement urbain), des acteurs locaux (élus), des ONG locales et environnementales (Ouani vert, Commission Mutsamudu Propre, Sac Marie), et des ONG internationales (Initiative Développement [ID], Naipenda Comores, et Gevalor). Au cours de l'atelier, les participants ont dressé une carte des flux de matières et d'énergie importés, produits, exportés et rejetés sur l'île. Les déclarations de ces acteurs locaux ont permis de mieux comprendre les flux visibles et moins visibles qui circulent sur l'île. Nous avons également eu l'occasion de rencontrer et d'établir une relation avec un fonctionnaire des douanes des Comores. Les données sur les importations et sur les exportations ont été recueillies au port de Mutsamudu à Ndzuwani, qui est le seul point d'entrée des marchandises sur l'île. Les données douanières ont permis d'obtenir une image assez précise des flux entrant ou sortant du territoire. Cette approche méthodologique est innovante dans le domaine des études de métabolisme territorial, qui tendent à être guidées par des sources nationales ou internationales, comme mentionné précédemment. La carte des flux, de leurs caractéristiques et de leurs transformations, élaborée par les acteurs locaux lors de la première visite de terrain, et l'atelier ont constitué la base de la visite de terrain de 4 mois entre mars et juin 2018 (Perez, 2018).

Concernant la Nouvelle-Calédonie, la majorité des sources proviennent de bases de données locales (bureau des douanes, tableau entrées-sorties, études statistiques import-export, énergie environnementale). Elles proviennent soit de l'institut statistique de Nouvelle-Calédonie (Isee), soit de la direction de l'industrie, des mines et de l'énergie (Dimenc). Ces données sont soumises à des incertitudes, telles que la variation statistique et la variabilité spatio-temporelle. Elles proviennent également de questionnaires envoyés aux entreprises, qui ont certes l'obligation de les remplir mais qui ne font l'objet que de contrôles aléatoires. Pour améliorer la précision des résultats, nous avons effectué une analyse temporelle, inspirée de l'analyse dynamique des flux de matières, afin de voir l'évolution des données de flux et des indicateurs métaboliques.

Notre enquête s'est aussi concentrée sur le sous-système « métaux », c'est-à-dire sur le nickel, de son extraction à son exportation. La trajectoire spatiale de l'exportation est également étudiée. L'hydrométallurgie et la pyrométallurgie sont toutes deux considérées. L'hydrométallurgie consiste à traiter le minerai par lixiviation, c'est-à-dire au moyen d'un solvant sous pression afin d'isoler le nickel. La solution contient des métaux dissous mais aussi des résidus solides, qui sont ensuite éliminés par décantation. Dans le procédé pyrométallurgique, le minerai est successivement broyé, pré-séché, calciné et réduit par fusion dans des fours électriques de forte puissance pour décanter le ferronickel brut. Il est coulé et séparé par gravité des scories. Les scories fondues issues du processus métallurgique sont refroidies et fragmentées par un rideau d'eau de mer ou déversées sur une pente pour former une « coulée » qui refroidit à l'air libre. Nous avons décidé de ne pas séparer ces deux processus dans l'analyse des flux de matières afin d'éviter une représentation trop complexe. Ainsi, le secteur est pris dans son ensemble, en lien avec les secteurs de l'énergie et des minéraux de construction. En effet, le secteur des métaux est un très gros consommateur d'énergie et produit un volume important de déchets solides (les scories). Par ailleurs, si le secteur « eau » n'est pas pris en compte dans cette recherche — ni dans la méthode d'Eurostat —, car il n'est ni fortement prépondérant, ni indispensable au fonctionnement de l'industrie du nickel, il n'en demeure pas moins un flux significatif dans le métabolisme insulaire.



Cette analyse quantitative est complétée avec des entretiens semi-directifs réalisés dans le cadre d'un stage de recherche (Higuera, 2019) qui ont permis de réduire les angles morts des bases de données locales, notamment sur l'extraction non utilisée et sur les quantités de scories de l'industrie du nickel et leur accumulation, sur la gestion de certains déchets de construction et sur la consommation de matériaux de construction liés aux grands projets d'infrastructure. Il existe un décalage entre l'année des entretiens et celle de la collecte des données. Cependant, ces entretiens ont permis de saisir l'état des connaissances des acteurs pour une année de référence car nous les avons prévenus que notre étude portait sur les données de 2016. Cela impliquait de leur demander un ordre de grandeur pour cette année de référence. Les difficultés et contraintes, ainsi que les leviers et opportunités, pour l'émergence de nouvelles synergies dans ce nexus de ressources sont également discutés.

## SPÉCIFICITÉ DES MÉTABOLISMES INSULAIRES

Une première approche métabolique consiste à cartographier les flux de matières, d'énergie et de déchets dans les deux îles étudiées. L'objectif est de comparer les métabolismes des matières et le fonctionnement socio-économique de ces territoires, ainsi que

de confronter les données existantes aux observations de terrain. Ces bilans fournissent des indicateurs de demande de matière, de consommation de matière et d'émissions par habitant, ce qui donne une base de comparaison.

### À Ndzuwani

La figure 4.1 résume les résultats de la MFA obtenus pour l'île de Ndzuwani. En 2016, l'apport intérieur de matières (DMI) pour l'île était de 483 kt (qui est la somme des importations et de l'extraction intérieure). Les importations par rapport à la DMI ne sont que de 27 %, soit 130 kt (ou 0,4 t/hab.), contrairement à ce que l'on aurait pu penser intuitivement. Les importations concernent principalement les minéraux de construction (ciment, chaux ou plâtre) et la biomasse (comme les aliments et les cultures), qui représentent respectivement 51 kt et 52 kt en 2016 (soit 80 % de l'ensemble des importations, figure 4.1). Les importations de combustibles fossiles sont très faibles avec 19 kt (soit 0,06 t/hab.). Les importations de métaux représentent la part la plus faible avec 8 kt. Il convient de noter que 61 % des importations de métaux sont des produits manufacturés. L'extraction intérieure représente la plus grande part de la DMI avec 353 kt ou 1,1 t/hab., avec la biomasse, en particulier la nourriture provenant de l'agriculture de subsistance (céréales et légumes) étant de 182 kt (ou 0,5 t/hab.) et le bois de 87 kt (ou 0,26 t/hab.).



La DMC totale — qui correspond à la DMI moins les exportations — est de 480 kt, donc 1,5 t/hab. en 2016. Cette DMC est très faible et, en fait, Ndzuwani a un taux métabolique très bas par rapport aux autres îles étudiées jusqu'à présent (tableau 3). De plus, selon l'IRP, l'Union des Comores semble avoir l'un des taux métaboliques les plus bas (DMC : 1,7/hab.) au monde (Fischer-Kowalski *et al.*, 2011b), ce qui en fait un territoire très spécifique et pertinent. La part de la biomasse est la plus importante avec 48 % de la DMC totale, suivie par les minéraux de construction (28 %) et par les combustibles fossiles (22 %). Les métaux (tels que les appareils manufacturés et les produits métallurgiques) représentent une très faible part de la consommation, ce qui explique également le manque d'équipement en biens durables (équipement ménager, voitures, produits électroniques) des habitants. En cela, l'accroissement net annuel des stocks, c'est-à-dire les matières qui restent sur le territoire, représente environ 138 kt/an, soit 0,42 t/hab. Il s'agit principalement d'une accumulation de matériaux dans la construction et de quelques produits durables importés.

Les rejets (*domestic processed output* [DPO] : sorties rejetées par l'économie) de 0,5 t/hab. sont constitués de déchets solides, y compris les matériaux de construction (30 %), des utilisations dissipatives des déchets agricoles (30 %) et des émissions atmosphériques (40 %) provenant de la combustion de combustibles fossiles, de bois et de la décomposition de la matière organique. Il convient de noter qu'à Ndzuwani, contrairement à d'autres pays exportateurs de ressources, peu de déchets résultent de l'extraction et de la fabrication des produits exportés. Cependant, les eaux usées issues de la production d'huiles essentielles sont importantes (Tongnuanchan et Benjakul, 2014). Enfin, le recyclage est faible par rapport à la production de déchets insulaires.

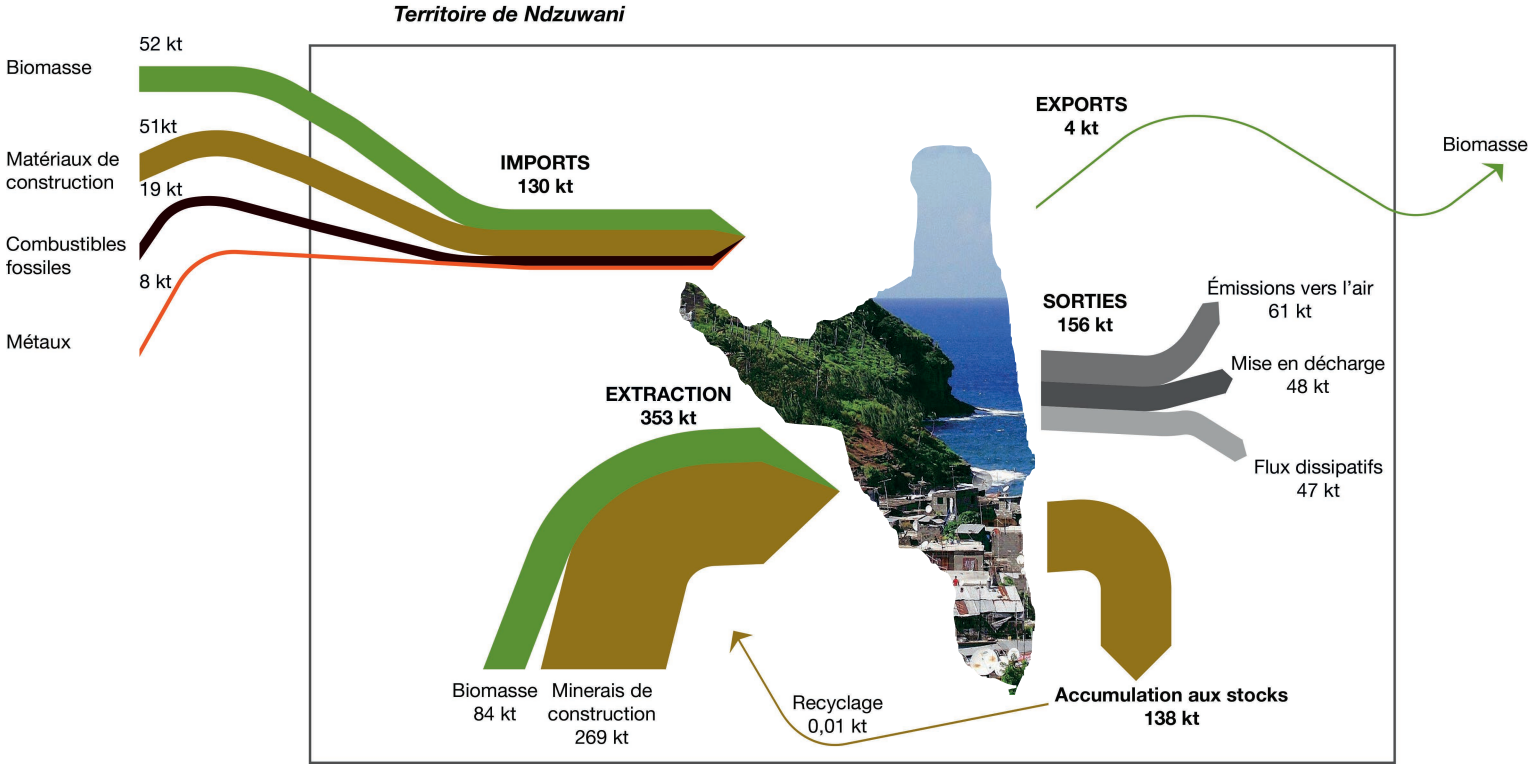



**Figure 4.1. Diagramme Sankey des flux de matières et d'énergie pour l'île de Ndzuwani en 2016 (photographie : Ndzuwani, Wikipedia Commons).**

## En Nouvelle-Calédonie

La figure 4.2 résume les résultats de l'analyse des flux de matières pour la Nouvelle-Calédonie pour l'année 2016. Ce schéma illustre le profil d'une île extractive avec une production considérable de nickel mais aussi de cobalt et de chrome. Cependant, le nickel représente 98 % de l'extraction des métaux. Les flux de métaux importés, qui représentent 1,4 % des importations (0,0054 Mt), sont dès lors peu significatifs. Plus de 15 Mt de minéraux sont extraites du sol calédonien et ce chiffre a doublé depuis 2000. Cela correspond à des exportations de 3,1 Mt en 2002 et de 5,8 Mt de nickel et de ferronickels en 2016 (figure 4.2). L'accumulation au stock concerne les déchets solides et liquides, qui sont donc plus importants que ceux des minerais de nickel et de ferronickels exportés. D'après le guide Eurostat, l'extraction inutilisée ne devrait plus être considérée dans les entrées et dans l'extraction, mais parce qu'il nous semble un enjeu prépondérant en Nouvelle-Calédonie, il est ajouté en entrée et donc dans l'accumulation au stock.



Ainsi, d'après les entretiens avec les acteurs industriels, 9,5 Mt de matériaux d'extraction non utilisés sont produites annuellement et sont stockées sur l'île. Cela représente une augmentation annuelle du stock de près de 10 Mt. En effet, les acteurs interrogés mentionnent un ratio de 1,25 tonne de déchets liquides par tonne de minerai extrait dans le cas de l'hydrométallurgie, ce qui aboutit à une production de 6 671 kt/an, et à un ratio de 14 tonnes de scories par tonne de minerai dans le cas de la pyrométallurgie, ce qui équivaut à 2 900 kt/an. Ces quantités « gaspillées », que l'on pourrait appeler « rendements négatifs », sont loin d'être négligeables. Cependant, à ce jour, aucune mesure n'a été effectuée, selon une méthode systématique et formelle, qui pourrait permettre leur suivi. Quant aux déchets liquides de l'hydrométallurgie, composés d'eau, de solvants et de déchets inertes, il est difficile d'en estimer le stock car une partie de l'eau est rejetée en mer, non sans provoquer des pollutions et des controverses (Batterbury, Kowasch et Bouard, 2020). En ce qui concerne les scories, principalement composées d'oxydes de silice et de magnésium, les acteurs industriels qui sont interrogés estiment le stock entre 20 et 25 millions de mètres cubes, ce qui est un ordre de grandeur immense pour une île de taille modeste.

Le secteur « énergie » est très dépendant des importations, passant de 0,65 Mt en 2000 à 1,56 Mt en 2016. Cela se traduit par un taux d'indépendance énergétique extrêmement faible de 2,7 % en 2016, qui n'a pas beaucoup évolué depuis 2000 (figure 4.3). Par ailleurs, les combustibles fossiles constituent la principale source d'énergie avec 63 % de produits pétroliers et 34 % de charbon. Une part importante est transformée en électricité par les centrales électriques. Le transport lié au nickel concerne la majorité de la consommation de combustibles fossiles avec 0,2 Mt de produits pétroliers sur les 0,3 Mt indiqués dans l'étape de consommation. Malgré les programmes d'investissement dans les énergies renouvelables et l'augmentation de leur production, il est clair que le bilan énergétique est dépendant des importations de combustibles fossiles, ce qui renforce d'autres déséquilibres économiques. Le secteur des métaux est très dépendant de l'énergie. En effet, 0,6 Mt de combustibles fossiles sont distribuées dans l'archipel uniquement pour l'extraction et pour la métallurgie (Dimenc Gouvernement de Nouvelle-Calédonie). Cela correspond à 66 % de la consommation totale d'énergie de l'île. Ainsi, les besoins énergétiques sont répartis de manière très inégale, ce qui donne un contexte insulaire très singulier. Le poids de ce secteur a un fort impact sur le métabolisme socio-économique. Ainsi, la filière des métaux est un très fort

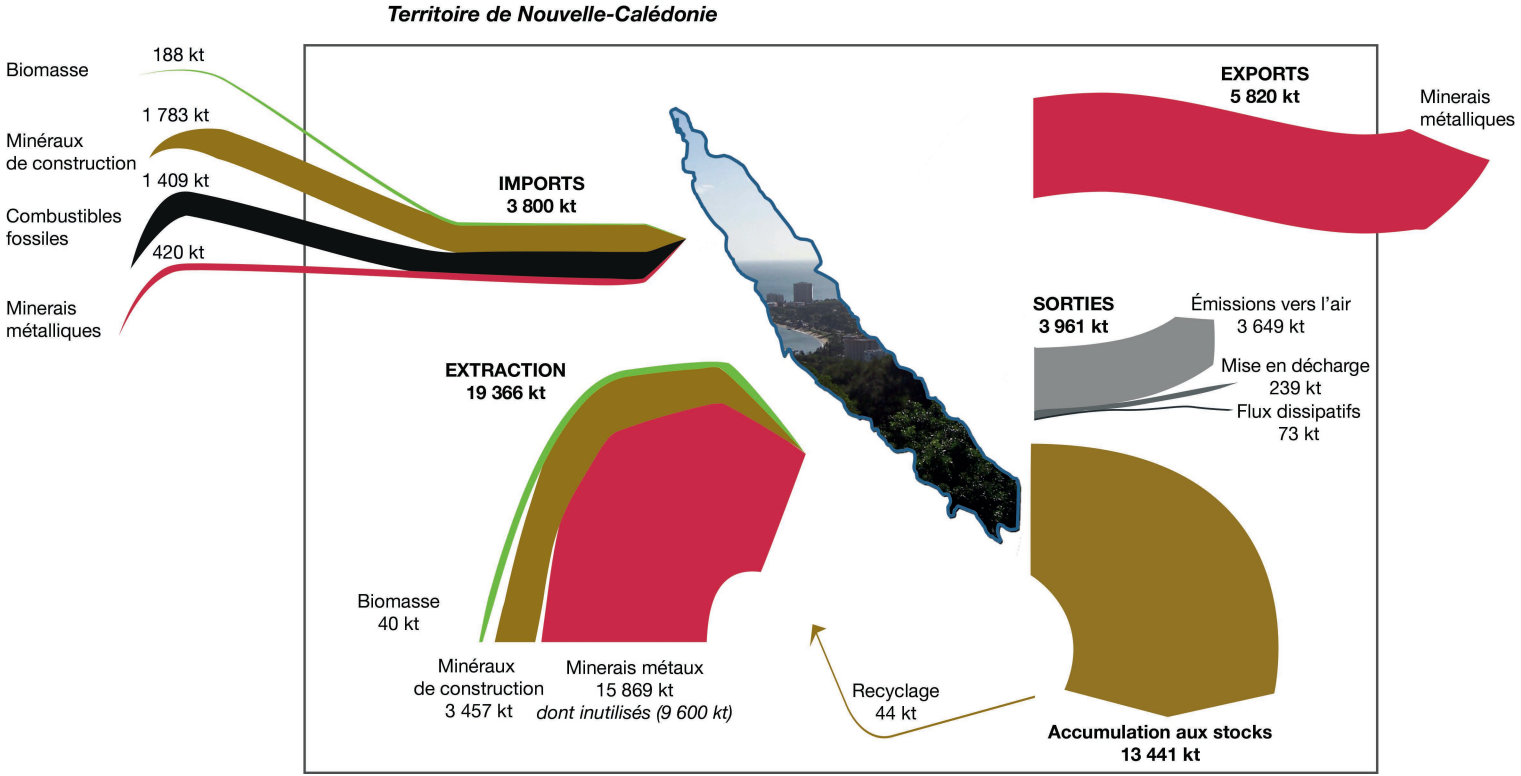



**Figure 4.2. Diagramme Sankey des flux de matières et d'énergie pour la Nouvelle-Calédonie en 2016 (photographie : Nouméa, Wikipedia Commons).**

producteur de gaz à effet de serre (52 % des émissions directes de l'île, dont 47,8 % pour l'industrie métallurgique, et 4,2 % pour l'extraction dans les mines).

Enfin, il est à noter la valorisation informelle des scories de nickel comme matériau. Selon les acteurs industriels, entre 5 et 10 % de la production annuelle de scories, soit environ 150 kt/an, sont réutilisés comme matériau de remplissage (en sous-couche routière ou d'infrastructure) pour leurs propriétés drainantes. C'est très peu par rapport à la production annuelle de scories, mais cela suggère des options pour une récupération plus systématique des scories et une solution à l'accumulation du stock existant.

La figure 4.3 montre des volumes de flux très importants en évolution et une interdépendance entre la filière métallurgique et énergétique. Si l'on se réfère aux indicateurs MFA du guide Eurostat, les résultats sont exorbitants par rapport à la population relativement faible de la Nouvelle-Calédonie (environ 269 000 habitants). Par exemple, en 2016, selon nos calculs, la DMI (qui correspond aux extractions intérieures — sans les extractions non utilisées — et aux importations) et la DMC (qui correspond au DMI dont on soustrait les exportations) étaient égales, respectivement, à 50,7 et 29,3 t/hab. Par comparaison, en France, l'apport de matière et la consommation de matière s'élèvent



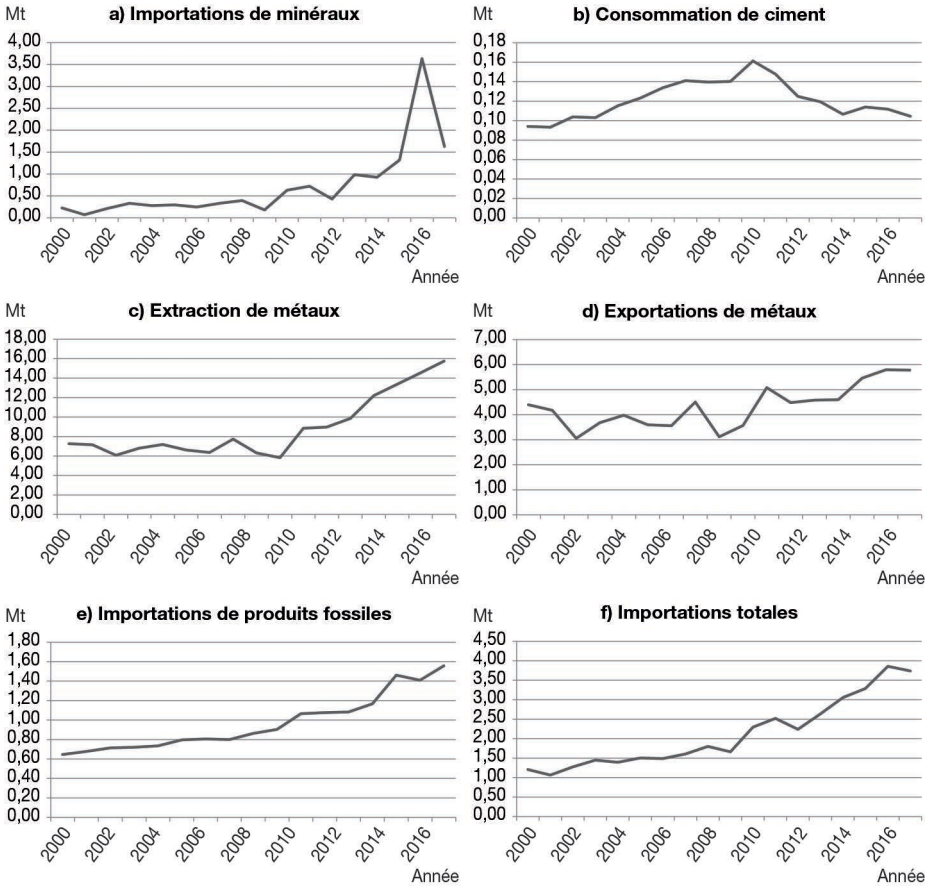



**Figure 4.3. Évolution temporelle des indicateurs en Nouvelle-Calédonie de 2000 à 2017 pour a), b) et f) et de 2000 à 2016 pour c), d) et e).**

à environ 14 et 11 t/hab./an selon la base de données d'Eurostat (Eurostat, 2018). C'est-à-dire qu'elles sont presque trois fois inférieures à celles de la Nouvelle-Calédonie. Cependant, le métabolisme de l'île est dominé par les « extractions non utilisées », selon les termes de la méthode Eurostat, désignant les flux excavés sans fonction économique locale. Ceux-ci correspondent à 35,7 t/hab. De même, le DPO (qui additionne les émissions dans la nature) est très élevé (13,8 t/hab.). C'est beaucoup plus que pour la France où ce chiffre s'élève à environ 7,2 t/hab. De plus, la DPO en Nouvelle-Calédonie concerne principalement les émissions atmosphériques liées aux industries métallurgiques (7 t/hab. d'équivalent $CO_2$). Ainsi, le secteur du nickel et ses interdépendances énergétiques et matérielles sont clairement prépondérants dans le métabolisme socio-économique de la Nouvelle-Calédonie.

En comparant le métabolisme de Ndzuwani et de la Nouvelle-Calédonie avec celui d'autres îles (tableau 4.1), nous constatons que l'utilisation de matériaux à Ndzuwani est très faible mais qu'elle est très élevée pour la Nouvelle-Calédonie (Cerema, 2019 ; Krausmann, Richter et Eisenmenger, 2014 ; Martinico-Perez *et al.* 2018 ; Singh *et al.*, 2001). Par exemple, la consommation matérielle de Ndzuwani est de 1,5 t/hab./an, ce qui est très faible par rapport à l'Islande (23 t/hab.), à Trinidad-et-Tobago (17 t/hab.) et à la Nouvelle-Calédonie (29 t/hab.). Ces trois pays sont des économies extractives où l'industrie est fortement orientée vers l'exportation de ressources locales (minerais métalliques pour les Philippines, pétrole pour Trinidad-et-Tobago et nickel pour la Nouvelle-Calédonie), ce qui se traduit par des niveaux élevés de consommation d'énergie et de production de déchets. De même, la quantité de biens importés à Ndzuwani, soit 0,4 t/hab., est bien inférieure aux 5,5 t/hab. de la Martinique, aux 8,8 t/hab. de Trinité-et-Tobago ou aux 15,1 t/hab. de l'Islande. Les rejets (DPO) sont également très faibles par rapport à d'autres îles. Ndzuwani est proche du profil métabolique de Trinket, même si l'extraction intérieure (DE) est beaucoup plus importante à Trinket (5,8 t/hab.), en particulier pour les minéraux. La Nouvelle-Calédonie est proche de profils plus extractivistes comme Trinidad-et-Tobago et l'Islande.



**Tableau 4.1. Comparaison des indicateurs de la MFA avec d'autres métabolismes insulaires (en t/hab./an).**

| Ville (année) | DE | Imports | Exports | DPO | DMC | Source |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ndzuwani (2018)** | 1,1 | 0,4 | 0,01 | 0,5 | 1,5 | |
| **Nouvelle Calédonie (2016)** | 36,3 | 14,3 | 21,7 | 13,9 | 29,0 | |
| **Martinique (2015)** | 7,8 | 5,5 | 2,4 | 7 | 10,9 | Cerema, 2019 |
| **Trinidad et Tobago (2008)** | 34,7 | 8,8 | 26,2 | NA | 17,4 | Krausmann, Richter et Eisenmenger, 2014 |
| **Islande (2008)** | 14,0 | 15,1 | 6,1 | NA | 23,0 | Krausmann, Richter et Eisenmenger, 2014 |
| **Philippines (2014)** | 6,0 | 1,2 | 1,5 | NA | 5,9 | Martinico-Perez *et al.*, 2018 |
| **Trinket (2000)** | 5,8 | 0,4 | 2,4 | NA | 3,8 | Singh *et al.*, 2001 |

t/hab./an = tonnes par habitant et par an mentionné fermé aux pays ; DE = *domestic extraction* (extraction domestique) ; DPO = *domestic processed output* (sorties rejetées domestiques) ; DMC = *domestic material consumption* (consommation matérielle intérieure) ; voir section précédente pour les explications de ces indicateurs.

## FLUX CONTRAINTS, DÉPENDANCES ET VULNÉRABILITÉS SOCIO-MÉTABOLIQUES

Cette section présente des exemples de vulnérabilités socio-métaboliques révélées par la MFA et par les entretiens auprès des acteurs. Ces vulnérabilités socio-métaboliques sont à la fois liées aux entrées (importations et extraction intérieure) et aux sorties (c'est-à-dire aux déchets et aux émissions) du métabolisme insulaire.

### De l'exportation à l'accumulation de déchets



À Ndzuwani, le métabolisme insulaire se concrétise par l'exportation de l'huile d'ylang-ylang, qui fait la fierté économique de l'île, et dont elle tire une grande partie de ses ressources économiques. Les fleurs d'ylang-ylang sont récoltées à la main sur l'arbre canaga, puis sont distillées pour en tirer une huile précieuse pour des traitements médicaux alternatifs. Cependant, les externalités de cette production sont rarement évoquées. Il y a environ 270 opérations de distillation par an sur l'île, produisant 3 litres d'huile par distillation. Ce processus consomme de grandes quantités d'eau de rivière, les asséchant à terme, et de même de grandes quantités de bois, ce qui est l'une des principales causes de la déforestation à Ndzuwani. Environ 1 tonne de bois est consommée par distillation, et « la plupart du temps, ils font appel à un bûcheron pour sélectionner et couper l'arbre, mais ne replantent pas par la suite » (entretien avec un responsable d'ONG, 2018). Le bois est coupé dans la forêt naturelle et dans l'agroforesterie dont l'essence principale est l'acajou des marais *Eucalyptus robusta*, une plantation de colonie. La surface de forêt dégradée aurait doublé entre 1995 et 2014, passant de 8,3 à 15,3 % de l'occupation des sols d'après une expertise locale (Boussougou, Brou et Mohamed, 2015), l'exploitation du bois atteignant 260 kg/hab. en 2016. Cela affaiblit la viabilité économique du secteur de la production d'huiles essentielles, qui repose sur la déforestation et donc sur la perte croissante de forêts, ce qui entraîne une diminution des ressources intérieures en bois au fil du temps.

En Nouvelle-Calédonie, l'exportation du nickel implique une énorme extraction de minerai métallique et une grande quantité d'énergie fossile importée pour alimenter l'industrie métallurgique, concentrée dans trois fonderies de nickel. L'accumulation de scories dangereuses et les émissions de gaz à effet de serre qui en résultent sont les conséquences de cette rupture métabolique. Les scories ne sont ni quantifiées ni étiquetées comme des déchets, mais elles sont transportées et accumulées dans les cours d'eau, modifiant les métabolismes naturels et transformant les paysages urbains (Sellier *et al.*, 2021). Les scories de l'usine de nickel de Nouméa, Doniambo, ont longtemps servi de matériau de comblement pour la croissance péninsulaire de la ville et continuent d'être distribuées aux habitants en remplacement des gravats. Ces scories solides sont accompagnées de déchets liquides dangereux issus du processus métallurgique, constituées d'un mélange d'eau, de solvants et d'inertes. Ces déchets dangereux sont très mal gérés et ont conduit à des fuites d'acide sulfurique dans les rivières depuis l'usine de Goro sud, notamment en 2009 (Meur, 2010), 2012, et en 2014. Enfin, ces activités extractives, rendues visibles par l'analyse des flux métaboliques, sont largement occultées dans les discours publics, qui se focalisent presque exclusivement sur les déchets ménagers.

Pour autant, on peut s'interroger sur la chaîne métabolique de responsabilité. En effet, la majeure partie du nickel produit n'est pas utilisée pour la consommation calédonienne. Il est exporté vers les industries de la Chine, de la Corée du Sud, du Japon, de




**Figure 4.4. Destinations et quantités de nickel exportées de Nouvelle-Calédonie en 2016 en lien avec les déchets produits et l'énergie consommée (données : douanes, 2016, © projet Carboval, UMR ESO CNRS, 2019).**

Taïwan, de l'Union européenne, de la France et de l'Australie (figure 4.4). L'utilisation dans les industries de transformation du nickel est celle de l'acier inoxydable, suivie par les piles et batteries et les alliages de métaux non ferreux. Les industries de ces pays sont parmi les plus gros consommateurs de nickel au monde. Dans cette perspective, environ la moitié de l'empreinte matérielle de la Nouvelle-Calédonie est imputable à la consommation de nickel dans d'autres pays, qui sont donc responsables en bout de chaîne de ces impacts environnementaux. En effet, ces impacts correspondent aux flux d'énergie et de matériaux de construction nécessaires tout au long de la chaîne d'approvisionnement pour produire les biens finalement consommés dans les régions ou pays importateurs que sont la Chine, la Corée du Sud, le Japon, Taïwan, l'Union européenne, la France et l'Australie.



**Dépendance extérieure et insécurité d'approvisionnements**

L'analyse des flux montre une grande dépendance des métabolismes insulaires pour les approvisionnements. En 2017, à Ndzuwani, l'analyse des flux de matières montre que les cultures de subsistance s'élèvent à 0,5 t/hab., directement consommées par les producteurs. Pourtant, cela est insuffisant et doit être complété par des denrées importées. Quarante pour cent des aliments proviennent de l'extérieur, c'est-à-dire principalement des protéines de mauvaise qualité car il y a beaucoup de produits carnés. La sécurité alimentaire est l'un des principaux problèmes des PEID, en ce qui concerne leur vulnérabilité et leur résilience (Lowitt *et al.*, 2015). L'intersection des aspects métaboliques et économiques est donc directement liée aux conséquences sur la sécurité alimentaire. En Nouvelle-Calédonie, c'est jusqu'à 88 % de la biomasse qui provient de l'extérieur. En outre, la valeur économique des denrées alimentaires importées a quadruplé depuis 2005 (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture [FAO], 2018). Il devient donc très coûteux d'importer des denrées alimentaires, ce qui est l'un des indicateurs de la baisse de la sécurité alimentaire, selon la FAO.

Les pays étrangers jouent donc un rôle important dans la satisfaction des besoins alimentaires de Ndzuwani et de Nouvelle-Calédonie. Au total, 36 pays fournissent de la nourriture à Ndzuwani (figure 4.5). Le riz et les produits carnés sont les principaux produits alimentaires importés (voir les flèches vertes de la biomasse dans la figure 4.5). La France est le premier partenaire, ce qui montre que la période coloniale n'est pas encore terminée, suivie par les Émirats arabes unis, en raison de leur rôle de plaque tournante logistique dans la région. L'Afrique du Sud, située à environ 3 000 km et identifiée comme un pays ayant des liens commerciaux forts avec les Comores (en particulier pour les équipements électriques et électroniques), est une autre source d'approvisionnement importante. Les îles de l'océan Indien, telles que Maurice et Madagascar, comptent parmi les fournisseurs de produits alimentaires les plus proches.

Alors que la production de nourriture, issue des cultures vivrières, a augmenté entre 2006 et 2016 (+ 65 %) à Ndzuwani grâce à l'extension des terres agricoles pour une population qui a également augmenté de 30 %, les importations ont augmenté dans des proportions encore plus importantes, de l'ordre de 77 % selon la FAO (2018). En effet, les habitants consomment plus de nourriture et la malnutrition diminue alors que l'obésité augmente (FAO, 2018). Ainsi, les aliments produits sur l'île représentent une part décroissante de la consommation intérieure, ce qui signifie que l'île n'est pas sur la voie de

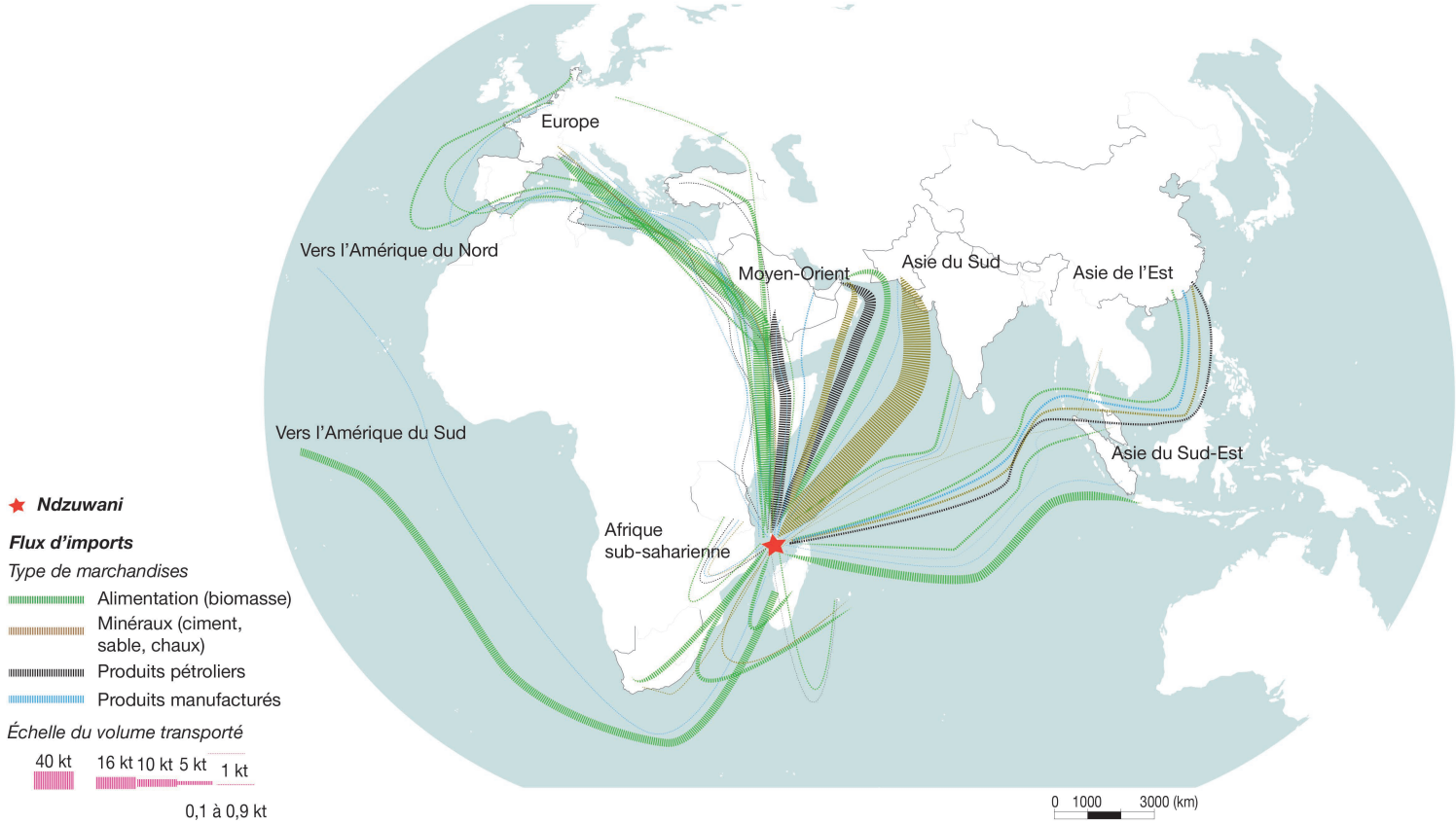



**Figure 4.5. Flux d'importation à destination de Ndzuwani en provenance des pays étrangers (données : Ndzuwani customs data, 2016).**
L'épaisseur des flèches correspond aux volumes importés par les pays étrangers.

la sécurité alimentaire. De même, en Nouvelle-Calédonie, l'autonomie alimentaire n'est que de 14 % du volume total en 2012 (productions animales et végétales confondues), alors qu'il était de 19,2 % en 2002. Ces besoins sont majoritairement satisfaits par des importations qui ont été multipliées par 2,6 entre 1995 et 2012 (FAO, 2018). Les importations les plus importantes viennent de France, de l'Union européenne, d'Australie, de Chine et d'autres pays.

Par ailleurs, l'analyse des flux de matières montre qu'il y a une grande perte de déchets organiques (qui constituent 80 % des déchets de l'île à Ndzuwani et 22 % en Nouvelle-Calédonie). Même si une part importante est récupérée par les éleveurs de chèvres à Ndzuwani, la plupart subissent le même sort que les plastiques, c'est-à-dire qu'ils sont enfouis ou jetés sur les plages. En Nouvelle-Calédonie, une part faible de déchets verts est compostée et une majorité de déchets organiques ménagers et économiques est enfouie. Pour autant, il s'agit d'une perte importante pour les agriculteurs, qui pourraient remplacer les intrants par ces résidus organiques pour nourrir les sols et potentiellement augmenter la productivité. Ce cycle ouvert de la matière organique augmente donc la vulnérabilité métabolique de la sécurité alimentaire.



De même, l'augmentation du commerce des matériaux de construction est une autre situation qui permet d'appréhender la vulnérabilité du métabolisme insulaire. L'urbanisation croissante des côtes a entraîné une forte croissance de ce secteur. La taille des zones urbaines a doublé à Ndzuwani entre 1995 et 2014 (Boussougou, Brou et Mohamed, 2015) et est en augmentation de 2,5 % par an à Nouméa (capitale de la Nouvelle-Calédonie). Par conséquent, des volumes physiques et financiers très importants de sable, de ciment, de chaux et de plâtre sont importés (à Ndzuwani principalement du Pakistan, à hauteur de 40 kt en 2016, et dans une moindre mesure de Chine et des Émirats arabes unis — voir les flèches brunes minérales dans la figure 4.5). Cela peut paraître surprenant, mais « le sable est plus rare qu'on ne le pense » (Peduzzi, 2014), de sorte que ces matériaux en vrac traversent les océans malgré leur valeur économique relativement faible par tonne, ce qui les rend très coûteux à transporter. À Ndzuwani, ces importations résultent de la pénurie de ressources intérieures et du manque d'installations de construction, ce qui ralentit le développement du secteur de la construction.

Ces dernières années, des carrières ont été ouvertes à Ndzuwani, ce qui a entraîné une baisse des importations de sable et de gravier. Cependant, les entretiens avec les personnes concernées ont montré que ces matériaux produits localement sont trop chers pour de nombreux ménages. Dans le même temps, l'extraction informelle de sable sur la côte et les rivières continue d'être populaire lorsque cela est possible, et représentait environ 20 % de l'extraction de matériaux de construction sur l'île en 2016. De plus, cette pratique nécessite beaucoup de travail et est mal payée : « J'extrais une quantité de trente seaux par jour. Quand j'arrive à environ 4 m³, soit environ un mois de travail, je vends le sable pour 50 000 FRC [environ 100 €] » (entretien avec un ouvrier extrayant du sable de la rivière à Ouani, 2018). C'est aussi un désastre pour le paysage de l'île, car les côtes disparaissent progressivement et subissent une érosion importante à cause de cette pratique (Sinane *et al.*, 2011). De plus, elle met en péril les infrastructures routières le long des côtes qui s'effondrent parfois à cause du recul des plages.

Bien que les autorités publiques aient légiféré à plusieurs reprises contre cette pratique, une part importante de l'extraction des matériaux de construction provient

de l'activité informelle (20 % à Ndzuwani). En Nouvelle-Calédonie, il existe une valorisation informelle des scories de nickel comme matériau. Ces processus d'extraction aboutissent à des bâtiments peu fiables et moins aptes à résister aux aléas climatiques (notamment aux inondations et aux cyclones) en raison de la mauvaise qualité du sable extrait. L'analyse critique du métabolisme insulaire met en évidence cette vulnérabilité socio-métabolique, dans un tableau combinant une matérialité environnementale à fort impact, des contraintes sociales sur le travail et des infrastructures défectueuses.

## Une économie informelle et sobre pour résister aux vulnérabilités socio-métaboliques

À Ndzuwani, malgré l'importance de l'économie informelle, celle-ci n'est pas à l'origine de la vulnérabilité du territoire. Bien au contraire, le secteur informel peut même atténuer certains aspects de la vulnérabilité socio-métabolique. La présence d'acteurs informels représente d'ailleurs l'un des principaux leviers pour améliorer la gestion des flux sur l'île. Les entretiens révèlent, par exemple, que le secteur du bâtiment y produit très peu de déchets, contrairement aux pays du Nord. En effet, la plupart des matériaux sont réutilisés directement sur place, tout simplement par manque d'accès à des matières premières : « Le secteur du bâtiment est très informel, et comme la population ne peut pas payer de nouveaux matériaux, elle réutilise les déchets de construction et fait même des contributions communautaires pour financer la construction de routes et de mosquées dans leur quartier ou leur village » (entretien avec un habitant construisant sa maison, 2018). Les matériaux secondaires sont ainsi pleinement réintégrés dans les cycles de production locaux, donnant lieu à différentes formes d'organisation collective. Une fois les flux clairement identifiés et séparés, l'enjeu est de trouver un modèle d'organisation permettant d'intégrer les contraintes pesant sur les différents acteurs, et ainsi de proposer une forme de gestion territoriale adaptée aux moyens disponibles localement. L'observation des pratiques quotidiennes informelles de collecte des déchets, du sable et du bois met en évidence les formes très variées et répandues des alternatives économique et politique. De plus, les sources de données ont permis d'enquêter à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de l'île, alors que certaines études sur le métabolisme se concentrent sur les frontières géographiques sans ouvrir la « boîte noire ».

Ainsi, malgré les vulnérabilités métaboliques décrites, le métabolisme de l'île de Ndzuwani présente de nombreux signaux forts de transition. De nombreux acteurs issus d'ONG locales et internationales mettent en œuvre des solutions *in situ* fondées sur des pratiques vernaculaires afin de fermer la boucle des matériaux et de réduire la dépendance à l'égard des flux externes. Ces solutions incluent des sacs recyclés fabriqués à partir de tissus et de papiers récupérés, des fours pour optimiser la combustion du bois, des tapis fabriqués à partir de restes de sandales en plastique (dont on trouve un très grand nombre dans les décharges illégales le long de la côte), des casseroles fabriquées à partir de canettes en aluminium, des boulettes de carton compressé à brûler comme combustible et des nappes fabriquées à partir de textiles usagés par des groupes de femmes. Ces solutions, bien que modestes en termes de volume, montrent qu'il existe des alternatives socio-métaboliques. Certaines communautés organisent également des nettoyages de côtes tous les week-ends, sans attendre l'intervention de l'État.

## CONCLUSION. RÉSISTER AUX VULNÉRABILITÉS DES ÎLES

L'aperçu comparatif de ces deux territoires insulaires fournit plusieurs pistes de réflexion sur les relations complexes entre le métabolisme, l'insularité et les vulnérabilités. Loin d'être des sites idéaux pour la réalisation de l'économie circulaire et des flux de matières en boucle fermée, les îles apparaissent à bien des égards comme des anti-modèles de développement durable. Elles se caractérisent par leur isolement géographique et, en même temps, par leur hyper-connexion à une économie mondialisée, incapable de réguler les déchets qu'elles génèrent. L'isolement géographique de ces territoires ne les épargne pas de ces dysfonctionnements ; au contraire, ils semblent particulièrement exposés et vulnérables.

Le métabolisme insulaire façonne et est façonné par les flux matériels liés à l'extraction des matériaux et à la circulation et à l'élimination des déchets. La recherche des flux de matières et des flux de déchets cachés nous aide à décortiquer les relations entre territoires et filières. Les données et analyses métaboliques rendent compte des grandes tendances des mouvements de matières et de déchets et permettent de suivre leur évolution dans le temps. En particulier, l'analyse quantitative des flux de matières permet de mettre en relation les flux de déchets eux-mêmes avec ceux de la consommation, de l'énergie et ceux liés aux activités économiques. À l'échelle d'un petit territoire insulaire, ces données sont très significatives et complémentaires des observations empiriques pour comprendre la manière dont les matières et déchets circulent et s'accumulent, ainsi que pour identifier l'attention différenciée dont ils font l'objet. Alors que le discours public se concentre sur les déchets ménagers et sur l'importance du bon comportement des habitants pour maintenir une île propre et touristique, les données métaboliques montrent que les flux résiduels les plus importants sont liés aux mono-activités extractives, minières et agricoles qui caractérisent ces économies insulaires, ainsi qu'au système orienté vers les importations qui les soutient. Les profils économiques extractivistes sont directement liés à l'histoire coloniale de ces territoires. Confrontés aux études environnementales et aux observations de terrain, ces résidus se révèlent souvent être des sources de pollution majeure et de transformation des paysages. La visibilisation/invisibilisation des déchets, souvent soulignée dans la littérature sur les déchets, est un trait marquant de ces réalités insulaires.

Étant donné les liens entre le cycle de vie d'un matériau, sa trajectoire spatiale et ses conséquences socio-économiques, les approches doivent être combinées. En reliant la matérialité du métabolisme social aux relations d'écologie politique, comme dans le cas de ces territoires insulaires, cette approche permet de décortiquer les relations complexes entre les moteurs des flux de matières, les institutions décisionnelles, et les verrous et vulnérabilités qui en résultent : c'est l'intérêt de la notion de vulnérabilité socio-métabolique. Cette étude vient s'ajouter à la rare littérature qui soutient que les petites économies insulaires devraient tirer parti des schémas d'utilisation des ressources pour renforcer la résilience du système, ainsi que de politiques et d'institutions audacieuses qui soutiennent la circularité des matières, impliquent les communautés et encouragent la sobriété.

# *Conclusion générale. Vers un nouveau régime métabolique ?*

Cet ouvrage a exploré le métabolisme territorial comme un enjeu à la fois social, conceptuel et épistémologique, dépassant les approches strictement pratiques ou opérationnelles. Il a proposé un enrichissement du cadre d'analyse du métabolisme, fondée sur l'interdisciplinarité entre diverses écologies scientifiques, pour mieux appréhender les relations socio-écologiques et leurs évolutions. L'objectif n'était pas seulement d'évaluer les approches méthodologiques ou analytiques, mais de dépasser les frictions épistémologiques et les frontières disciplinaires qui entourent le concept de métabolisme. En transcendant le constructivisme social (où tout est social) et l'essentialisme naturaliste (où tout est physique), ce travail envisage les territoires comme un socio-écosystème doté d'un métabolisme, intégrant des dimensions physiques, sociales, institutionnelles et culturelles. Il critique les approches positivistes et techno-centrées, incapables de répondre aux enjeux structurels de consommation de ressources, et remet en question les biais anthropocentriques qui occultent les impacts sur les matières et sur les êtres vivants. Enfin, les approches spatiale et historique des flux permettent de saisir les interconnexions, héritages et conséquences des transformations urbaines, élargissant ainsi la compréhension du métabolisme territorial.



Les premiers chapitres soulignent l'importance d'une approche interdisciplinaire du métabolisme urbain, croisant écologie politique, sociale et industrielle, tout en explorant leurs controverses et limites. Ils introduisent deux courants émergents que sont l'écologie politico-industrielle et l'écologie territoriale, avant d'approfondir la dimension spatiale du métabolisme, souvent polysémique, ce qui freine la consolidation des connaissances. Le troisième chapitre identifie deux axes de convergence : les inégalités socio-métaboliques et les infrastructures, clés pour repenser l'espace et les futurs urbains. La deuxième partie applique cette analyse à deux études comparatives : Nantes-Saint-Nazaire et Göteborg, révélant évolutions, tensions et inégalités, et les Comores et la Nouvelle-Calédonie, illustrant la vulnérabilité des territoires insulaires dépendant des échanges extérieurs. Ces travaux combinent dimensions matérielles, sociales et spatiales pour enrichir la compréhension du métabolisme urbain et pour guider des politiques plus intégratives.

Trois enseignements majeurs émergent de cette analyse. Le premier enseignement s'attache au croisement des flux et des dynamiques socio-politiques. Cela montre qu'une approche métabolique permet d'appréhender les territoires comme des objets socio-écologiques complexes, où matières, énergies et relations sociales s'entrelacent. Elle révèle des tensions subtiles : entre villes et infrastructures dans les espaces urbains, ou dans les îles, entre vulnérabilités internes et dépendances aux circulations globales. Ces subtilités, invisibles autrement, deviennent ici des clés d'interprétation. Le deuxième enseignement se concentre sur l'intérêt du profil métabolique. Décrire le métabolisme d'un territoire dépasse les indicateurs traditionnels, comme la croissance économique

ou la démographie. C'est ouvrir une porte sur les rapports profonds entre humains et non-humains, entre nature et société. Les infrastructures émergent alors comme des acteurs cruciaux, prolongeant des logiques productivistes et matérialistes. Qu'il s'agisse des politiques d'économie circulaire des villes ou des pratiques extractivistes des îles, elles structurent l'usage des territoires et renforcent parfois leur vulnérabilité. Le troisième enseignement s'intéresse aux frictions épistémologiques qui offrent de nouvelles perspectives. En mettant en avant des notions comme les inégalités et les infrastructures, cette approche interroge les disciplines elles-mêmes, leurs cadres et leurs limites. Les infrastructures, en tant que carrefours matériels et sociaux, tissent des interdépendances entre territoires et reflètent des choix techniques et politiques qui marquent durablement les espaces. Ainsi, l'empreinte matérielle d'un territoire urbain, ou les chaînes de dépendance des îles, révèlent des récits de relations globales et de responsabilités partagées.



Cette réflexion dessine un métabolisme territorial à la croisée des écologies scientifiques et des sciences du territoire, où la matérialité du monde devient un miroir des ordres sociaux. Elle montre comment les circulations de matières et d'énergies, loin de n'être que des phénomènes physiques, portent en elles des histoires de pouvoir, d'inégalités et d'interdépendances.

## La vie sociale des flux métaboliques

Tout en privilégiant une perspective territoriale, ce travail met en lumière l'intégration du métabolisme dans un réseau de flux qui dépasse largement les frontières des territoires. Il explore les dynamiques de transformation du métabolisme urbain à différentes échelles temporelles (court, moyen et long termes) en mobilisant des approches combinées, à la fois quantitatives et qualitatives, issues des sciences naturelles, humaines et sociales. Si le ciment a une vie sociale qui façonne nos villes (Choplin, 2020b), il en est de même pour l'ensemble des flux de matières et d'énergie qui en ont une également.

Cette perspective socio-matérielle, qui est menée grâce à une construction interdisciplinaire des méthodologies, est davantage axée sur les flux métaboliques, c'est-à-dire qu'elle met l'accent sur les circulations, en reconnaissant leur caractère sélectif, évolutif et structuré par des rapports de pouvoir qui déterminent ce qui circule ou non, sans figer à priori la forme des infrastructures qui les organisent. L'analyse se déplace ainsi des territoires vers les flux eux-mêmes, devenant des outils clés pour explorer les dynamiques socio-matérielles. Ces flux englobent une grande diversité et tout ce qui reflète la matérialité des circulations. Un aspect central de cette approche réside dans l'étude des interdépendances socio-matérielles entre ressources, espaces et sociétés, en tenant compte des relations entre les lieux et des différentes échelles spatiales. Inscrite dans un « tournant matériel » (Coutard et Florentin, 2022), cette perspective privilégie une compréhension processuelle des circulations, en mettant en lumière leur matérialité et les relations complexes qu'elles tissent entre espaces et échelles. En suivant la vie des flux, notre approche renouvelle la lecture des dynamiques sociales et matérielles, tout en révélant les enjeux de pouvoir et les mécanismes de sélection qui façonnent ces circulations.

Cette production de connaissances interdisciplinaires est essentielle pour aborder les défis posés par l'anthropocène. Au-delà des pratiques et des méthodes, cette réflexion épistémologique vise à dépasser les limites des approches constructivistes sociales, afin d'envisager le métabolisme comme un système d'interdépendances matérielles, un

espace dynamique et un champ de forces produisant des enchaînements imprévus et des contingences historiques souvent incontrôlables (Parrinello et Kondolf, 2021). Cette approche appelle à dépasser les réflexes disciplinaires traditionnels et dichotomiques en adoptant une vision sociale et matérielle des flux.

Cette vie sociale des flux conduit aussi à s'interroger sur les effets multiscalaires des politiques de transition (notamment d'économie circulaire) et sur les acteurs impliqués, qu'ils soient historiques ou émergents, ainsi que sur les gagnants et perdants des reconfigurations éventuelles. Les politiques d'économie circulaire se multiplient en France et ailleurs, mais la compréhension du métabolisme urbain reste fragmentaire. Par ailleurs, cette recherche met en évidence les inégalités et conflits spatiaux révélés par le métabolisme urbain et examine les interactions entre trajectoires de développement et trajectoires socio-écologiques. Ce travail, bien que non exhaustif, souligne l'importance d'une approche matérielle des sociétés urbaines face aux enjeux environnementaux locaux et mondiaux, et ouvre des pistes pour mieux comprendre les dynamiques complexes du métabolisme urbain.



Malgré un regain d'intérêt récent pour ce sujet, les études métaboliques demeurent dispersées et souvent centrées sur les métropoles, symboles majeurs de l'urbanisation mondiale et de flux préoccupants de ressources. Ces travaux, majoritairement quantitatifs, négligent le caractère multiscalaire et la dimension socio-écologique du métabolisme urbain, se limitant souvent à une perspective normative orientée vers la transition écologique, sans en interroger les implications profondes. Notre recherche identifie ainsi un défi majeur qui nécessitera l'attention des chercheurs en études urbaines, à savoir comment les villes et les acteurs urbains s'y prennent pour proclamer et mettre en œuvre la circularité, la relocalisation et la diminution, voire la dématérialisation dans, de et par les systèmes d'infrastructure, tout en s'efforçant de capturer de nouveaux flux de ressources et de reconfigurer les grandes infrastructures existantes pour une organisation intensément matérialisée du fonctionnement métabolique.

Nous suggérons que la recherche métabolique pourrait donc utilement se concentrer sur au moins quatre domaines afin de suivre l'évolution de ces dynamiques et pratiques contradictoires. Premièrement, nous continuerons à avoir besoin d'une analyse quantitative des flux dans, à travers et hors des zones urbaines afin de fournir une base de connaissances plus solide pour l'articulation de politiques et d'initiatives de circularité mieux situées et adaptées. Deuxièmement, il faudra s'intéresser à l'économie mouvante de la circularité, et notamment à la manière dont les autorités, les fournisseurs et les entreprises peuvent travailler avec les flux et les intrants réduits, voire accrus, en tirer profit et répartir les avantages et la création de valeur. Troisièmement, des recherches plus approfondies pourraient se concentrer sur les formes et sur les implications des infrastructures fondamentales de la circularité à d'autres échelles, comme celles des quartiers ou des espaces périurbains et ruraux. En réorientant les préoccupations vers les questions d'accès aux initiatives de réutilisation et de recyclage pour les moyens de subsistance des communautés (Pruvost, 2024), il est possible de soutenir des pratiques métaboliques plus inclusives et ascendantes. Il reste des défis à relever pour soutenir et étendre le soutien à plus grande échelle et dans la durée, mais ce type d'initiatives ancrées localement peut s'avérer particulièrement propice pour jeter les bases d'un métabolisme de décroissance. Enfin, il y a la question connexe de l'accès inégal aux futurs flux de déchets et de ressources. La recherche pourrait utilement continuer à suivre la mesure

dans laquelle les circulations mondiales de ressources (y compris les déchets) sont dominées par certains acteurs, et qui ont la capacité d'importer et de payer pour ces flux. Les implications spatiales et sociales plus larges d'une éventuelle recentralisation, c'est-à-dire façonnées par et pour certains territoires, sont une question cruciale qui mérite d'être explorée plus avant.

### Rupture du régime métabolique dominant

La circulation contemporaine des flux dans les territoires s'inscrit majoritairement dans une consolidation du régime métabolique dominant (Barles et Bahers, 2019), marqué par une logique matérialiste, productiviste et expansionniste. Bien que les politiques de transition écologique, telles que l'économie circulaire, visent à transformer ce système, elles tendent plutôt à consolider les infrastructures existantes, accentuant la circulation extensive de flux matériels et contrecarrant les objectifs de réduction des déchets, de relocalisation et de dématérialisation. Cette dynamique perpétue des pratiques systémiques non durables et compromet la possibilité d'une véritable transition vers un modèle de décroissance matérielle ou circulaire (Savini, 2023).



Les approches actuelles, souvent centrées sur les métropoles et majoritairement quantitatives, négligent les dimensions multiscalaires et socio-écologiques du métabolisme territorial. Elles se limitent fréquemment à des visions normatives de la transition écologique sans interroger les implications profondes de ces politiques. Par ailleurs, la survalorisation de signaux faibles comme les circuits courts ou les réseaux décentralisés masque une réalité où les infrastructures de circularité s'adaptent pour capter davantage de flux de ressources, étendant ainsi l'économie linéaire sous couvert de durabilité. De plus, de nombreux territoires tentent d'intégrer les principes de l'économie circulaire à travers des projets tels que les synergies industrielles, le renforcement des initiatives de réemploi, réutilisation et recyclage des matériaux, ainsi que la mise en place de nouvelles collaborations territoriales. Cependant, ces politiques locales peinent à constituer de véritables contrepoids aux logiques dominantes. Elles n'inversent pas les tendances à l'augmentation des empreintes matérielles et énergétiques, largement externalisées aujourd'hui. Ces initiatives s'inscrivent dans des processus marqués par une faible réflexivité sur leur politisation, sur leur spatialisation et sur leur responsabilisation des relations métaboliques entre territoires de consommation et *hinterlands*. Elles ne remettent pas en question le modèle de consommation et production de déchets ni le rôle central des infrastructures métaboliques dans ce système.

Face à ces enjeux, il est crucial de défendre, non pas une rupture métabolique, mais une rupture du régime métabolique dominant. Cela passe par plusieurs déplacements. D'abord, il serait simpliste de tenir les métropoles pour seules responsables des problèmes actuels ou de nier leur capacité à agir. Bien qu'une grande partie de leur empreinte matérielle échappe à leur contrôle direct, elles pourraient adopter des stratégies visant à enrayer l'engrenage de la production et de la consommation. Cela passerait par une politisation du métabolisme urbain, c'est-à-dire par l'analyse critique des rapports de pouvoir et des dominations qui structurent la circulation des flux métaboliques et accentuent les inégalités sociales. Ensuite, il faut repenser et repolitiser le rôle des infrastructures métaboliques. Leur rôle serait alors de contribuer à la décroissance des flux et au rapprochement des territoires. En particulier, les métropoles portuaires doivent revoir

leur fonction actuelle, qui consiste à maximiser la ventilation des flux vers des espaces toujours plus éloignés, afin de privilégier des logiques territoriales et écologiques plus durables. La théorie de la redirection écologique et du démantèlement des infrastructures (Bonnet *et al.*, 2021) est utile pour cibler un apprentissage collectif à hériter et pour fermer les infrastructures qui dégradent l'environnement. Pour autant, il faut mettre à jour et moins naïvement les intérêts des acteurs dans la reproduction de ces processus et visibiliser les conflits nécessaires pour leur remise en question, de même que leurs interdépendances socio-matérielles. C'est par exemple le cas avec la recherche sur les grandes infrastructures de transport en France depuis 1945 de Nelo Magalhães, car les réseaux de transport, qui représentent un tiers du stock mondial de matières, permettent la circulation des marchandises en France et donc l'échange écologique inégal entre des pays au centre de la dynamique capitaliste et des États périphériques (Magalhães, 2024). Cette histoire environnementale rattache les flux et stocks de matières des grandes infrastructures à des structures sociales et spatiales, ce qui permet ainsi de politiser leurs dégâts environnementaux.



Enfin, il est important de développer des politiques métaboliques ambitieuses qui dépassent les contradictions actuelles, où l'organisation matérielle des systèmes territoriaux reste fortement ancrée dans le régime linéaire, « croissantiste » et externalisé. Cela pourrait illustrer une nouvelle solidarité qui relie les villes à leurs territoires environnants, une solidarité métabolique pouvant constituer le socle d'une politique matérielle articulée entre les espaces urbains et régionaux. Cette approche serait particulièrement pertinente pour gérer des ressources clés comme les flux de matériaux de construction, de biomasse et d'énergie. Ces réflexions interterritoriales sont essentielles pour élaborer des stratégies de débrayage du régime métabolique dominant.

# *Bibliographie*


Allen M. G., 2017. Islands, extraction and violence: Mining and the politics of scale in Island Melanesia. *Political Geography*, 57, 81-90. https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2016.12.004

Angelo H., Wachsmuth D., 2015. Urbanizing urban political ecology: a critique of methodological cityism. *International Journal of Urban and Regional Research*, 39 (1), 16-27. https://doi.org/10.1111/1468-2427.12105

Arboleda M., 2016a. In the nature of the non-city: expanded infrastructural networks and the political ecology of planetary urbanisation. *Antipode*, 48 (2), 233-251. https://doi.org/10.1111/anti.12175

Arboleda M., 2016b. Spaces of extraction, metropolitan explosions: planetary urbanization and the commodity boom in Latin America. *International Journal of Urban and Regional Research*, 40 (1), 96-112. https://doi.org/10.1111/1468-2427.12290

Arboleda M., 2020. From spaces to circuits of extraction: value in process and the mine/city nexus. *Capitalism Nature Socialism*, 31 (3), 114-133. https://doi.org/10.1080/10455752.2019.1656758

Athanassiadis A., Christis M., Bouillard P., Vercalsteren A., Crawford R. H., Khan A. Z., 2016. Comparing a territorial-based and a consumption-based approach to assess the local and global environmental performance of cities. *Journal of Cleaner Production*, 173, 112-123. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.068

Augiseau V., Barles S., 2017. Studying construction materials flows and stock: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 153-164. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.002

Ayres R. U., Kneese A. V., 1969. Production, consumption, and externalities. *American Economic Review*, 59 (3), 282-297.

Baccini P., Brunner P. H., 1991. *Metabolism of the Anthroposphere*. Berlin, New York, Springer-Verlag Berlin et Heidelberg GmbH and Co. K, 169 pages.

Bahers J.-B., 2012. Dynamiques des filières de récupération-recyclage et écologie territoriale : l'exemple de la filière de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) en Midi-Pyrénées. Thèse de doctorat, université Toulouse II le Mirail.

Bahers J.-B., Athanassiadis A., Perrotti D., Kampelmann S., 2022. The place of space in urban metabolism research: towards a spatial turn? A review and future agenda. *Landscape and Urban Planning*, 221, 104376. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104376

Bahers J.-B., Barles S., Durand M., 2019. Urban metabolism of intermediate cities: the material flow analysis, hinterlands and the logistics-hub function of Rennes and Le Mans (France). *Journal of Industrial Ecology*, 23 (3), 686-698. https://doi.org/10.1111/jiec.12778

Bahers J.-B., Batardy C., Barbe F., 2019. « Les déchets nantais : exportations et flux cachés du métabolisme urbain », in Madoré F., Rivière J., Batardy C., Charrier S., Loret S., *Atlas social de la métropole nantaise*, mis à jour le 18/12/2019, https://asmn.univ-nantes.fr/index.php?id=289, https://doi.org/10.48649/asmn.289

Bahers J.-B., Batardy C., Yobom N., 2020, « Qui est responsable des inégalités d'impacts écologiques ? », in Madoré F., Rivière J., Batardy C., Charrier S., Loret S., *Atlas social de la métropole nantaise*, mis à jour le 22/05/2020, https://asmn.univ-nantes.fr/index.php?id=446, https://doi.org/10.48649/asmn.446

Bahers J.-B., Durand M., Beraud H., 2017. Quelle territorialité pour l'économie circulaire ? Interprétation des typologies de proximité dans la gestion des déchets. *Flux*, 109-110, 129-141. https://doi.org/10.3917/flux1.109.0129

Bahers J.-B., Rosado L., 2023. The material footprints of cities and importance of resource use indicators for urban circular economy policies: a comparison of urban metabolisms of Nantes-Saint-Nazaire and Gothenburg. *Cleaner Production Letters*, 4, 100029. https://doi.org/10.1016/j.clpl.2023.100029

Baka J., Bailis R., 2014. Wasteland energy-scapes: a comparative energy flow analysis of India's biofuel and biomass economies. *Ecological Economics*, 108, 8-17. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.09.022

Baka J. E., 2017. Political-industrial ecologies of energy, in Solomon B. D., Calvert K. E. (eds), *Handbook on the Geographies of Energy*. Cheltenham, Edward Elgar Publishing, collection « Social and Political Science », p. 477-489.

Balaud L., Chopot A., 2021. *Nous ne sommes pas seuls. Politique des soulèvements terrestres*. Paris, Éditions du Seuil, 432 pages.

Barbe F., Maillard J., 2021. Bidonvilles, précarité et antitsiganisme dans l'agglomération nantaise (1/2). Vivre et habiter en bidonvilles. *Atlas social de la Métropole nantaise*. https://doi.org/10.48649/asmn.647

Barles S., 2009. Urban metabolism of Paris and its region. *Journal of Industrial Ecology*, 13 (6), 898-913. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00169.x

Barles S., 2010. Society, energy and materials: the contribution of urban metabolism studies to sustainable urban development issues. *Journal of Environmental Planning and Management*, 53 (4), 439-455. https://doi.org/10.1080/09640561003703772



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. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.07.027

Barles S., 2017. Écologie territoriale et métabolisme urbain : quelques enjeux de la transition socioécologique. *Revue d'économie régionale et urbaine*, décembre, 5, 819-836. https://doi.org/10.3917/reru.175.0819

Barles S., Abbadie L., Lehec É., Paddeu F., Thébault E., 2020. 7. L'urbain, un objet socio-écologique ?, in Adisson F., Blanc N., Coutard O., Frouillou L., Rassat F. (eds), *Pour la recherche urbaine*. Paris, CNRS Éditions, p. 141-159. https://doi.org/10.4000/books.editionscnrs.37088

Barles S., Bahers J.-B., 2019. Transition ou consolidation du régime dominant : le métabolisme urbain en question. *Flux*, 116-117 (2), 1-5. https://doi.org/10.3917/flux1.116.0001

Barles S., Poux X., Lumbroso S., Barataud F., Petit C., Garnier J., Billen G., Esculier F., Devemy R., Dietrich I., 2022. *Un scénario post-métropolitain pour le bassin de la Seine. Quelle co-évolution des systèmes alimentaires et territoriaux ?*. Rapport de recherche. Programme Piren Seine. https://www.academia.edu/download/104347582/document.pdf

Bassens D., Keblowski W., Lambert D., 2020. Placing cities in the circular economy: neoliberal urbanism or spaces of socio-ecological transition?. *Urban Geography*, 41 (6), 893-897. https://doi.org/10.1080/02723638.2020.1788312

Batterbury S. P. J., Kowasch M., Bouard S., 2020. The geopolitical ecology of New Caledonia: territorial re-ordering, mining, and Indigenous economic development. *Journal of Political Ecology*, 27 (1). https://doi.org/10.2458/v27i1.23812

Belghith N. B. H., Takamatsu S., Razafimanantsoa Harivelo F. N., Sharma N., Mahdi S., 2018. *Comoros Poverty Assessment*, 125069. The World Bank, p. 1-40. http ://documents.banquemondiale.org/curated/fr/269921528113279530/Comoros-Poverty-Assessment

Billen G., Garnier J., Barles S., 2012. History of the urban environmental imprint: introduction to a multidisciplinary approach to the long-term relationships between Western cities and their hinterland. *Regional Environmental Change*, 12 (2), 249-253. https://doi.org/10.1007/s10113-012-0298-1

Billen G., Le Noë J., Anglade J., Garnier J., 2017. Bio, autonome et Demitarien : un scénario exploratoire radical du système agro-alimentaire français basé sur la reconnexion de l'agriculture et de l'élevage. Colloque RMT SpyCE Les polycultures-élevages : valoriser leurs atouts pour la transition agro-écologique (Dijon).

Billen G., Toussaint F., Peeters P., 1983. *L'écosystème Belgique : essai d'écologie industrielle*. Bruxelles, Belgique, Centre de recherche et d'information socio-politiques, 163 pages.

Birkmann J., 2006. Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: Conceptual frameworks and definitions, in Birkmann J., UN University, *Measuring vulnerability to natural hazard: towards disaster resilient societies*. Tokyo, New York, United Nations University, p. 9-54.

Blaszkiewicz H., Choplin A., 2024. Holes and towers: spatialising the places of concrete in Greater Geneva's metabolism. *disP – The Planning Review*, 60 (2), 52-63. https://doi.org/10.1080/02513625.2024.2424107

Blot D., 2018. Les déchets et le désordre : comment les habitants prennent-ils en main leur environnement ?. *Environnement et quartiers populaires*. https://hal.science/hal-03862063/document

Bognon S., 2014. Les transformations de l'approvisionnement alimentaire dans la métropole parisienne. Trajectoire socio-écologique et construction de proximités. Thèse de doctorat, université Paris 1. https://inria.hal.science/tel-01175746/

Bognon S., 2017. Towards the reterritorialisation of food supply networks in Paris? Three approaches to understanding proximity. *Flux*, 109-110 (3), 118-128. https://doi.org/10.3917/flux1.109.0118

Bognon S., L'Her G., Lejoux P., Buclet N., 2020. « 8. De la ville des réseaux à la ville des flux. Enjeux techniques, sociaux et politiques d'une appréhension de l'urbain par les flux », in Adisson F., Barles S., Blanc N., Coutard O., Frouillou L., Rassat F. (dir.), *Pour la recherche urbaine*. Paris, CNRS Éditions, p. 161-180.

Bohle H.-G. V., 2001. Vulnerability and criticality: perspectives from social geography. *Newsletter of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, Bonn*, IHDP Update 2/2001, 2, 1-7.

Bolger K., Doyon A., 2019. Circular cities: exploring local government strategies to facilitate a circular economy. *European Planning Studies*, 27 (11), 2184-2205. https://doi.org/10.1080/09654313.2019.1642854

Bollin C., Cárdenas C., Hahn H., Vatsa K. S., 2003. *Disaster Risk Management by Communities and Local Governments, Washington, DC: Inter-American Development Bank*. Washington DC, Inter-American Development Bank. https://doi.org/10.18235/0008775

Bond A., Lavers J., 2017. *Pristine paradise to rubbish dump: the same Pacific island, 23 years apart*, *The Conversation*. http://theconversation.com/pristine-paradise-to-rubbish-dump-the-same-pacific-island-23-years-apart-80811

Bonneuil C., 2022. Terre, in Fassin D. (dir.), *La Société qui vient*. Paris, Éditions du Seuil, p. 37.

Bookchin M., 1990. *The Philosophy of Social Ecology: Essays on Dialectical Naturalism*. Montréal, Black Rose Books, 208 pages.

Boudreau J.-A., Hamel P., Jouve B., Keil R., 2006. Comparing metropolitan governance: the cases of Montreal and Toronto. *Progress in Planning*, 66 (1), 7-59. https://doi.org/10.1016/j.progress.2006.07.005

Boussougou G. B., Brou Y. T., Mohamed I., 2015. Changements de la couverture forestière dans l'île d'Anjouan entre 1995 et 2014. Sageo 2015 Spatial Analysis and GEOmatics. Actes de la 11e conférence internationale annuelle Spatial Analysis and GEOmatics Hammamet, Tunisie, 23 novembre, 2015, p. 14.

Bradley K., Persson O., 2022. Community repair in the circular economy – fixing more than stuff. *Local Environment*, 27 (10-11), 1321-1337. https://doi.org/10.1080/13549839.2022.2041580

Bradshaw J., Jit Singh S., Tan S.-Y., Fishman T., Pott K., 2020. GIS-based material stock analysis (MSA) of climate vulnerabilities to the tourism industry in Antigua and Barbuda. *Sustainability*, 12 (19), 8090. https://doi.org/10.3390/su12198090

Brenner N., 2009. What is critical urban theory?. *City*, 13 (2-3), 198-207. https://doi.org/10.1080/13604810902996466

Brenner N., 2014. *Implosions/explosions: towards a study of planetary urbanization*. Berlin, Jovis Verlag, 560 pages.

Broto V. C., Allen A., Rapoport E., 2012. Interdisciplinary perspectives on urban metabolism. *Journal of Industrial Ecology*, 16 (6), 851-861. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00556.x

Buck N. T., While A., 2021. The urban bioeconomy: extracting value from the ecological and biophysical. *Journal of Environmental Planning and Management*, 64 (2), 182-201. https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1763931

Buclet N. (dir.), 2015. *Essai d'écologie territoriale. L'exemple d'Aussois en Savoie*. Paris, CNRS Éditions, 218 pages.

Bulkeley H., Castán Broto V., Maassen A., 2014. Low-carbon transitions and the reconfiguration of urban infrastructure. *Urban Studies*, 51 (7), 1471-1486. https://doi.org/10.1177/0042098013500089

Cahen-Fourot L., Magalhães N., 2020. Matter and regulation: socio-metabolic and accumulation regimes of French capitalism since 1948. Ecological Economic Papers 34. https://epub.wu.ac.at/7565/

Cecchin A., 2016. Material flow analysis for a sustainable resource management in island ecosystems. *Journal of Environmental Planning and Management*, 60 (9), 1-20. https://doi.org/10.1080/09640568.2016.1246997

Charles L., Emelianoff C., Ghorra-Gobin C., Roussel I., Roussel F.-X., Scarwell H.-J., 2007. Les multiples facettes des inégalités écologiques. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, 11 (2), dossier 9. https://doi.org/10.4000/developpementdurable.3892

Charmes É., 2023. L'écologie politique contre les métropoles ?. La Vie des idées. https://laviedesidees.fr/L-ecologie-politique-contre-les-metropoles

Chen S., Chen B., Feng K., Liu Z., Fromer N., Tan X., Alsaedi A., Hayat T., Weisz H., Schellnhuber H. J., Hubacek K., 2020. Physical and virtual carbon metabolism of global cities. *Nature Communications*, 11 (1), 182. https://doi.org/10.1038/s41467-019-13757-3

Chesnel K., Devisme L., 2020. La ville en mode « démonstrateur urbain » : *learning from* Nantes City Lab. *Revue internationale d'urbanisme*, Aperau (L'urbain en ses objets), 9. https://hal.science/hal-03178858

Choplin A., 2020a. Cementing Africa: cement flows and city-making along the West African corridor (Accra, Lomé, Cotonou, Lagos). *Urban Studies*, 57 (9), 1977-1993. https://doi.org/10.1177/0042098019851949

Choplin A., 2020b. *Matière grise de l'urbain : La vie du ciment en Afrique*. Les Acacias, Métis Presses, édition illustrée, 252 pages.

Clift R., Druckman A. (eds), 2016. *Taking stock of industrial ecology*. Cham, Springer International Publishing, 373 pages. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20571-7

Cole S., 2012. A political ecology of water equity and tourism: a case study from Bali. *Annals of Tourism Research*, 39 (2), 1221-1241. https://doi.org/10.1016/j.annals.2012.01.003

Conrad E., Cassar L. F., 2014. Decoupling economic growth and environmental degradation: reviewing progress to date in the small island state of Malta. *Sustainability*, 6 (10), 6729-6750. https://doi.org/10.3390/su6106729

Corvellec H., Stowell A. F., Johansson N., 2022. Critiques of the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 26 (2), 421-432. https://doi.org/10.1111/jiec.13187

Corvellec H., Zapata Campos M. J., Zapata P., 2013. Infrastructures, lock-in, and sustainable urban development: the case of waste incineration in the Göteborg Metropolitan Area. *Journal of Cleaner Production* (numéro spécial : Advancing sustainable urban transformation), 50, 32-39. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.009

Cousins J. J., Newell J. P., 2015. A political-industrial ecology of water supply infrastructure for Los Angeles. *Geoforum*, 58, 38-50. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2014.10.011

Coutard O., Florentin D., 2022. Resource ecologies, urban metabolisms, and the provision of essential services. *Journal of Urban Technology*, 29 (1), 1-10. https://doi.org/10.1080/10630732.2021.2001718

Coutard O., Florentin D., 2024. Researching infrastructures and cities: origins, debates, openings, in Coutard O., Florentin D. (eds), *Handbook of Infrastructures and Cities*. Cheltenham, Edward Elgar Publishing, collection « Geography, Planning and Tourism 2024 », p. 1-49. https://doi.org/10.4337/9781800889156.00009

Coutard O., Hanley R., Zimmerman R., 2004. *Sustaining urban networks: the social diffusion of large technical systems*. Londres, Routledge, première édition, 256 pages.

Coutard O., Rutherford J., 2009. Les réseaux transformés par leurs marges : développement et ambivalence des techniques « décentralisées ». *Flux*, 76-77, 6-13. https://doi.org/10.3917/flux.076.0006

D'Alisa G., Demaria F., Kallis G., 2014. *Degrowth: a vocabulary for a new era*. Londres, Routledge, 249 pages.

De Lange H. J., Sala S., Vighi M., Faber J. H., 2010. Ecological vulnerability in risk assessment — A review and perspectives. *Science of the Total Environment*, 408 (18), 3871-3879. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.009

Debuisson M., 2014. Les modes d'interaction pour une dynamique territoriale soutenable : un apport à l'écologie territoriale. Thèse de doctorat, université de technologie de Troyes. https://shs.hal.science/tel-01162416/

Decker E. H., Elliott S., Smith F. A., Blake D. R., Rowland F. S., 2000. Energy and material flow through the urban ecosystem. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 685-740. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.685

Deldrève V., Candau J., 2014. Produire des inégalités environnementales justes ?. *Sociologie*, 5 (3), 255-269. https://doi.org/10.3917/socio.053.0255

Demaria F., Schindler S., 2016. Contesting urban metabolism: struggles over waste-to-energy in Delhi, India. *Antipode*, 48 (2), 293-313. https://doi.org/10.1111/anti.12191

Deschenes P. J., Chertow M., 2004. An island approach to industrial ecology: towards sustainability in the island context. *Journal of Environmental Planning and Management*, 47 (2), 201-217. https://doi.org/10.1080/0964056042000209102

Dimenc Gouvernement de Nouvelle-Calédonie, non daté. *Schéma pour la transition énergétique de la Nouvelle-Calédonie*, p. 130. https://gouv.nc/sites/default/files/atoms/files/projet_de_schema_pour_la_transition_energetique_de_la_nouvelle-caledonie.pdf

Dorninger C., Hornborg A., Abson D. J., von Wehrden H., Schaffartzik A., Giljum S., Engler J.-O., Feller R. L., Hubacek K., Wieland H., 2021. Global patterns of ecologically unequal exchange: implications for sustainability in the 21st century. *Ecological Economics*, 179, 106824. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106824

Dunlap A., 2021. Does renewable energy exist? Fossil fuel+ technologies and the search for renewable energy, in Batel S., Rudolp D., *A Critical Approach to the Social Acceptance of Renewable Energy Infrastructures. Going beyond Green Growth and Sustainability*. Cham, Springer International Publishing, p. 83-102. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73699-6_5

Durand M., 2012. Mesurer les inégalités environnementales et écologiques dans les villes en développement : déchets et eaux usées à Lima. *Flux*, 89-90 (3-4), 67-78. https://doi.org/10.3917/flux.089.0067

Durand M., Jaglin S., 2012. Inégalités environnementales et écologiques : quelles applications dans les territoires et les services urbains ?. *Flux*, 89-90, 4-14. https://doi.org/10.3917/flux.089.0004

Duro J. A., Schaffartzik A., Krausmann F., 2018. Metabolic inequality and its impact on efficient contraction and convergence of international material resource use. *Ecological Economics*, 145, 430-440. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.029

Duru M., Therond O., 2023. Paradigmes et scénarios de transition des systèmes alimentaires pour la neutralité carbone. *Cahiers Agricultures*, 32, 23. https://doi.org/10.1051/cagri/2023016

Eckelman M. J., Ashton W., Arakaki Y., Hanaki K., Nagashima S., Malone-Lee L. C., 2014. Island waste management systems. *Journal of Industrial Ecology*, 18 (2), 306-317. https://doi.org/10.1111/jiec.12113

Eckelman M. J., Chertow M. R., 2009. Using material flow analysis to illuminate long-term waste management solutions in Oahu, Hawaii. *Journal of Industrial Ecology*, 13 (5), 758-774. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00159.x

Emelianoff C., 2008. La problématique des inégalités écologiques, un nouveau paysage conceptuel. *Écologie politique*, 35 (1), 19-31. https://doi.org/10.3917/ecopo.035.0019

Emelianoff C., 2015. La ville durable, une notion fossile ?, in Barré R., Lavoux T., Piveteau V. (dir.), *Un demi-siècle d'environnement entre science, politique et prospective*. Versailles, Éditions Quæ, p. 137-144.

Erkman S., 2004. *Vers une écologie industrielle*. Paris, Charles Léopold Mayer, deuxième édition, 251 pages.

Ernstson H., Lawhon M., Makina A., Millington N., Stokes K., Swyngedouw E., 2021. Turning livelihood to rubbish?: The politics of value and valuation in South Africa's urban waste sector in

Keith M., Aruska de Souza Santos A. (eds), *African cities and collaborative futures. Urban platforms and metropolitan logistics*. Manchester, Manchester University Press, p. 96-120.

Ernstson H., Swyngedouw E., 2018. *Urban political ecology in the anthropo-obscene: interruptions and possibilities*. Londres, Routledge, 469 pages.

European Commission, 2022. *Circular cities and regions initiative*. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/environment/circular-economy/circular-cities-and-regions-initiative_en

European Parliament, 2022. *Resource efficiency and the circular economy*. https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/76/resource-efficiency-and-the-circular-economy

Eurostat, 2018. *Economy-wide material flow accounts handbook*. Publications Office. https://doi.org/10.2785/158567

Faburel G., 2012. La ville durable aux défis des injustices environnementales. Constats empiriques et enjeux sociopolitiques. *Flux*, 89-90 (3), 15-29. https://doi.org/10.3917/flux.089.0015

FAO, 2018. *FAO statistical database*. Rome, Food and Agriculture Organization. http://www.fao.org/faostat/fr/#country/45

Fetzel T., Petridis P., Noll D., Singh S. J., Fischer-Kowalski M., 2018. Reaching a socio-ecological tipping point: overgrazing on the Greek island of Samothraki and the role of European agricultural policies. *Land Use Policy*, 76, 21-28. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.042

Fischer-Kowalski M., 1998. Society's metabolism. *Journal of Industrial Ecology*, 2 (1), 61-78. https://doi.org/10.1162/jiec.1998.2.1.61

Fischer-Kowalski M., Krausmann F., Giljum S., Lutter S., Mayer A., Bringezu S., Moriguchi Y., Schütz H., Schandl H., Weisz H., 2011a. Methodology and indicators of economy-wide material flow accounting. *Journal of Industrial Ecology*, 15 (6), 855-876. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00366.x

Fischer-Kowalski M., Swilling M., von Weizsacker E. U., Ren Y., Moriguchi Y., Crane W., Krausmann F. K., Eisenmenger N., Giljum S., Hennicke P., Kemp R., Romero Lankao P., Siriban Manalang A. B., Sewerin S., 2011b. Decoupling: natural resource use and environmental impacts from economic growth. Technical Report. United Nations Environment Programme. https://scholar.sun.ac.za:443/handle/10019.1/14631

Flynn A., Hacking N., 2019. Setting standards for a circular economy: a challenge too far for neoliberal environmental governance?. *Journal of Cleaner Production*, 212, 1256-1267. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.257

Foster J. B., 1999. Marx's theory of metabolic rift: classical foundations for environmental sociology. *American Journal of Sociology*, 105 (2), 366-405. https://doi.org/10.1086/210315

Galan J., Perrotti D., 2019. Incorporating metabolic thinking into regional planning: the case of the Sierra Calderona strategic plan. *Urban Planning*, 4 (1), 152-171. https://doi.org/10.17645/up.v4i1.1549

Gandy M., 2014. *The Fabric of Space: Water, Modernity, and the Urban Imagination*. Cambridge, MIT Press, 363 pages.

Gandy M., 2018. Cities in deep time. *City*, 22 (1), 96-105. https://doi.org/10.1080/13604813.2018.1434289

Gandy M., 2022. Urban political ecology: a critical reconfiguration. *Progress in Human Geography*, 46 (1), 21-43. https://doi.org/10.1177/03091325211040553

Garcier R., Rocher L., Verdeil É., 2017. Introduction : circulation des matières, économies de la circularité. *Flux*, 108 (2), 1-7. https://doi.org/10.3917/flux1.108.0001

Geddes P., 1915. *Cities in evolution: an introduction to the town planning movement and to the study of civics*. Londres, Williams, 446 pages.

Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S., 2016. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007

Ginard-Bosch F. J., Ramos-Martín J., 2016. Energy metabolism of the Balearic Islands (1986-2012). *Ecological Economics*, 124, 25-35. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.12.012

Girardet H., 1996. *The Gaia Atlas of Cities: New Directions for Sustainable Urban Living*. UN-Habitat, 204 pages.

Goldstein B., Newell J. P., 2020. How to track corporations across space and time. *Ecological Economics*, 169, 106492. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106492

Görg C., Plank C., Wiedenhofer D., Mayer A., Pichler M., Schaffartzik A., Krausmann F., 2019. Scrutinizing the Great Acceleration: The Anthropocene and its analytic challenges for social-ecological transformations. *The Anthropocene Review*, 7 (1). https://doi.org/10.1177/2053019619895034

Gössling S., 2003. *Tourism and development in tropical islands: political ecology perspectives*. Cheltenham, Edward Elgar, 310 pages.

Gravagnuolo A., Angrisano M., Fusco Girard L., 2019. Circular economy strategies in eight historic port cities: criteria and indicators towards a circular city assessment framework. *Sustainability*, 11 (13), 3512. https://doi.org/10.3390/su11133512

Gregson N., Crang M., Fuller S., Holmes H., 2015. Interrogating the circular economy: the moral economy of resource recovery in the EU. *Economy and Society*, 44 (2), 218-243.



Guibrunet L., Sanzana Calvet M., Castán Broto V., 2016. Flows, system boundaries and the politics of urban metabolism: waste management in Mexico City and Santiago de Chile. *Geoforum*, 85, 353-367. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2016.10.011

Guillibert P., 2021. *Terre et capital : Pour un communisme du vivant*. Paris, Éditions Amsterdam/Multitudes, première édition, 260 pages.

Gustafson S., 2021. « We dredge because it doesn't work »: urban political ecology and the uneven geographies of sediment metabolism. *Urban Geography*, 42 (8), 1099-1118. https://doi.org/10.1080/02723638.2020.1748296

Haberl H., Fischer-Kowalski M., Krausmann F., Winiwarter V. (eds), 2016. *Social ecology: society-nature relations across time and space*. New York, Springer International Publishing, 610 pages. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33326-7

Haraway D. J., 2016. *Staying with the trouble: making kin in the Chthulucene*. Durham, Duke University Press, 312 pages.

Harrison C., Popke J., 2018. Geographies of renewable energy transition in the Caribbean: reshaping the island energy metabolism. *Energy Research and Social Science*, 36, 165-174. https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.11.008

Hecht G., 2011. *Entangled Geographies: Empire and Technopolitics in the Global Cold War*. Cambridge, MIT Press, 348 pages.

Herbelin A., 2018. Écologie territoriale et trajectoires de transitions : le cas du Rhône-Médian. Thèse de doctorat, université Grenoble Alpes.

Hetherington K. (ed.), 2018. *Infrastructure, Environment, and Life in the Anthropocene*. Durham, Duke University Press, 368 pages.

Hickel J., Brockway P., Kallis G., Keyßer L., Lenzen M., Slameršak A., Steinberger J., Ürge-Vorsatz D., 2021. Urgent need for post-growth climate mitigation scenarios. *Nature Energy*, 6 (8), 766-768. https://doi.org/10.1038/s41560-021-00884-9

Higuera P., 2019. Évaluation technico-économique des débouchés de valorisation des scories de Nickel. Territoire : Nouvelle-Calédonie. Master 2 Environnement, Énergie & Transports. Institut d'administration des entreprises Nantes, économie et management, Université de Nantes, France.

Hobson K., 2016. Closing the loop or squaring the circle? Locating generative spaces for the circular economy. *Progress in Human Geography*, 40 (1), 88-104. https://doi.org/10.1177/0309132514566342

Hodson M., Marvin S., Robinson B., Swilling M., 2012. Reshaping urban infrastructure. *Journal of Industrial Ecology*, 16 (6), 789-800. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00559.x

Holmquist L., Göteborg Energi, 2021. The Swedish experience with local energy planning: implementing the energy hierarchy in Gothenburg. Göteborg Energi, 30 novembre.

Homrich A. S., Galvão G., Abadia L. G., Carvalho M. M., 2018. The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. *Journal of Cleaner Production*, 175, 525-543. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.064

Hornborg A., Martínez-Alier J., 2016. Ecologically unequal exchange and ecological debt. *Journal of Political Ecology*, 23 (1), 328-333. https://doi.org/10.2458/v23i1.20220

Hult A., Larsson J., 2016. Possibilities and problems with applying a consumption perspective in local climate strategies – the case of Gothenburg, Sweden. *Journal of Cleaner Production*, 134, 434-442. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.033

Inostroza L., 2014. Measuring urban ecosystem functions through « Technomass » – A novel indicator to assess urban metabolism. *Ecological Indicators*, 42, 10-19. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.02.035

Inostroza L., Zepp H., 2021. The metabolic urban network: urbanisation as hierarchically ordered space of flows. *Cities*, 109, 103029. https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103029



IPCC 2014. Summary for policymakers in Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A : Global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, , p. 1-32.

IRP, 2019. Global resources outlook 2019: natural resources for the future we want. United Nations Environment Programme.

Jin Y., Wang H., Wang Y., Fry J., Lenzen M., 2021. Material footprints of Chinese megacities. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105758. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105758

Johansson N., Henriksson M., 2020. Circular economy running in circles? A discourse analysis of shifts in ideas of circularity in Swedish environmental policy. *Sustainable Production and Consumption*, 23, 148-156. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.05.005

Joxe S., 2021. La bioéconomie circulaire peut-elle constituer un levier du développement territorial en Pays de la Loire ?. Thèse de doctorat, Le Mans Université.

Kalmykova Y., Rosado L., Patrício J., 2015. Urban economies resource productivity and decoupling: metabolism trends of 1996-2011 in Sweden, Stockholm, and Gothenburg. *Environmental Science and Technology*, 49 (14), 8815-8823. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01431

Kampelmann S., 2020. Wood works: how local value chains based on urban forests contribute to place-based circular economy. *Urban Geography*, 41 (6), 1-4. https://doi.org/10.1080/02723638.2020.1786330

Kirchherr J., Reike D., Hekkert M., 2017. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005

Kneese A. V., Ayres R. U., d'Arge R. C., 1971. *Economics and the environment: a materials balance approach*. Londres, Routledge, première édition, 120 pages.

Korhonen J., Honkasalo A., Seppälä J., 2018. Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041

Kowasch M., 2018. Nickel mining in northern New Caledonia – a path to sustainable development?. *Journal of Geochemical Exploration*, 194, 280-290. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.09.006

Krausmann F., 2013. A city and its hinterland: Vienna's energy metabolism 1800-2006, in Singh S. J., Haberl H., Chertow M., Mirtl M., Schmid M. (eds), *Long term socio-ecological research*. Dordrecht, Springer, p. 247-268. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1177-8_11

Krausmann F., Gingrich S., Eisenmenger N., Erb K.-H., Haberl H., Fischer-Kowalski M., 2009. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, 68 (10), 2696-2705. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007

Krausmann F., Richter R., Eisenmenger N., 2014. Resource use in small island states. *Journal of Industrial Ecology*, 18 (2), 294-305. https://doi.org/10.1111/jiec.12100

Kurniawan F., Adrianto L., Bengen D. G., Prasetyo L. B., 2016. Vulnerability assessment of small islands to tourism: The case of the Marine Tourism Park of the Gili Matra Islands, Indonesia. *Global Ecology and Conservation*, 6, 308-326. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.04.001

Lacoste E., Chalmin P., 2007. *From Waste to Resource: 2006 World Waste Survey*. Washington, Brookings Institution Press, 260 pages.

Lawhon M., Nilsson D., Silver J., Ernstson H., Lwasa S., 2018. Thinking through heterogeneous infrastructure configurations. *Urban Studies*, 55 (4), 720-732. https://doi.org/10.1177/0042098017720149

Lawhon M., Nsangi Nakyagaba G., Karpouzoglou T., 2022. Towards a modest imaginary? Sanitation in Kampala beyond the modern infrastructure ideal. *Urban Studies*, 60 (1). https://doi.org/10.1177/00420980211064519

Lenzen M., Moran D., Kanemoto K., Geschke A., 2013. Building Eora: a global multi-region input-output database at high country and sector resolution. *Economic Systems Research*, 25 (1), 20-49. https://doi.org/10.1080/09535314.2013.769938.

Lepawsky J., 2015. The changing geography of global trade in electronic discards: time to rethink the e-waste problem. *The Geographical Journal*, 181 (2), 147-159. https://doi.org/10.1111/geoj.12077

Liboiron M., 2018. Waste colonialism. *Discard Studies*, 1er novembre. https://discardstudies.com/2018/11/01/waste-colonialism/

Liboiron M., 2021. *Pollution is colonialism*. Durham, Duke University Press, 134 pages.

Liu N., Zhang Y., Fath B. D., 2021, The material metabolism characteristics and growth patterns of the central cities of China's Beijing-Tianjin-Hebei region. *Ecological Modelling*, 448, 109532. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109532

Loftus A., March H., 2016. Financializing desalination: rethinking the returns of big infrastructure. *International Journal of Urban and Regional Research*, 40 (1), 46-61. https://doi.org/10.1111/1468-2427.12342

Lowitt K., Ville A. S., Lewis P., Hickey G. M., 2015. Environmental change and food security: the special case of small island developing states. *Regional Environmental Change*, 15 (7), 1293-1298. https://doi.org/10.1007/s10113-015-0849-3

Magalhães N., 2024. *Accumuler du béton, tracer des routes : Une histoire environnementale des grandes infrastructures*. Paris, La Fabrique Éditions, première édition, 294 pages.

Magalhães N., Fressoz J.-B., Jarrige F., Le Roux T., Levillain G., Lyautey M., Noblet G., Bonneuil C., 2019. The physical economy of France (1830-2015). The history of a parasite?. *Ecological Economics*, 157, 291-300. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.001

Magnan A. K., Duvat V. K. E., 2020. Towards adaptation pathways for atoll islands. Insights from the Maldives. *Regional Environmental Change*, 20 (4), 119. https://doi.org/10.1007/s10113-020-01691-w

Mallet L., Thévard B., 2022. La biorégion en Île-de-France : une société écologique post-rupture. *Les Annales des Mines*, série Responsabilité et environnement, 107 (3), 48-52. https://doi.org/10.3917/re1.107.0048

Malm A., 2018. *The Progress of This Storm: Nature and Society in a Warming World*. Londres, New York, Verso, 256 pages.

Martínez-Alier J., 2012. Environmental justice and economic degrowth: an alliance between two movements. *Capitalism Nature Socialism*, 23 (1), 51-73. https://doi.org/10.1080/10455752.2011.648839

Martínez-Alier J., 2021. Mapping ecological distribution conflicts: The EJAtlas. *The Extractive Industries and Society*, 8 (4). https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.02.003

Martínez-Alier J., Demaria F., Temper L., Walter M., 2016. Changing social metabolism and environmental conflicts in India and South America. *Journal of Political Ecology*, 23 (1), 467-491. https://doi.org/10.2458/v23i1.20252

Martinico-Perez M. F. G., Schandl H., Fishman T., Tanikawa H., 2018. The socio-economic metabolism of an emerging economy: monitoring progress of decoupling of economic growth and environmental

pressures in the philippines. *Ecological Economics*, 147, 155-166. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.01.012

McFarlane C., 2013. Metabolic inequalities in Mumbai. Mumbai: beyond telescopic urbanism. *City*, 17 (4), 498-503. https://doi.org/10.1080/13604813.2013.812354

Meilinger V., Monstadt J., 2022. From the sanitary city to the circular city? Technopolitics of wastewater restructuring in Los Angeles, California. *International Journal of Urban and Regional Research*, 46 (2), 182-201. https://doi.org/10.1111/1468-2427.13014

Meur P. -Y. L., 2010. La terre en Nouvelle-Calédonie : pollution, appartenance et propriété intellectuelle. *Multitudes*, 41 (2), 91-98. https://doi.org/10.3917/mult.041.0091

Mohee R., Mauthoor S., Bundhoo Z. M. A., Somaroo G., Soobhany N., Gunasee S., 2015. Current status of solid waste management in small island developing states: a review. *Waste Management*, 43, 539-549. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.012

Monsaingeon B., 2017. Homo detritus. *Critique de la société du déchet*. Paris, Éditions du Seuil, 209 pages.



Monstadt J., Colen Ladeia Torrens J., Jain M., Macrorie R. M., Smith S. R., 2022. Rethinking the governance of urban infrastructural transformations: a synthesis of emerging approaches. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 55, 101157. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101157

Moore J. W., 2011. Transcending the metabolic rift: a theory of crises in the capitalist world-ecology. *The Journal of Peasant Studies*, 38 (1), 1-46. https://doi.org/10.1080/03066150.2010.538579

Newell J. P., Cousins J. J., 2015. The boundaries of urban metabolism: towards a political-industrial ecology. *Progress in Human Geography*, 39 (6), 702-728. https://doi.org/10.1177/0309132514558442

Newell J. P., Cousins J. J., Baka J., 2017. Political-industrial ecology: an introduction. *Geoforum*, 85, 319-323. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.07.024

O'Brien J., 2006. Planning for growth? The determinantes of aggregates demand in New Zealand, *IPENZ engineering TreNz*, 3 (9).

Ordonez I., Hagy S., 2019. Fixotek: implementing and testing urban reuse and repair centers in Sweden. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 225, 012007. https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012007

Parrinello G., Kondolf G. M., 2021. The social life of sediment. *Water History*, 13 (1), 1-12. https://doi.org/10.1007/s12685-021-00280-w

Peccia T., Meda R., 2017. Les Comores, le Visa Balladur et l'hécatombe au large de Mayotte : une analyse transdisciplinaire de la question complexe des migrations comoriennes. *Confins*, 31. https://doi.org/10.4000/confins.11991

Pecqueux A., Poupin P., Vuillerod J.-B., 2022. Aventures de l'interdisciplinarité : les sciences de la nature et les sciences humaines et sociales face à la question écologique. *Tracés. Revue de sciences humaines*, 22, 7-20. https://doi.org/10.4000/traces.14566.

Peduzzi P., 2014. Sand, rarer than one thinks. *Environmental Development*, 11, 208-218. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2014.04.001

Pelling, M., Uitto, J. I., 2001. Small island developing states: natural disaster vulnerability and global change. *Global Environmental Change Part B : Environmental Hazards*, 3, 2, 49-62. https://doi.org/10.1016/S1464-2867(01)00018-3

Perez J., 2018. Quel potentiel la connaissance du métabolisme territorial de l'île d'Anjouan offre-t-il en termes de mise en œuvre de l'économie circulaire ?. Mémoire de recherche, Université du Mans, master 1 Ville et Environnements urbains.

Perrotti D., Stremke S., 2018. Can urban metabolism models advance green infrastructure planning? Insights from ecosystem services research. *Environment and Planning B : Urban Analytics and City Science*, 47 (4), 2399808318797131. https://doi.org/10.1177/2399808318797131

Petridis P., Fischer-Kowalski M., 2016. Island sustainability: the case of Samothraki, in Haberl H., Fischer-Kowalski M., Krausmann F., Winiwarter V. (eds), *Social Ecology*. Cham, Springer International Publishing, p. 543-557.

Pincetl S., 2012. Nature, urban development and sustainability – What new elements are needed for a more comprehensive understanding?. *Cities*, 29, S32-S37. https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.06.009

Pincetl S., Bunje P., Holmes T., 2012. An expanded urban metabolism method: Toward a systems approach for assessing urban energy processes and causes. *Landscape and Urban Planning*, 107 (3), 193-202. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.06.006

Porse E., Derenski J., Gustafson H., Elizabeth Z., Pincetl S., 2016. Structural, geographic, and social factors in urban building energy use: analysis of aggregated account-level consumption data in a megacity. *Energy Policy*, 96, 179-192. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.06.002

Pruvost G., 2024. *La subsistance au quotidien. Conter ce qui compte*. Paris, La Découverte, 611 pages.

Pugh J., 2018. Relationality and island studies in the Anthropocene. *Island Studies Journal*, 13 (2), 93-110. https://doi.org/10.24043/isj.48

Ragazzi M., Catellani R., Rada E. C., Torretta V., Salazar-Valenzuela X., 2014. Management of municipal solid waste in one of the Galapagos Islands. *Sustainability*, 6 (12), 9080-9095. https://doi.org/10.3390/su6129080



Raimbault N., Batardy C., 2022. Les classes populaires de la métropole nantaise : un groupe social central, une géographie résidentielle doublement périphérique. *Atlas social de la Métropole nantaise*. https://doi.org/10.48649/asmn.737

Ramaswami A., Weible C., Main D., Heikkila T., Siddiki S., Duvall A., Pattison A., Bernard M., 2012. A social-ecological-infrastructural systems framework for interdisciplinary study of sustainable city systems: an integrative curriculum across seven major disciplines. *Journal of Industrial Ecology*, 16 (6), 801-813. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00566.x

Rask N., 2022. An intersectional reading of circular economy policies: towards just and sufficiency-driven sustainabilities. *Local Environment*, 27 (10-11), 1287-1303. https://doi.org/10.1080/13549839.2022.2040467

Rist G., 2018. Le marxisme vert pâle est-il soluble dans le capitalisme ?. *Terrestres*, 15 novembre. https://www.terrestres.org/2018/11/15/le-marxisme-vert-pale-est-il-soluble-dans-le-capitalisme

Romero Lankao P., Qin H., 2011. Conceptualizing urban vulnerability to global climate and environmental change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3 (3), 142-149. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.12.016

Rosado L., Niza S., Ferrão P., 2014. A material flow accounting case study of the lisbon metropolitan area using the urban metabolism analyst model. *Journal of Industrial Ecology*, 18 (1), 84-101. https://doi.org/10.1111/jiec.12083

Rutherford J., 2020. *Redeploying urban infrastructure: the politics of urban socio-technical futures*. Cham, Springer International Publishing, 191 pages. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17887-1

Saito K., 2021. La théorie du métabolisme chez Marx à l'ère de la crise écologique mondiale. *Tracés. Revue de sciences humaines*, 40, 161-182. https://doi.org/10.4000/traces.12425

Salomon T., Couturier C., Jedliczka M., Letz T., Lebot B., 2005. A negawatt scenario for 2005-2050 (p. 189-195). European Council for an Energy-Efficient Economy.

Sauvêtre P., 2021. Éco-communalisme. *Terrains/Théories*, 13. https://doi.org/10.4000/teth.3360

Savini F., 2023. Futures of the social metabolism: Degrowth, circular economy and the value of waste. *Futures*, 150, 103180. https://doi.org/10.1016/j.futures.2023.103180

Sastre S., Carpintero Ó., Lomas P. L., 2015, Regional material flow accounting and environmental pressures: The Spanish case. *Environmental Science & Technology*, 49 (4), 2262-2269. https://doi.org/10.1021/es504438p

Schaffartzik A., Duro J. A., Krausmann F., 2019. Global appropriation of resources causes high international material inequality – Growth is not the solution. *Ecological Economics*, 163, 9-19. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.05.008

Sellier V., Navratil O., Laceby J. P., Allenbach M., Lefèvre I., Evrard O., 2021. Reconstructing the impact of nickel mining activities on sediment supply to the rivers and the lagoon of South Pacific Islands:

lessons learnt from the Thio early mining site (New Caledonia). *Geomorphology*, 372, 107459. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107459

Sessego V., Hébel P., 2019. Consommation durable : l'engagement de façade des classes supérieures. *Consommation et modes de vie, Credoc*, 303, 1-4.

Sinane K., David G., Pennober G., Troadec R., 2011. Fragilisation et modification des formations littorales meubles sur l'île d'Anjouan (Comores) : Quand l'érosion d'origine anthropique se conjugue au changement climatique. *VertigO – la revue électronique en sciences de l'environnement*, 10 (3). https://doi.org/10.4000/vertigo.10528

Singh S. J., Fischer-Kowalski M., Chertow M., 2020. Introduction: The metabolism of islands. *Sustainability*, 12 (22), 9516. https://doi.org/10.3390/su12229516

Singh S. J., Grünbühel C. M., Schandl H., Schulz N., 2001. Social metabolism and labour in a local context: changing environmental relations on Trinket Island. *Population and Environment*, 23 (1), 71-104. https://doi.org/10.1023/A:1017564309651



Solá A. G., Vilhelmson B., 2012. Convergence or divergence? Changing gender differences in commuting in two Swedish urban regions. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 591. https://doi.org/10.4000/cybergeo.25141

Steinberger J. K., Krausmann F., Eisenmenger N., 2010. Global patterns of materials use: A socioeconomic and geophysical analysis. *Ecological Economics*, 69 (5), 1148-1158. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.12.009

Stephan A., Athanassiadis A., 2018. Towards a more circular construction sector: Estimating and spatialising current and future non-structural material replacement flows to maintain urban building stocks. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 248-262. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.022

Swilling M., Hajer M., Baynes T., Bergesen J., Labbé F., Kaviti Musango J., Ramaswami A., Robinson B., Salat S., Suh S., 2018. The weight of cities–Resource requirements of future urbanisation. Paris, UN Environment/IRP.

Swilling M., Robinson B., Marvin S., Hodson M., 2013. City-level decoupling: urban resource flows and the governance of infrastructure transitions. UN environment, GRID-Arendal.

Swyngedouw E., 2005. Circulations and metabolisms: (Hybrid) Natures and (Cyborg) cities, in Heynen N., Kaika M., Swyngedouw E. (eds), *In the nature of cities: urban political ecology and the politics of urban metabolism*. Londres, Routledge, 288 pages.

Swyngedouw E., 2006. Circulations and metabolisms: (Hybrid) Natures and (Cyborg) cities. *Science as Culture*, 15 (2), 105-121. https://doi.org/10.1080/09505430600707970

Taglioni F., 2008. L'île d'Anjouan figure de la balkanisation de l'archipel des Comores. *EchoGéo*. https://doi.org/10.4000/echogeo.7223

Taglioni F. (éd.), 2011. *Insularité et développement durable*. Marseille, IRD éditions, 379 pages.

Tanguy A., Bahers J.-B., Athanassiadis A., 2020. Outsourcing of urban metabolisms and its consequences: A multiscale energy flow analysis of a French port-city. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104951. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104951

Tchokothe R. A., 2018. « Balladur Visa » or « Visa of Death » ? Questioning migration to Europe via the Comoros Archipelago. *Journal of Identity and Migration Studies*, 12, 2, 60-80.

Thompson B. S., 2018. The political ecology of mangrove forest restoration in Thailand: Institutional arrangements and power dynamics. *Land Use Policy*, 78, 503-514. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.07.016

Tongnuanchan P., Benjakul S., 2014. Essential oils: extraction, bioactivities, and their uses for food preservation. *Journal of Food Science*, 79 (7), R1231-R1249. https://doi.org/10.1111/1750-3841.12492

Tsing A., 2012. Unruly edges: mushrooms as companion species: For Donna Haraway. *Environmental Humanities*, 1 (1), 141-154. https://doi.org/10.1215/22011919-3610012

Tsing A. L., Deger J., Keleman A., Zhou F., 2020. La vie plus qu'humaine (introduction), in Tsing A., Deger J., Keleman A., Zhou F., *Feral Atlas: The More-than-Human Anthropocene*. Redwood City, Stanford University Press. https://www.terrestres.org/2019/05/26/la-vie-plus-quhumaine

Turvey R., 2007. Vulnerability assessment of developing countries: the case of small-island developing states. *Development Policy Review*, 25 (2), 243-264. https://doi.org/10.1111/j.1467-7679.2007.00368.x

Tzaninis Y., Mandler T., Kaika M., Keil R., 2021. Moving urban political ecology beyond the « urbanization of nature ». *Progress in Human Geography*, 45 (2), 229-252. https://doi.org/10.1177/0309132520903350

*UN Comtrade: International Trade Statistics*, 2022. https://comtradeplus.un.org/TradeFlow/

Unep, 2019. Sand and sustainability: finding new solutions for environmental governance of global sand resources. Grid-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.

Vialleix M., 2019. L'urbanisme à l'épreuve du métabolisme territorial. Thèse de doctorat, université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.

Villalba B., Zaccai E., 2007. Inégalités écologiques, inégalités sociales : interfaces, interactions, discontinuités ?. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, dossier 9. https://doi.org/10.4000/developpementdurable.3502

Weisz H., Steinberger J. K., 2010. Reducing energy and material flows in cities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2 (3), 185-192. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.05.010

Wiedenhofer D., Fishman T., Lauk C., Haas W., Krausmann F., 2019. Integrating material stock dynamics into economy-wide material flow accounting: concepts, modelling, and global application for 1900-2050. *Ecological Economics*, 156, 121-133. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.09.010

Wiedmann T., Lenzen M., Keyßer L. T., Steinberger J. K., 2020. Scientists' warning on affluence. *Nature Communications*, 11 (1), 3107. https://doi.org/10.1038/s41467-020-16941-y

Wiedmann T. O., Chen G., Barrett J., 2016. The concept of city carbon maps: a case study of Melbourne, Australia. *Journal of Industrial Ecology*, 20 (4), 676-691. https://doi.org/10.1111/jiec.12346

Wiedmann T. O., Schandl H., Lenzen M., Moran D., Suh S., West J., Kanemoto K., 2015. The material footprint of nations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (20), 6271-6276. https://doi.org/10.1073/pnas.1220362110

Wielemaker R., Wilken C., Chen W.-S., Oenema O., Weijma J., 2020. Resource Dynamo: a GIS model to match urban nutrient supply with agricultural demand. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120789. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120789

Wiig A., Karvonen A., McFarlane C., Rutherford J., 2022. From the guest editors *Splintering Urbanism* at 20: Mapping trajectories of research on urban infrastructures. *Journal of Urban Technology*, 29 (1), 1-11. https://doi.org/10.1080/10630732.2021.2005930

Williams J., 2019. Circular cities. *Urban Studies*, 56 (13), 2746-2762. https://doi.org/10.1177/0042098018806133

Winslow J., Coenen L., 2023. Sustainability transitions to circular cities: Experimentation between urban vitalism and mechanism. *Cities*, 142, 104531. https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104531

Zapata Campos M. J., Zapata P., 2017. Infiltrating citizen-driven initiatives for sustainability. *Environmental Politics*, 26 (6), 1055-1078. https://doi.org/10.1080/09644016.2017.1352592

Zapata P., Zapata Campos M. J., 2019. Cities, institutional entrepreneurship and the emergence of new environmental policies: The organizing of waste prevention in the City of Gothenburg, Sweden. *Environment and Planning C : Politics and Space*, 37 (2), 339-359. https://doi.org/10.1177/2399654418783205

Zhang Y., Xia L., Fath B. D., Yang Z., Yin X., Su M., Liu G., Li Y., 2016. Development of a spatially explicit network model of urban metabolism and analysis of the distribution of ecological relationships: case study of Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, 112 (5), 4304-4317. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.052

**Derniers ouvrages parus dans la collection « Indisciplines » :**

*Les Outre-mer face à la bifurcation écologique. Des territoires pionniers ?*
Bérard Y.,
2025, 210 p.

*Coproduction entre savoirs autochtones et sciences. Faire face au changement global*
Roué M., Nakashima D., coord.
2024, 176 p.

*Récits de recherche sur l'eau dans un monde interdisciplinaire*
Collard A.-L., Riaux J., Kuper M., coord.
2024, 172 p.

Coordination éditoriale : Géraldine Doité
Édition : Eline Susset
Mise en page : EliLoCom

Imprimé pour vous par Libri Plureos GmbH (Allemagne)
Dépôt légal : novembre 2026

INDISCIPLINES

Face à l'intensification de l'extraction des ressources naturelles, de leur consommation et du rejet de leurs déchets, qui provoque de graves impacts environnementaux, repenser les relations entre sociétés et environnements constitue un enjeu crucial. Le concept de métabolisme territorial, en croisant plusieurs disciplines et approches écologiques, permet d'envisager les territoires comme des systèmes socio-écologiques complexes, où matières, énergies et relations sociales s'entrelacent. Il interroge les limites des approches technocentrées et anthropocentriques.

Après avoir exploré les apports de l'interdisciplinarité à l'étude du métabolisme urbain, en portant une attention particulière aux inégalités métaboliques et au rôle des infrastructures, cet ouvrage s'appuie sur deux analyses comparatives. Examinant les flux de ressources et leurs déterminants socio-politiques, la première porte sur les territoires de Nantes-Saint-Nazaire et de Göteborg et la seconde sur les espaces insulaires des Comores et de la Nouvelle-Calédonie. Ces travaux révèlent les tensions liées à la mise à l'agenda de l'économie circulaire et les vulnérabilités associées à la circulation des matières.

La compréhension des trajectoires territoriales est ainsi renouvelée en soulignant l'interconnexion des flux, la diversité des profils métaboliques et les frictions épistémologiques. Des pistes de recherche s'ouvrent sur l'histoire des infrastructures et les luttes socio-environnementales.

L'ouvrage s'adresse aux chercheurs et étudiants intéressés par les enjeux socio-environnementaux, ainsi qu'aux professionnels et aux acteurs publics, privés et associatifs de l'urbanisme et de l'aménagement des réseaux urbains et de l'économie circulaire.

Directeur de recherche au CNRS, **Jean-Baptiste Bahers** est membre du laboratoire Espaces et Sociétés (ESO) à Nantes. Ses travaux portent sur le métabolisme urbain et territorial, les politiques d'économie circulaire, la rupture métabolique et le développement de l'écologie territoriale.

Prix TTC : 25 €

ISBN : 978-2-7592-4405-8

Éditions CIRAD, Ifremer, INRAE
www.quae.com

ISSN : 1772-4120
Réf. : 03091