

L'approche du métabolisme urbain : un portrait des modes d'adoption pour le déploiement urbain de l'économie circulaire

Philippe Genois-Lefrançois, Martial Vialleix and Franck Scherrer

Volume 32, Number 3, 2023

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1109394ar>
DOI: <https://doi.org/10.1522/revueot.v32n3.1675>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Chicoutimi

ISSN

1493-8871 (print)
2564-2189 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Genois-Lefrançois, P., Vialleix, M. & Scherrer, F. (2023). L'approche du métabolisme urbain : un portrait des modes d'adoption pour le déploiement urbain de l'économie circulaire. *Revue Organisations & territoires*, 32(3), 33–54. <https://doi.org/10.1522/revueot.v32n3.1675>

Article abstract

This review of the literature is situated at the interface of three research fields with strong potential for synergy: the circular economy, urban metabolism, and urban planning. Our work is firstly part of a broad reflection on the conceptual and methodological approaches likely to stimulate the urban implementation of circular economy. More specifically, urban planning and urban metabolism have been identified as levers to stimulate this territorial transition towards circularity, but their articulation still includes several epistemological and operational grey areas. The objective of our work is therefore to contribute to producing an inventory of the modes of adoption of urban metabolism in favour of circularity, specifically within the framework of urban planning approaches. The aim is to synthesize the existing knowledge and the lines of thinking on the possible repercussions of the metabolic approach as a tool for analysis and action for managing the transition of cities towards the circular economy.



Dossier spécial

L'approche du métabolisme urbain : un portrait des modes d'adoption pour le déploiement urbain de l'économie circulaire

Philippe Genois-Lefrançois^a, Martial Vialleix^b, Franck Scherrer^c

DOI : <https://doi.org/10.1522/revueot.v32n3.1675>

RÉSUMÉ. Cette recension des écrits se positionne au croisement de trois champs de recherche à fort potentiel de synergie : l'économie circulaire, le métabolisme urbain et l'urbanisme. Notre travail s'inscrit d'abord dans une réflexion globale sur les approches conceptuelles et méthodologiques susceptibles de stimuler le déploiement urbain de l'économie circulaire. Plus spécifiquement, l'urbanisme et le métabolisme urbain ont été identifiés comme des leviers pour stimuler cette transition territoriale vers la circularité, mais leur articulation comprend encore plusieurs zones d'ombre épistémologiques et opérationnelles. Notre travail a donc pour objectif de contribuer à produire un état des lieux des modes d'adoption du métabolisme urbain en faveur de la circularité, spécifiquement dans le cadre de démarches d'urbanisme, dans l'optique de synthétiser les connaissances existantes et les pistes de réflexion sur les implications possibles de l'approche métabolique en tant qu'outil d'analyse et d'action pour la gestion de la transition des villes vers l'économie circulaire.

Mots clés : Métabolisme urbain, urbanisme, ville circulaire, économie circulaire, recension des écrits

ABSTRACT. This review of the literature is situated at the interface of three research fields with strong potential for synergy: the circular economy, urban metabolism, and urban planning. Our work is firstly part of a broad reflection on the conceptual and methodological approaches likely to stimulate the urban implementation of circular economy. More specifically, urban planning and urban metabolism have been identified as levers to stimulate this territorial transition towards circularity, but their articulation still includes several epistemological and operational grey areas. The objective of our work is therefore to contribute to producing an inventory of the modes of adoption of urban metabolism in favour of circularity, specifically within the framework of urban planning approaches. The aim is to synthesize the existing knowledge and the lines of thinking on the possible repercussions of the metabolic approach as a tool for analysis and action for managing the transition of cities towards the circular economy.

Key words: Urban metabolism, urban planning, circular city, circular economy, literature review

Introduction

Un domaine de recherche et d'action encore émergent en urbanisme

Un nombre grandissant d'organisations et d'experts internationaux considèrent l'échelle de la ville

comme particulièrement porteuse pour implanter des démarches de transition vers le modèle de l'économie circulaire (ÉC) (Ellen MacArthur Foundation, 2017; Syngellakis et Melgarejo, 2020). En effet, l'ÉC est progressivement adoptée, depuis environ une décennie, comme un référentiel clé de stratégies et de politiques urbaines (Salvatori et collab., 2019).

^a Candidat au doctorat, École d'urbanisme et d'architecture de paysage, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, membre étudiant du Réseau de recherche en économie circulaire du Québec (RRECQ)

^b Candidat au doctorat, Institut Paris Région/UMR Géographie-cités, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

^c Professeur titulaire, École d'urbanisme et d'architecture de paysage, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, membre régulier du Réseau de recherche en économie circulaire du Québec (RRECQ)

Les villes et métropoles d'Amsterdam, de Paris, de Bruxelles et de Londres comptent parmi les pionnières dans l'élaboration de feuilles de route, de politiques publiques et d'expérimentations (Climate-KIC et C40 Cities, 2019; Williams, 2021).

La saisie par les gouvernements urbains de l'ÉC, phénomène encore émergent, a précédé la maturation d'un champ de recherche portant sur l'articulation de ce concept avec les composantes et processus urbains. L'intérêt récent des disciplines spatiales pour ce paradigme économique se traduit donc par une hétérogénéité épistémologique et opérationnelle quant à la définition et à l'implantation de la « ville circulaire » (Marin et De Meulder, 2018a). En ce sens, les connaissances sur les modalités de l'action collective locale destinées à concrétiser cette « utopie rationnelle » sont lacunaires (Ntsondé et Aggeri, 2022; Petit-Boix et Leipold, 2018). Bien qu'encore peu étudié sous cet angle, l'urbanisme gagne en intérêt comme un vecteur clé pour engager une transition des villes vers la circularité (Grisot, 2019; Lukkarinen et collab., 2023). Il apparaît toutefois nécessaire d'y mobiliser des cadres analytiques et méthodologiques susceptibles d'enrichir les contenus et méthodes en faveur de l'ÉC.

À ce titre, l'étude du métabolisme urbain (MU) occupe une place croissante dans la littérature scientifique portant sur les cadres analytiques et opérationnels de l'ÉC à l'échelle des territoires (Lucertini et Musco, 2020). Parallèlement, sur le plan de la pratique, plusieurs gouvernements locaux et organisations se réclament de la perspective métabolique dans le cadre de démarches d'analyse et de planification stratégique en matière de développement durable et d'ÉC (Vialleix, 2021). Or, malgré un fort potentiel d'innovation, l'articulation entre le MU et les démarches d'urbanisme est encore peu étudiée et comprend plusieurs zones d'ombre conceptuelles, méthodologiques et opérationnelles (Oliveira et Vaz, 2021; Roggema, 2019). De plus, la diversité d'appropriations du concept de MU laisse présager la menace d'une confusion épistémologique et sémantique susceptible de diminuer sa puissance heuristique et transformative. Il semble alors essentiel de comprendre les modalités d'articulation entre le

MU et l'urbanisme, de même que de cadrer les différentes appropriations du MU actuellement mobilisées pour le déploiement de l'ÉC.

Un portrait des modalités d'articulation du métabolisme urbain en urbanisme

Le présent article a l'objectif de dresser un état des lieux de la diversité des modes d'incorporation du MU au sein de démarches d'urbanisme de manière à contribuer à clarifier son rôle potentiel au sein de stratégies de déploiement urbain de l'ÉC. Nous tenterons ainsi de répondre à la question exploratoire suivante : Comment l'approche du MU est-elle mobilisée au sein de démarches d'urbanisme ? Il s'agira de décrire et d'analyser les modalités d'application du MU dans le champ de l'urbanisme à partir de travaux conceptuels ou revenant sur des expériences sur le terrain.

Les prochaines parties de cette recension des écrits se déclinent comme suit. La section suivante précise le cadre conceptuel de notre recherche. La section 2 restitue le protocole de recherche, basé sur deux démarches de doctorat en géographie-aménagement. La section 3 est dédiée aux résultats dits généraux de notre recensement d'articles scientifiques. Si des éléments intéressants ont pu être mis en évidence, il nous a semblé opportun d'aller plus loin dans l'analyse en concentrant celle-ci sur un corpus plus restreint de travaux. La section 4 est donc consacrée à ces résultats dits spécifiques, grâce à l'observation de quatre exemples empiriques d'approches métaboliques documentés dans la littérature. Notre analyse se termine par une discussion proposant une lecture globale, transversale et croisée des articles analysés. Enfin, la conclusion est l'occasion de dresser des perspectives de recherche¹.

1. Cadre conceptuel

1.1 L'économie circulaire à l'échelle des territoires

Concept d'abord porté par le discours des acteurs publics et des agences consultantes à partir des années 2000, l'ÉC découle d'un assemblage de notions provenant de différentes écoles de

pensée : économie écologique, pensée du berceau au berceau (cradle to cradle), économie de fonctionnalité, écologie industrielle, biomimétisme et pensée cycle de vie (Beaulieu et collab., 2016). Faisant encore à ce jour l'objet de débats épistémologiques, l'ÉC peut être résumée comme un système d'échange, de production et de consommation consistant à boucler les flux de ressources aux différentes échelles des systèmes socioéconomiques (Aurez et Georgeault, 2019; Kirchherr et collab., 2017). L'ÉC est donc un concept parapluie comprenant un ensemble de stratégies assimilables en deux catégories selon leur position dans les chaînes de valeur : 1) repenser les modes de production/consommation pour limiter l'extraction de ressources; et 2) optimiser l'usage des ressources déjà en circulation (Institut EDDEC et RECYC-QUÉBEC, 2018).

Étant d'abord appréhendée par les sciences environnementales, par la gestion et par le génie, la réflexion sur l'ÉC s'élargit progressivement à l'échelle territoriale à partir du milieu des années 2010. Mentionnons l'exception du cas chinois, qui fait l'objet, dès 2006, d'articles empiriques, normatifs et théoriques sur des villes et quartiers industriels circulaires (Chen et Tang, 2007; Du et Liu, 2006). Cet élan de spatialisation de l'ÉC, d'abord européen, s'inscrit au départ dans les champs de la géographie économique et de l'écologie industrielle. À ce propos, la littérature francophone a fortement contribué à éclairer bon nombre de réflexions touchant aux politiques publiques; aux cadres institutionnels et légaux; aux composantes spatiales et aux échelles d'intervention des stratégies; de même qu'aux dynamiques de développement circulaire local (Bahers et collab., 2017; Bourdin et Maillefert, 2020; Dermine-Brullot et Torre, 2020; Garcier et collab., 2017; Maillefert et Robert, 2017; Niang et collab., 2020).

1.2 La ville circulaire

C'est ensuite à l'aube des années 2020 qu'on observe la maturation d'une réflexion savante spécifique à la « ville circulaire », celle-ci s'inscrivant dans un double contexte. Le premier consiste dans la reconnaissance du rôle de premier plan que les villes sont portées à jouer dans la transition

socioécologique. Outre leur lourd fardeau environnemental, elles intègrent des dimensions matérielles et intangibles leur procurant une forte « agentivité transformatrice » : concentration de ressources, poids dans les processus économiques mondiaux, structures de gouvernance locale et écosystèmes d'acteurs de l'innovation (Grosse, 2020; Hölscher et Frantzeskaki, 2021; Scherrer et Abrassart, 2016).

Le second point réside dans l'enrichissement des interprétations conceptuelles de la « ville circulaire » issue d'une diversification des regards disciplinaires lui étant adressés : aménagement, science des transitions, géographie urbaine et écologie territoriale (Obersteg et collab., 2019; Paiho et collab., 2020; Williams, 2019). Cela invite à percevoir les villes comme des systèmes multifacettes où les stratégies d'ÉC doivent considérer les processus d'urbanisation; le sol; les systèmes sociotechniques des flux de ressources; les structures de gouvernance; les écosystèmes d'acteurs; ainsi que la forme et les fonctions urbaines. Cette diversification a permis d'élargir et d'enrichir les liens entre ÉC et villes.

Dans cette optique, et malgré l'absence d'un consensus scientifique, l'acception la plus exhaustive de la ville circulaire se décline comme un système complexe et adaptatif intégrant diverses stratégies de circularité au sein de ses structures, fonctions et activités socioéconomiques (Williams, 2019). La ville circulaire implique de placer au centre des préoccupations planificatrices la limitation des flux entrants et sortants de matières et d'énergie de son territoire (Paiho et collab., 2020; Williams, 2021). Or, ces flux sont aussi considérés au sein de dynamiques multiscalaires, notamment en ce qui a trait aux approvisionnements (Bahers et collab., 2017; Bahers et Giacchè, 2018). Nous inscrivant dans les propos d'Aggeri (2021) portant sur l'ÉC, nous considérons la ville circulaire comme une « utopie rationnelle » permettant d'ouvrir une réflexion sur les stratégies d'action collective visant à limiter les impacts matériels des villes. Ici, le champ de l'urbanisme semble un champ d'action de première importance.

1.3 L'urbanisme pour le déploiement urbain de l'économie circulaire

Nous entendons l'urbanisme, en accord avec François Ascher, comme « l'ensemble des techniques et des connaissances utilisées pour étudier, concevoir, réaliser et gérer des villes, des morceaux de villes et des espaces urbains » (2010, p. 262). Son intérêt pour la ville circulaire réside dans le fait qu'il s'agit d'un champ de l'action collective agissant sur la gestion et sur la disposition spatiale des ressources territoriales, mais représentant aussi une arène de décisions stratégiques (Turcu et Gillie, 2020). Aussi, par son caractère transversal et interdisciplinaire, l'urbanisme permet de réaliser des programmes mobilisant simultanément divers acteurs et secteurs d'activités, répondant au nécessaire décloisonnement des stratégies de circularité (van der Leer et collab., 2018). Approche intrinsèquement spatialisée, l'urbanisme répond à la nécessité d'implanter des initiatives circulaires adaptées au contexte local (place-based) (Dabrowski et collab., 2019). De plus, il dispose de divers instruments analytiques et opérationnels pouvant orienter les parties prenantes urbaines vers l'implantation de l'ÉC au sein du cadre bâti : plans stratégiques et d'usage, réglementation, planification collaborative, urbanisme transitoire et tactique, projets urbains pilotes, etc.

L'urbanisme porte l'avantage de lier les processus et composantes urbains avec les principes de circularité, soit de favoriser ce que Williams (2021) nomme le *circular development*, ici traduit comme déploiement urbain de l'ÉC. Le déploiement urbain de l'ÉC comprend un ensemble de stratégies, avec pour leviers les composantes urbaines, visant une implantation systémique des principes de circularité dans les processus et systèmes urbains. Les stratégies d'ÉC sont appliquées sur les flux et stocks de ressources à travers des interventions sur l'usage du sol, les infrastructures, le cadre bâti, les activités socioéconomiques et les modes de consommation. En ce sens, le champ de l'urbanisme semble intrinsèquement lié à la transition des villes vers la circularité (Van den Berghe et Vos, 2019; Williams, 2020).

Toutefois, à l'heure actuelle, les contours et modalités du rôle de l'urbanisme dans ces transitions sont en cours de construction et semblent s'incarner dans une diversité d'approches et de projets avec des retombées différenciées (ADEME, 2020; Grisot, 2019). Déjà critiqué en 1990 par Gabriel Dupuy pour avoir délaissé son rôle dans l'organisation des réseaux techniques, l'urbanisme peine encore à se saisir pleinement de sa dimension matérielle, soit d'appréhender son rôle dans l'approvisionnement, l'accumulation et le rejet de ressources des villes (Barles, 2015). Pourtant, il s'agit d'un élément clé de la ville circulaire. En effet, en modulant le foncier, les infrastructures, la forme urbaine ainsi que le développement local, l'urbanisme a une influence protéiforme sur la configuration et sur l'intensité des flux de ressources. Cette dimension matérielle est toutefois peu considérée dans les orientations traditionnelles d'urbanisme durable (Bogunovich, 2009; Roggema, 2019).

Le déploiement urbain de l'ÉC nécessite donc d'approfondir la réflexion sur les outils analytiques et susceptibles d'orienter les approches d'urbanisme à travers une approche systémique qui considère les flux de ressources impliqués dans les différents sous-systèmes urbains. À ce titre, le MU s'illustre progressivement, dans la littérature comme dans la pratique, comme une approche d'analyse susceptible d'outiller les parties prenantes territoriales dans l'intégration des composantes urbaines et des flux de ressources lors de la mise en place d'orientations stratégiques.

1.4 Le métabolisme urbain : un objet de recherche hétérogène regroupant des approches diverses

La lecture métabolique des territoires constitue une analogie organiciste qui conçoit la dimension systémique des interrelations matérielles entre les systèmes anthropiques et naturels (Castán Broto et collab., 2012; Mehmood, 2010). Dans cette perspective, le métabolisme est considéré comme une métaphore « aux frontières » de différentes communautés scientifiques lui attribuant des interprétations contrastées, mais connaissant également certaines filiations (Newell et Cousins,

2014). En effet, à la suite de sa première transposition aux sociétés par Karl Marx au XIX^e siècle, la trajectoire intellectuelle du métabolisme est marquée par une diversification théorique et méthodologique émanant des champs se l'appropriant : écologies sociale, politique, industrielle, urbaine et territoriale; architecture; et sociologie (Castán Broto et collab., 2012; Fischer-Kowalski, 1998; Zhang, 2013).

La transposition du métabolisme à l'objet urbain est d'abord réalisée au milieu du XX^e siècle par l'ingénieur états-unien Abel Wolman (1965). Il utilise le terme *metabolism of cities* comme cadre métaphorique pour décrire et comptabiliser les échanges de flux de matières et d'énergie entre une ville fictive et son environnement. Au cours des décennies suivant ce travail pionnier, le concept de MU sera enrichi par l'accumulation de savoirs issus des sciences environnementales, de l'écologie industrielle et territoriale, de la comptabilité et de la géographie (Ribon et collab., 2018; Wachsmuth, 2012). L'étude contemporaine du MU réside dans l'observation de la circulation des flux matériels et énergétiques au sein d'un territoire délimité, de même que des échanges entre ledit territoire et son arrière-pays (*hinterland*) (Kennedy et collab., 2007).

La définition la plus aboutie du MU se présente comme « l'ensemble des flux d'énergie et de matières mis en jeu par le fonctionnement d'un territoire donné » (Barles, 2017, p. 21). Selon cette perspective écosystémique, la structuration et le fonctionnement d'une ville sont simultanément producteurs et tributaires de processus multiscales de mobilisation, de stockage et d'échange de ressources (Ferrão et Fernandez, 2013).

1.4.1 L'analyse du métabolisme urbain : des perspectives variées

Raffinée par le champ de l'écologie industrielle, l'analyse de flux de matières (AFM) est la méthode la plus documentée et utilisée pour évaluer le métabolisme des territoires (Zhang, 2019). Elle consiste à comptabiliser pour un territoire donné les flux de ressources/produits entrants, sortants ou qui s'accumulent pour une période donnée

(un an) (Barles, 2009). Les flux principalement étudiés sont les matériaux de construction, les matières organiques et l'énergie. Si l'AFM a différentes déclinaisons, c'est la méthode du bilan matière selon une logique dite descendante qui domine les exercices conduits dans la sphère des territoires et des politiques publiques (Vialleix, 2021). Reposant sur les principes de conservation de la masse, le bilan matière consiste à mobiliser les données disponibles portant sur les flux d'importation, d'extraction intérieure, d'exportation ou de rejets dans l'environnement d'un système territorial. De ce calcul se dégage un ensemble d'indicateurs de « pression environnementale » liés aux flux et aux stocks du système : entrées et sorties de matières, addition nette aux stocks, rejets vers la nature, consommation totale, etc. (Iablonovski et Bognon, 2019).

En parallèle, afin de contribuer à la compréhension des métabolismes, de nombreuses autres méthodes ont été soit développées de façon explicite, soit empruntées à l'ingénierie environnementale. Alors que la seconde catégorie inclut les études d'empreinte écologique (ÉE) et d'analyse de cycle de vie (ACV), la première comprend les études d'AFM dite ascendante développée par Baccini et Brunner (1991). Plus adaptée au contexte local que le bilan matière, l'AFM ascendante permet d'identifier les flux sous-jacents aux différentes activités à l'intérieur d'un système territorial. Le bilan matière est en effet critiqué pour son approche « boîte noire » peu soucieuse des composantes socioéconomiques et politiques qui régissent les processus métaboliques et ne capturant pas la spatialité des ressources au sein des systèmes territoriaux étudiés (Barles, 2010b; Perrotti, 2019).

C'est notamment en écho à ces lacunes que les travaux de l'écologie territoriale émergent dès les années 2010 (Barles, 2010a; Buclet, 2011). Ce champ se donne pour objectif :

de décrire, d'analyser, voire de transformer le métabolisme des territoires, en se fondant sur l'analyse des processus naturels et sociaux (au sens large du terme) qui sont à l'origine des flux de matières et d'énergie, qui réciproquement les transforment (Barles, 2014, p. 1).

L'écologie territoriale vient donc compléter les outils comptables et a-urbains de l'écologie industrielle par une analyse spatialisée des processus et structures urbains régissant le métabolisme des territoires. Elle vise moins à quantifier les métabolismes qu'à comprendre la complexité inhérente à la configuration circulatoire des flux et à offrir des pistes de transformation allant au-delà de solutions techniques et entrepreneuriales privilégiées par l'écologie industrielle (Buclet, 2011). L'écologie territoriale a donc eu un rôle notable dans l'élargissement des perspectives analytiques du MU et dans l'établissement de liens avec les disciplines de l'aménagement.

1.4.2 Le métabolisme urbain comme outil privilégié pour cadre la circularité des territoires

Les études de MU peuvent être utilisées à des fins diverses dans le cadre de démarches d'action collective en développement durable (Ferrão et Fernandez, 2013; Ribon et collab., 2018). C'est sur le plan de la question matérielle et énergétique (quantité de ressources mobilisées, production de déchets, émission de GES, etc.) que le MU intersecte avec le déploiement urbain de l'ÉC. En effet, l'approche du MU est adaptée pour préparer et cadrer l'action sur les flux de ressources et de déchets inhérents au fonctionnement des territoires. Certains auteurs (Fernandez et collab., 2018; Ferrão et Fernandez, 2013) placent le MU comme un outil essentiel d'aide à la compréhension spatio-temporelle des ressources mobilisées par les villes : un préalable à la mise en place de stratégies circulaires. C'est pourquoi le MU est actuellement manipulé sous divers degrés et modalités au sein des travaux d'ÉC.

En outre, la méthode de l'AFM permet de recueillir des indicateurs scientifiquement crédibles de l'intensité matérielle et/ou énergétique d'un territoire, contribuant à la définition de politiques et de stratégies de l'ÉC et à la mesure de leurs impacts (Ribon et collab., 2018; Vialleix, 2022). D'ailleurs, les AFM sont mobilisées pour appuyer les diagnostics stratégiques au sein de nombreuses villes et régions en vue d'orienter l'action collective en ÉC (Athanassiadis et collab., 2015; Metabolic, 2018).

Par ailleurs, l'idéal d'un « métabolisme circulaire » est progressivement adopté par certains travaux comme cadre analytique clé du déploiement de l'ÉC d'un territoire (Lucertini et Musco, 2020; Van Broekhoven et Vernay, 2018). Cette perspective découle notamment des recherches d'AFM des années 1990, qui à défaut d'être explicitement placées sous le signe de la circularité, étaient guidées par la perspective de la soutenabilité (Cui, 2018; Golubiewski, 2012). Pensons ici à Herbert Girardet (1992), qui a proposé l'idée d'un MU circulaire où les rejets seraient réintroduits comme intrants dans la ville.

1.4.3 Éclairer la relation entre l'urbanisme et le métabolisme urbain en faveur l'économie circulaire

Le cadre conceptuel précédemment développé permet d'observer une relation triangulaire dans la recherche sur la ville circulaire qui comporte une zone d'ombre importante. En effet, alors que les liens entre urbanisme et ÉC sont de plus en plus démontrés, il en va de même pour l'intérêt de l'étude du MU pour analyser et orienter l'ÉC.

D'un côté, l'urbanisme, par ses leviers ainsi que par sa dimension matérielle intrinsèque, est un champ de l'action collective de première importance pour le déploiement urbain de l'ÉC. Toutefois, on lui remarque le besoin de nouveaux outils analytiques et appliqués permettant de considérer les flux au sein de la réflexion planificatrice. De l'autre côté, le MU représente un cadre clé pour transposer les questions d'ÉC à l'échelle territoriale de même que pour fournir des méthodes comptables et des indicateurs de circularité.

Bien qu'étant des cadres de l'action collective porteurs d'un fort potentiel pour le déploiement de l'ÉC, l'urbanisme et le MU ont, à l'heure actuelle, une relation plus ambiguë. Comme mentionné précédemment, il manque actuellement de connaissances portant sur les modalités et les retombées d'un urbanisme basé sur les approches du MU. Pourtant, un rapprochement plus structuré entre le MU et l'urbanisme inviterait

à apporter un éclairage sur l'analyse et le cadrage des démarches de déploiement urbain de l'ÉC. C'est dans cette optique que nous cherchons à clarifier les articulations entre le MU et l'urbanisme.

2. Méthodologie

2.1 Une recension des écrits croisant les domaines de l'urbanisme et du métabolisme urbain

Considérant la portée exploratoire de notre question de recherche, nous avons procédé par une recension des écrits scientifiques en nous inspirant de l'enquête systématique (Briner et Denyer, 2012). Cette démarche méthodologique permet d'établir des observations ancrées dans une procédure rigoureuse et explicite limitant les biais de subjectivité. Ainsi, le protocole de recherche doit être transparent, reproductible et synthétique (Bryman, 2012). Il est question de nous en inspirer, car nous la mobiliserons uniquement dans les étapes d'enquête.

La première étape du protocole de recherche a été d'effectuer une recherche la plus exhaustive possible dans des bases de données scientifiques sélectionnées (Web of Science et Engineering Village). Pour ce faire, nous avons élaboré une série de combinaisons de mots clés provenant de deux domaines : l'aménagement/l'urbanisme (city planning, urban planning, spatial planning, planning, city, urbanism, infrastructure et urban design) et le MU (metabolism, metabolic, resource flows, material flows, energy flows et material flow analysis). Comme mentionné précédemment, c'est à travers la relation MU-urbanisme que nous souhaitons dégager des éléments de compréhension pour le déploiement de l'ÉC. C'est pourquoi nous avons exclu les mots clés portant sur le domaine de l'ÉC dans notre recherche. Cela nous a également permis d'être plus précis au sein d'une littérature abondante. Nous avons utilisé des opérateurs booléens de manière à respecter les critères de sélection suivants : articles scientifiques rédigés en anglais ou en français publiés entre 2000 et 2021 et dont les clés de recherche apparaissent dans le titre, le résumé ou les mots

clés des auteurs. Cette étape a permis l'identification initiale de 323 publications.

La tâche suivante a été de défricher ce premier bloc d'articles par une évaluation sur la base des titres, des mots clés des auteurs et des résumés : 53 articles ont alors été retenus. En tenant compte du fait que les bases de données scientifiques utilisées comprennent majoritairement des publications anglophones et qu'il n'existe pas de base de données interdisciplinaires francophone de l'importance de Web of Science ou d'Engineering Village, nous avons pris la décision d'intégrer à la suite de cette étape des écrits francophones correspondant à nos critères, mais qui n'avaient pas été trouvés dans la recherche par opérateurs booléens. Pour ce faire, nous avons passé au peigne fin les revues scientifiques francophones portant sur l'urbanisme et celles s'intéressant au MU et, plus largement, à l'ÉC afin d'identifier des textes faisant la rencontre entre urbanisme et MU. À notre surprise, très peu d'articles ont été trouvés. Mentionnons ici certains articles du numéro 116-117 de la revue Flux intitulé « Transition ou consolidation du régime dominant : le métabolisme urbain en question » ainsi que des articles des revues VertigO et Développement durable et territoires. Sept nouveaux articles ont alors été intégrés dans le corpus, pour un total de 60.

Nous avons procédé en une seconde étape de filtrage en examinant les métadonnées et la structure générale des textes (disciplines des auteurs et des publications, titres des sections, résultats). Notre corpus initial nous a permis d'observer que les textes issus du champ de l'écologie industrielle occupent une place prépondérante dans la littérature sur le MU. En ce sens, nous avons remarqué que certains articles ayant été retenus consistaient en des analyses métaboliques purement comptables et a-urbaines. C'est pourquoi nous avons dû préciser notre sélection afin de garder uniquement les textes ne se limitant pas à cette perspective, mais intégrant des dimensions en lien avec notre définition de l'urbanisme précédemment exprimée. Conscients que l'urbanisme revêt des frontières floues, nous avons sélectionné des articles mentionnant des outils de planification; des démarches d'aménagement proposées, décrites ou évaluées; des politiques publiques

locales; ou encore des objets propres aux territoires urbains tels que les infrastructures, le sol, le cadre bâti, les activités urbaines diverses, etc. Les textes devaient ainsi aller au-delà d'une perspective comptable pour intégrer des dimensions géographiques, sociales, spatiales et/ou politiques dont l'analyse transversale est un attribut de l'urbanisme.

Notre filtrage a aussi été guidé par la place (centrale ou périphérique) accordée au concept de MU dans les articles. Nous avons donc noté les textes sur une échelle de 1 à 5 (5 étant la plus haute note). Seuls les articles jugés 4 ou 5 furent gardés dans le corpus, pour un nombre de 35. Nous avons ensuite examiné les bibliographies de ces 35 articles afin d'y identifier de nouvelles sources pertinentes (méthode boule de neige), ce qui nous a permis d'ajouter 10 références. De ce corpus de 45 textes ont émergé des résultats globaux et spécifiques.

2.2 Une stratégie d'analyse qualitative et itérative

Notre approche analytique, de nature qualitative, s'est voulue guidée par une logique itérative caractérisée par des interactions entre notre cadre conceptuel et notre matériau. En effet, nous avons d'abord développé un tableau descriptif permettant un premier classement de notre corpus : auteur(s), titre, type d'article, nom du journal, mots clés des auteurs, discipline des auteurs et des journaux, résumé de l'article et concepts clés.

Nous avons ensuite progressivement dressé un tableau analytique nourri conjointement par notre cadre conceptuel et par la lecture des articles. Il comprenait des éléments tels que : la méthodologie de l'article, la définition du MU, le type de démarche d'urbanisme, des flux de ressources, des échelles et des cas de figure. Ce tableau nous a permis de développer itérativement une analyse thématique permettant de dégager des résultats généraux sur l'ensemble du corpus.

Nous avons aussi pu identifier des démarches empiriques d'application du MU en urbanisme bien documentées dans notre corpus. Ces exemples ont d'abord été choisis pour leur portée exploratoire : il

existe très peu de retours d'expériences sur des approches empiriques du MU dans la littérature. Ils portent aussi sur des registres différents du MU et de l'urbanisme, enrichissant notre réflexion sur les articulations possibles entre ces deux approches. Pour enrichir cette analyse, nous avons ajouté des éléments de littérature grise portant sur ces exemples (rapports d'étape, documents de planification locale/régionale, thèses). Ces cas d'études ont ensuite fait l'objet de tableaux analytiques comparatifs.

3. Résultats généraux

Le corpus de littérature invite à dégager quatre perspectives transversales sur l'articulation du MU et de l'urbanisme pour l'ÉC :

1. Le MU joue un rôle ambigu dans l'urbanisme, oscillant entre des vocations heuristiques et comptables qui, même si elles peuvent être mobilisées séparément, peuvent aussi être complémentaires;
2. Le MU est un concept considéré, par un large pan de la littérature, comme essentiel pour agir sur les villes à l'aune de la circularité;
3. Ce cadre nécessite une appropriation interdisciplinaire et intersectorielle, permettant un échange entre les disciplines, de même qu'un transfert de connaissances et d'outils entre les milieux de la recherche et de la pratique;
4. Certains pans de la littérature portent sur une nouvelle spécialisation d'urbanisme métabolique.

3.1 Deux vocations complémentaires du MU appliqué aux questions de l'urbanisme

Une double utilisation du MU semble à l'œuvre dans l'urbanisme : heuristique et comptable.

D'abord, le MU, par son essence ontologique, représente un cadre heuristique ancrant la ville dans une perspective écosystémique et complexe où circulent et s'accumulent des flux matériels et énergétiques (Castán Broto et collab., 2012; Kennedy et collab., 2011). La pensée métabolique

invite ainsi à une lecture réinventée des composantes urbaines sous-jacentes aux flux traversant les villes : les infrastructures, le sol, les activités socioéconomiques, etc. (Longato et collab., 2019; Thomson et Newman, 2018). Ce regard alternatif sur la ville semble prendre différentes formes. Pour Cathrin Zengerling (2019), la pensée métabolique permet d'observer la ville des flux et d'y évaluer des interventions publiques pour y implanter plus de durabilité. Dans le même ordre d'idées, Obersteg et ses collègues (2020) considèrent le MU comme un paradigme descriptif offrant des clés de lecture pour appréhender et gérer les flux urbains. Ce caractère heuristique du MU permet aussi de faire un pas de côté dans l'observation de plusieurs phénomènes urbains sous l'angle de leur matérialité. Par exemple, Juwet et Ryckewaert (2018) utilisent le MU pour analyser conjointement le développement industriel, les infrastructures lourdes, l'urbanisation et la consommation énergétique en Flandres. Dans une logique similaire, Nalini (2017) étudie la coévolution entre l'urbanisation, les vagues de développement industriel et l'éloignement des sources d'approvisionnement hydriques à Bangalore. Toujours dans un angle sociotechnique, Bahers et Giacchè (2018) soulignent l'intérêt d'une analyse de MU multiscalair intégrant les composantes de gouvernance afin de rendre compte de la complexité des filières de traitement des matières organiques. De leur côté, Thomson et Newman (2018) différencient des métabolismes intra-urbains en fonction des modes de transport et de la forme urbaine. Ces auteurs affirment que les quartiers centraux, plus denses et axés sur le transport actif que les quartiers périphériques, ont tendance à présenter un métabolisme plus sobre. Ces quelques exemples illustrent l'intérêt et la diversité de cette lentille heuristique ainsi que son potentiel pour compléter ou renouveler les analyses et les stratégies en matière d'urbanisme.

Ensuite, le MU est aussi envisagé comme une gamme d'outils de comptabilisation et de modélisation permettant d'orienter, d'évaluer et de faire le suivi de démarches d'urbanisme visant une réduction de la mobilisation des flux de ressources. La littérature fait donc état d'un

ensemble d'approches comptables de bilans environnementaux destinés à appuyer les parties prenantes urbaines : AFM, analyse des flux de substances (AFS), empreinte écologique (EE), ACV, etc. (Augiseau, 2019; Kennedy et collab., 2011; Pinho et collab., 2013).

Alors que l'AFM consiste à quantifier la circulation et le stockage des ressources d'un territoire, l'AFS consiste à analyser la configuration et les changements d'un flux précis (eau, phosphore) au sein d'un système. Elle permet d'aborder des enjeux spécifiques tels que la présence d'un polluant ou de mines urbaines ou encore la détérioration des sols et aquifères (Barles, 2010b). De son côté, l'EE, qui consiste à mesurer la surface productive nécessaire à assurer les besoins d'une structure sociale, représente, pour Kampelmann et De Muynck (2018), un indicateur spatial afin de distinguer les métabolismes interne et externe d'un territoire basé sur la localisation des espaces d'approvisionnement et de rejets. En ce sens, une analyse de MU combinant une AFM avec l'EE ou encore une ACV permet de mieux identifier ce que Bahers nomme flux cachés (ou indirects), soit les ressources mobilisées dans l'ensemble des chaînes de production et d'approvisionnement des produits consommés sur un territoire précis (Bahers et collab., 2020).

La littérature invite à dégager trois grandes vocations des outils comptables et de modélisation du MU :

1. Jauger un niveau de circularité et aborder des impératifs de durabilité liés aux flux et aux besoins des populations;
2. Identifier et cartographier des flux/stocks porteurs d'enjeux; et
3. Dégager des objectifs/cibles de réduction d'intensité matérielle.

Une perspective métabolique sur la ville

Dans ses acceptions heuristiques et comptables, le MU offre l'occasion de décentrer le regard au-delà des orientations traditionnelles de l'urbanisme durable : d'une perspective tournée sur la densification, sur les espaces verts et sur la mobilité, vers une perspective axée sur la circularité des flux

matériels et énergétiques. Cette « perspective métabolique » s'oriente ainsi sur le paysage des interrelations socioécologiques, lequel invite à une analyse croisée des processus de transformation urbaine, des flux de ressources et de déchets ainsi que des enjeux socioéconomiques. Autrement dit, la perspective métabolique peut venir se superposer aux couches analytiques préexistantes dans le cadre d'une démarche de planification urbaine. L'approche par le MU, grâce à ses deux vocations complémentaires, apparaît porteuse pour orienter les différentes démarches d'urbanisme en faveur de l'ÉC : diagnostic, aide à la décision, comparaison/évaluation (modèles et indicateurs), conception et mise en œuvre.

3.2 L'émergence d'une pensée en faveur de métabolismes (plus) circulaires

Le MU représente actuellement un cadre analytique de plus en plus utilisé pour transposer les enjeux et impératifs de l'ÉC à l'échelle des villes (Amenta et van Timmeren, 2018; Barragan-Escandon et collab., 2017; Lucertini et Musco, 2020). Dans cette optique, le cadre du MU invite à penser la transition vers une ville circulaire comme étant tributaire d'une réduction des flux entrants et sortants : l'établissement d'un métabolisme circulaire. Toutefois, cette perspective nécessite de sortir de l'idéalisation de l'autonomie locale et de planifier le déploiement de l'ÉC de façon multiscalaire, soit d'implanter des stratégies aux échelles spatiales et temporelles appropriées en fonction des contextes spatiaux spécifiques (Bahers et Giacchè, 2018; Juwet et Ryckewaert, 2018).

D'autres textes, sans parler de métabolisme circulaire, utilisent le MU pour réactualiser des questions bien étudiées par l'urbanisme et pour élargir l'agenda de la durabilité sous l'angle de la matérialité, ce qui implique de quantifier des flux et de comprendre comment ceux-ci sont gérés dans le temps et dans l'espace (Augiseau, 2019). Dans les deux cas de figure, le MU est considéré comme pertinent pour appréhender les effets rebonds potentiels et pour mettre en évidence des contradictions entre différentes stratégies d'aménagement. Par exemple, Fernandez et ses collègues (2018) observent les impacts possibles

de scénarios contrastés de gestion des matières résiduelles générées par un projet urbain en fonction de taux variés de valorisation et de mise en décharge ainsi que des modes de transport utilisés.

Par ailleurs, la complexité inhérente aux villes implique de considérer celles-ci non uniquement dans leur matérialité, mais aussi dans leurs différentes acceptions (écosystèmes d'acteurs, d'agents politiques et d'espaces d'expérimentation) et d'y implanter des stratégies intégrées qui nécessitent des apports de différents acteurs, disciplines et secteurs d'activités.

3.3 Le MU comme outil interdisciplinaire et intersectoriel

La troisième perspective transversale entre MU et urbanisme pour l'ÉC concerne le caractère interdisciplinaire et intersectoriel essentiel à la compréhension et à l'opérationnalisation du MU. D'ailleurs, l'histoire intellectuelle du MU, caractérisée par une fertilisation croisée entre champs de recherche diversifiés, appuie la nécessité de développer des cadres d'analyse et d'actions marqués par l'interdisciplinarité (Castán Broto et collab., 2012). Par exemple, Van Broekhoven et Vernay (2018) explorent le croisement entre les principes de mixité urbaine et de MU pour identifier des trajectoires d'innovation. De son côté, le projet BRIDGE (nous y reviendrons) souhaite rapprocher les sciences biophysiques avec l'urbanisme. Dans une logique similaire, Pelorosso et ses collègues (2017) ainsi que Perrotti et Stremke (2020) tentent d'augmenter les connaissances croisant le MU et les services écosystémiques.

Plus globalement, l'implantation de l'ÉC implique de créer des ponts entre les savoirs scientifiques axés sur la compréhension des métabolismes et ceux axés sur leur transformation (Amenta et Qu, 2020). En ce qui a trait à l'intersectorialité, comprise comme la collaboration entre les secteurs de la recherche et de la pratique, la littérature fait état de fort potentiel et de défis notables. Il existe de nombreuses études de MU de territoires à travers le globe, mais celles-ci concernent un cercle scientifique restreint (Perrotti, 2019). Ainsi, le MU peine à intégrer les processus

de planification et d'aide à la décision (Currie et collab., 2017). Cette déconnexion est notamment due au caractère protéiforme du concept, qui le rend difficile à appréhender par des non-initiés, mais aussi à la difficile traduction des résultats d'études de MU en orientations tangibles (Oliveira et Vaz, 2021). De plus, lorsque des démarches de planification intègrent le concept de MU, ce dernier est rarement utilisé à son plein potentiel heuristique et méthodologique (Zengerling, 2019). Il arrive même qu'il soit utilisé de façon implicite lorsqu'il renvoie à des sujets comme la réduction des émissions de GES déjà bien identifiés par l'urbanisme durable (Davoudi et Sturzaker, 2017). Il manque actuellement d'outils favorisant le transfert de connaissances destinées aux acteurs urbains leur permettant d'appréhender les différentes perspectives du MU ainsi que d'intégrer ce cadre dans leurs pratiques quotidiennes (Perrotti, 2019). Cet enjeu de transfert est ainsi lié au potentiel, actuellement non atteint, du MU de transformer l'urbanisme en faveur d'une transition des villes vers l'ÉC.

3.4 Vers un urbanisme métabolique?

Une partie du corpus de littérature observe l'urbanisme comme une clé pour opérationnaliser le concept de MU en faveur du déploiement urbain de l'ÉC. En effet, l'urbanisme intègre un ensemble de champs de connaissances interdisciplinaires (économie, sociologie, géographie, sciences politiques, design, ingénierie) et s'inscrit au carrefour de différentes communautés de praticiens. Cette discipline, à l'interface entre les savoirs scientifiques et l'action transformatrice sur le terrain, offre le potentiel de transférer les connaissances du MU en instruments et en pratiques de planification tangibles (Amenta et Qu, 2020; Giezen et Roemers, 2015). Vu ainsi, le MU ne doit pas être perçu comme un nouveau fardeau, mais bien comme une nouvelle source d'information (flux, technologies, échelles, composantes spatiales) supplémentaire pour agir sur la ville en faveur de la circularité, sous l'angle de synergies entre échelles, flux, usages du sol et technologies (Pistoni et Bonin, 2017).

Ainsi, le MU vient répondre en partie à l'enjeu évoqué dans la section 1 sur l'urbanisme consistant dans un besoin d'embrasser davantage sa dimension matérielle. En effet, puisque le déploiement d'une ville circulaire nécessite d'intégrer une réflexion par les flux et stocks de ressources dans la planification urbaine, le MU permet a priori de répondre à cette injonction. Cette perspective métabolique est encore insuffisamment considérée dans les démarches d'urbanisme durable actuelles (Bogunovich, 2009). De ce fait, la littérature invite à faire l'hypothèse de deux avenues de changement pour l'urbanisme en faveur de l'ÉC : soit le développement de nouveaux outils de planification centrés sur le MU, soit l'intégration du MU au sein des dispositifs existants.

Dans cette perspective, Giezen et Roemers (2015) soulignent l'intérêt de former des *metabolic planners*, une spécialisation en urbanisme qui conceptualise la ville comme un assemblage de flux, mais qui considère aussi l'implication de ces flux au sein de différents processus socioécologiques. Interdisciplinaires, réfléchissant à des échelles variées et connectées, mais aussi multilingues (politique, urbanistique, métabolique), les urbanistes métaboliques seraient des médiateurs entre expertises et parties prenantes diverses pouvant agir pour reconfigurer les flux par le biais d'interventions spatiales directes ou d'outils de gouvernance multiacteurs (Giezen et Roemers, 2015). Cet urbanisme métabolique est toutefois peu commun dans la littérature. Ses contours et modalités d'actions mériteraient d'être clarifiés à travers des enquêtes de terrain approfondies.

C'est à la lumière de ces résultats généraux que nous souhaitons désormais approfondir la réflexion sur l'intégration du MU dans l'urbanisme à travers l'observation rapide de quatre exemples empiriques documentés dans notre corpus de littérature : le projet BRIDGE, le projet REPAiR, le plan stratégique de la Sierra Calderona et l'atelier d'idéation du Limbourg.

4. Résultats spécifiques

4.1 Une expression du métabolisme ancrée dans les sciences biophysiques : le projet RIDGE

Le premier exemple largement documenté d'une démarche d'urbanisme mobilisant le MU est le projet de recherche-intervention BRIDGE (pour sustainable uRban plannIng Decision support accountinG for urban mÉtabolism), déployé entre 2008 et 2011 (Chrysoulakis et collab., 2013, 2020; Gonzalez et collab., 2013; Mitraka et collab., 2014; Perrotti, 2019). Celui-ci visait l'expérimentation d'un système d'aide à la décision pour des projets urbains à travers une modélisation spatialisée des changements métaboliques découlant de différents scénarios d'aménagement (Chrysoulakis, 2011; Gonzalez et collab., 2013).

Le MU y est d'abord considéré comme une lentille heuristique permettant d'observer la ville à l'image d'un écosystème où s'enchevêtrent des interrelations entre des composantes environnementales et socioéconomiques (Chrysoulakis et collab., 2013). Il est également appliqué dans sa dimension comptable à travers une AFM ascendante, où sont greffées des données propres aux sciences biophysiques afin de quantifier et de spatialiser certains flux (énergie, eau, polluants et CO₂) et de renseigner les processus biophysiques associés à ceux-ci (particules atmosphériques de pollution, confort thermique, surface de canopée) (Chrysoulakis et collab., 2013, 2020; Mitraka et collab., 2014). Cette évaluation est intégrée dans le dispositif d'urbanisme en deux temps : 1) diagnostic de l'état actuel d'un quartier; et 2) évaluation des impacts d'interventions urbanistiques potentielles sur l'intensité et sur la localisation de flux de matières et d'énergie (Chrysoulakis, 2011; Chrysoulakis et collab., 2013). Pour cette composante de localisation, le projet BRIDGE mobilise un système d'information géographique (SIG) afin d'observer les interactions potentielles entre les composantes environnementales liées au MU et les autres éléments physiques et socioéconomiques du système urbain étudié à diverses échelles.

4.2 Identifier des espaces urbains à circulariser dans une approche collaborative : le projet REPAiR

REPAiR (pour REsource management in Peri-urban AREas: Going beyond urban metabolism) est également un projet de recherche-intervention (Amenta et collab., 2019; Amenta et van Timmeren, 2018; Arciniegas et collab., 2019; Obersteg et collab., 2020; Rigillo et collab., 2018). Il vise l'élaboration de stratégies d'aménagement intégrées, innovantes et localisées pour réduire la génération de déchets dans les zones périurbaines (Rigillo et collab., 2018). Il comprend une dimension procédurale singulière caractérisée par un dispositif de urban living lab (ULL) guidé par une AFM spatialisée (Arciniegas et collab., 2019). Un ULL consiste en une arène d'innovation collaborative ouverte à un large public (Amenta et collab., 2019). L'AFM spatialisée développée par l'équipe de recherche, qui géolocalise les activités urbaines et les acteurs sous-jacents aux flux étudiés, a été mobilisée aux différentes étapes de l'ULL (diagnostic, idéation, décision des actions à mettre en œuvre) pour favoriser une compréhension des enjeux et des pistes d'action par l'ensemble des participants (Arciniegas et collab., 2019).

Selon la littérature sur le projet REPAiR, le MU y est mobilisé comme un cadre heuristique établissant un lien explicite avec le déploiement urbain de l'ÉC (Obersteg et collab., 2020). On y élargit la conception du déchet en intégrant le sol (Rigillo et collab., 2018). En ce sens, la recherche d'un métabolisme circulaire remet en question les paradigmes de planification axés sur la croissance urbaine linéaire qui engendrent des flux de déchets et des zones périphériques définies comme des « espaces-déchets » (wastescapes) (Amenta et van Timmeren, 2018; Rigillo et collab., 2018). Ces espaces-déchets comprennent les infrastructures de gestion des flux de matières reléguées à la périphérie ainsi que les espaces perçus comme des sous-produits de l'extension urbaine peu considérés dans la planification urbaine : friches, bâtiments vacants ainsi qu'infrastructures de stockage et de traitement des déchets (Amenta et van Timmeren, 2018; Rigillo

et collab., 2018). Ces espaces, simultanément une composante et une résultante du métabolisme linéaire, offrent un fort potentiel de transformation en faveur de la circularité territoriale (Amenta et van Timmeren, 2018).

Ainsi, le projet REPAiR oriente sa démarche sur une double vocation possible de ces espaces-déchets : 1) leur régénération (décontamination, changement d'usage, recyclage du sol); et 2) leur possible rôle pour accueillir des activités circulaires (Amenta et collab., 2019; Rigillo et collab., 2018). On y propose un ensemble de stratégies comprenant diverses formes de bioremédiation, d'agriculture urbaine, de déconstruction et rénovation du cadre bâti, d'espaces publics, de sites logistiques et d'infrastructures d'énergie renouvelable. Malgré la richesse de cette démarche d'idéation, Amenta et van Timmeren (2018) soulignent des freins à l'implantation des innovations sur le terrain : lenteur des processus de bioremédiation, réglementation limitant les expérimentations, incompatibilités d'usages et manque de mécanismes institutionnels adéquats.

4.3 Le métabolisme urbain dans une démarche de planification régionale : le plan stratégique de la Sierra Calderona

Le troisième exemple recensé dans la littérature porte sur une démarche d'incorporation de l'approche métabolique au sein de l'élaboration d'un plan de développement stratégique en région espagnole (Galan, 2019; Galan et Perrotti, 2019). Ce plan visait à fixer les modalités de développement et de gestion du territoire par des orientations d'usage du sol ainsi que par des plans sectoriels. Galan et Perrotti (2019) expliquent que le plan régional a été conçu en partie autour de dispositifs métaboliques ayant alimenté différentes phases de réflexion, et ce, sous des perspectives variées : diagnostic, définition d'orientations globales ainsi qu'élaboration des plans d'usage du sol et des plans sectoriels.

Soulignons d'abord la réalisation d'un diagnostic environnemental de la région conduit sur la base d'une AFM descendante complétée d'un calcul de

l'ÉE. Considérant la grande taille et la faible densité du territoire, les chercheurs ont développé un diagnostic différencié en fonction de sous-unités territoriales : des zones fonctionnelles métaboliques (zones urbaines denses, zones forestières, zones industrielles, etc.) (Galan et Perrotti, 2019). L'analyse différenciée de ces zones a alors permis d'illustrer les variations de consommation et de production de ressources découlant notamment de la diversité des modes d'occupation du sol.

Le second point souligné par Galan et Perrotti (2019) touchant au rôle du MU dans la mise en place du plan est la réalisation d'un schéma directeur guidant la transition métabolique du territoire vers une configuration plus circulaire. Ce schéma représente qualitativement les évolutions que le plan régional prévoit en matière de changements de nature et d'intensité dans les échanges de flux de ressources entre les différentes zones fonctionnelles métaboliques. Il synthétise les orientations contenues dans les différentes composantes du plan stratégique : plan général d'occupation du sol et plans sectoriels (Galan, 2019).

4.4 Contextualiser spatialement les ressources territoriales : l'atelier d'idéation du Limbourg

La quatrième approche métabolique s'inscrit dans un champ ayant jusqu'à maintenant peu abordé le MU : le urban landscape design (ULD), qui découle d'une hybridation entre urbanisme, design urbain et architecture de paysage. L'ULD invite à analyser simultanément un système urbain et les paysages multiscalaires impliqués dans son métabolisme (Marin, 2019). Les tenants de l'ULD placent en haute importance la contextualisation spatiale des flux au détriment des outils comptables (Marin et De Meulder, 2018b). On mobilise aussi des cadres inspirés de l'écologie sociale de Vienne portant sur l'étude des transitions métaboliques des systèmes sociétaux. Le cas ici étudié fait état d'un atelier d'ULD visant à imaginer des futurs circulaires pour la région du Limbourg, un territoire marqué par l'héritage industriel, par les infrastructures lourdes et par une urbanisation dispersée (Marin et De Meulder, 2018b).

L'approche de l'atelier s'est basée sur une phase d'analyse de la trajectoire socioécologique de la région, laquelle a permis de comprendre le processus de reconfiguration de l'usage des ressources du territoire (sol, eau, forêts, biomasse, etc.) découlant des activités consubstantielles d'exploitation charbonnière, manufacturière et urbaine depuis le xx^e siècle (Marin et De Meulder, 2018b). Cette analyse est accompagnée de cartes interprétatives diachroniques mettant en lumière la dimension spatiale de cette évolution.

Sur la base de cette étude géographique et historique du territoire, les chercheurs ont identifié des ressources sous-utilisées : réseaux énergétiques existants, ressources renouvelables potentielles, infrastructures, biomasse forestière, etc. Le même exercice a été effectué pour les ressources paysagères dites résiduelles : zones tampons, infrastructures vacantes, infrastructures des matières résiduelles, etc. (Marin, 2019; Marin et De Meulder, 2018b). Ces différentes cartographies de ressources ont été superposées avec d'autres composantes territoriales (cadre bâti, démographie, réseau hydrique) pour dégager de nouveaux potentiels d'intervention permettant la valorisation convergente de diverses ressources (eau, infrastructures, biomasse, énergie, sol) (Marin et De Meulder, 2018b). Ce cas exemplifie une entrée du MU non par une AFM, mais par une étude spatiale fine permettant de contextualiser les ressources locales en relation avec les différentes composantes territoriales. Selon Marin (2019), cette approche interroge la circularité en travaillant sur les flux et stocks de ressources disponibles sur le territoire ainsi que sur les infrastructures et sols vacants ou abandonnés.

4.5 Des approches variées d'intégration du métabolisme urbain dans l'urbanisme

Un retour rapide sur ces exemples illustre la différenciation dans l'appréhension du MU autant sur le plan des contenus (compréhension du MU pour la planification) que des procédures (manière dont le MU est utilisé dans la démarche). Ainsi, les démarches manifestent une compréhension conceptuelle du MU pouvant différer en fonction des disciplines s'en

saisissant : sciences biophysiques, ingénierie, urbanisme et architecture de paysage, ULD, etc. Bien qu'agissant toujours, à un niveau plus ou moins explicite, comme cadre heuristique pour orienter les démarches de planification, le MU est utilisé à un niveau sophistiqué dans sa dimension comptable. À l'exception de l'atelier d'idéation du Limbourg, les démarches prennent appui sur des AFM combinées à d'autres outils d'évaluation (EE, cartographie, modélisation).

Par ailleurs, outre le projet BRIDGE, les démarches prennent également appui sur des considérations spatiales chères à l'écologie territoriale (objectiver les acteurs cachés derrière les flux, approfondir la dimension spatiale du métabolisme, considérer les systèmes socioécologiques et sociotechniques). Cette dimension spatiale de l'approche du MU est également digne de mention. On remarque effectivement, dans les quatre exemples, la mobilisation d'outils de représentation cartographique (AFM spatialisée, cartes thématiques de scénarios, plans d'usages, espaces-déchets, ressources territoriales) qui contribuent à spatialiser le MU lors des étapes de diagnostic, d'idéation et de planification. Outil presque intrinsèque à l'urbanisme, la cartographie est toutefois encore peu utilisée dans les études de MU plus traditionnelles.

La littérature semble aussi indiquer que le MU est appelé à intervenir selon des modalités procédurales différenciées en fonction des démarches de planification : diagnostic (qualitatif ou quantitatif), idéation, orientations stratégiques, implantation d'actions, expérimentation et évaluation. Certains auteurs expriment un intérêt pour mobiliser le MU dans une logique ponctuelle, alors que d'autres le préconisent de manière intégrée tout au long des démarches. Par exemple, le projet BRIDGE utilise le MU dans ses étapes de diagnostic territorial et d'aide à la décision. Dans l'exemple du Limbourg, le MU est utilisé comme cadre analytique pour diagnostiquer le territoire et pour imaginer des interventions spécifiques. Or, cet exercice ne semble pas s'imbriquer au sein d'une démarche plus large d'élaboration de jalons stratégiques pour implanter les visions élaborées lors de l'atelier. À l'opposé, Galan et Perrotti (2019) soulignent que le diagnostic territorial de la région est

alimenté par une analyse métabolique, qui permet ensuite de guider la définition d'objectifs stratégiques quantifiés, puis d'élaborer des orientations transversales et sectorielles. Enfin, la documentation portant sur le projet REPAiR signale que le MU intervient au sein de différentes étapes de la méthode d'ULL (diagnostic, objectifs, idéation et conception d'innovations sociotechniques, modélisation d'impacts et aide à la décision).

À l'image de l'ensemble du corpus de littérature, ces exemples mentionnent très peu les retombées

concrètes des démarches d'urbanisme métabolique abordées. Ainsi, nous disposons de peu d'éclairage sur le poids concret du rôle du MU dans les interventions sur le territoire. En ce sens, bien que l'intérêt du MU soit avéré pour élaborer et évaluer les démarches de planification, on a encore peu étudié à quel niveau les orientations émanant d'une analyse de MU sont embrassées et mises en œuvre par les décideurs, planificateurs et autres acteurs urbains. Se pose donc encore ici la question sur la capacité du MU à aider à la transition urbaine vers l'ÉC.

Cas de figure	Échelles appréhendées	Flux et ressources appréhendées	Étape de planification mobilisant le MU	Perspective heuristique	Perspective comptable
BRIDGE: Helsinki, Florence, Londres, Athènes, Gliwice	Projet urbain; Région urbaine	Énergie; Eau; Polluants Carbone	Diagnostic Aide à la décision	La ville comme écosystème d'interrelations entre composantes environnementales et socioéconomiques. Ajout d'une perspective biophysique dans la lecture du MU.	AFM ascendante dont on ajoute des données biophysiques sous-jacentes aux flux étudiés : particules atmosphériques de pollution, confort thermique, surface de canopée, etc.
REPAiR: Amsterdam et Naples	Quartier; Région urbaine	Déchets; Sol	Diagnostic; Définition d'objectifs; Idéation/Conception de stratégies; Modélisation d'impacts; Aide à la décision	Le MU comme cadre pour comprendre la fabrique urbaine sous l'angle de l'ÉC: la circularisation du métabolisme nécessite de penser autrement la planification Identification d'espaces-déchets issue d'un développement urbain linéaire.	AFM spatialisée de type « Activity based-MFA » qui lie l'analyse quantitative de flux, les activités sous-jacentes aux flux et les acteurs impliqués.
Plan stratégique de la Sierra Calderona	Région rurale;	Eau; Déchets; Énergie	Diagnostic; Idéation/Conception de stratégies; Définition d'une vision stratégique	Le MU comme cadre de planification permettant une meilleure appréhension des impacts différenciée des différents sous-systèmes d'un territoire régional et des interrelations matérielles entre ceux-ci; Mobilisation d'un schéma directeur régional représentant qualitativement les modifications métaboliques issues des différentes orientations stratégiques.	Des AFM différenciées entre zones régionales basées sur l'usage du sol et les activités : zones fonctionnelles métaboliques; Empreinte écologique.
Atelier de ULD à Limbourg, Flandres	Région rurale; Ville	Déchets; Infrastructures résiduelles; Biomasse (énergie); Eau	Diagnostic; Idéation/Conception de stratégies;	Analyse du MU pour contextualiser de manière spatio-temporelle les ressources disponibles et potentielles d'un territoire. Le MU permet de superposer différentes composantes territoriales et d'identifier de nouveaux potentiels pour mettre en valeur les ressources.	X

Tableau 1 – Récapitulatif des cas empiriques de démarches de MU en urbanisme

Conclusion

Cette recension a tenté d'éclairer la transposition de l'ÉC aux questions urbaines en s'intéressant particulièrement à la relation encore peu étudiée entre le MU et l'urbanisme. Si ce panorama ne prétend pas à l'exhaustivité, il contribue à tracer les contours des modalités d'instrumentalisation du MU au sein de l'urbanisme.

Nous avons d'abord observé deux familles d'applications de l'approche : 1) un cadre heuristique offrant une vision territoriale axée sur les flux de ressources; et 2) un ensemble de méthodes de comptabilisation environnementale des territoires. Derrière ces deux familles, les travaux étudiés articulent MU et urbanisme sur des configurations territoriales hétérogènes, et avec des perspectives tout aussi diversifiées. En ce sens, il apparaît qu'il convient de parler non pas d'approche métabolique, mais plutôt des approches métaboliques. En effet, la littérature illustre qu'il n'existe actuellement pas une méthode ou une appropriation du MU qui semble dominer les démarches urbanistiques. L'utilisation du MU en urbanisme n'est donc pas standardisée. Toutefois, on remarque que les outils comptables se démarquent par leur omniprésence dans la littérature au sein de différents types de démarches, vantées pour leurs qualités diagnostiques et stratégiques. Le MU est également un cadre analytique susceptible de contribuer à lier organisation urbaine et échelle territoriale de l'ÉC, à condition de fédérer plusieurs regards disciplinaires sur cet objet qui pose d'importantes questions épistémologiques. Cette interdisciplinarité doit être accompagnée d'une collaboration entre les milieux de la recherche et de la pratique afin d'agir collectivement sur la transition des territoires. Dans cette idée, la littérature trace les contours d'un urbanisme dit métabolique, aux interfaces des secteurs d'activités urbaines et pouvant jouer un rôle dans la gestion des ressources sur diverses échelles et temporalités interreliées.

Afin d'approfondir l'exploration sur les usages du MU, nous avons analysé quatre exemples de démarches suffisamment documentées dans la littérature. Cette section nous enseigne globalement

que l'appropriation du MU est malléable sur plusieurs aspects : entre autres, appropriation disciplinaire, dimension heuristique/comptable, étapes de planification et modalités d'utilisation. Toutefois, il nous semble crucial de souligner que les quatre exemples identifiés ne prétendent pas à illustrer l'ensemble des utilisations du MU en urbanisme. L'identification de ceux-ci découle de notre recension des écrits et leur analyse se veut exploratoire. Enfin, mentionnons que très peu d'articles scientifiques évoquent à l'heure actuelle des démarches d'application du MU en urbanisme.

Vers de nouvelles trajectoires de recherche

Notre panorama de la littérature nous invite à constater que le MU permet à l'urbanisme de gagner en pertinence sur des sujets de durabilité urbaine et de circularité. Aussi, l'urbanisme invite le MU à se déployer au-delà d'une posture explicative vers une qui soit tournée vers l'action. Toutefois, certaines interrogations persistent dans ce croisement conceptuel et opérationnel encore peu exploré, appelant ainsi à proposer deux pistes de réflexion.

En premier lieu, peu de recherches et de démarches concrètes de MU appréhendent simultanément plus de trois ou quatre flux et/ou stocks de matières et d'énergie. Nous pourrions ici avancer prudemment que, pour atterrir dans la sphère aménagiste, les approches du MU doivent se restreindre et simplifier la complexité des flux sur un territoire. Alors qu'il a été défini comme une clé de lecture holistique de l'urbain, le MU nous apparaît donc rarement utilisé à son plein potentiel heuristique et méthodologique. Ainsi, il serait pertinent de clarifier les contextes, modalités et retombées des approches de MU en fonction de la quantité et du type de flux considérés. Autrement dit, il s'agirait de comparer des études de MU holistiques (plusieurs flux) et singulières (un seul flux) appliquées à l'urbanisme.

En second lieu, plusieurs travaux insistent sur l'élaboration d'outils ou de méthodes de planification intégrant des informations métaboliques à différentes échelles ou pour des secteurs précis. Toutefois, on s'intéresse encore peu au transfert et à l'adaptabilité de ces instruments face aux aléas

multiples du secteur de la planification urbaine : changements de personnel ou de mandature politique; règles institutionnelles variables selon les contextes; dépendance au sentier; crises externes; processus d'arbitrage entre enjeux métaboliques et socioéconomiques; etc. Il existe également une diversité d'intérêts et de compétences au sein de ce champ de l'action collective pouvant mener à des appropriations différenciées du MU.

Cette observation souligne l'enjeu des freins systémiques à l'incorporation des approches métaboliques en urbanisme en faveur du déploiement

urbain de l'ÉC. En ce sens, des enquêtes sur les composantes sociotechniques conjointes à l'urbanisme et à l'ÉC pourraient éclairer sur les freins et leviers au caractère transformatif du MU. Les outils analytiques et prescriptifs du champ des transitions pourraient s'avérer pertinents pour 1) caractériser les démarches de MU sous l'angle de leur rôle dans la transformation des systèmes de planification actuels; et 2) expérimenter et stimuler l'innovation dans les façons de faire de l'urbanisme (Markard et collab., 2012; Wolfram, 2018).

NOTE

- 1 Cet article rend compte d'une recherche financée par le Réseau de recherche en économie circulaire du Québec (RRECQ) et les Fonds de recherche du Québec (FRQ).

RÉFÉRENCES

- Agence de la transition écologique (ADEME). (2020). *Guide économie circulaire et urbanisme : une démarche, des outils pour construire son projet*. ADEME, Orée et Inddigo.
- Aggeri, F. (2021). Des déchets aux mines urbaines : une mise en perspective historique de l'économie circulaire. *La revue de l'Institut Veolia*, 23, 10-13. <https://www.institut.veolia.org/sites/g/files/dvc2551/files/document/2021/11/10%20Des%20d%C3%A9chets%20aux%20mines.pdf>
- Amenta, L., Attademo, A., Remoy, H., Berruti, G., Cerreta, M., Formato, E., Palestino, M. F. et Russo, M. (2019). Managing the transition towards circular metabolism: Living labs as a co-creation approach. *Urban Planning*, 4(3), 5-18. <https://doi.org/10.17645/up.v4i3.2170>
- Amenta, L. et Qu, L. (2020). Experimenting with circularity when designing contemporary regions: Adaptation strategies for more resilient and regenerative metropolitan areas of Amsterdam and Naples developed in university studio settings. *Sustainability*, 12(11), 4549. <https://doi.org/10.3390/su12114549>
- Amenta, L. et van Timmeren, A. (2018). Beyond wastescapes: Towards circular landscapes – Addressing the spatial dimension of circularity through the regeneration of wastescapes. *Sustainability*, 10(12), 4740. <https://doi.org/10.3390/su10124740>
- Arciniegas, G., Sileryte, R., Dabrowski, M., Wandl, A., Dukai, B., Bohnet, M. et Gutsche, J. M. (2019). A geodesign decision support environment for integrating management of resource flows in spatial planning. *Urban Planning*, 4(3), 32-51. <https://doi.org/10.17645/up.v4i3.2173>
- Ascher, F. (2010). *Les nouveaux principes de l'urbanisme*. Éditions de l'Aube.
- Athanassiadis, A., Merckx, B., Paolini, F. et Noel, L. (2015). *Métabolisme de la Région de Bruxelles-Capitale : identification des flux, acteurs et activités économiques sur le territoire et pistes de réflexion pour l'optimisation de ressources*. Bruxelles Environnement. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133526273>
- Augiseau, V. (2019). Utiliser les ressources secondaires de matériaux de construction : contraintes et pistes d'action pour des politiques territoriales. *Flux*, 2-3(116-117), 26-41. <https://doi.org/10.3917/flux1.116.0026>
- Aurez, V. et Georgeault, L. (2019). *Économie circulaire : système économique et finitude des ressources* (2^e éd.). De Boeck Supérieur.
- Baccini, P. et Brunner, P.H. (1991). *Metabolism of the Anthroposphere : Analysis, Evaluation, Design* (2^e éd.). The MIT Press.
- Bahers, J.-B., Durand, M. et Beraud, H. (2017). Quelle territorialité pour l'économie circulaire? Interprétation des typologies de proximité dans la gestion des déchets. *Flux*, 3-4(109-110), 129-141. <https://doi.org/10.3917/flux1.109.0129>

- Bahers, J.-B. et Giacchè, G. (2018). Échelles territoriales et politiques du métabolisme urbain : la structuration des filières de biodéchets et l'intégration de l'agriculture urbaine à Rennes. *Vertigo*, 31 (hors-série). <https://doi.org/10.4000/vertigo.21609>
- Bahers, J.-B., Tanguy, A. et Pincetl, S. (2020). Metabolic relationships between cities and hinterland: a political-industrial ecology of energy metabolism of Saint-Nazaire metropolitan and port area (France). *Ecological Economics*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106447>
- 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. (2010a). Écologies urbaine, industrielle et territoriale. Dans O. Coutard et J. Rutherford (dir.), *Écologies urbaines* (p. 61-83). Economica.
- Barles, S. (2010b). 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://search.proquest.com/docview/753926322?accountid=12543>
- Barles, S. (2014). L'écologie territoriale et les enjeux de la dématérialisation des sociétés : l'apport de l'analyse des flux de matières. *Développement durable et territoires*, 5(1), 1-22. <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.10090>
- Barles, S. (2015). L'urbanisme, le génie urbain et l'environnement : une lecture par la technique. *RIURBA – Revue internationale de l'urbanisme*, 1, 1-10. <http://www.riurba.review/Revue/lurbanisme-le-genie-urbain-et-lenvironnement-une-lecture-par-la-technique>
- Barles, S. (2017). Écologie territoriale et métabolisme urbain : quelques enjeux de la transition socioécologique. *Revue d'économie régionale et urbaine*, 5, 819-836. <https://doi.org/10.3917/reu.175.0819>
- Barragan-Escandon, A., Terrados-Cepeda, J. et Zalamea-Leon, E. (2017). The role of renewable energy in the promotion of circular urban metabolism. *Sustainability*, 9(12), 2341. <https://doi.org/10.3390/su9122341>
- Beaulieu, L., Durme, G. et Arpin, M. (2016). *Circular economy: A critical literature review of concepts*. CIRAIG.
- Bogunovich, D. (2009). From planning sustainable cities to designing resilient urban regions. Dans C. A. Brebbia, M. Neophytou, E. Beriatos, I. Ioannou et A. G. Kungolos (dir.), *Sustainable development and planning IV* (2 vol., p. 87-96). <https://doi.org/10.2495/sdp090091>
- Bourdin, S. et Maillefert, M. (2020). L'économie circulaire : modes de gouvernance et développement territorial [Introduction]. *Natures Sciences Sociétés*, 28(2), 101-107. <https://doi.org/10.1051/nss/2020033>
- Briner, R. et Denyer, D. (2012). Systematic review and evidence synthesis as a practice and scholarship tool. Dans D. Rousseau (dir.), *The Oxford handbook of evidence-based management* (p. 112-129). Oxford University Press.
- Bryman, A. (2012). *Social Research Methods* (4th ed.). Oxford University Press.
- Buclet, N. (2011). *Écologie industrielle et territoriale : stratégies locales pour un développement durable*. Presses universitaires du Septentrion.
- Castán Broto, V., Allen, A. et 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>
- Chen, S. Y. et Tang, X. W. (2007, 14-21 juillet). *Cluster empirical study on the development of city circular economy of China based on principal components* [Présentation]. International Conference on Management Science and Engineering Management, Chengdu (Chine).
- Chrysoulakis, N. (2011). *BRIDGE project progress*. BRIDGE Demonstration Event, Bruxelles.
- Chrysoulakis, N., Anselmo de Castro, E. et Moors, E. J. (2020). *Understanding urban metabolism: A tool for urban planning*. Routledge.
- Chrysoulakis, N., Lopes, M., San Jose, R., Grimmond, C. S. B., Jones, M. B., Magliulo, V., Klostermann, J. E. M., Synnefa, A., Mitraka, Z., Castro, E. A., Gonzalez, A., Vogt, R., Vesala, T., Spano, D., Pigeon, G., Freer-Smith, P., Staszewski, T., Hodges, N., Mills, G. et Cartalis, C. (2013). Sustainable urban metabolism as a link between bio-physical sciences and urban planning: The BRIDGE project. *Landscape and Urban Planning*, 112, 100-117. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.12.005>
- Climate-KIC et C40 Cities. (2019). *Municipality-led circular economy case studies*. <https://www.climate-kic.org/wp-content/uploads/2019/01/Circular-Cities.pdf>

- Cui, X. (2018). How can cities support sustainability: A bibliometric analysis of urban metabolism. *Ecological Indicators*, 93, 704-717. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.056>
- Currie, P. K., Musango, J. K. et May, N. D. (2017). Urban metabolism: A review with reference to Cape Town. *Cities*, 70, 91-110. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.06.005>
- Dabrowski, M., Varju, V. et Amenta, L. (2019). Transferring circular economy solutions across differentiated territories: Understanding and overcoming the barriers for knowledge transfer. *Urban Planning*, 4(3), 52-62. <https://doi.org/10.17645/up.v4i3.2162>
- Davoudi, S. et Sturzaker, J. (2017). Urban form, policy packaging and sustainable urban metabolism. *Resources, Conservation et Recycling*, 120, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.011>
- Dermine-Brullot, S. et Torre, A. (2020). Quelle durabilité pour le développement territorial? Réflexions sur les composantes spatiales de l'économie circulaire. *Natures Sciences Sociétés*, 28(2), 108-117. <https://doi.org/10.1051/nss/2020034>
- Du, L. J. et Liu, J. S. (2006, 17 novembre). *Urban circular economy in Tangshan, China* [Présentation]. Euro-Asian Conference on Environment and Corporate Social Responsibility: Perspectives from Business in Asia, Hong Kong.
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *Cities in the circular economy: An initial exploration*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/cities-in-the-circular-economy-an-initial-exploration>
- Fernandez, M., Blanquart, C. et Verdeil, É. (2018). La terre et le béton : le projet d'urbanisme considéré sous l'angle du métabolisme territorial. *VertigO*, 18(3). <https://id.erudit.org/iderudit/1065316ar>
- Ferrão, P. et Fernandez, J. (2013). *Sustainable urban metabolism*. MIT Press.
- Fischer-Kowalski, M. (1998). Society's metabolism: The intellectual history of materials flow analysis, Part I, 1860-1970. *Journal of Industrial Ecology*, 2(1), 61-78. <https://doi.org/10.1162/jiec.1998.2.1.61>
- Galan, J. (2019). *Analysis and strategies for sustainable regional planning: Sierra Calderona strategic plan, Spain*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96508-6>
- Galan, J. et 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>
- Garcier, R. J., Rocher, L. et Verdeil, É. (2017). Introduction : circulation des matières, économies de la circularité. *Flux*, 2(108), 1-7. <https://doi.org/10.3917/flux1.108.0001>
- Giezen, M. et Roemers, G. (2015). Metabolism in context – The metabolic planner: Reflection on urban planning from the perspective of urban metabolism. Dans F. Savini, S. Verschuuren, W. Salet et K. Raats (dir.), *Master studio urban planning 2014-2015: Urban metabolism* (p. 14-27). University of Amsterdam. <https://hdl.handle.net/11245.1/efdd739a-a27a-48b1-9cd1-ae190838237b>
- Girardet, H. (1992). *Gaia atlas of cities: New directions for sustainable urban living*. Anchor Books.
- Golubiewski, N. (2012). Is there a metabolism of an urban ecosystem? An ecological critique. *Ambio*, 41(7), 751-764. <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0232-7>
- Gonzalez, A., Donnelly, A., Jones, M., Chrysoulakis, N. et Lopes, M. (2013). A decision-support system for sustainable urban metabolism in Europe. *Environmental Impact Assessment Review*, 38, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.06.007>
- Grisot, S. (2019). *Manifeste pour un urbanisme circulaire*. Dixit.
- Grosse, F. (2020). Pour une métropole circulaire, ici et maintenant. *Futuribles*, 436(3), 5-22. <https://doi.org/10.3917/futur.436.0005>
- Hölscher, K. et Frantzeskaki, N. (2021). Perspectives on urban transformation research: Transformations in, of, and by cities. *Urban Transformations*, 3(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s42854-021-00019-z>
- Iablouovski, G. et Bognon, S. (2019). Efficacité matérielle et performance écologique des territoires : analyse croisée de 67 métabolismes. *Flux*, 2-3(116-117), 6-25. <https://doi.org/10.3917/flux1.116.0006>

- Institut EDDEC et RECYC-QUÉBEC (2018). *L'économie circulaire*. Québec circulaire. <https://www.quebeccirculaire.org/static/h/concept-et-definition>.
- Juwet, G. et Ryckewaert, M. (2018). Energy transition in the nebular city: Connecting transition thinking, metabolism studies, and urban design. *Sustainability*, 10(4), 955. <https://doi.org/10.3390/su10040955>
- Kampelmann, S. et De Muynck, S. (2018). Les implications d'une circularisation des métabolismes territoriaux : une revue de la littérature. *Pour*, 236, 153-173. <https://doi.org/10.3917/pour.236.0151>
- Kennedy, C., Cuddihy, J. et Engel-Yan, J. (2007). The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11, 43-59. <https://doi.org/10.1162/jie.2007.1107>
- Kennedy, C., Pincetl, S. et Bunje, P. (2011). The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 1965-1973. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.022>
- Kirchherr, J., Reike, D. et Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation et Recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Longato, D., Lucertini, G., Dalla Fontana, M. et Musco, F. (2019). Including urban metabolism principles in decision-making: A methodology for planning waste and resource management. *Sustainability*, 11(7), 2101. <https://doi.org/10.3390/su11072101>
- Lucertini, G. et Musco, F. (2020). Circular urban metabolism framework. *One Earth*, 2(2), 138-142. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.004>
- Lukkarinen, J. P., Nieminen, H. et Lazarevic, D. (2023). Transitions in planning: Transformative policy visions of the circular economy and blue bioeconomy meet planning practice. *European Planning Studies*, 31(1), 55-75. <https://doi.org/10.1080/09654313.2022.2060706>
- Maillefert, M. et Robert, I. (2017). Nouveaux modèles économiques et création de valeur territoriale autour de l'économie circulaire, de l'économie de la fonctionnalité et de l'écologie industrielle. *Revue d'économie régionale et urbaine*, 5, 905-934. <https://doi.org/10.3917/rru.175.0905>
- Marin, J. (2019). *Circular economy transition in Flanders: An urban landscape design contribution* [Thèse de doctorat inédite]. Université catholique de Louvain.
- Marin, J. et De Meulder, B. (2018a). Interpreting circularity: Circular city representations concealing transition drivers. *Sustainability*, 10(5), 1310. <https://doi.org/10.3390/su10051310>
- Marin, J. et De Meulder, B. (2018b). Urban landscape design exercises in urban metabolism: Reconnecting with Central Limburg's regenerative resource landscape. *Journal of Landscape Architecture*, 13(1), 36-49. <https://doi.org/10.1080/18626033.2018.1476031>
- Markard, J., Raven, R. et Truffer, B. (2012). Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, 41(6), 955-967. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.013>
- Mehmood, A. (2010). On the history and potentials of evolutionary metaphors in urban planning. *Planning Theory*, 9(1), 63-87. <https://doi.org/10.1177/1473095209346495>
- Metabolic. (2018). *Circular cities program*. <https://www.metabolic.nl/brochures/metabolic-circular-cities-program>
- Mitraka, Z., Diamantakis, E., Chrysoulakis, N., Castro, E. A., San Jose, R., Gonzalez, A. et Bleic, I. (2014). Incorporating bio-physical sciences into a decision support tool for sustainable urban planning. *Sustainability*, 6(11), 7982-8006. <https://doi.org/10.3390/su6117982>
- Nalini, N. S. (2017). The Great Divide: Exploring the divergence between urban metabolism in theory and practice in water supply system in Bengaluru. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 9(1), 1-20. <https://doi.org/10.1080/19463138.2016.1191497>
- Newell, J. et Cousins, J. (201). The boundaries of urban metabolism: Towards a political-industrial ecology. *Progress in Human Geography*, 39(6), 702-728. <https://doi.org/10.1177/0309132514558442>
- Niang, A., Bourdin, S. et Torre, A. (2020). L'économie circulaire, quels enjeux de développement pour les territoires? *Développement durable et territoires*, 11(1). <https://dx.doi.org/10.4000/developpementdurable.16902>

- Ntsondé, J. et Aggeri, F. (2022). L'économie circulaire comme utopie rationnelle : de la fiction à sa performance. *Revue française de gestion*, 304(3), 43-63. http://www.cairn.info/load_pdf.php?ID_ARTICLE=RFG_304_0041
- Obersteg, A., Arlati, A., Acke, A. Berruti, G., Czapiewski, K., Dabrowski, M., Heurkens, E., Mezei, C., Palestino, M. F., Varju, V., Wojcik, M. et Knieling, J. (2019). Urban regions shifting to circular economy: Understanding challenges for new ways of governance. *Urban Planning*, 4(3), 19-31. <https://doi.org/10.17645/up.v4i3.2158>
- Obersteg, Arlati, A., et Knieling, J. (2020). Making cities circular: experiences from the living lab Hamburg-Altona. *European Spatial Research and Policy*, 27(2), 59-77. <https://doi.org/10.18778/1231-1952.27.2.05>
- Oliveira, V. et Vaz, R. (2021). Is the concept of urban metabolism useful for planning practice? *European Planning Studies*, 29(3), 411- 424. <https://doi.org/10.1080/09654313.2020.1740173>
- Paiho, S., Mäki, E., Wessberg, N., Paavola, M., Tuominen, P., Antikainen, M., Heikkilä, J., Rozado, C. A. et Jung, N. (2020). Towards circular cities: Conceptualizing core aspects. *Sustainable Cities and Society*, 59, 102143. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102143>
- Pelorusso, R., Gobattoni, F. et Leone, A. (2017). The low-entropy city: A thermodynamic approach to reconnect urban systems with nature. *Landscape and Urban Planning*, 168, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.10.002>
- Perrotti, D. (2019). Evaluating urban metabolism assessment methods and knowledge transfer between scientists and practitioners: A combined framework for supporting practice-relevant research. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(8), 1458-1479. <https://doi.org/10.1177/2399808319832611>
- Perrotti, D. et Stremke, S. (2020). Can urban metabolism models advance green infrastructure planning? Insights from ecosystem services research. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 47(4), 678-694. <https://doi.org/10.1177/2399808318797131>
- Petit-Boix, A. et Leipold, S. (2018). Circular economy in cities: Reviewing how environmental research aligns with local practices. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1270-1281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.281>
- Pinho, P., Oliveira, V., Cruz, S. S. et Barbosa, M. (2013). Metabolic impact assessment for urban planning. *Journal of Environmental Planning and Management*, 56(2), 178-193. <https://doi.org/10.1080/09640568.2012.657953>
- Pistoni, R. et Bonin, S. (2017). Urban metabolism planning and designing approaches between quantitative analysis and urban landscape. *City, Territory and Architecture*, 4, 20. <https://doi.org/10.1186/s40410-017-0076-y>
- Ribon, B., Badariotti, D. et Kahn, R. (2018). Fondements des analyses de flux de matières et d'énergie et typologies d'applications pour la gouvernance des territoires et des organisations. *Vertigo*, 18(2). <https://doi.org/10.4000/vertigo.20822>
- Rigillo, M., Amenta, L., Attademo, A., Boccia, L., Formato, E. et Russo, M. (2018). Eco-innovative solutions for wasted landscapes. *Ri-Vista – Ricerche per la progettazione del paesaggio*, 1, 146-159. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135255040>
- Roggema, R. (2019). City of flows: The need for design-led research to urban metabolism. *Urban Planning*, 4(1), 106-112. <https://doi.org/10.17645/up.v4i1.1988>
- Salvatori, G., Holstein, F. et Böhme, K. (2019). *Circular economy strategies and roadmaps in Europe: Identifying synergies and the potential for cooperation and alliance building* [Rapport final]. European Economic and Social Committee. <https://doi.org/10.2864/554946>
- Scherrer, F. et Abrassart, C. (2016). La ville, territoire privilégié de l'économie circulaire. Dans S. Sauvé, D. Normandin et M. McDonald (dir.), *L'économie circulaire : une transition incontournable* (p. 88-92). Presses de l'Université de Montréal.
- Syngellakis, S. et Melgarejo, J. (2020). *Urban growth and the circular economy*. WIT Press.
- Thomson, G. et Newman, P. (2018). Urban fabrics and urban metabolism: From sustainable to regenerative cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 218-229. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.010>
- Turcu, C. et Gillie, H. (2020). Governing the circular economy in the city: Local planning practice in London. *Planning Practice and Research*, 35(1), 62-85. <https://doi.org/10.1080/02697459.2019.1703335>
- Van Broekhoven, S. et Vernay, A. L. (2018). Integrating functions for a sustainable urban system: A review of multifunctional land use and circular urban metabolism. *Sustainability*, 10(6), 1875. <https://doi.org/10.3390/su10061875>

- Van den Berghe, K. et Vos, M. (2019). Circular area design or circular area functioning? A discourse-institutional analysis of circular area developments in Amsterdam and Utrecht, The Netherlands. *Sustainability*, 11(18). <https://doi.org/10.3390/su11184875>
- van der Leer, J., van Timmeren, A. et Wandl, A. (2018). Social-ecological-technical systems in urban planning for a circular economy: An opportunity for horizontal integration. *Architectural Science Review*, 61(5), 298-304. <https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1505598>
- Vialleix, M. (2021). *Les études de métabolisme territorial : état des lieux et perspectives*. Institut Paris Région. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03528267>
- Vialleix, M. (2022). *Les indicateurs de l'économie circulaire : apprécier les tendances et mieux outiller l'Île-de-France*. Institut Paris Région. https://www.fnau.org/wp-content/uploads/2022/04/indicateursec_rapport_v0_complet.pdf
- Wachsmuth, D. (2012). Three ecologies: Urban metabolism and the society-nature opposition. *The Sociological Quarterly*, 53(4), 506-523. <https://doi.org/10.1111/j.1533-8525.2012.01247.x>
- Williams, J. (2019). Circular cities. *Urban Studies*, 56(13), 2746-2762. <https://doi.org/10.1177/0042098018806133>
- Williams, J. (2020). The role of spatial planning in transitioning to circular urban development. *Urban Geography*, 41(6), 915-919. <https://doi.org/10.1080/02723638.2020.1796042>
- Williams, J. (2021). *Circular cities: A revolution in urban sustainability*. Routledge.
- Wolfram, M. (2018). Urban planning and transition management: Rationalities, instruments and dialectics. Dans N. Frantzeskaki, K. Hölscher, M. Bach et F. Avelino (dir.), *Co-creating sustainable urban futures: A primer on applying transition management in cities* (p. 103-125). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69273-9_5
- Wolman, A. (1965). The Metabolism of Cities. *Scientific American*, 213, 179-190.
- Zengerling, C. (2019). Governing the city of flows: How urban metabolism approaches may strengthen accountability in strategic planning. *Urban Planning*, 4(1), 187-199. <https://doi.org/10.17645/up.v4i1.1750>
- Zhang, Y. (2013). Urban metabolism: A review of research methodologies. *Environmental Pollution*, 178, 463-473. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.052>
- Zhang, Y. (2019). Urban metabolism. Dans B. Fath (dir.), *Encyclopedia of ecology* (p. 441-451). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10756-0>