



HAL
open science

Intégration des limites planétaires dans l'ACV des bâtiments et des quartiers

Khaled Khazaal, Charlotte Roux, Bruno Peuportier, Patrick Schalbart

► **To cite this version:**

Khaled Khazaal, Charlotte Roux, Bruno Peuportier, Patrick Schalbart. Intégration des limites planétaires dans l'ACV des bâtiments et des quartiers. Conférence IBPSA France 2024, IBPSA France, May 2024, La Rochelle / Oléron, France. hal-04772194

HAL Id: hal-04772194

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-04772194v1>

Submitted on 7 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Intégration des limites planétaires dans l'ACV des bâtiments et des quartiers

Khaled Khazaal*¹, Charlotte Roux¹, Bruno Peuportier¹, Patrick Schalbart¹

¹ Mines Paris, Université PSL, Centre d'Efficacité Énergétique des Systèmes (CES),
75006 Paris, France

* khaled.khazaal@minesparis.psl.eu

RESUME

Les bâtiments contribuent à plus de 28 % des émissions de gaz à effet de serre en France. Pour respecter l'accord de Paris, il faut diviser par deux les émissions d'ici 2030 et les annuler d'ici 2050. En réponse à l'urgence environnementale un changement de paradigme est nécessaire pour passer d'une évaluation environnementale relative (e.g. comparaison de variantes) à une évaluation absolue (comparaison à un seuil). Ce basculement peut se faire par exemple via l'utilisation du cadre conceptuel des limites planétaires. L'intégration de ces dernières suppose dans certains cas d'effectuer une descente d'échelle depuis la planète jusqu'au projet étudié. Cette communication présente un état de l'art des méthodes permettant de progresser vers une évaluation environnementale absolue des bâtiments. Les travaux proposant des modalités d'intégration des limites planétaires dans l'ACV sont analysés pour étudier les possibilités d'application dans le cadre de l'écoconception des bâtiments et des quartiers, notamment dans la prise en compte du contexte territorial du projet.

MOTS-CLÉS : Analyse du cycle de vie, bâtiment, limites planétaires

ABSTRACT

Buildings account for over 28 % of greenhouse gas emissions in France. To comply with the Paris Agreement, emissions need to be halved by 2030 and eliminated by 2050. In response to the environmental crisis, a paradigm shift is needed from relative environmental assessment (e.g. comparison of variants) to absolute assessment (comparison with a threshold). This can be achieved, for example, by using the conceptual framework of planetary boundaries founded. In some cases, their integration means scaling down from the planet level to the project level. This paper presents the state of the art in methods for progressing towards an absolute environmental assessment of buildings. Works proposing ways of integrating planetary boundaries into LCA are analysed in order to examine possible applications in the eco-design of buildings and districts, particularly while considering the project's territorial context.

KEYWORDS: Life cycle assessment, buildings, planetary boundaries

1. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie primaire en France. Il représente 28 % des émissions totales de gaz à effet de serre du pays en prenant en compte les émissions liées à la production d'énergie consommée dans les bâtiments (Ministère de la transition écologique 2020). La transition écologique de ce secteur est essentielle pour atteindre les objectifs fixés par les accords internationaux sur le climat et contribuer à maintenir la Terre dans un état de fonctionnement sûr (Rockström, Steffen, et al. 2009; Steffen, Richardson, et al. 2015). Or les stratégies nationales de décarbonisation prennent rarement en compte les émissions incorporées ou indirectes (matériaux,

équipements, etc.) dans leur définition de net zéro émissions en raison de leur complexité, notamment en ce qui concerne les émissions produites à l'étranger. Et les autres limites planétaires sont peu présentes dans les stratégies nationales. Les propositions de la littérature concernant la définition du bâtiment à énergie zéro (bâtiment qui produit autant d'énergie qu'il en consomme) ont également tendance à se concentrer uniquement sur l'utilisation de l'énergie opérationnelle, voir par exemple les travaux de (Sartori, Napolitano, et Voss 2012). C'est dans ce contexte que l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) des bâtiments dans un cadre d'écoconception s'impose comme un outil essentiel pour évaluer et éventuellement améliorer la performance environnementale d'un projet de construction à l'échelle globale (Peuportier, Thiers, et al. 2013a).

L'ACV permet d'évaluer les impacts environnementaux des bâtiments, depuis leur construction jusqu'à leur fin de vie, en passant par leur utilisation et leur entretien (Zabalza Bribián, Aranda Usón, et al. 2009). Cependant, l'ACV est le plus souvent effectuée en comparant différentes variantes afin de choisir la meilleure. Des efforts récents ont été faits pour progresser vers une évaluation environnementale dite "absolue" (Bjørn, Chandrakumar, et al. 2020; Andersen, Ohms, et al. 2020). Celle-ci suppose de définir des seuils à respecter, exogènes au projet étudié et permettant de valider une performance environnementale « suffisante ».

L'ACV absolue peut être mise en œuvre de différentes manières, comme en se basant sur les accords internationaux pour fixer des budgets carbone (Ministère de la transition écologique 2020), les benchmarks de performance environnementale (Peuportier et Wurtz 2023), ou en se basant sur le concept de limites planétaires. Les limites planétaires peuvent être utilisées pour déterminer les capacités de charge de la planète qui délimitent un "espace opérationnel sûr" dans lequel l'humanité peut exister, ce qui pourrait transformer les indicateurs ACV en indicateurs absolus de durabilité environnementale. Les seuils ainsi obtenus pourraient permettre d'évaluer si le projet étudié est suffisamment performant au regard des enjeux environnementaux. C'est l'objet de nombreux travaux de recherche actuellement, dont certains dans le secteur de la construction. Ils seront présentés suite à une brève description du concept de limite planétaire.

Le concept de Limites Planétaires (LP), proposé en 2009 par (Rockström, Steffen, et al. 2009; Steffen, Richardson, et al. 2015), et révisé pour la dernière fois en 2023 (Richardson, Steffen, et al. 2023), vise à définir un « espace de fonctionnement sûr pour l'humanité » (*Safe Operating Space*) basé sur l'évolution de neuf phénomènes complexes et interconnectés. Pour étudier l'évolution de ces phénomènes, une ou plusieurs « variables de contrôle » sont définies à l'échelle mondiale. Un « seuil critique » est fixé pour chacune de ces variables, avec une « zone d'incertitude » composée de deux valeurs : une valeur basse (« frontière planétaire ») et une valeur haute (« limite planétaire »). La frontière représente la zone de danger qui précède la limite au-delà de laquelle les écosystèmes pourraient basculer dans un état inconnu et probablement défavorable à l'humanité (C Larrieu et al. La France face aux neuf limites planétaires, 2023). Ces limites sont définies et traitées dans (Rockström, Steffen, et al. 2009), les limites les plus prometteuses sur lesquelles travailler dans le contexte de l'écoconception des bâtiments et des quartiers sont présentées dans le [Tableau 1](#). Les critères pris en compte sont 1/ la pertinence environnementale ; 2/ la faisabilité (théorique) d'intégration ; 3/ la possibilité de régionalisation.

Le premier critère est basé sur : le dépassement critique des limites planétaires associées, la pertinence de l'objet étudié par rapport aux enjeux de l'aménagement des quartiers. Le deuxième critère

est basé sur les éléments suivants : travaux nombreux proposant des pistes d'intégration, existence de politique publique facilitant la descente d'échelle (méthode d'élaboration de seuils environnementaux présentée dans la [Partie 2](#)), compatibilité entre les métriques. Le troisième est basé sur : l'intérêt et la faisabilité de la régionalisation de certaines limites pour pouvoir dériver des budgets/limites locales prenant en compte les spécificités régionales.

Les différentes LP sont généralement traitées séparément, tout en soulignant les nombreuses interactions qui existent entre elles (Lade, Steffen, et al. 2019). Ainsi, elles forment un système complexe qu'on peut étudier d'une manière globale et transversale. Lors de la révision du modèle en 2015, les auteurs ont complété la grille d'analyse par des variables géographiques spécifiques au territoire afin de faciliter les tests de régionalisation. Dans le cas de la limite "changement d'usage des sols" par exemple, ils ont distingué la situation des forêts tempérées de celle des forêts tropicales ou boréales (Steffen, Richardson, et al. 2015).

Tableau 1 : Limites planétaires

Limite	Variable de contrôle	C1/ Dépass- ement	C2/ Existence de politique publique nationale	C3/ Régionalisation
Réchauffement climatique	Concentration de CO2 dans l'atmosphère en partie par million (ppm)	Oui	Oui (Stratégie Nationale Bas Carbone)	Non
	Augmentation du forçage radiatif en watt par mètre carré (W/m ²) par rapport à l'ère préindustrielle			
Changement d'usage des sols	Échelle mondiale : rapport entre la superficie forestière actuelle et la superficie forestière «originelle» (avant 1700)	Oui	Oui (Zéro Artificialisation Net)	Oui
Utilisation et cycle de l'eau douce	Eau bleue : volume total d'eau douce consommé, prélevé dans les eaux de surface et souterraines renouvelables	Oui	Oui (Plan eau)	Oui
	Eau verte : pourcentage de la surface terrestre libre de glace dans laquelle l'humidité du sol de la zone racinaire s'écarte de la variabilité naturelle observée au cours des 11 000 dernières années (beaucoup plus humide ou beaucoup plus sec)			
Érosion de la biodiversité	Diversité spécifique : taux d'extinction d'espèces (nombre d'extinctions sur un million d'espèces, par an)	Oui	Oui (Stratégie Nationale Biodiversité)	Oui
	Diversité fonctionnelle : indice d'intégrité de la biodiversité – IIB (abondance des espèces dans un écosystème par rapport à leur abondance à l'ère préindustrielle), en pourcentage			

Le cadre d'analyse des LP pourrait ainsi constituer un outil méthodologique pour structurer la gouvernance environnementale nationale. Des budgets nationaux peuvent être dérivés de ces limites en suivant une approche « top - down », voir par exemple (Brejnord et al. 2017) et (Priore, Jusselme, et al. 2021). Ces budgets nationaux peuvent ensuite être ramenés à l'échelle des bâtiments ou des quartiers par différentes techniques de descente d'échelle. Cependant, le cadre initial des LP n'accorde pas un seuil pour les ressources (minérales ou métalliques) qui représentent une part importante de l'impact environnemental incorporé des bâtiments. (Bendahmane, Gondran, et al. 2022) ont travaillé sur ce sujet en développant une méthodologie pour proposer un budget de ressources durable pour chaque substance minérale ou métallique et en combinant les méthodes d'analyse de flux de matières à la méthode ACV.

Cette communication a pour objectif de présenter l'état de l'art sur l'utilisation du concept des limites planétaires afin de pouvoir effectuer, au niveau des bâtiments et des quartiers, une analyse de cycle de vie dite absolue. Les concepts clés ainsi que la méthode de descente d'échelle qui existe aujourd'hui dans la littérature sont présentés en premier. Un cas d'étude sera ensuite présenté, afin de comparer les

valeurs d'émissions de gaz à effet de serre d'un bâtiment résidentiel aux budgets carbone d'une maison établis par une étude Danoise (Brejnrod, Kalbar, et al. 2017a).

2. DESCENTE D'ECHELLE ET ELABORATION DE BUDGET CARBONE

Quelques études ont appliqué le cadre d'analyse des LP à une échelle sous-planétaire. Compte tenu des disparités économiques, sociales et écologiques entre les pays, le travail a consisté à définir des parts nationales afin de déterminer l'espace opérationnel sûr à l'intérieur des frontières du pays. Les LP sont alors interprétées comme des budgets globaux alloués chaque année aux pays sur la base d'un principe d'allocation. Plusieurs équipes ont travaillé à l'échelle nationale, on peut citer par exemple l'exercice de (Friot et Dao 2015) pour la Suisse, (Nykqvist 2013) pour le Suède ou encore (Lucas et Wilting 2018) pour les Pays-Bas. Aucun ne considère de limites régionales mais plutôt un partage du capital planétaire désagrégé à l'échelle nationale. À notre connaissance ce type d'étude n'existe pas pour la France.

Une méthode de descente d'échelle alloue une part de « budget » à un sous-ensemble (e.g. part nationale du budget planétaire). « Descendre » les limites planétaires jusqu'à l'échelle du projet implique plusieurs choix : premièrement, le choix entre indicateurs d'ACV et LP (conversion de LP en indicateurs d'ACV, ou utilisation des facteurs de caractérisation pour exprimer les résultats d'ACV en unités de LP) ; ensuite, une combinaison de différentes méthodes d'allocation (de planétaire à national, puis sectoriel, et finalement au niveau du projet) (Francart, Clausen, et al. 2023). Six modes d'allocation sont généralement considérés, basés sur six principes : l'égalité, les besoins, le droit au développement, la souveraineté, la capacité et la responsabilité. Ces modes d'allocation sont définis en détails dans (Ryberg, Andersen, et al. 2020a). Les auteurs ont également fourni un cadre méthodologique pour déterminer et communiquer les théories de justice distributive qui encadrent le choix des principes de distribution lors de la descente d'échelle des LP dans les évaluations absolues de la durabilité environnementale. Ils ont identifié 18 études qui proposent 34 façons différentes de procéder selon différents principes de justice distributive. C'est la théorie de distribution égalitaire, pour laquelle le budget environnemental global est réparti équitablement entre la population mondiale, qui est la plus utilisée dans la littérature.

Quelques rares études s'intéressent spécifiquement au cas des bâtiments. (Brejnrod, Kalbar, et al. 2017a) ont développé un cadre d'évaluation absolue des bâtiments, ou plutôt des logements, en allouant à la fonction logement une part de capital-planète évalué à l'échelle nationale pour le Danemark. L'allocation est proposée soit sur la base de la valeur économique du service rendu (ici, le logement), soit sur la base de la contribution environnementale de ce service par rapport au total (allocation au prorata de la contribution, ce qui pénalise les secteurs qui ont déjà fait beaucoup d'efforts pour réduire leurs impacts, car une part plus faible de capital leur est alloué). Ce seuil est comparé à une évaluation ACV. La proposition de (Andersen, Ohms, et al. 2020) est similaire. Un nombre plus important de principes d'allocation ont été testés et là encore, l'influence importante de ce choix est soulignée. Les deux études montrent que la « durabilité absolue » est très difficile à atteindre.

Une autre approche est proposée par (Ryberg, Andersen, et al. 2020a) pour allouer une part du budget au secteur bâtiment. Tout d'abord, un budget doit être attribué à toutes les personnes selon un modèle de répartition précis (avec sur le court terme, une répartition égale par personne). Ensuite, la part attribuée à un secteur économique devrait être basée sur l'utilité que l'unité industrielle fournit aux utilisateurs.

Ainsi, le budget du secteur économique attribué à l'unité industrielle dépendra du nombre d'utilisateurs et de l'utilité que l'unité fournit à ses utilisateurs.

Le changement climatique représente la limite planétaire au caractère le plus global, c'est également une limite qui a un effet direct sur les autres limites. Par exemple, le CO₂ est un indicateur du changement climatique, mais son augmentation dans l'atmosphère a un impact sur l'acidification des océans et sur l'érosion de la biodiversité marine (Commissariat général au développement durable 2023). Cette limite est plus spécifiquement étudiée dans la suite.

Un budget carbone est un concept utilisé pour aider à fixer des objectifs de réduction des émissions. Il s'agit de la quantité maximale d'émissions anthropiques nettes cumulées de dioxyde de carbone. Il peut être appliqué à l'échelle planétaire, nationale ou plus spécifiquement à un secteur ou un projet.

Le GIEC introduit un « Budget Planétaire » qui fait référence à la quantité totale de dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres GES que l'humanité peut émettre dans l'atmosphère tout en maintenant le réchauffement climatique mondial en dessous de certains seuils, 1,5°C ou 2°C. Ces seuils sont généralement associés aux objectifs de l'Accord de Paris, bien que la cohérence entre les deux ne soit pas pleinement assurée. Il est calculé en tenant compte des émissions passées, des émissions actuelles, ainsi que des projections d'émissions futures, en fonction de plusieurs scénarios de développement économique, technologique et énergétique (Calvin, Dasgupta, et al. 2023).

La définition de budgets carbone pour le secteur du bâtiment d'un pays tenant compte des émissions incorporées en plus des émissions directes implique une comptabilité carbone détaillée interindustrielle et transfrontalière. L'étude suisse (Priore, Jusselme, et al. 2021) a relevé ces défis en développant une méthodologie d'allocation d'un budget carbone global à différentes échelles en considérant le secteur du bâtiment suisse. Cette approche pourrait être appliquée au secteur du bâtiment français, mais elle nécessite suffisamment de données sur le secteur industriel afin de pouvoir définir la part des émissions de la construction de bâtiments par rapport aux émissions totales du secteur industriel.

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) a été établie afin de fixer la feuille de route de la France pour conduire la politique d'atténuation du changement climatique. Elle fixe des objectifs à court et moyen termes qui sont définis à travers des budgets carbone représentant des plafonds annuels d'émissions territoriales à ne pas dépasser. Les deux principaux objectifs définis par la SNBC sont, d'une part, de réduire d'au moins 40 % les émissions de GES d'ici à 2030 par rapport aux émissions de 1990 et, d'autre part, d'atteindre la neutralité carbone nette d'ici à 2050. Elle vise à la fois à réduire les émissions territoriales et l'empreinte carbone, mais elle ne fixe pas d'objectifs concernant l'empreinte carbone. L'empreinte carbone prend en compte les émissions associées aux biens et services importés et soustrait les émissions associées aux exportations. Par habitant, en 2018, l'empreinte carbone française (11,2 t CO₂eq/habitant) est la plus élevée depuis 1995 (10,5 t CO₂eq/habitant) et reste constante depuis les années 2000. La baisse des émissions sur le territoire est en effet contrebalancée par une augmentation des émissions liées aux importations, multipliées par deux depuis 1995 (Ministère de la transition écologique 2020). Il est donc primordial de considérer l'impact environnemental entier (national et international) d'un produit. Pour les émissions de GES, on parle du « *Whole Life Carbon* » qui considère les émissions directes d'utilisation ainsi que les émissions incorporées.

3. CAS D'ETUDE

(Dicko, Roux, et al. 2023) ont effectué une étude de cas correspondant à un bâtiment résidentiel français pour évaluer la faisabilité d'atteindre un objectif de net zéro émissions en considérant le « Whole Life Carbon ». À partir d'une construction réalisée en 2016, différentes mesures d'amélioration sont étudiées : diminution des besoins en énergie de chauffage, mise en œuvre de matériaux biosourcés et de systèmes de production d'énergie renouvelable (pompe à chaleur géothermique, production d'eau chaude sanitaire solaire, et production d'électricité photovoltaïque). La simulation thermique dynamique est utilisée pour évaluer la consommation d'énergie ainsi que le risque de surchauffe en période chaude. Les émissions de gaz à effet de serre sont quantifiées à l'aide d'une approche d'analyse conséquentielle du cycle de vie, considérant que pendant une période de transition, l'exportation d'électricité permet d'éviter les impacts correspondant à une production marginale sur le réseau. Une durée de vie de 100 ans est considérée pour le bâtiment (10 ans pour les finitions du bâtiment, 20 ans pour les équipements, 25 ans pour les modules PV et 30 ans pour les fenêtres). L'ACV est réalisée avec l'hypothèse conservatrice qu'on remplace les éléments du bâtiment avec des éléments identiques à la fin de leur durée de vie.

Les résultats de l'étude ACV montrent une réduction potentielle des émissions totales de GES allant jusqu'à 97 % (Tableau 2) en utilisant des matériaux biosourcés, en minimisant les besoins de chauffage et en utilisant des sources d'énergie à faible teneur en carbone grâce à la mise en œuvre d'équipements appropriés. Le choix d'une structure en bois a permis de réduire les émissions liées à la construction de 3,01 à -0,41 kg CO₂eq/m²/an. Cependant, les émissions liées à la rénovation passent de 2,5 à 5,06 kg CO₂eq/m²/an à cause du remplacement de certains matériaux et équipements lors des rénovations, notamment le système photovoltaïque, le système de ventilation, et le câblage électrique.

Les impacts évités diminuent et deviennent très faibles à l'horizon 2050, lorsqu'on suppose que le réseau est 100% décarboné, selon le scénario de la SNBC. À partir de ce moment, le bâtiment devrait être à zéro émission nette, mais il reste des émissions inévitables dues à la rénovation (produits de construction tels que la plomberie, l'installation électrique et les équipements comme les capteurs solaires, pompes à chaleur, ventilation, etc.). Les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie seraient alors d'environ 5,6 kg CO₂eq/m²/an après la période de transition du système énergétique, notamment le mix électrique. Dans l'article initial, la possibilité de compenser ces émissions est étudiée, en envisageant la séquestration dans les forêts ou à travers la biomasse.

Tableau 2 : Valeurs de GES (en kgCO₂eq/m²/an) de l'impact Changement Climatique (EF v3.0)

Variante	Construction	Usage	Rénovation	Fin de vie	Total
Base	3,1	27	2,5	0,12	32,7
Après améliorations (phase de transition)	-0,41	-2,27	5,06	0,15	2,53
Après transition	-0,41	0,81	5,06	0,15	5,61

(Brejnrod, Kalbar, et al. 2017a) ont établi des budgets carbone pour une maison individuelle de surface moyenne de 128 m² au Danemark, et une occupation moyenne de 2,6 occupants par logement, en se basant sur la limite de réchauffement climatique de 2°C. Ces valeurs moyennes ne sont pas loin des valeurs françaises (113 m² et 2,5 occupants) (Insee 2017). Le budget trouvé qui permet de respecter la limite est de 2,2 kgCO₂eq/m²/an. Pour établir ce budget, la répartition de la capacité de charge de la planète se fait en deux étapes :

- 1) Distribution de la capacité de charge de la terre par habitant.
- 2) Attribution d'une partie de l'équivalent-personne quantifié en 1) à des services spécifiques liés aux bâtiments, dans ce cas, la fourniture de logements, y compris les effets de la construction, de l'exploitation et de l'entretien d'un logement danois.

Il faut prendre en compte le fait que le budget d'une maison individuelle sera forcément inférieur à celui d'un logement collectif, car on a moins d'occupants par m² dans une maison que dans un appartement (45 et 32,5 occ/m² respectivement en France) (Insee 2017). Le bâtiment de logement collectif français n'est pas loin du seuil danois (2,53 pour un seuil de 2,2 kgCO₂eq/m²/an). Par contre, après la période de transition, on s'éloigne plus du seuil et on risque de ne pas le respecter même s'il est établi pour un logement collectif en France.

La descente d'échelle présente un caractère subjectif, notamment par rapport aux objectifs qu'on définit (limites planétaires ou accords de Paris par exemple), mais aussi par rapport aux différentes théories de distribution de la capacité de charge de la planète. Il y a aussi la question de temporalité qui reste importante à prendre en considération. Les bâtiments étant des systèmes à très longue durée de vie, comment doit être pris en compte l'évolution du système productif (et donc les impacts de la rénovation), l'évolution du climat, la contribution du bâtiment à l'amélioration d'autres secteurs en phase de transition (e.g. secteur électrique et production photovoltaïque). Quelle est finalement la validité temporelle des budgets établis ? L'ensemble de ces questions doit être adressé pour réellement progresser vers une ACV absolue des bâtiments.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Dans cette communication, les modalités d'articulation entre les concepts d'ACV absolue et des limites planétaires ont été présentées. Les principaux travaux sur le sujet ont été analysés. Notamment, plusieurs méthodes de descente d'échelle ont été identifiées. Le résultat d'une de ces études a été utilisé pour évaluer la performance environnementale d'un bâtiment dans le contexte de limitation du réchauffement climatique à 2°C. Le changement climatique est identifié comme la limite la plus simple à traiter et la plus étudiée dans la littérature. Plusieurs questions concernant la temporalité et l'évolution du contexte climatique et technologique au long de la durée de vie du bâtiment doivent cependant être résolues. Une perspective de ce travail est de pouvoir créer des budgets pour le secteur du bâtiment français en utilisant différentes limites planétaires. Ceci implique des efforts sur la régionalisation et la spatialisation des impacts, notamment pour les cas de l'eau et de l'usage des sols. Il serait intéressant également d'étudier le cas d'un quartier multi-usage, afin d'établir des budgets qui prennent en compte en plus de la fonction de logement, autres activités comme le commerce, l'éducation, le transport, mais aussi l'alimentation.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Andersen, Camilla Ernst, Pernille Ohms, Freja Nygaard Rasmussen, Harpa Birgisdóttir, Morten Birkved, Michael Hauschild, et Morten Ryberg. 2020. « Assessment of Absolute Environmental Sustainability in the Built Environment ». *Building and Environment* 171 (mars): 106633. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106633>.
- Bendahmane, N, N Gondran, et J Chevalier. 2022. « AESA Approach Applied to Mineral and Metal Resources Use Sustainability in the Building Sector: The MiMOSA Method ». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1078 (1): 012124. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012124>.
- Bjørn, Anders, Chanjief Chandrakumar, Anne-Marie Boulay, Gabor Doka, Kai Fang, Natacha Gondran, Michael Zwicky Hauschild, et al. 2020. « Review of Life-Cycle Based Methods for Absolute Environmental Sustainability

- Assessment and Their Applications ». *Environmental Research Letters* 15 (8): 083001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab89d7>.
- Brejtnrod, Kathrine Nykjær, Pradip Kalbar, Steffen Petersen, et Morten Birkved. 2017a. « The Absolute Environmental Performance of Buildings ». *Building and Environment* 119 (juillet): 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.003>.
- . 2017b. « The Absolute Environmental Performance of Buildings ». *Building and Environment* 119 (juillet): 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.003>.
- Calvin, Katherine, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter W. Thorne, Christopher Trisos, José Romero, et al. 2023. « IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. » First. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Commissariat général au développement durable. 2023. « La France face aux neuf limites planétaires ». <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/la-france-face-aux-neuf-limites-planetaires/>.
- Dicko, Alpha Hamid, Charlotte Roux, et Bruno Peuportier. 2023. « Achieving Net Zero Carbon Performance in a French Apartment Building? » *Energies* 16 (22): 7608. <https://doi.org/10.3390/en16227608>.
- Francart, N, C A Clausen, A Bjørn, et H Birgisdottir. 2023. « Building within Planetary Boundaries: Setting and Assessing Absolute Sustainability Targets at the Building Level ». *Journal of Physics: Conference Series* 2600 (15): 152015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/15/152015>.
- Friot, Damien, et Hy Dao. 2015. « Environmental Limits and Swiss Footprints Based on Planetary Boundaries ». Insee. 2017. « Les conditions de logement en France ». Insee. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2586377>.
- Lade, Steven J., Will Steffen, Wim De Vries, Stephen R. Carpenter, Jonathan F. Donges, Dieter Gerten, Holger Hoff, Tim Newbold, Katherine Richardson, et Johan Rockström. 2019. « Human Impacts on Planetary Boundaries Amplified by Earth System Interactions ». *Nature Sustainability* 3 (2): 119-28. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0454-4>.
- Lucas, Paul, et Harry Wiltng. 2018. « Towards a Safe Operating Space for the Netherlands », juillet.
- Ministère de la transition écologique. 2020. « Stratégie Nationale Bas Carbone ». <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>.
- Nykqvist, Björn. 2013. *National Environmental Performance on Planetary Boundaries: A Study for the Swedish Environmental Protection Agency*. Stockholm: Swedish Environmental Protection Agency.
- Peuportier, Bruno, Stéphane Thiers, et Alain Guiavarch. 2013a. « Eco-Design of Buildings Using Thermal Simulation and Life Cycle Assessment ». *Journal of Cleaner Production* 39 (janvier): 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.041>.
- . 2013b. « Eco-Design of Buildings Using Thermal Simulation and Life Cycle Assessment ». *Journal of Cleaner Production* 39 (janvier): 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.041>.
- Peuportier, Bruno, et Aurore Wurtz. 2023. « Application of Life Cycle Assessment to a Building Sample in Order to Help in Projects Evaluation », septembre.
- Pittau, Francesco, Gabriele Lumia, Niko Heeren, Giuliana Iannaccone, et Guillaume Habert. 2019. « Retrofit as a Carbon Sink: The Carbon Storage Potentials of the EU Housing Stock ». *Journal of Cleaner Production* 214 (mars): 365-76. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.304>.
- Priore, Yasmine Dominique, Thomas Jusselme, et Guillaume Habert. 2021. « Deriving Global Carbon Budgets for the Swiss Built Environment ». *Journal of Physics: Conference Series* 2042 (1): 012172. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012172>.
- Richardson, Katherine, Will Steffen, Wolfgang Lucht, Jørgen Bendtsen, Sarah E. Cornell, Jonathan F. Donges, Markus Drüke, et al. 2023. « Earth beyond Six of Nine Planetary Boundaries ». *Science Advances* 9 (37): eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>.
- Rockström, Johan, Will Steffen, Kevin Noone, Åsa Persson, F. Stuart Chapin, Eric F. Lambin, Timothy M. Lenton, et al. 2009. « A Safe Operating Space for Humanity ». *Nature* 461 (7263): 472-75. <https://doi.org/10.1038/461472a>.
- Ryberg, Morten W., Martin Marchman Andersen, Mikołaj Owsianiak, et Michael Z. Hauschild. 2020a. « Downscaling the Planetary Boundaries in Absolute Environmental Sustainability Assessments – A Review ». *Journal of Cleaner Production* 276 (décembre): 123287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123287>.
- . 2020b. « Downscaling the Planetary Boundaries in Absolute Environmental Sustainability Assessments – A Review ». *Journal of Cleaner Production* 276 (décembre): 123287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123287>.
- Steffen, Will, Katherine Richardson, Johan Rockström, Sarah E. Cornell, Ingo Fetzer, Elena M. Bennett, Reinette Biggs, et al. 2015. « Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet ». *Science* 347 (6223): 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>.
- Zabalza Bribián, Ignacio, Alfonso Aranda Usón, et Sabina Scarpellini. 2009. « Life Cycle Assessment in Buildings: State-of-the-Art and Simplified LCA Methodology as a Complement for Building Certification ». *Building and Environment* 44 (12): 2510-20. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.001>.