

Rapport complémentaire

Septembre 2024

RAPPORT SUR
**L'INDICE DE
CIRCULARITÉ DE
L'ÉCONOMIE**

Québec

L'économie circulaire : un outil pour respecter
les limites planétaires

Document de méthodologie



CIRCLE ECONOMY

Nous sommes un organisme à incidence mondiale établi à Amsterdam et doté d'une équipe internationale de spécialistes passionnés.

Nous habilitons les entreprises, villes et nations au moyen de solutions pratiques et évolutives visant à concrétiser l'économie circulaire..

Notre vision : un système économique qui assure l'épanouissement des gens et de la planète.

Pour éviter le dérèglement climatique, notre objectif est de doubler la circularité mondiale de l'économie d'ici 2032.



RECYC-QUÉBEC

RECYC-QUÉBEC est une société d'État créée en 1990 avec le souci de faire du Québec un modèle de gestion novatrice et durable des matières résiduelles pour une société sans gaspillage.

Elle promeut, développe et favorise la réduction, le réemploi, la récupération et le recyclage de contenants, d'emballages, de matières ou de produits ainsi que leur valorisation dans une perspective d'économie circulaire et de lutte aux changements climatiques.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	3
1. PRÉFACE	4
2. APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE	5
3. ÉLABORATION DE L'EXTENSION ENVIRONNEMENTALE	7
4. CALCUL DES INDICATEURS	8
4.1 Changement climatique	9
4.2 Utilisation de l'eau douce	10
4.3 Affectation des terres	12
4.4 Eutrophisation de l'eau douce :	14
4.5 Eutrophisation en milieu marin	14
4.6 Formation de particules (AOD)	15
5. DISCUSSION	17

1. PRÉFACE

Cette méthodologie s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés dans le cadre du *Rapport sur l'indice de circularité de l'économie du Québec*¹. Le modèle entrées-sorties régionalisé (modèle SNAC) et les scénarios de circularité sont fondés sur ce rapport. Alors que le *Rapport sur l'indice de circularité de l'économie du Québec* avait pour objectif de modéliser l'effet des stratégies circulaires sur la consommation de matériaux, cette méthodologie étend l'analyse de l'incidence à des impacts environnementaux définis de manière plus large.

¹ Circle Economy. (2021). *Rapport sur l'indice de circularité de l'économie du Québec*. Amsterdam : Circle Economy. Tiré du [site Web de CGRI](#)

2. APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

L'objectif de cette méthodologie est d'évaluer l'impact environnemental des stratégies circulaires sur le Québec, à l'aide du cadre des limites planétaires. Toutefois, ce cadre prend en compte l'ensemble du système terrestre, et n'a pas été conçu pour être utilisé directement à l'échelle régionale au moyen d'une réduction d'échelle ou d'une désagrégation².

Cette méthodologie présentera une analyse de l'impact du cycle de vie, fondée sur l'analyse du cycle de vie (ACV) du cadre des limites planétaires, ayant été régionalisée pour le Québec au moyen de données spatialement explicites lorsque nécessaire. Les tentatives actuelles d'application du cadre des limites planétaires sont souvent génériques sur le plan spatial^{3,4,5,6,7,8}, ce qui signifie qu'elles ne prennent pas en compte les effets régionaux des répercussions. Cette méthodologie contribue au développement de pointe en étendant l'ACV du cadre des limites planétaires aux répercussions régionalisées, le cas échéant.

Une ACV fondée sur les limites planétaires requiert deux étapes principales. D'abord, la quantification des répercussions (analyse de l'incidence du cycle de vie), puis la comparaison avec la part de l'espace de fonctionnement sûr pour cette région⁹.

La majorité des indicateurs sont fondés sur la méthode de pointe mondialement régionalisée pour l'analyse de l'incidence du cycle de vie d'IMPACT World+¹⁰ (IW+), et appliqués au modèle SNAC, bien que certains indicateurs personnalisés aient été ajoutés conformément aux recherches les plus récentes. Grâce à OpenIO-Canada¹¹, les données ascendantes de Statistique Canada, combinées à celles d'Exiobase, ont été utilisées pour créer l'extension de l'environnement nécessaire à la caractérisation des répercussions d'IW+.

Pour établir la part des espaces de fonctionnement sûrs, nous avons procédé à des analyses documentaires approfondies pour chaque indicateur, afin d'établir le cadre des limites à l'échelle mondiale et régionale. Certains indicateurs, comme le changement climatique, n'ont pas besoin d'être régionalisés et

² Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., [...] et Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855.

³ Bjørn, A., et Hauschild, M. Z. (2015). Introducing carrying capacity-based normalisation in LCA: framework and development of references at midpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20, 1005-1018.

⁴ Sandin, G., Peters, G. M., et Swanström, M. (2015). Using the planetary boundaries framework for setting impact-reduction targets in LCA contexts. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20, 1684-1700.

⁵ Doka, G. (2016) Combining life cycle inventory results with planetary boundaries: The Planetary Boundary Allowance impact assessment method Update PBA'06. Gabor Doka, Doka Life Cycle Assessments : Zurich, Suisse. Avril 2016. Tiré du [site Web Doka](#)

⁶ Sala, S., Benini, L., Crenna, E., et Secchi, M. (2016). Global environmental impacts and planetary boundaries in LCA. Office des publications de l'Union européenne : Luxembourg. Tiré du [site Web de l'Union européenne](#)

⁷ Sala, S., Crenna, E., Secchi, M., et Sanyé-Mengual, E. (2020). Environmental sustainability of European production and consumption assessed against planetary boundaries. *Journal of Environmental Management*, 269, 110686. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110686

⁸ Ryberg, M. W., Owsianiak, M., Richardson, K., et Hauschild, M. Z. (2018). Development of a life-cycle impact assessment methodology linked to the Planetary Boundaries framework. *Ecological Indicators*, 88, 250-262. doi:10.1016/j.ecolind.2017.12.065

⁹ Bjørn, A., Richardson, K., et Hauschild, M. Z. (2019). A framework for development and communication of absolute environmental sustainability assessment methods. *Journal of Industrial Ecology*, 23(4), 838-854. doi:10.1111/jiec.12820

¹⁰ Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A.-M., Bourgault, G., De Bruille, V., [...] Jolliet, O. (2019). Impact world+: A globally regionalized life cycle impact assessment method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(9), 1653-1674. doi:10.1007/s11367-019-01583-0. Tiré du [site Web d'Impact World+](#)

¹¹ CIRAI. (2024). CIRAI/OpenIO-Canada : V2.9. (2024). Tiré du [site Web d'OpenIO-Canada](#)

sont plutôt réduits directement à partir de leur limite mondiale, en fonction de la population. D'autres indicateurs, comme l'utilisation des sols, sont de nature spatiale et requièrent des données et des limites adaptées à chaque région. Ici, nous avons relié les recherches existantes qui abordent ces questions par indicateur, tout en utilisant des bases de données ascendantes ou spatiales.

Enfin, pour chaque indicateur, la limite et l'impact ont été calculés pour le Québec, tout en renvoyant les données aux modèles de scénarios, afin de comparer l'incidence des scénarios sous l'angle des limites planétaires.

Sources de données

Les principales sources de données pour le modèle régionalisé des entrées-sorties sont Exiobase et OpenIO-Canada. OpenIO-Canada utilise à son tour de nombreuses données de Statistique Canada, sur lesquelles nous nous appuyons principalement pour les tableaux des ressources et des emplois¹², les comptes de GES¹³ et les données de l'inventaire national des rejets de polluants (INRP)¹⁴.

Les frontières administratives¹⁵ de Statistique Canada ont été utilisées pour choisir les données qui s'appliquent précisément au Québec. La province a été sélectionnée et utilisée par la suite pour toutes les requêtes spatiales relatives à une région en particulier. Pour les frontières administratives mondiales, nous avons utilisé l'ensemble de données vectorielles sur les pays de Natural Earth¹⁶.

D'autres sources de données spécifiques aux indicateurs seront mentionnées dans la sous-section correspondante du chapitre 4.

¹² Statistique Canada. (s.d.). Tableaux des ressources et des emplois. Tiré du [site Web de Statistique Canada](#)

¹³ Statistique Canada. (s.d.). Compte des flux physiques des émissions de gaz à effet de serre : outil interactif. Tiré du [site Web de Statistique Canada](#)

¹⁴ Gouvernement du Canada. (s.d.). Inventaire national des rejets de polluants. Tiré du [site Web du gouvernement du Canada](#)

¹⁵ Gouvernement du Canada. (s.d.). Limites administratives au Canada Tiré du [site Web du gouvernement du Canada](#)

¹⁶ Natural Earth. (s.d.). Spatial vectors. Tiré du [site Web de données de Natural Earth](#)

3. ÉLABORATION DE L'EXTENSION ENVIRONNEMENTALE

L'extension environnementale du modèle SNAC utilisée dans l'analyse sous-jacente au *Rapport sur l'indice de circularité de l'économie du Québec* n'incluait pas tous les facteurs de stress environnementaux. Cela signifie que pour utiliser les répercussions d'IW+, tous les facteurs de stress manquants à la caractérisation requise ont dû être ajoutés. L'étendue spatiale du Québec étant provinciale, il n'a pas été possible de directement tirer profit des bases de données d'émissions à l'échelle nationale. Nous avons donc choisi d'harmoniser la base de données de l'INRP de Statistique Canada avec celle d'Exiobase.

Notre stratégie initiale consistait à utiliser directement les tableaux d'OpenIO-Canada¹⁷. Pour la plupart des années, des versions préliminaires sont disponibles, y compris pour l'année 2016, notre année cible. Cependant, une enquête plus approfondie a révélé que les émissions déclarées par les extensions incluses dans ces tableaux ne correspondaient pas aux chiffres déclarés au niveau national dans le contexte de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC)^{18,19}. Le fait de reconstruire manuellement les tableaux à l'aide de la dernière version (« commit 6360c18 » sur Github) et des données de l'INRP²⁰ nouvellement récupérées (les données incluses dans le référentiel sont défectueuses) a permis de résoudre ce problème, probablement en incluant des « commit » plus récents qui ont corrigé les bogues potentiels dans les tableaux d'IO.

Néanmoins, bien que l'extension d'OpenIO-Canada corresponde désormais aux données de la CCNUCC (les émissions de GES par pays, déclarées à la CCNUCC, sont l'une des données d'entrée), d'autres émissions et substances sont sous-déclarées. Alors que les données sur les émissions de GES sont basées sur des chiffres déclarés au niveau national, les données sur les autres substances proviennent de l'INRP²¹, qui consigne directement les polluants provenant de plus de 7 000 installations au Canada. Le principal problème est que ces comptes ne correspondent pas aux bases de données mondiales sur les polluants, et qu'il n'est pas possible de comparer directement des bases de données d'inventaires des émissions et des transferts de matières polluantes similaires provenant d'autres pays. Par exemple, dans Exiobase, les émissions de substances dans l'air, dans le sol et dans l'eau sont le résultat d'estimations de modélisation qui rassemblent un large éventail de données et d'hypothèses^{22,23}.

Compte tenu des problèmes d'harmonisation des données ascendantes de l'INRP et des rapports mondiaux, nous avons choisi d'utiliser les données de l'INRP au Canada pour réduire l'échelle des chiffres nationaux concernant les polluants, à partir des sources de données mondiales, au Québec. Par exemple, grâce aux données de l'INRP, nous savons que les rejets totaux de PM_{2,5} s'élèvent à 48 292 tonnes

¹⁷ CIRAIG. (2024). CIRAIG/OpenIO-Canada : V2.9. (2024). Tiré du [site Web d'OpenIO-Canada](#)

¹⁸ United Nations Climate Change. (s.d.). GHG total without LULUCF data table. Tiré du [site Web de l'Organisation des Nations Unies](#)

¹⁹ Pflüger, M., et Gütschow, J. (2023). UNFCCC country-submitted greenhouse gas emissions data until 2022-12-13. doi:10.5281/zenodo.7432088

²⁰ Gouvernement du Canada. (2016). Inventaire national des rejets de polluants (INRP). Tiré du [site Web du gouvernement du Canada](#)

²¹ Gouvernement du Canada. (s.d.). Inventaire national des rejets de polluants. Tiré du [site Web du gouvernement du Canada](#)

²² Stadler, K., Wood, R., Bulavskaya, T., Södersten, C. J., Simas, M., Schmidt, S., [...] et Tukker, A. (2018). EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables. *Journal of Industrial Ecology*, 22(3), 502-515. doi:10.1111/jiec.12715

²³ Merciai, S., et Schmidt, J. (2018). Methodology for the construction of global multi-regional hybrid supply and use tables for the EXIOBASE v3 database. *Journal of Industrial Ecology*, 22(3), 516-531. doi:10.1111/jiec.12713

au Canada et à 7 733 tonnes au Québec, ce qui signifie que 16 % des PM_{2,5} à l'échelle nationale proviennent de la province. Nous avons appliqué ce facteur de réduction d'échelle par polluant et par secteur, en utilisant les données nationales sur les polluants pour le Canada, à partir d'Exiobase. En utilisant les totaux d'Exiobase, nous avons également comparé notre méthodologie aux limites mondiales pour nous assurer que la méthode est solide.

Enfin, nous avons caractérisé l'extension environnementale harmonisée aux répercussions requises et les avons ajoutées au modèle SNAC original.

4. CALCUL DES INDICATEURS

Nous avons procédé à un examen approfondi des sources pour chaque indicateur. Comme les sources de données, les méthodologies, les unités de mesure et les calendriers peuvent différer, il existe de nombreux renseignements contradictoires sur les capacités de charge mondiales. Pour ces indicateurs, nous avons choisi de dresser une liste de documents de référence ainsi que leur limite (comparable) rapportée, après quoi nous avons utilisé la limite moyenne.

Pour certains indicateurs, les études font état d'unités de mesure très différentes, qui ne sont pas directement comparables. Pour ces études, nous avons choisi celles qui correspondent aux répercussions disponibles.

Enfin, tous les indicateurs ne peuvent pas être régionalisés par une simple réduction d'échelle. Dans la mesure du possible, nous avons examiné et utilisé des études spatialement explicites portant sur des indicateurs précis de la limite planétaire.

À propos de la réduction d'échelle

Le calcul de la part de l'espace de fonctionnement sûr soulève diverses questions éthiques. Par souci de simplicité, nous nous en sommes tenus à des parts fondées sur la population (principe égalitaire). Pour les indicateurs mondiaux, la part du Québec dans l'espace global de fonctionnement sûr est d'environ 0,1 %, sur la base des données démographiques de 2016 (voir tableau 4.1).

Tableau 4.1 : Facteur de réduction d'échelle basé sur la population²⁴

Population du Québec	8 164 000
Population mondiale	7 464 021 934
Réduction d'échelle pour le Québec :	0,001

²⁴ Banque mondiale. (s.d.) Population, total. Tiré du [site Web de la Banque mondiale](#)

4.1 Changement climatique

Limite au Québec : **1,39 t éq. CO₂/pers./an** ou **10,4 Mt d'éq. CO₂/an**

Facteur de caractérisation (FC) du Québec : variable selon le GES, identique à l'échelle mondiale

Pour cet indicateur, nous avons utilisé une approche globale et avons donc établi la limite régionale en fonction de la limite mondiale. Cette dernière est fondée sur une simple moyenne de chiffres harmonisés provenant d'un échantillon sélectionné d'études qui ont mentionné la limite par rapport aux principaux GES et à leur potentiel de réchauffement planétaire (PRP) (éq. CO₂). Les études exprimant la limite uniquement pour le CO₂ n'ont pas été prises en compte.

Tableau 4.2 : Limites du changement climatique

Étude	Limite	Incluse	Remarque :
Sala et al. (2016)	6,81 Gt d'éq. CO ₂ /an	Oui	Modèles atmosphériques (horizon temporel en millions d'années), année de référence 2010, objectif de 2 °C
Doka et al. (2016) ²⁵	8,28 Gt d'éq. CO ₂ /an	Oui	Année de référence 2011 (11,5 Gt d'éq. CO ₂ /an dans l'hypothèse d'une population de 10E+12 en 2100)
Butz et al. (2018)	14,25 Gt d'éq. CO ₂ /an	Oui	Pas d'horizon temporel spécifié, année de référence 2013, objectif de 2 °C
Dao et al. (2018)	12,3 Gt d'éq. CO ₂ /an	Oui	Horizon temporel 1990-2100, année de référence 2015
Lucas et al. (2018)	9,9 Gt CO ₂ /an	Non	Horizon temporel 2015-2100, année de référence 2015, objectif de 2 °C
Fanning et O'Neill (2016)	8,06 Gt CO ₂ /an	Non	Horizon temporel 1850-2100, année de référence 2013
Meyer et al. (2018)	-7,5 Gt CO ₂ /an	Non	Horizon temporel 20??-2100

Les limites du changement climatique dans les études énumérées dans le tableau 4.2 varient considérablement. Cela s'explique par le fait que les limites sont basées sur des horizons temporels différents, et qu'elles utilisent divers modèles climatiques qui peuvent avoir un objectif climatique distinct.

En général, la manière dont la limite est calculée dans ces études consiste à fixer un horizon temporel ainsi qu'un objectif climatique. Ensuite, à l'aide d'un modèle climatique, les émissions cumulées totales d'éq. CO₂ sont additionnées sur cet horizon temporel, et la moyenne annuelle devient la limite. Cela signifie également que la limite est souvent beaucoup plus basse que l'état actuel, car il s'agit d'une moyenne entre une période de fortes émissions (aujourd'hui) et un objectif de faibles émissions (comme l'objectif de 2 °C).

Néanmoins, même si les études utilisent des paramètres distincts, nous concluons que toutes les limites se situent dans une fourchette comparable. Pour obtenir une limite unique, nous avons établi la moyenne des

²⁵ Doka, G. (2016) Combining life cycle inventory results with planetary boundaries: The Planetary Boundary Allowance impact assessment method Update PBA'06. Gabor Doka, Doka Life Cycle Assessments, Zurich, Suisse. Avril 2016. Tiré du [site Web de Doka](#)

études qui exprimaient la limite en équivalents CO₂, et qui incluaient donc tous les GES, puis nous avons exclu les études qui établissaient uniquement la limite pour le CO₂. De plus, cela nous a permis de nous assurer qu'aucune moyenne n'a été établie à partir de limites basées sur des unités différentes.

4.2 Utilisation de l'eau douce

Limite mondiale : **1 901 051 531 803 m²/m³/an**

Limite du Québec : **1 901 051 531 m²/m³/an**

FC Québec : **~782,62** (à multiplier par la consommation d'eau bleue)

Nous utilisons une approche régionalisée, proposée par Bjørn et al. (2020)²⁶, avec deux petites modifications de l'indicateur proposées par Steffen et al. (2015)²⁷ : le prélèvement d'eau bleue est remplacé par la consommation, et le débit mensuel moyen est normalisé en fonction du bassin versant.

L'unité qui en résulte est mesurée en superficie (m²) nécessaire pour soutenir 1 m³ d'eau bleue. Cette valeur est mesurée par rapport à l'espace de fonctionnement sûr qui représente la capacité de charge totale en m² par bassin versant.

Nous avons reproduit les données spatiales utilisées dans Bjørn et al. (2020), en utilisant les renseignements supplémentaires concernant les facteurs de pression de l'eau et les espaces de fonctionnement sûrs, en combinaison avec les données spatiales du modèle WaterGAP²⁸.

Les facteurs de pression de l'eau et les espaces de fonctionnement sûrs sont dynamiques, par mois (voir la figure 4.1 pour connaître les facteurs de pression de janvier). Afin d'obtenir une limite unique, la moyenne des facteurs de pression et la somme des espaces de fonctionnement sûrs sont utilisés. Aucun changement saisonnier important n'a été observé pour le Québec.

²⁶ Bjørn, A., Sim, S., King, H., Patouillard, L., Margni, M., Hauschild, M. Z., et Ryberg, M. (2020). Life cycle assessment applying planetary and regional boundaries to the process level: a model case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 2241-2254. doi:10.1007/s11367-020-01823-8

²⁷ Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., [...] Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223). doi:10.1126/science.1259855

²⁸ WULCA. (s.d.). Input data (WaterGAP). Tiré du [site Web de WULCA](#)

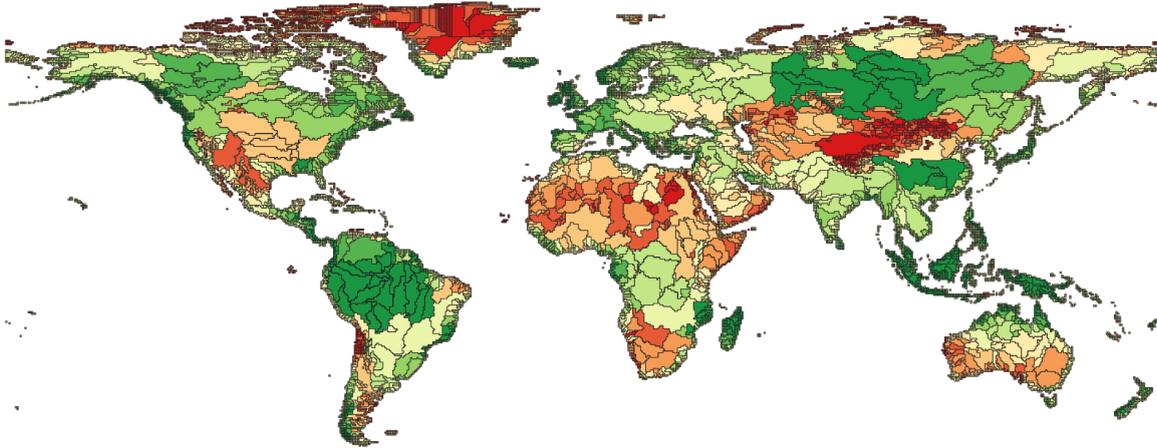


Figure 4.1 : Reproduction des FC régionalisés relatifs à l'utilisation de l'eau douce (janvier)

Afin d'obtenir les valeurs pour le Québec, les bassins versants recoupant les limites administratives de la province sont sélectionnés, après quoi on établit la moyenne des facteurs de pression, puis les espaces de fonctionnement sûrs sont additionnés (pondérés en fonction de la superficie).

Il convient de noter que les bassins versants sont fortement régionalisés et comprennent les régions les plus au nord du Canada. Cependant, les données relatives à la consommation d'eau bleue ne sont pas aussi détaillées, ce qui signifie que seul un facteur de pression moyen a été appliqué.

Finalement, bien que cet ensemble de données puisse être utilisé pour régionaliser entièrement cette limite dans un modèle régionalisé des entrées-sorties, le modèle SNAC employé dans le *Rapport sur l'indice de circularité de l'économie du Québec* d'origine utilise un modèle simplifié à trois régions. Nous avons donc été dans l'obligation de réagréger les données très détaillées et régionalisées en fonction de régions plus grandes. Afin que les limites obtenues soient aussi précises que possible, l'agrégation des FC (facteurs de pression de l'eau) a été faite en utilisant une moyenne pondérée fondée sur la dépendance relative à l'importation des répercussions liées à l'eau pour le Canada.

4.3 Affectation des terres

Limite du Canada : **1 E+6 km² de terres cultivées** (7 066 181 km² *0,15/1E6)

Limite du Québec : **0,21 E+6 km² de terres cultivées** (1 408 187 km² *0,15/1E6)

Pour cette limite, nous avons respecté la définition de Rockstrom et al. (2009)²⁹ telle qu'elle a été mise en application par Butz et al. (2018)³⁰, puis par Lucas et al. (2018)³¹, qui établissent la limite des terres cultivées en utilisant une part de 15 % de terres libres de glace (à l'échelle mondiale). Cette démarche correspond bien aux données disponibles dans Exiobase.

Dans Exiobase, l'utilisation totale des terres au Canada est de 2,6 E+6 km², dont 0,388 E+6 km² de terres cultivées. Selon l'information complémentaire³², ces données sont fondées sur des données de FAOSTAT. Cependant, ces valeurs sont beaucoup plus faibles que celles rapportées par FAOSTAT³³ et ne correspondent pas à celles rapportées par Statistique Canada.

Tableau 4.3 : Couverture des données sur l'utilisation des terres

Utilisation des terres (km ²)	Exiobase v3.7, 2016	FAOSTAT, 2016	Statistique Canada	Référence
Superficie du pays	-	9,88 E+6 km ²		
Superficie des terres	2,57 E+6 km ²	8,96 E+6 km ²	8,90 E+6 km ²	Somme des éléments suivants
Terres cultivées	0,388 E+6 km ²	0,387 E+6 km ²	0,378 E+6 km ²	Tableau 32-10-024 9-01 – Utilisation des terres, Recensement de l'agriculture, 2021
Prairies et pâturages permanents	0,137 E+6 km ²	0,193 E+6 km ²	0,137 E+6 km ²	
Terres forestières	1,94 E+6 km ²	3,47 E+6 km ²	3,83 E+6 km ²	Tableau 38-10-002 9-01 – Couverture terrestre selon la catégorie, Canada, aires de drainage principales et sous-aires de drainage
Autres terres	0,104 E+6 km ²	4,89 E+6 km ²	4,56 E+6 km ²	

En conclusion, il existe un décalage général entre les données d'Exiobase, de FAOSTAT et de Statistique Canada. Bien que les données de FAOSTAT et de Statistique Canada puissent être rapprochées,

²⁹ Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., [...] et Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472-475. doi:10.1038/461472a

³⁰ Butz, C., Liechti, J., Bodin, J., et Cornell, S. E. (2018). Towards defining an environmental investment universe within planetary boundaries. *Sustainability Science*, 13, 1031-1044. doi:10.1007/s11625-018-0574-1

³¹ Lucas, P., et Wilting, H. (2018). *Towards a safe operating space for the Netherlands* [Résumé de la politique]. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Tiré du [site Web du PBL](#).

³² Merciai, S., et Schmidt, J. (2018). Methodology for the construction of global multi-regional hybrid supply and use tables for the EXIOBASE v3 database. *Journal of Industrial Ecology*, 22(3), 516-531. SI_land Supporting Information for land accounts

³³ FAOSTAT. (2024). Utilisation des terres. Tiré du [site Web du FAO](#)

Exiobase semble exclure de ses comptes une grande partie de la superficie des forêts et des autres terres. Cependant, les données sur l'utilisation des terres cultivées sont très similaires entre les différentes sources.

À la suite de cette observation, nous exprimerons la limite de l'utilisation des terres à l'aide précisément de la mesure de l'utilisation des terres cultivées, car une telle limite a déjà été fournie par Butz et al. (2018) et Lucas et al. (2018).

Exiobase disposant de bonnes données sur l'utilisation des terres cultivées, il ne nous reste plus qu'à calculer cette dernière précisément pour le Québec. Toutefois, les ensembles de données de Statistique Canada ne correspondent pas en termes de portée géographique infranationale et ne peuvent donc pas être utilisés tels quels pour calculer les facteurs d'échelle. Au lieu de cela, des données matricielles spatiales seront utilisées pour calculer l'utilisation totale des terres ainsi que les terres cultivées au Canada et au Québec.

Utilisation des terres (AAC)

Nous avons calculé l'utilisation totale des terres et l'utilisation des terres cultivées par fichier matriciel, à partir des GeoTIF d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC)³⁴, et nous avons appliqué un masque basé sur la limite administrative du Québec reprojctée pour calculer les parts au Québec.

Les cellules matricielles d'AAC ont des valeurs assignées en fonction du type d'utilisation des terres. En nous basant sur la documentation³⁵, nous avons défini les terres cultivées comme la somme des quatre cellules matricielles décrites dans le tableau 4.4, et l'utilisation totale des terres comme la somme de toutes les cellules matricielles dont la valeur n'est pas NO_DATA.

Tableau 4.4 : Valeurs matricielles des terres cultivées

Terres cultivées	51
Terres en culture annuelle	52
Terres converties en terres cultivées	55
Terres converties en terres en culture annuelle	56

Grâce à l'utilisation des terres cultivées et à l'utilisation totale des terres au Québec et au Canada, nous avons pu réduire avec précision l'échelle des facteurs de stress liés à l'utilisation des terres cultivées d'Exiobase pour le Québec (tableau 4.5).

³⁴ L'utilisation des terres d'AAC (2020). Tiré du [site Web du gouvernement du Canada](#)

³⁵ Agriculture et Agroalimentaire Canada. (s.d.). *L'utilisation des terres d'AAC – Spécifications de contenu informationnel* produites conformément à la norme ISO 19131 Tiré du [site Web d'Agriculture et Agroalimentaire Canada](#)

Tableau 4.5 : Utilisation totale des terres. Seules les données de 2020 étaient disponibles au format GeoTIF.

Utilisation des terres au Canada	7,06 E6
Terres cultivées au Canada	0,48 E6
Utilisation des terres au Québec	1,40 E6
Terres cultivées au Québec	0,02 E6

4.4 Eutrophisation de l'eau douce

Limite du Québec : **0,021 Mt éq. PO₄/an** (= 0,84 kg éq. P/pers./an* 3,06 éq. PO₄/éq. P*

8 164 000 personnes)

FC Québec : **comme à l'échelle mondiale**, dans IW+ il s'agit d'une simple conversion de P en éq. PO₄. (3,06 éq. PO₄/éq. P)

Pour cet indicateur, nous choisissons la limite définie par Steffen et al. (2015), car c'est la seule qui soit directement liée à l'eutrophisation de l'eau douce. Les autres limites mondiales et régionales calculées pour les émissions de phosphore (P) dans les océans (eutrophisation marine, 11 Mt/an) et les émissions de P dans le sol (6,2 Mt/an) ne sont pas prises en compte ici. La limite liée à l'eutrophisation marine est exprimée en émissions d'azote (N). Les émissions de P dans le sol ne sont pas directement liées à une catégorie de répercussions d'IW+, et pourraient être associées à l'eutrophisation de l'eau douce par le biais de facteurs d'« élimination », mais cette démarche n'est pas mise en œuvre actuellement.

Il convient de noter que dans Rockstrom et al. (2009), les flux d'azote et de phosphore représentent deux parties d'une limite planétaire unique appelée « flux biogéochimiques ». Ici, les limites entre le phosphore et l'eau douce et entre l'azote et les océans sont traitées comme des limites indépendantes.

4.5 Eutrophisation en milieu marin

Limite mondiale : **93 Mt N an**

Limite du Canada : **1,4 Mt N an**

Limite du Québec : **0,23 Mt N an**

La limite comparable à celle de Steffen est la « nouvelle fixation de l'azote », qui comprend les entrées relatives aux engrais et à la fixation biologique de l'azote. Veuillez prendre note que si ce chiffre est semblable au ruissellement de l'azote dans l'océan, il n'est pas directement comparable à l'eutrophisation marine (kg N-lim éq.) telle qu'indiquée par l'IW+.

Nous adoptons les données introduites par Schulte-Uebbing et al. (2022)³⁶, qui ont introduit un nouvel ensemble de données spatialement explicites parce que « l'utilité d'une limite planétaire de l'azote pour évaluer les problèmes régionaux comme la pollution par l'azote a été remise en question, en raison de la grande variation spatiale des pertes d'azote et des répercussions connexes. »

Toutefois, si l'on compare la référence à la figure 2 de Schulte-Uebbing et al. (2022), 106 Mt semblent être attribuées à tort aux eaux de surface, au lieu de 92 Mt (ce qui coïncide avec la limite de l'excédent), même si ce chiffre est légèrement différent (93) dans les Données complémentaires, Figure 1. Le recalcul à l'échelle mondiale (permettant donc le calcul régionalisé) a nécessité une reproduction importante du matériel supplémentaire. La limite mondiale de la nouvelle fixation d'azote qui en résulte est de 93 Mt. La nouvelle fixation mondiale actuelle de l'azote est de 128 Mt (~150 Mt selon Steffen).

Pour le Canada, la nouvelle fixation de l'azote est de 2,6 Mt, tandis que la limite est de 1,4 Mt. Ce résultat est différent de celui d'Exiobase, qui indique 0,89 Mt pour le Canada (et 58,7 Mt à l'échelle mondiale), ce qui est normal, car l'azote indiqué dans Exiobase n'est pas directement comparable à la nouvelle fixation de l'azote, ni à la répercussion.

Pour le Québec, la nouvelle fixation d'azote est de 0,21 Mt, ce qui est conforme à la limite de 0,23 Mt. Il convient de noter que dans Rockstrom et al. (2009), les flux d'azote et de phosphore représentent deux parties d'une limite planétaire unique appelée « flux biogéochimiques ». Ici, les limites entre le phosphore et l'eau douce et entre l'azote et les océans sont traitées comme des limites indépendantes.

4.6 Formation de particules (AOD)

Limite mondiale : **0,064**

Limite du Québec : **6,4 E-05 AOD**

Tableau 4.6 : Limite de profondeur optique des aérosols

Doka et al. (2016)	0,0222 AOD
Meyer et al. (2018)	0,04-0,1 AOD
Ryberg et al. (2018)	0,11 AOD
	0,064 AOD

Richardson et al.³⁷ définissent les difficultés d'une mesure mondiale, puisque la moyenne mondiale est d'environ 0,14, alors que l'Asie se situe actuellement à ~0,3. Il s'agit donc de la profondeur optique des aérosols totale. Doka a tiré l'influence cible de « combustion de combustibles fossiles, de biocarburants et

³⁶ Schulte-Uebbing, L., Beusen, A., Bouwman, A., et de Vries, W. (2022). From planetary to regional nitrogen boundaries for targeted policy support. *Nature*. doi:10.21203/rs.3.rs-149125/v1

³⁷ Richardson, K., Steffen, W., Lucht W., Bendtsen, J., Cornell, S. Donges, J [...] et Rockström, J. (2024). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *ScienceAdvances*, 9(37). doi:10.1126/sciadv.adh2458

de biomasse » de Chin et al. 2014³⁸. Ce document présente également des graphiques régionaux, y compris un graphique distinct pour le Canada (qui présente une profondeur optique des aérosols inférieure à la moyenne mondiale), mais il n'y a pas de renseignements supplémentaires permettant d'extraire des chiffres détaillés. Toutefois, Ryberg et al. (2018) font également référence aux chiffres de Chin et al. (2015), et ont inclus un tableau de référence avec les FC par région dans le document d'information complémentaire, tableau 8.

Tableau 4.6 : FC régionalisés (Ryberg et al. 2018)

Substance	CF [yr kg ⁻¹]															
	Region															
	Terrestrial land area	Canada + Alaska	United States (Continental)	Central America + Mexico	South America	Europe	Russia + Georgia	Central Asia	Middle East	East Asia	South Asia	Southeast Asia	Australia and New Zealand	Sahara	Sahel	Rest of Africa
SO ₂	1.7E-13	1.8E-12	3.0E-12	6.3E-12	1.3E-12	3.3E-12	1.3E-12	6.2E-12	3.7E-12	2.0E-12	4.5E-12	3.2E-12	2.6E-12	2.7E-12	8.2E-12	1.3E-12
SO _x	6.8E-14	7.5E-13	1.2E-12	2.6E-12	5.3E-13	1.3E-12	5.5E-13	2.6E-12	1.5E-12	8.2E-13	1.8E-12	1.3E-12	1.1E-12	1.1E-12	3.4E-12	5.2E-13
Dimethyl sulfide	2.5E-14	2.7E-13	4.5E-13	9.4E-13	1.9E-13	4.9E-13	2.0E-13	9.3E-13	5.5E-13	3.0E-13	6.7E-13	4.8E-13	4.0E-13	4.0E-13	1.2E-12	1.9E-13
PM ₁₀	5.2E-13	5.7E-12	9.3E-12	2.0E-11	4.0E-12	1.0E-11	4.2E-12	1.9E-11	1.2E-11	6.3E-12	1.4E-11	1.0E-11	8.3E-12	8.3E-12	2.6E-11	4.0E-12
PM _{2.5}	1.1E-11	1.2E-10	1.9E-10	4.1E-10	8.4E-11	2.1E-10	8.7E-11	4.0E-10	2.4E-10	1.3E-10	2.9E-10	2.1E-10	1.7E-10	1.7E-10	5.3E-10	8.2E-11
PM _{10-2.5}	9.7E-15	1.1E-13	1.7E-13	3.7E-13	7.5E-14	1.9E-13	7.8E-14	3.6E-13	2.1E-13	1.2E-13	2.6E-13	1.9E-13	1.5E-13	1.5E-13	4.8E-13	7.4E-14
Generic carbon aerosol (e.g. organic carbon)	1.1E-13	1.2E-12	1.9E-12	4.0E-12	8.3E-13	2.1E-12	8.6E-13	4.0E-12	2.4E-12	1.3E-12	2.9E-12	2.1E-12	1.7E-12	1.7E-12	5.3E-12	8.2E-13
Black carbon (e.g. soot)	1.1E-13	1.2E-12	2.0E-12	4.2E-12	8.6E-13	2.2E-12	8.9E-13	4.1E-12	2.5E-12	1.3E-12	3.0E-12	2.1E-12	1.8E-12	1.8E-12	5.5E-12	8.4E-13
NO ₃ , Nitrate	9.7E-14	1.1E-12	1.7E-12	3.7E-12	7.5E-13	1.9E-12	7.8E-13	3.6E-12	2.2E-12	1.2E-12	2.6E-12	1.9E-12	1.5E-12	1.6E-12	4.8E-12	7.4E-13
NMVOC, urban	4.8E-15	5.3E-14	8.6E-14	1.8E-13	3.7E-14	9.5E-14	3.9E-14	1.8E-13	1.1E-13	5.8E-14	1.3E-13	9.3E-14	7.7E-14	7.7E-14	2.4E-13	3.7E-14
NMVOC, rural	1.9E-14	2.1E-13	3.5E-13	7.3E-13	1.5E-13	3.8E-13	1.6E-13	7.2E-13	4.3E-13	2.3E-13	5.2E-13	3.7E-13	3.1E-13	3.1E-13	9.5E-13	1.5E-13
NO _x	4.8E-15	5.3E-14	8.6E-14	1.8E-13	3.7E-14	9.5E-14	3.9E-14	1.8E-13	1.1E-13	5.8E-14	1.3E-13	9.3E-14	7.7E-14	7.7E-14	2.4E-13	3.7E-14
NO _y	4.8E-15	5.3E-14	8.6E-14	1.8E-13	3.7E-14	9.5E-14	3.9E-14	1.8E-13	1.1E-13	5.8E-14	1.3E-13	9.3E-14	7.7E-14	7.7E-14	2.4E-13	3.7E-14

Veillez noter que ces FC régionalisés (tableau 4.6) pourraient être appliqués à chaque région du modèle régionalisé des entrées-sorties. Nous avons uniquement appliqué les FC mondiaux (zone terrestre) et nous nous en tenons donc à la méthode standard de l'ACV relative aux limites planétaires de Ryberg pour la profondeur optique des aérosols.

³⁸ Chin, M., Diehl, T., Tan, Q., Prospero, J.M., Kahn, R.A. [...] et Zhao, P. (2014). Multi-decadal aerosol variations from 1980 to 2009: a perspective from observations and a global model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 3657-3690. doi:10.5194/acp-14-3657-2014

5. DISCUSSION

Des recherches supplémentaires sont requises. La régionalisation d'indicateurs supplémentaires, comme la profondeur optique des aérosols et l'eutrophisation de l'eau douce (flux de phosphore), doit être davantage étudiée. Pour l'utilisation de la profondeur optique des aérosols, des facteurs de caractérisation régionaux sont facilement accessibles. D'autres sources de données concernant les flux d'azote, et surtout ceux de phosphore, comme celle de Bouwman et al. (2017)³⁹, doivent être prises en compte.

De plus, les sources existantes devraient être revues et faire l'objet de réexamens critiques. À quelques reprises, des données erronées ont été trouvées dans l'information complémentaire provenant de sources bien établies, et d'autres documents sur les limites planétaires récemment publiés peuvent nécessiter un examen plus approfondi au sein de la communauté universitaire. La reproduction de l'information complémentaire était souvent difficile, laissant ainsi une grande marge d'erreur. Deux exemples sont à noter : Schulte-Uebbing et al. (2022) ont reproduit des données provenant de l'information complémentaire qui ne correspondent pas aux figures de l'article principal, et Bjørn et al. (2020a)⁴⁰ n'incluent pas les ensembles de données spatiales requis.

Enfin, si nous avons introduit une régionalisation plus détaillée, nous n'avons pas approfondi, pour cette méthodologie, les autres méthodes de réduction d'échelle éthiques (par exemple, Bjørn et al., 2020b⁴¹). La limite du changement climatique, en particulier, pourrait facilement utiliser des facteurs d'échelle ajustés en fonction de l'incidence historique du CO₂.

³⁹ Bouwman, A.F., Beusen, A.H., Lassaletta, L., van Apeldoorn, D.F., van Grunsven, H.J.M., Zhang, J. et van Ittersum, M.K. (2017). Lessons from temporal and spatial patterns in global use of N and P fertilizer on cropland. *Scientific Reports*, 7, 40366. doi:10.1038/srep40366

⁴⁰ Bjørn, A., Sim, S., King, H., Patouillard, L., Margni, M., Hauschild, M. Z., et Ryberg, M. (2020). Life cycle assessment applying planetary and regional boundaries to the process level: a model case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 2241-2254. doi:10.1007/s11367-020-01823-8

⁴¹ Bjørn, A., Chandrakumar, C., Boulay, A., Doka, G., Fang, K., Gondran, N., [...] et Ryberg, M. (2020). Review of life-cycle based methods for absolute environmental sustainability assessment and their applications. *Environmental Research Letters*, 15, 083001. doi:10.1088/1748-9326/ab89d7

Pour en savoir plus ce sur document,
veuillez communiquer avec :

Mathijs Nelemans,
Alex Colloricchio, Marijana Novak



Mauritskade 64,
1092 AD Amsterdam
info@circle-economy.com