

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Rapport Final

Novembre 2019

Responsables scientifiques :

-Grégory Herfray, Marion Sié
VERSo, 5 quai Victor Augagneur, 69003 LYON



L'association SCORE LCA est une structure d'étude et de recherche dédiée aux travaux relatifs à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et à la quantification environnementale. Elle vise à promouvoir et à organiser la collaboration entre entreprises, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution partagée et reconnue, aux niveaux européen et international, de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie et de sa mise en pratique.

- ✓ En Bibliographie, ce document sera cité sous la référence :
SCORE LCA, Indicateur ressources renouvelables, 2019, 126 pages, n°2018-05.
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr
- ✓ Les points de vue et recommandations exprimés dans ce document n'engagent que les auteurs et ne traduisent pas nécessairement, sauf mention contraire, l'opinion de l'ensemble des membres de SCORE LCA.
- ✓ Les informations et les conclusions présentées dans le présent document ont été établies au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Comité de suivi pour SCORE LCA : Anne Prieur-Vernat – ENGIE ; Denis Le Boulch, Anne Grau, Anne-Marie Blanc – EDF; Jean-paul Cazalets, Julie Aguilhon – Total ; Daniel Dunet, Jeanne Serre, Séverine Méhier – Veolia R&I ; Stéphane Morel, Violaine Poulain, Yves Babian – Renault ; Charlotte Hesloin – CSTB ; Jacques L'Haridon, Patricia Martz – L'OREAL ; Jean-Fraçois Viot – Solvay ; Romain Muggéo, Vincent Debost, Nicolas Jeannoutot – Michelin ; Erwan Autret – ADEME ; Bénédicte Coouffignal – RECORD ; Jade Garcia, Philippe Osset – SCORE LCA .

Préambule :

Ce document présente les recherches bibliographiques portant sur les notions de renouvelabilité, de ressources renouvelables, mais aussi sur leur articulation avec les notions de développement durable et de gestion durable des ressources. Il a pour objet d'analyser les différentes définitions et approches existant pour ces concepts, et d'en faire une synthèse permettant une définition opérationnelle de la notion de ressources renouvelables, et l'élaboration d'une typologie de celles-ci.

On s'appliquera par ailleurs à articuler cette définition et cette typologie à la pratique de l'ACV, à ses aspects méthodologiques et pratiques. Ce document présente ainsi les recherches bibliographiques portant sur la prise en compte des ressources renouvelables en ACV. A partir de cet état des lieux, des propositions méthodologiques sont présentées pour chaque type de ressources renouvelables considéré. Deux cas d'études permettent ensuite d'illustrer ces propositions.

Rappel des objectifs du projet :

A l'heure où la transition écologique devient une préoccupation courante du grand public¹²³, il convient de s'interroger sur la nature bénéfique du recours aux ressources renouvelables, souvent présenté comme la solution à l'ensemble des problèmes environnementaux actuels. On trouve dans la loi de transition énergétique pour la croissance verte, l'objectif de porter la part des énergies renouvelables à plus de 30 % de la consommation énergétique finale d'énergie en 2030. Par ailleurs, la feuille de route pour l'économie circulaire présente des mesures concrètes qui permettraient d'établir des modes de consommation et de production durables notamment en maximisant le recours aux ressources renouvelables issues de la technosphère. Cela étant, les impacts et/ou bénéfices associés à l'augmentation de la part de renouvelable ne sont ni caractérisés, ni mesurés. L'ACV est adapté à ce défi, mais encore faut-il mieux cerner le concept de « renouvelable » et identifier les impacts induits par leur exploitation, en particulier la perte du taux de renouvelabilité potentiellement induite par une surexploitation. C'est l'objectif du présent projet de recherche.

Dans cette étude l'équipe projet tachera de :

- Etablir une typologie des ressources dites renouvelables
- Clarifier la façon dont sont prises en compte les ressources renouvelables en ACV aujourd'hui
- Identifier les limites existantes et les besoins des praticiens
- Etablir des recommandations pour le développement d'un nouvel indicateur ou l'amélioration d'indicateurs existants permettant de quantifier la contribution d'un produit à l'épuisement d'une ressource renouvelable (que celle-ci soit issue d'un service écosystémique ou de la technosphère)
- Appliquer les recommandations sur des cas d'études

¹ <https://www.novethic.fr/actualite/environnement/climat/isr-rse/l-affaire-du-siecle-devient-la-petition-la-plus-signe-de-l-histoire-en-france-signe-d-un-vrai-sursaut-climatique-146741.html>

² https://www.francetvinfo.fr/sante/environnement-et-sante/il-n-y-a-rien-de-traditionnel-chez-lui-aurelien-barrau-l-astrophysicien-philosophe-qui-defend-l-ecologie_2958039.html

³ <https://reporterre.net/Ces-youtubeurs-qui-parlent-d-ecologie-au-plus-grand-nombre>

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Ainsi l'étude s'articule autour de trois axes, chacun mis à l'épreuve sur des cas d'étude :

1. Définition de la renouvelabilité
2. Prise en compte de cette renouvelabilité dans la pratique de l'ACV
3. Recommandations méthodologiques pour la prise en compte de la renouvelabilité en ACV

TABLE DES MATIERES

Table des matières	5
Liste des illustrations	8
Liste des tableaux	10
Introduction.....	11
1 Etat de l’art sur le terme « ressources renouvelables »	12
1.1 Clarifications sur le terme « ressources »	12
1.1.1 Définitions	12
1.1.2 Origine de la ressource : technosphère ou écosphère.....	12
1.1.3 Ressources biotiques ou abiotiques.....	13
1.1.4 Les notions de stock, de capital et de flux.....	14
1.1.5 Synthèse et proposition	14
1.2 Des définitions non explicites : listing d’exemples.....	16
1.3 Des définitions restreintes à un seul type de ressource	17
1.3.1 Ressources à capital	17
1.3.2 Energies renouvelables	18
1.4 Intégration de l’aspect temporel.....	18
1.5 Intégration de l’aspect qualitatif.....	19
1.6 Intégration du mode d’exploitation et d’usage et lien avec le développement durable	20
1.7 Enseignements	21
2 Caractérisation des ressources renouvelables.....	22
2.1 Proposition méthodologique	23
2.1.1 Déterminer la renouvelabilité potentielle.....	23
2.1.2 Estimer la renouvelabilité effective.....	25
2.2 Illustrations.....	26
2.2.1 Solaire	26
2.2.2 Forêt	27
2.2.3 Sols.....	28
2.2.4 Déchet	29
2.3 Listing et typologie des ressources renouvelables.....	29
3 Etat de l’art sur la prise en compte de la renouvelabilité en ACV.....	30
3.1 Introduction.....	30
3.1.1 Les différents types d’indicateurs rencontrés en ACV	30
3.1.2 Qu’évalue-t-on ?	30
3.2 Méthodes de Calcul d’Impacts sur les ressources renouvelables.....	32
3.2.1 Les ressources biotiques.....	32

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

3.2.2	Les sols et sous-sols.....	39
3.2.3	L'eau	47
3.2.4	Les ressources énergétiques	52
3.2.5	Les écosystèmes et les services écosystémiques	54
3.3	Premiers enseignements.....	56
3.3.1	Les indicateurs de dégradation de la qualité d'une ressource.....	56
3.3.2	Des indicateurs portant sur l'épuisement des ressources renouvelables.....	57
3.3.3	L'indicateurs de criticité	57
4	Vers une méthode d'AICV pour la prise en compte des ressources renouvelables en ACV.....	59
4.1	Les ressources biotiques	60
4.1.1	Les ressources biotiques naturelles	60
4.1.2	Les ressources biotiques anthropiques	63
4.2	Les ressources abiotiques.....	74
4.2.1	Propositions méthodologiques pour l'évaluation de la criticité des ressources énergétiques renouvelables	75
4.2.2	Proposition de méthode pour le calcul d'un indicateur de criticité.....	76
4.2.3	Données disponibles	77
4.2.4	Intérêt et limites.....	77
4.2.5	Développements nécessaires	78
4.2.6	Perspectives.....	78
5	Cas d'études	79
5.1	Cas d'étude sur la culture du miscanthus : consommation de la ressource sol, production de biomasse.....	79
5.1.1	Présentation du miscanthus.....	79
5.1.2	Objectif et périmètre de l'étude : notion de sol marginal, évaluation de la renouvelabilité des sols et du miscanthus	80
5.1.3	ICV : modélisation du système, paramètres clés.....	81
5.1.4	AICV : état des lieux des méthodes et analyse de leur capacité à caractériser la renouvelabilité	82
5.1.5	Application de la proposition méthodologique sur le cas d'étude	90
5.1.6	Conclusion	93
5.2	Cas d'étude maisons INCAS : prise en compte des ressources énergétiques renouvelables.....	93
5.2.1	Présentation des maisons INCAS.....	93
5.2.2	Objectif et périmètre de l'étude : la problématique des vecteurs énergétiques, prise en compte des ressources de flux	96
5.2.3	ICV : modélisation du système, paramètres clés.....	97

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

5.2.4	AICV : état des lieux des méthodes et analyse de leur capacité à caractériser la renouvelabilité	98
5.2.5	Application de la proposition méthodologique sur le cas d'étude	101
5.2.6	Conclusion	103
Conclusion et perspectives.....		105
Références.....		108
Glossaire		113
Annexes		115
Annexe 1 : recherche bibliographique sur la notion de durabilité et de développement durable		116
Annexe 2 : proposition de flux d'inventaires et de facteurs de caractérisation portant sur les ressources renouvelables biotiques, issue de [crenna & al, 2018]		118
Annexe 3 : synthèse des méthodes d'aicv concernant les ressources renouvelables identifiées ..		122
Annexe 4 : facteurs de caractérisation pour l'indicateur ADP de la méthode CML.....		123

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : définition de la frontière entre technosphère et écosphère dans le cas des ressources biotiques, issu de [Crenna & al, 2018].....	13
Figure 2 : classification des ressources liées aux productions terrestres selon leur niveau de transformation (exemples).....	15
Figure 3: classification des ressources liées aux productions aquatiques selon leur niveau de transformation (exemples).....	15
Figure 4 : schéma de principe de l'élaboration de la typologie des ressources renouvelables	25
Figure 5 : comparaison de différentes technologies de production d'1kWh d'énergie (base ecoinvent, méthode ILCD midpoint)	27
Figure 8: illustration de résultats obtenus par utilisation de la méthode des impacts évités, cas de la récupération de chaleur sur incinération de déchet (source : Analyse de cycle de vie d'un incinérateur rotatif, Yvon Guilbaud, https://slideplayer.fr/slide/1192090/	32
Figure 9 : étapes du calcul des facteurs de caractérisation du modèle de [Hélias & al, 2018]. B est la quantité de biomasse considérée, C le prélèvement, r le taux de renouvellement, K la capacité de charge de la population concernée. L'équation différentielle est issue du modèle de Schaeffer de description de la dynamique d'une population	35
Figure 10 : durée de renouvellement de quelques espèces, en échelle logarithmique [Crenna & al, 2018].....	36
Figure 11 : calcul de la production primaire requise pour une production biotique donnée. C est la quantité de biomasse prélevée, M le ratio entre la masse sèche de biomasse et le contenu carbone de l'espèce concernée, TE l'efficacité de transfert trophique de l'écosystème concerné, TL le niveau trophique de l'espèce considérée	38
Figure 12 : chaîne de cause à effets concernant les impacts liés à l'usage des sols [Koellner & al, 2013]	42
Figure 13 : chaîne de causes à effets pour l'usage de l'eau [Kounina & al, 2013]	47
Figure 14 : flux de services écosystémiques vers l'économie américaine, 1997, base de la méthode d'EcoLCA [Zhang & al, 2010 II].....	55
Figure 15 : cartographie mondiale du contenu carbone des sols (SOC), issue de l'initiative GSOCmap (http://54.229.242.119/GSOCmap/)	65
Figure 16 : zones climatiques dans le monde (https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/renewable-energy-directive) et en France (https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_de_la_France , Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported).....	66
Figure 17 : cartographie des types de sols en France [Antoni & al, 2011]	67
Figure 18 : cartographie de l'appropriation humaine de production primaire nette (HANPP), excluant l'appropriation liée aux incendies dus à l'homme. (a) réduction de la production primaire net (NPP) due au changement d'usage des sols (en % de la NPP initiale), (b) HANPP totale (en % de la NPP initiale) [Haberl & al, 2007]. Les valeurs en bleu (négatives) indiquent une augmentation de la NPP liée à l'intervention de l'homme.	71
Figure 19 : caractérisation de la criticité de l'antimoine, [European Commission, 2017b]	75
Figure 20: plan de miscanthus géant, source : http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Miscanthus_giganteus.jpg . Photo par Pschmitz, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported	80
Figure 21 : schéma de principe de la modélisation de la culture d'un hectare de miscanthus	82
Figure 22 : comparaison des variantes de culture de miscanthus à partir des indicateurs d'empreinte eau	83

Figure 23 : détail par contributeur des résultats obtenus pour les trois variantes sur les indicateurs empreinte eau (non marginal (haut), marginal (milieu), très marginale (bas))	84
Figure 24 : comparaison des variantes de culture de miscanthus à partir des indicateurs écotoxicité terrestre.....	85
Figure 25 : détail par contributeur des résultats obtenus pour les trois variantes sur les indicateurs écotoxicité terrestre (non marginal (haut), marginal (milieu), très marginale (bas))	86
Figure 26 : comparaison des variantes de culture de miscanthus à partir des indicateurs d'usage des sols.....	87
Figure 27 : comparaison des variantes sur l'indicateur « land use », à partir de la méthode ILCD et la méthode ILCD modifiée.....	89
Figure 28 : rotation des cultures simulée [Lesur-Dumoulin & al, 2018]	91
Figure 29 : comparaison des variantes de production du miscanthus et de production de biomasse énergétique par rotation des cultures, indicateur land use ILCD modifié et ASOCRE	92
Figure 30 : les trois premières maisons INCAS construites sur le site de l'INES.....	94
Figure 31 : bilan énergétique annuelle de la maison INCAS I-BB [Pannier, 2014]	95
Figure 32: schéma de principe de la simulation des besoins en chauffage et ECS et de la production PV et solaire thermique pour la maison INCAS variante électrique et 100% électricité PV injectée sur le réseau	97
Figure 33 : comparaison des variantes avec la méthode impact 2002+, 100% export PV, impacts évités	98
Figure 34 : comparaison des variantes avec la méthode impact 2002+, 20% autoconsommation, exportation exclue du système	99
Figure 35 : comparaison des variantes avec la méthode CED, 100% export PV, impacts évités	100
Figure 36 : comparaison des variantes avec la méthode CED, 20% autoconsommation, exportation exclue du système	100
Figure 37 : comparaison des variantes avec l'indicateur ADP de la méthode CML, 100% export de PV (gauche) et 20% autoconsommation, exportation exclue du système (droite)	101
Figure 38 : valeurs de l'indice de criticité (IC) pour les ressources énergétiques abiotiques renouvelables pour le cas d'étude maison INCAS.....	102
Figure 39 : résultats du calcul de l'index de criticité des ressources renouvelables abiotiques pour notre cas d'étude.....	103
Figure 40 : perspectives de développements méthodologiques pour l'évaluation des ressources renouvelables en ACV	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : méthodes de calcul d'indicateurs portant sur l'épuisement des ressources [Klinglmair & al, 2014].....	33
Tableau 2 : méthodes portant sur les ressources naturelles biotiques rencontrées dans la littérature [Crenna & al, 2018].....	34
Tableau 3: liste des ressources naturelles biotiques incluses dans la base de données ecoinvent V 3.3 [Crenna & al, 2018].....	37
Tableau 4 :classification des sols et de leurs usages dans la base de données ecoinvent 3, [Weidema et al, 2013].....	40
Tableau 5: méthodes d'évaluation des impacts des usages des sols, de leur qualité et fonctions en ACV [Legaz, 2107].....	43
Tableau 6 : catégories d'impact, indicateurs considérés pour l'évaluation des impacts liés à l'usage des sols, selon [Koellner & al, 2013].....	44
Tableau 7 : méthode de calcul d'indicateur concernant le potentiel de production biotique des sols [Brandao & Mila i Canals, 2013]	45
Tableau 8 : illustration, les flux d'eau dans les inventaires de ecoinvent 3.5	48
Tableau 9: caractéristiques des sets de données de quatre bases de données	48
Tableau 10 : méthodes de mesure et d'évaluation de l'usage de l'eau en ACV [Berger et Finkbeiner, 2010].....	50
Tableau 11 : illustration, flux d'énergie renouvelable dans les inventaires d'ecoinvent 3.5	52
Tableau 12 : facteurs de caractérisation correspondant à cinq approches de calcul de l'indicateur CED [Frischknecht & al, 2015].....	53
Tableau 13 : prise en compte de l'usage des ressources dans la norme NF EN 15804 portant sur les déclarations environnementales des produits de construction [AFNOR, 2014].....	53
Tableau 14 : pertes en Nr, modifications du carbone organique des sols, rendement en matière sèches et rendement énergétique pour différentes culture de biomasse biocarburant [Gabrielle & al, 2014].....	88
Tableau 15 : caractéristiques de la culture en rotation considérée pour le cas d'étude, issues de [Lesur-Dumoulin & al, 2018]	91
Tableau 16 : modes constructifs pour les murs des maisons INCAS [Pannier, 2014]	94
Tableau 17 : périmètre considéré selon la méthode d'allocation choisie	96
Tableau 18 : impacts les plus importants pour chaque variante considérée. En orange : les indicateurs midpoints ayant un effet sur la santé humaine, en bleu : les indicateurs midpoints ayant un effet sur la qualité des écosystèmes, et en gris : les indicateurs midpoints ayant un effet sur l'épuisement des ressources.....	99
Tableau 19 : éléments pour le calcul des indices de criticité associés aux ressources renouvelables abiotiques de flux dans le cas des maisons INCAS	102

INTRODUCTION

Le concept de ressources renouvelables, largement utilisé, comporte néanmoins un certain flou : le caractère potentiel de la renouvelabilité rend nécessaires des précisions sur les critères dont elle dépend, et une définition des limites dans lesquelles cet aspect s'applique et peut devenir opérant. Il reste néanmoins complexe de définir des critères pouvant s'appliquer à tous les types de ressource devant être considérés.

Par ailleurs les impacts environnementaux liées à l'exploitation de ces ressources, qu'ils concernent la ressource elle-même (épuiement, perte de renouvelabilité, dégradation de la ressource ou du milieu dont elle est issue...) ou d'autres catégories d'impact (épuiement de ressources abiotiques, contribution au réchauffement climatique, acidification...) sont complexes à analyser : ils sont en effet rarement considérés isolément (les impacts sont souvent calculés pour l'ensemble du système étudié, sans considération particulière pour les ressources de type renouvelables comprises dans le périmètre), et sont souvent liés à un équilibre écosystémique rendant plusieurs types d'impacts ou ressources interdépendants (ainsi l'usage ou la transformation d'un sol aura un effet sur la biodiversité terrestre, la ressource en eau, la séquestration du CO₂, la consommation d'eau peut avoir un effet sur la biodiversité aquatique, la santé humaine...).

Ce travail a pour objectif d'établir un bilan de la pratique ACV autour des ressources renouvelables, et de chercher à améliorer cette prise en compte, tant d'un point de vue méthodologique (définition d'un périmètre, règles d'allocation, inventaires, indicateurs d'impacts) que de celui de l'analyse et de l'exploitation des résultats d'une ACV.

Il repose tout d'abord sur un état de l'art concernant la définition de la notion de ressource renouvelable, amenant à une synthèse et l'élaboration d'une classification et d'une typologie de ces ressources. Cette typologie servira de base à des recommandations et développements méthodologiques ayant pour objectif une meilleure évaluation de la renouvelabilité de ces ressources, ainsi que de leur contribution aux impacts globaux d'un système. Cette démarche s'appuiera notamment sur la littérature existante, notamment concernant les données d'Inventaire de Cycle de Vie (ICV) et les méthodes d'Analyse d'Impacts du Cycle de Vie (AICV) de certaines catégories de ressources renouvelables (eau, sols, ressources biotiques, écosystèmes, ressources énergétiques).

1 ETAT DE L'ART SUR LE TERME « RESSOURCES RENOUVELABLES »

Si le terme de ressource renouvelable est souvent utilisé dans la littérature, il est plus rarement défini de façon précise, la notion étant souvent considérée comme acquise et explicite. Néanmoins on peut constater une certaine variabilité dans les périmètres et paramètres intégrés dans les définitions que l'on peut rencontrer, ainsi que des niveaux de précision variables. C'est ce que l'on aborde dans ce chapitre.

1.1 Clarifications sur le terme « ressources »

Avant de définir le terme de renouvelabilité, tâchons de mieux cerner ce qu'est une ressource. Nous abordons la question par l'étude des classifications que l'on trouve dans la littérature, concernant les ressources renouvelables ou non.

1.1.1 Définitions

Afin de borner la discussion, commençons par chercher à déterminer ce qu'est une ressource. On peut trouver sur le site internet du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL) les définitions suivantes :

« Ressource : Moyens matériels dont dispose un pays, une région, une collectivité.

Dans un contexte écologique. Ressources naturelles. , Ensemble constitué des éléments biotiques et non biotiques de la Terre, ainsi que des diverses formes d'énergies reçues (énergie solaire) ou produites sans intervention de l'homme (marées, vents)`` (Gunn-Murcia Secours 1984). La dégradation des biocœnosés figure au premier rang des multiples modalités par lesquelles l'humanité surexploite sinon gaspille les ressources naturelles (Fr. Ramade, Élé. d'écol. appl., Paris, McGraw-Hill, 1978, p. 453). »⁴

Si la notion de ressource est ici assez floue, elle sous-entend néanmoins la question de la disponibilité et de l'usage. Les ressources naturelles elles, sont circonscrites aux ressources disponibles sans intervention de l'homme. On pourra ainsi envisager d'y opposer la notion de ressources artificielles, ou encore anthropiques qui sont, elles, issues de l'activité humaine.

Les ressources naturelles sont définies ainsi dans le glossaire de l'OCDE [UN, 1997] :

« Natural resources are natural assets (raw materials) occurring in nature that can be used for economic production or consumption. »

Encore une fois, on relève la notion d'usage d'une ressource : même si elle semble ici limitée aux matières premières, cette définition introduit explicitement un lien avec une consommation ou une transformation dans un but productif dans le système économique en place.

1.1.2 Origine de la ressource : technosphère ou écosphère

La provenance d'une ressource est donc un premier critère discriminant. On peut considérer que la disponibilité d'une ressource naturelle, c.a.d. issue de l'écosphère, dépend du maintien d'un équilibre

⁴ <https://www.cnrtl.fr/definition/ressource>

écosystémique, potentiellement mis en défaut par la dérégulation des flux. De la même manière, la disponibilité d'une ressource anthropique, c.a.d. issue de la technosphère dépend du maintien du système techno-systémique, autrement dit de la stabilité des mécanismes de marché régulant l'approvisionnement des différentes chaînes de valeur.

Cette distinction est parfois complexe à mettre en œuvre puisque rares sont les ressources qui ne subissent aucune influence humaine avant d'être exploitées ou pour leur exploitation. Par ailleurs la définition de cette limite peut varier, est souvent spécifique au sujet considéré, et peut dépendre du système analysé. Dans la pratique de l'ACV notamment, la distinction entre technosphère et écosphère n'est pas clairement établie [Crenna & al, 2018] en ce qui concerne les inventaires. On peut ainsi retrouver dans les flux élémentaires des éléments relevant des deux origines : il n'est ainsi pas possible de considérer un ICV comme une représentation directe des échanges entre le système considéré et l'écosphère.

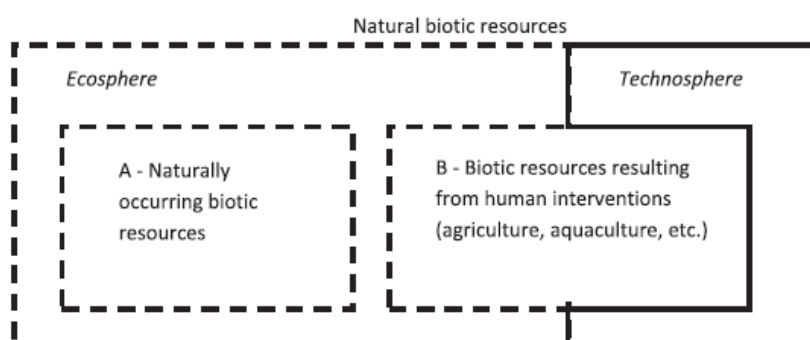


Figure 1 : définition de la frontière entre technosphère et écosphère dans le cas des ressources biotiques, issu de [Crenna & al, 2018]

Enfin il peut exister une certaine confusion lorsque l'on considère les ressources énergétiques : on considère à la fois la notion de source renouvelable d'énergie et celle de ressource (la biomasse par exemple est à la fois une ressource et une source d'énergie).

1.1.3 Ressources biotiques ou abiotiques

Plusieurs approches opposent ressources biotiques et abiotiques. [Klinglmair & al, 2013] reprennent cette distinction :

- Les ressources abiotiques sont les matières inorganiques ou non-vivantes au moment de l'extraction (et peuvent donc inclure des ressources issues du vivant, comme par exemple le charbon). Cette catégorie inclue l'eau.
- Les ressources biotiques sont les ressources issues du vivant, qui le sont au moins jusqu'au moment de l'extraction du milieu naturel. Elles n'incluent pas les ressources vivantes produites par un procédé industriel (donc issues de la technosphère).

Cette classification n'inclue pas les ressources solaire, éolienne ou encore hydraulique – dites, plus loin, « de flux » - ainsi que l'usage des sols, ceux-ci pouvant être considérés comme une ressource. De par leur nature spécifique (ils sont à la fois une ressource et le support d'autres fonctions, notamment support des écosystèmes terrestres) Ils font l'objet d'une catégorie à part. Notons la classification

n'est pas consensuelle : l'eau peut parfois être considérée dans une catégorie à part entière, au même titre et pour les mêmes raisons que les sols et leurs usages. Par ailleurs la définition des ressources biotiques peut dans certains cas inclure les ressources vivantes issues à la fois de l'écosphère (ex : poissons sauvages) et de la technosphère (ex : poissons d'élevage).

1.1.4 Les notions de stock, de capital et de flux.

On trouve dans [Klinglmair & al, 2013], une classification de ressources naturelles en trois types :

- Les ressources en stock : elles existent dans le milieu naturel en quantité finie, sans possibilité de nouvelle croissance du stock après consommation (cas des minéraux, notamment), ou sur une durée d'un ordre de grandeur beaucoup plus élevée que l'échelle de temps humaine (pétrole par exemple)
- Les ressources à capital : ces ressources peuvent s'épuiser, à une vitesse dépendant du ratio entre son exploitation et son renouvellement. L'épuisement total ou le développement du capital de ressource disponible sont deux options possibles (exemple des forêts durablement gérés ou non)
- Les ressources de flux : cette catégorie de ressource concerne celles qui ne sont pas épuisables, même si leur disponibilité n'est pas constante dans le temps et dans l'espace (exemples : solaire, éolien, hydraulique). Le renouvellement de ces ressources peut être considéré comme quasiment instantané.

Cette classification permet de rendre compte du caractère limité ou illimité d'une ressource, mais aussi de la dynamique d'évolution de la quantité de ressource disponible.

1.1.5 Synthèse et proposition

Toutes les catégorisations exposées ci-dessus apparaissent dans les citations rapportées dans le prochain chapitre.

Cela étant dit, celle que nous privilégierons dans la suite de l'étude est celle selon les trois catégories : « en stock », « à capital » et « de flux », classification qui nous semble la plus exhaustive et sans recouvrement. De plus, elle est potentiellement compatible avec la notion de ressources issues de la technosphère qui, si elles sont intégrées à l'étude, pourront appartenir à une ou plusieurs de ces trois catégories, en fonction de leurs caractéristiques. La question est maintenant la suivante : la notion de renouvelabilité recouvre-t-elle les ressources dites « de flux » et « à capital », là où les ressources épuisables seraient les ressources dites « en stock » ?

Afin d'avoir une meilleure compréhension et une meilleure prise en compte de la notion de ressource pour la suite de ce travail, nous proposons ici une piste d'analyse et de prise en compte de ses caractéristiques. Partant du constat que sont considérés comme des ressources des éléments présentant des niveaux de transformation divers (transformations liées à un processus naturel ou non), et qu'une même ressource peut voir sa dénomination varier selon ce niveau de transformation, il nous semble intéressant de chercher à les distinguer selon ces niveaux. Les

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

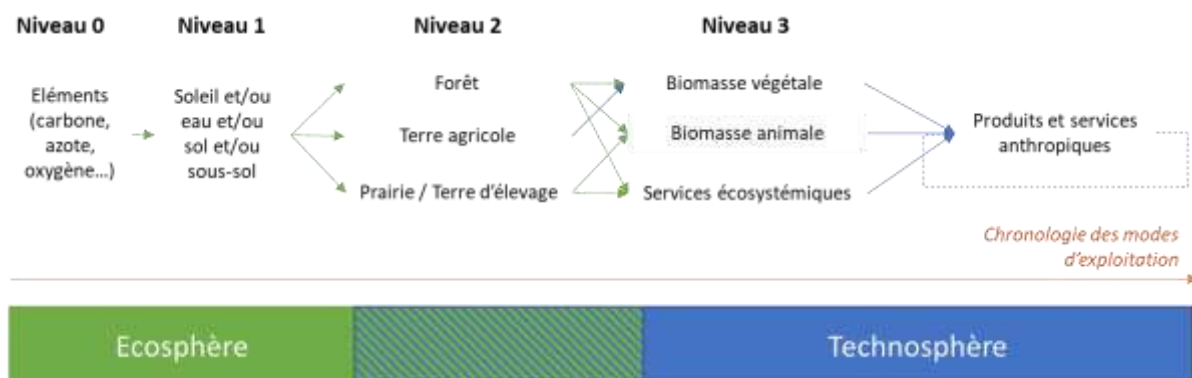


Figure 2 et Figure 3 présentent une ébauche d'une telle classification pour les productions terrestres et aquatiques.

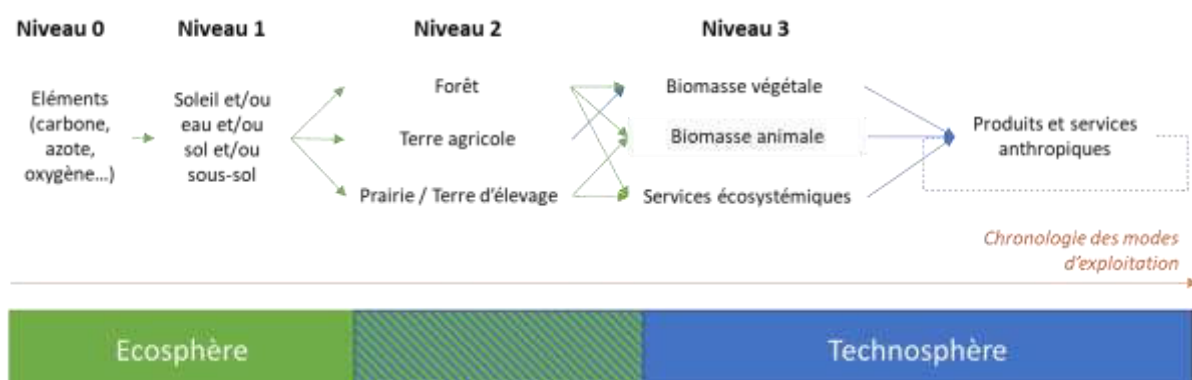


Figure 2 : classification des ressources liées aux productions terrestres selon leur niveau de transformation (exemples)

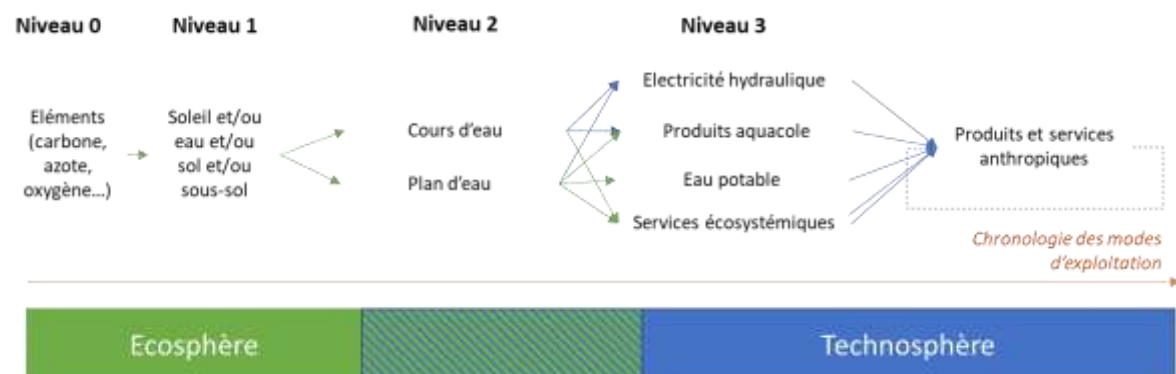


Figure 3 : classification des ressources liées aux productions aquatiques selon leur niveau de transformation (exemples)

Dans le langage courant aussi bien l'eau, le soleil, la forêt, l'énergie photovoltaïque ou encore la biomasse sont perçus comme des ressources. On note ainsi que l'exploitation des ressources de niveau n-1 permet de produire d'autres ressources de niveau n.

Nous proposons ici dans un premier temps de distinguer deux grands types de ressources :

- Les ressources « support » : ce sont les ressources sur lesquelles s'appuient les fonctionnements écosystémiques ainsi que les transformations naturelles. Elles intègrent notamment l'eau, les sols, le carbone, le soleil (et plus largement le climat). Elles ont pour

particularité de ne pas pouvoir être produite : aucune action de l'homme ne peut en augmenter la quantité. En revanche leur qualité peut être altérée ou améliorée par l'homme.

- Les ressources « produites » : ce sont les ressources issues de transformations, naturelles ou anthropiques, de ressources « support ». Leur quantité comme leur qualité peut potentiellement être modifiée par l'homme.

1.2 Des définitions non explicites : listing d'exemples

Au-delà des tentatives de donner une définition claire de ce que sont les ressources renouvelables, plusieurs démarches vont pouvoir approcher une définition par l'exemple, en listant les ressources éligibles à cette définition. On retrouve ainsi, dans le glossaire de l'OCDE, à l'occurrence concernant les énergies nouvelles et renouvelables [UN, 1997] :

« New and renewable energy sources are energy sources including solar energy, geothermal energy, wind power, hydropower, ocean energy (thermal gradient, wave power and tidal power), biomass, draught animal power, fuelwood, peat, oil shale and tar sands. »

En France, le code de l'énergie inclut lui aussi une liste des sources d'énergie considérées comme renouvelables [JO, 2011] :

« Les sources d'énergies renouvelables sont les énergies éolienne, solaire, géothermique, aérothermique, hydrothermique, marine et hydraulique, ainsi que l'énergie issue de la biomasse, du gaz de décharge, du gaz de stations d'épuration d'eaux usées et du biogaz. »

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers. »

On retrouve le même genre de classification dans la documentation technique issue de labels visant à la promotion de l'usage de ressources renouvelables. Le label EKOénergie [EKOénergie, 2013], portant sur l'électricité renouvelable, liste les modes de production retenus par le label de façon exhaustive (énergie éolienne, énergie solaire, énergie hydraulique, énergie marine (énergie marémotrice, énergie des vagues, énergie des courants océaniques, etc.), énergie géothermique, bioénergie (solide, liquide et gazeuse), gaz d'enfouissement, gaz produit par les stations d'épuration des eaux usées), ainsi que les sources exclues de son label, de façon non exhaustive (charbon et schistes bitumineux, pétrole, y compris le pétrole non conventionnel comme l'huile de schiste et le pétrole provenant des sables bitumineux, gaz naturel, y compris le gaz de schiste, tourbe, énergie nucléaire, incinération de déchets autres que la biomasse).

Ainsi, plutôt qu'une définition nécessitant, pour être opérationnelle, une analyse et une interprétation, on cherche ici à lister de façon exhaustive les ressources pertinentes. On notera néanmoins que ces listings ne font pas nécessairement consensus, et peuvent intégrer des ressources de nature parfois très différentes, ou dont la renouvelabilité est à minima contestable. Ainsi dans la définition donnée par l'OCDE, qui regroupe en fait à la fois les sources d'énergie renouvelables et les nouvelles sources d'énergie (en opposition aux sources d'énergie « classiques »), les gaz de schistes et sables bitumineux, qui ne sont pas renouvelables, sont regroupés avec des sources énergétiques illimitées et renouvelables. Si cette approche ne prétend pas inclure ces deux énergies fossiles dans les ressources renouvelables, ce regroupement reste questionnable.

En ce qui concerne la définition française des énergies renouvelables, on constate que le code de l'énergie considère par exemple le gaz de décharge dans la liste des énergies éligibles. Ce vecteur est de nature très différente des énergies issues directement de l'écosphère, et présente des caractéristiques le rendant incohérent avec certaines des définitions présentées précédemment.

[Rowland, 2015] expose les divergences qui peuvent exister entre consensus scientifique et approche réglementaire, ainsi que l'influence des différents niveaux décisionnels existants au niveau européen sur les prises de décision, en exposant les différences d'approche entre le parlement, la commission et le conseil européen. Il illustre ces aspects avec trois exemples, issus des travaux d'élaboration de la directive européenne sur l'électricité renouvelable :

- Le cas de l'hydroélectricité. S'il n'y avait pas débat sur le caractère renouvelable de l'hydroélectricité, les divergences portaient sur le soutien à apporter à cette filière via la directive, en fonction du type d'installation. Ces divergences auront amené à considérer l'intégralité des installations comme des sources d'énergie renouvelable, mais à permettre d'exclure celle de plus de 10MW du champ de la directive, en fonction du contexte national.
- Le cas de la biomasse. Le périmètre des ressources biomasse considérées comme renouvelables a lui subi de nombreuses modifications au cours des différentes étapes de débat. Si la première définition de ce périmètre était restrictive (*'products from agriculture and forestry, vegetable waste from agriculture, forestry and from the food production industry, untreated wood waste and cork waste'*), le parlement européen proposa de l'étendre à d'autres ressources (*'landfill gas, biodegradable pulp and paper industry waste, the digestion of the biodegradable fraction of separated municipal wastes'*). La version finale de la directive va encore plus loin, en intégrant la part biodégradable des déchets ménagers et industriels, même non digérés (*'the biodegradable fraction of industrial and municipal waste'*).

La mise en place de textes réglementaires visant à définir ce qui est renouvelable semble être issue de débats, de jeux d'influence et d'arbitrages politiques, qui peuvent très sensiblement diverger du consensus scientifique. On note par exemple la présence dans ces listings de ressources issues de la technosphère : la notion de renouvelable est donc ici ouverte à des ressources dont l'existence dépend potentiellement d'une action humaine, dont la pérennité est peut-être conditionnelle.

1.3 Des définitions restreintes à un seul type de ressource

1.3.1 Ressources à capital

Notons tout d'abord la définition utilisée par l'OCDE pour les ressources naturelles renouvelables [UN, 1997] :

« Renewable natural resources are natural resources that, after exploitation, *can return to their previous stock levels by natural processes of growth or replenishment* »

On constate dans cette première occurrence l'introduction de la notion de « stock » (nommé « capital » dans la suite) et de retour, de façon naturelle, à son niveau avant exploitation. Cette approche amène de façon implicite à considérer que les ressources renouvelables sont aussi potentiellement épuisables, et semble exclure de cette définition des ressources inépuisables. Par ailleurs elle semble au moins partiellement exclure des ressources qui se renouvellent, mais de façon artificielle.

Pour une bonne compréhension du champ couvert par cette définition, il est nécessaire de s'intéresser à celles relevant du même champ thématique, dans cette même publication. Les ressources naturelles sont définies ici ainsi [UN, 1997] :

« Natural resources are natural assets (raw materials) occurring in nature that can be used for economic production or consumption. »

En ce qui concerne les ressources naturelles non renouvelables [UN, 1997] :

« Non-renewable natural resources are exhaustible natural resources such as mineral resources that cannot be regenerated after exploitation. »

On constate donc ici que la renouvelabilité semble limitée à des ressources dites « à capital », et qu'elle exclue de cette catégorisation, de façon implicite, les ressources dites « de flux », qui par définition ne dépendent pas d'un stock. Cette exclusion semble néanmoins liée au fait que le terme ressource est ici utilisé dans le sens de matière première, et n'inclut ni l'énergie et les différents vecteurs énergétiques, ni l'eau comme étant des ressources.

1.3.2 Energies renouvelables

*« **Energy sources** that do not rely on fuels of which there are only finite stocks. The most widely used renewable source is hydroelectric power; other renewable sources are biomass energy, solar energy, tidal energy, wave energy, and wind energy. »⁵*

La définition se construit ici en opposition à l'usage de combustibles épuisables, disponibles en stock finis.

Autre définition, celle de [Armstrong & Hamrin, non daté], concernant les énergies renouvelables :

*« The term "renewable" is generally applied to those **energy resources and technologies** whose common characteristic is that they are non-depletable or naturally replenishable. »*

On a donc ici une définition qui apparaît plus généraliste dans le sens où elle englobe les ressources à capital et les ressources de flux. Elle s'applique cependant aux sources d'énergie ou encore aux ressources énergétiques et technologies, et non pas aux « ressources » de manière générale.

1.4 Intégration de l'aspect temporel

Citons la définition donnée par [Glavic & Lukman, 2007], qui fait elle directement référence aux ressources fossiles :

*« Renewable resources are available **in a continually renewing manner**, supplying materials and energy in more or less continuous ways. In other words, renewable resources do not rely on fossil fuels of which there are finite stocks »*

Cette définition est en fait issue du glossaire de l'Agence Européenne de l'Environnement, et est une tentative de synthétiser les différentes définitions qui y sont listées, concernant les ressources renouvelables, les matières premières renouvelables, et les énergies renouvelables. Si les approches

⁵ <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/renewable-energy-source>

spécifiques à chaque catégorie seront présentées dans la partie suivante, celle recouvrant la notion de ressource renouvelable est :

*« Resources capable of **being continuously renewed or replaced** through such processes as organic reproduction and cultivation such as those practiced in agriculture, animal husbandry, forestry and fisheries »⁶*

La notion d'un renouvellement « continu », que l'on traduit dans la suite par « régulier », apparaît, qu'il soit naturel ou artificiel.

Cette définition est à articuler à deux autres, concernant les ressources non renouvelables, disponibles dans ce même glossaire :

*« A natural resource which, **in terms of human time scales**, is contained within the Earth in a fixed quantity and therefore can be used once only in the foreseeable future (although it may be recycled after its first use). This includes the fossil fuels and is extended to include mineral resources and sometimes ground water, although water and many minerals are renewed eventually. »⁷*

*« Minerals, oil, gas and coal. Their use as material and energy sources leads to depletion of the Earth's reserves and are characterised that they **do not renew in human relevant periods**. »⁸*

La notion de l'échelle de temps humaine apparaît. Cette grandeur est difficile à quantifier, puisque l'acceptation de ce concept peut varier, selon que l'on considère une approche générationnelle, intergénérationnelle, ou que l'on s'intéresse à l'échelle de l'humanité (on atteint alors une durée de l'ordre de la dizaine de milliers d'années). La notion est en général utilisée en opposition à celle d'échelle de temps géologique, représentative du temps de formation des ressources considérées comme épuisables.

On note donc que l'approche retenue ici marque une opposition entre les ressources minérales et fossiles, considérées comme non renouvelables, et les ressources biotiques, considérées comme naturellement et continuellement renouvelées ou remplacées. Là encore les ressources « de flux » sont exclues.

La dimension temporelle est ici présente : si dans la définition d'une ressource renouvelable, on parle d'un renouvellement continu (sans en préciser la dynamique), il est question d'un non-renouvellement à l'échelle de temps humaine dans le cas de ressources épuisables.

1.5 Intégration de l'aspect qualitatif

L'ouvrage « Du bon usage des ressources renouvelables » [Guillon, 2000], qui traite de relations qui existent entre dynamique d'exploitation d'une ressource et dynamique d'évolution de cette ressource, pose dès son introduction la nécessité d'une définition rigoureuse du concept de ressource renouvelable.

⁶ <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/gemet-environmental-thesaurus/renewable-resource>

⁷ <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/gemet-environmental-thesaurus/non-renewable-resource>

⁸ <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/non-renewable-resource>, [EUROPEAN COMMISSION, 2000]

« C'est, dans le domaine biologique, une production spontanée exploitée sans transformation qualitative, pour autant qu'une exploitation quantitative soit sans effets qualitatifs (frontière qui sera explorée attentivement dans les contributions qui suivent). »

On retrouve là encore une définition limitée aux ressources d'origine biologique, mais dont l'approche est potentiellement généralisable. Elle implique en tous cas la prise en compte des modes d'exploitation des ressources, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif.

Ainsi il est expliqué que

« Le terme « renouvelable » est lié aux vitesses respectives d'exploitation et de restauration de la ressource. Si ces vitesses sont voisines l'une de l'autre, le stock peut rester inchangé ou en tout cas suffisant pour que les flux sortants (exploitation) et entrants (production) puissent s'équilibrer. »

Mais aussi que

« La renouvelabilité ne s'exprime pas seulement en termes quantitatifs, elle implique souvent des aspects qualitatifs. C'est évident pour l'eau potable et de plus en plus clair pour les produits vivants : qualités nutritives ou gustatives des ressources alimentaires, ou qualités mécaniques des bois, par exemple. »

Ainsi, là où certaines ressources peuvent être exploitées sans autre effet qu'un épuisement du volume de ressource disponible, d'autres peuvent voir leur qualité dégradée. Cette dégradation qualitative peut s'articuler de différentes manières avec les aspects quantitatifs :

- Elle peut être indépendante (la quantité décroît mais la qualité reste, la qualité décroît mais la quantité reste).
- Elle peut être liée par un lien de cause à effet (la baisse de qualité entraîne la baisse de quantité, ou inversement).

Ce potentiel de dégradation est une caractéristique autant intrinsèque que liée au mode d'exploitation et d'usage de la ressource.

Ce travail met en avant l'importance de la prise en compte du renouvellement qualitatif de la ressource, un aspect en partie lié au mode d'exploitation et d'usage de la ressource.

1.6 Intégration du mode d'exploitation et d'usage et lien avec le développement durable

La notion d'exploitation de la ressource apparaît dans la suite de la définition utilisée par l'OCDE pour les ressources naturelles renouvelables donnée plus haut [UN, 1997] :

*« Conditionally renewable resources are those **whose exploitation** eventually reaches a level beyond which regeneration will become impossible. Such is the case with the clear—cutting of tropical forests. »*

L'Agence Européenne de l'Environnement considère les matières premières renouvelables comme :

*« Resources that **have a natural rate of availability and yield a continual flow of services** which may be consumed in any time period without endangering future consumption possibilities **as long as current use does not exceed net renewal** during the period under consideration. »⁹*

Cette définition se base sur la permanence de la disponibilité de la ressource dans le temps – aujourd’hui et à l’avenir. Elle se réfère :

- Aux caractéristiques intrinsèques de celle-ci (disponibilité, flux disponible pour prélèvement tout en maintenant cette disponibilité)
- Et aux caractéristiques de « l’usage », à entendre ici comme « exploitation », via son intensité sur un temps donné, qui doit ici être limitée par le taux de renouvellement de la ressource sur la même durée.

La question de la renouvelabilité de la ressource apparaît comme indissociable de celle de la durabilité, ou soutenabilité, de son exploitation.

EXEMPLE : DEUX MODES D’EXPLOITATION D’UNE MEME RESSOURCE RENOUVELABLE : LA TERRE AGRICOLE

Agriculture intensive : Forme d’agriculture caractérisée par l’usage important d’intrants et dont l’objectif est d’optimiser au maximum la production. Dans cette forme d’agriculture, la régénération qualitative de la terre cultivée et sa résilience sur le long terme ne sont pas considérées.

Permaculture : Forme d’agriculture visant à s’inspirer de la nature pour développer des systèmes agricoles en synergie, basés sur la diversité des cultures, leur résilience et leur productivité naturelle, sur le court comme sur le long terme.

En outre, on souligne que la dimension spatiale, l’accessibilité de la ressource et les contraintes géographiques peuvent modifier le bilan environnemental du recours à une ressource donnée, voire remettre en cause le caractère durable de l’exploitation de la ressource.

Une étude bibliographique sur le concept de développement durable a été menée et est disponible en annexe 1. Il ressort qu’une « exploitation durable » pourrait signifier qu’au-delà d’éviter la surexploitation de la ressource (qui empêcherait son renouvellement), il conviendrait aussi d’intégrer les mécanismes environnementaux en œuvre lors de l’exploitation afin de s’assurer qu’ils sont bien compatibles avec « le maintien de la biodiversité, la stabilité atmosphérique et des autres fonctions eco-systémiques non classés habituellement comme ressources économiques » [Harris, 2000]

1.7 Enseignements

L’analyse de la bibliographie montre qu’il n’existe pas aujourd’hui de définition de la notion de ressource renouvelable permettant une prise en compte exhaustive et cohérente des différents flux concernés. Cette difficulté se concrétise lorsqu’il est question d’établir un listing de ressources devant être considérées comme renouvelables d’un point de vue opérationnel.

⁹ <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/gemet-environmental-thesaurus/renewable-raw-material>

On retiendra néanmoins que les « ressources potentiellement renouvelables » sont les ressources :

- A capital renouvelable
- De flux

Par ailleurs, nous avons souligné dans cet état de l'art que la renouvelabilité est un enjeu réel qui peut être mis à mal par l'exploitation. Parce que ces ressources renouvelables ne sont pas nécessairement renouvelées, nous souhaitons aller vers un indicateur de mesure de la renouvelabilité, qui prendrait en compte la compatibilité du mode d'exploitation de la ressource avec son renouvellement qualitatif (ressource de qualité, peu dégradée) et quantitatif. Pour être jugé effectif, ce renouvellement doit être régulier et réalisé dans une échelle de temps humaine, dans les conditions de pression humaine et de biodiversité actuelles.

Le concept de criticité semble pouvoir rendre compte de façon pertinente des différents aspects soulevés par l'état de l'art. A l'origine terme relevant de l'économie et de la géopolitique, la criticité d'une ressource désigne la difficulté à s'en procurer. Appliquée au champ environnemental, on pourra considérer que la criticité d'une ressource, associée à sa disponibilité pour un usage, peut permettre d'évaluer une renouvelabilité : en considérant une part de la ressource devant être préservée pour assurer sa pérennité et celle des écosystèmes dont elle fait partie ou qu'elle maintient, on pourra déterminer la quantité de ressource disponible pour l'homme, et donc déterminer l'impact des niveaux de consommation actuels. Cette démarche devra cependant intégrer ou être accompagnée d'évaluations portant sur la qualité de la ressource considérée, et qu'elle soit affectée par son exploitation ou de manière indirecte.

Enfin, la compatibilité du mode d'exploitation de la ressource avec un développement durable de manière plus générale sera aussi discutée. Il est sous-entendu ici qu'outre l'aspect du renouvellement de la ressource, il pourrait être important de regarder l'impact de l'exploitation de la ressource sur l'ensemble des mécanismes environnementaux. Cet aspect est estimé connu et déjà mesurée (par l'ICV). Il ne s'agit donc pas de le mesurer ou encore de l'intégrer à un nouvel indicateur, mais plutôt de le considérer comme une ouverture au travail de recherche, un éclairage.

2 CARACTERISATION DES RESSOURCES RENOUVELABLES

Avant d'envisager le calcul d'un indicateur, nous proposons tout d'abord de caractériser la ressource à étudier. Ce chapitre présente une proposition de méthodologie et des illustrations sur des exemples. Il se base sur une proposition de définition des ressources renouvelables, établie à partir de la bibliographie :

« Les ressources renouvelables sont constituées par les flux physiques issus de l'écosphère (ressources renouvelables primaires) ou de la technosphère et de la simili-écosphère (ressources renouvelables secondaires) qu'il est possible d'exploiter sans affecter leur disponibilité (en qualité et en quantité) sur une échelle de temps humaine, dans les conditions de pression humaine et de biodiversité actuelles. Elles sont soit inépuisables car issues d'un flux, soit issues d'un capital pouvant aussi bien augmenter que diminuer, et qui se renouvelle de façon régulière. »

2.1 Proposition méthodologique

Notre proposition méthodologique d'élaboration d'une typologie des ressources renouvelables s'appuie sur deux aspects. Ainsi, nous articulerons la description de la méthode en deux parties :

- (1) La détermination de la renouvelabilité potentielle. Les ressources sont classées en différentes catégories selon leurs caractéristiques intrinsèques. Ces catégories ont été déterminées sur la base de la bibliographie. Cela permet de qualifier la ressource comme potentiellement renouvelable ou non.
- (2) L'estimation de la renouvelabilité effective. A partir des différents paramètres pouvant l'affecter, la renouvelabilité effective (ou de perte de renouvelabilité) de la ressource est discutée. Ces aspects dépendent principalement des conséquences du mode d'exploitation des ressources qui supportent sa production – les ressources supports – sur la quantité et la qualité de la ressource renouvelée.
 - a. Exemple 1 : est-ce que le mode d'exploitation des sols met à mal la renouvelabilité de la production (en quantité et en qualité) de biomasse ?
 - b. Exemple 2 : est-ce que le mode d'exploitation du soleil met à mal la renouvelabilité de la production (en quantité et en qualité) d'énergie photovoltaïque ?

2.1.1 Déterminer la renouvelabilité potentielle

La classification a pour objectif d'organiser un listing des ressources selon leurs caractéristiques intrinsèques qui peuvent définir ou conditionner leur caractère renouvelable. Cette classification s'opère ici en cinq étapes.

Origine de la ressource :

- Ecosphère
- Technosphère

Afin de mieux prendre en compte l'influence de l'homme sur l'écosphère et l'appropriation par l'homme de mécanismes naturels à visée de production de ressource, nous proposons ici d'introduire deux sous-catégories à la notion de technosphère :

- La technosphère écosystémique, ou simili-écosphère, regroupant l'écosphère sur laquelle l'Homme intervient pour permettre son maintien (exemple d'un sol enrichi en engrais), et la technosphère reposant sur des mécanismes issus de l'écosphère (culture, élevage, canal...). Les ressources issues de cette catégorie sont donc des ressources dont la production repose sur des mécanismes écosystémiques créés et/ou entretenus par l'Homme.
- La technosphère non-écosystémique, au sein de laquelle la production des ressources ne repose pas sur des mécanismes écosystémiques, ou en tout cas pas principalement et directement (exemple : usine).

Type de ressource :

- Biotiques
- Abiotiques
- Sols et eau

L'objectif est ici de distinguer les ressources relevant du vivant, qui obéissent à des mécanismes spécifiques et dont l'existence peut dépendre de contraintes fortes (notamment de la disponibilité de certaines ressources non biotiques, l'eau par exemple). Nous proposons ici de considérer une

acceptation large des ressources biotiques, en y incluant les ressources vivantes issues de la technosphère écosystémique. Nous définissons par ailleurs une catégorie spécifique concernant les sols et l'eau. Ainsi si ces deux ressources constituent un support pour des écosystèmes, qui relèvent donc des ressources biotiques, elles peuvent par ailleurs devoir leur statut de ressource à des fonctions autres (par exemple la fourniture d'énergie mécanique, la consommation directe en ce qui concerne l'eau, le stockage du CO₂, la production biotique ou la purification de l'eau entre autres fonctions en ce qui concerne les sols). Il existe donc une ambiguïté sur le caractère biotique ou abiotique de ces deux ressources, qui ne permet pas de les classer dans l'une ou l'autre de ces catégories de façon tranchée.

Dynamique d'évolution de la ressource :

- Capital
- Flux
- Stock

Nous reprenons donc ici la classification relevée chez Klinglmair & al, particulièrement intéressante dans la perspective d'un travail portant sur les ressources renouvelables. Elle permet en effet de clairement séparer les ressources épuisables, de stock, des ressources considérées comme potentiellement renouvelables, de flux et à capital. Par ailleurs elle permet de distinguer les ressources dont le renouvellement peut être mis à mal (le capital, à entretenir ou à développer) et celles pouvant être considérées comme inépuisables, et donc instantanément renouvelées (les ressources en flux).

Localisation, accessibilité :

La question spatiale et la question de l'accessibilité sont directement liées aux caractéristiques physiques des ressources. Elle peut en effet être soumise par exemple à l'existence de conditions climatiques précises, à la configuration hydrogéologique, à la disponibilité d'autres ressources... Nous chercherons donc ici à préciser si la ressource est disponible universellement ou si elle l'est de façon conditionnelle, et selon quels critères.

Potentiel de dégradation / qualité intrinsèque de la ressource :

On l'a vu précédemment, la qualité d'une ressource peut constituer en élément clé de sa renouvelabilité et de sa gestion durable. L'existence d'un risque de dégradation de cette qualité, lié à la nature de la ressource (risque de disparition d'une espèce dans un écosystème, et donc de sa fonction dans l'écosystème, par exemple), sera donc ici intégrée dans la typologie.

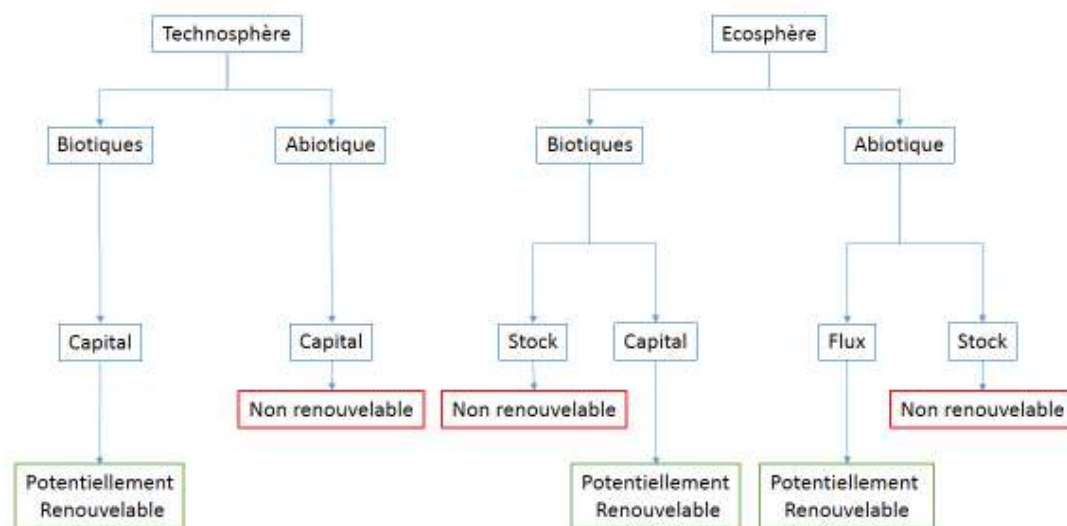


Figure 4 : schéma de principe de l'élaboration de la typologie des ressources renouvelables

L'évaluation de la renouvelabilité effective s'appuiera sur ces catégorisations, et pourra être menée de façon différente selon les caractéristiques de la ressource considérée. Les aspects liés à sa localisation et à sa dégradation potentielle devront eux aussi être pris en compte, lorsque pertinents, dans le calcul.

2.1.2 Estimer la renouvelabilité effective

Les typologies d'exploitation et d'usage d'une même ressource peuvent recouvrir des réalités diverses, dans la mesure où une même ressource peut être valorisée selon plusieurs modes, avec transformation ou non. Le mode d'exploitation devra être confronté aux caractéristiques intrinsèques définies et listées précédemment : elles peuvent en effet avoir une influence sur la possibilité d'avoir recours à un mode précis, ou significativement modifier le bilan environnemental d'un mode d'exploitation (citons par exemple le cas des cultures sous serres chauffées : le recours à cette technique est une conséquence de l'existence de conditions climatiques nécessaires pour la culture considérée, et l'intensité de l'apport d'énergie nécessaire dépendra de la localisation de la culture).

Nous tâcherons tout d'abord de lister les différents modes d'exploitation des ressources « support » pour la production d'une ressource identifiée comme potentiellement renouvelable. A partir de cette liste, nous chercherons alors à questionner l'influence de chacun des modes sur :

- Le maintien des ressources « support » :
 - Pour les ressources à capital produites : il s'agit du maintien de la quantité et la qualité des ressources supports exploitées. Dans quelle mesure le mode d'exploitation des ressources supports (ex : sols, eau...), et en particulier ses impacts sur la qualité des écosystèmes, affecte le maintien en quantité et en qualité de ces ressources supports ?
 - Pour les ressources de flux produites : il s'agit du maintien de l'accessibilité et de la capacité de captage du flux. Dans quelle mesure le mode d'exploitation de la ressource support (ex : vent, soleil...), et en particulier ses impacts globaux sur le climat ou les cycles naturels, affectent l'accessibilité et le captage du flux ?
- La quantité et la qualité de la ressource produite. Que peut-on dire sur la vitesse et la fréquence du renouvellement ? Est-il possible d'estimer ces paramètres ? Sur quoi ces paramètres reposent ? A partir de quelles valeurs estime-t-on avoir affaire à un renouvellement à l'échelle de temps humaine et continu ? Dans le cas où la ressource est

considérée comme intrinsèquement potentiellement dégradable, quelles seraient les caractéristiques dégradées ? Selon quels mécanismes liés au mode d'exploitation ?

Une attention particulière sera portée sur l'existence d'une concurrence entre différents modes d'exploitation, et sur l'influence de cette concurrence sur la quantité et la qualité renouvelée, pour les ressources à capital, et sur l'accessibilité au flux, pour les ressources de flux.

2.2 Illustrations

Nous nous proposons ici d'illustrer de façon succincte l'approche proposée précédemment sur des exemples types de ressource. Une analyse poussée de chacune des ressources sera nécessaire pour une évaluation pertinente de leur renouvelabilité, en fonction de chacun des paramètres retenus. Cette approche simplifiée permet néanmoins de mettre à l'épreuve la typologie et son opérationnalité.

2.2.1 Solaire

La ressource solaire constitue la ressource primaire du système terrestre : elle est à la base de la plupart des mécanismes producteurs de ressources. Nous nous limiterons ici à l'exploitation directe de cette ressource d'un point de vue énergétique : seule sa transformation anthropique est considérée (nous ne considérerons ainsi par exemple pas la biomasse ou l'énergie éolienne comme étant des ressources solaires, bien que leur existence est directement liée à la photosynthèse pour l'une et aux transferts d'énergie solaire entre masses d'airs pour l'autre).

L'énergie solaire est une ressource issue de l'écosphère, abiotique et de flux. Elle rentre donc bien dans le cadre choisi pour définir une ressource renouvelable.

Sa renouvelabilité intrinsèque peut être considérée comme illimitée, elle n'est par ailleurs pas dégradable. Sa disponibilité est néanmoins dépendante :

- De l'activité solaire, qui subit des variations
- De la nébulosité
- De la latitude, de la saison et de l'heure
- Du relief et de l'existence d'éventuels masques

Par ailleurs son exploitation peut impliquer des impacts environnementaux, notamment la consommation de ressources non renouvelables. On peut ainsi distinguer trois formes :

- Une forme directe et passive, le flux de chaleur est directement valorisé : séchage, chauffage... Cette forme peut être associée à un impact lié à l'exploitation nul.
- Une forme directe et active, où le flux de chaleur est transformé : centrales solaires thermodynamiques, chauffage solaire avec stockage de chaleur, rafraîchissement solaire, moteur stirling... L'impact lié à l'exploitation dépend ici principalement des rendements énergétiques
- La production d'électricité photovoltaïque : elle est considérée séparément puisqu'il ne s'agit pas ici d'une exploitation par la chaleur mais d'une transformation basée sur l'effet photoélectrique, et donc le recours à une technologie spécifique, qui implique des impacts environnementaux propres (recours à des ressources critiques épuisables et non substituables, notamment). Ce dernier mode peut engendrer des impacts environnementaux dans des proportions parfois supérieures à l'exploitation de l'alternative non-renouvelable

conventionnelle (hydraulique, charbon, nucléaire...). Dans la figure suivante les impacts environnementaux de la production d'1kWh d'énergie à partir de différentes ressources est présentée. Cette comparaison est à considérer avec prudence : si le flux de référence comparé est identique (1 kWh d'électricité low voltage), le service rendu ne l'est pas forcément, toutes les sources d'électricité ne se valant pas (du point de vue par exemple de la puissance potentiellement disponible, de l'intermittence de la production...). Elle permet néanmoins d'illustrer l'impact des modes d'exploitation des ressources. On note ainsi que la production d'électricité photovoltaïque arrive en seconde position sur les catégories « Epuisement des ressources minérales et fossiles » et « Ecotoxicité des eaux douces ». Ces résultats sont dus aux métaux extraits pour la fabrication des panneaux. Bien que cela ne remette pas en question l'accessibilité au rayonnement solaire, et donc la renouvelabilité en tant que telle, cela amène à s'interroger sur le caractère durable de ce mode d'exploitation.

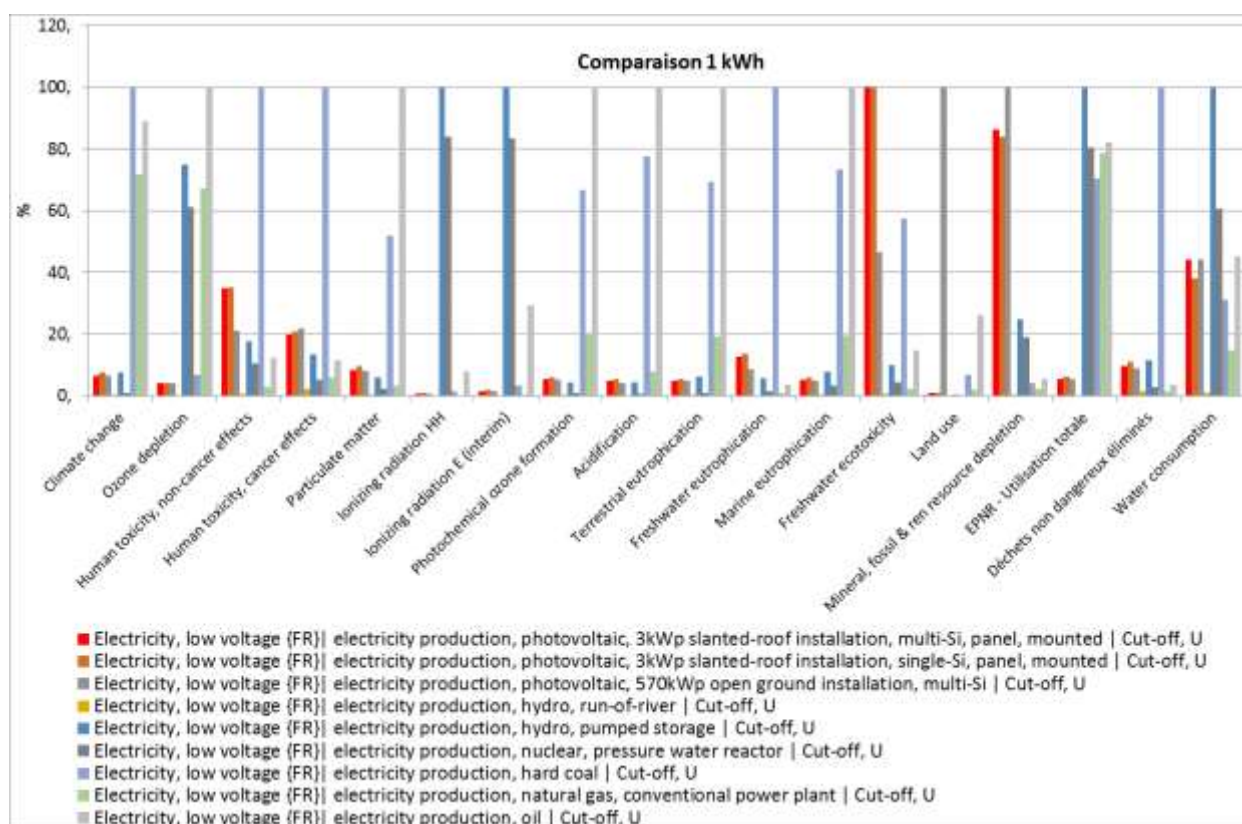


Figure 5 : comparaison de différentes technologies de production d'1kWh d'énergie (base ecoinvent, méthode ILCD midpoint)

2.2.2 Forêt

La ressource forestière est une ressource issue de l'écosphère ou de la simili-écosphère, biotique et à capital ou à stock (dans le cas notamment des forêts primaires, qui constituent une ressource épuisable). La fraction correspondant à une ressource à capital constitue donc une ressource renouvelable dans notre acceptation.

La disponibilité de la ressource dépend :

- De l'intensité des prélèvements passés et/ou de la durée de croissance (maturité)

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

- De la disponibilité et de la qualité des ressources abiotiques support (eau, soleil, air, sols)
- De conditions climatiques favorables
- De possibilité d'importations de la ressource

Sa renouvelabilité est dépendante de l'intensité de son exploitation et de l'absence de dégradation significative (perte de biodiversité, perte de services écosystémiques), dans le cas de la fraction issue de l'écosphère, et de la pérennité des dispositifs de gestion de la ressource (intrants chimiques, taille...) ainsi que de celle des services écosystémiques qui alimente sa croissance (ressource en eau, qualité des sols) dans le cas de la simili-écosphère.

Elle peut s'évaluer sur la base :

- De la période de rotation des espèces
- De l'impact sur les écosystèmes dont dépend la ressource
- De l'impact sur la disponibilité des ressources support
- Du coût environnemental lié à la fourniture des dispositifs de gestion de la ressource, dans le cas de la technosphère

Son exploitation peut impliquer des impacts environnementaux :

- Consommation de combustibles fossiles
- Appauvrissement, dégradation mécanique des sols
- Dégradation de la qualité des écosystèmes
- Relargage de CO₂ biogénique

Son usage implique des impacts environnementaux dont la nature peut varier, selon qu'il soit question d'un usage matériau ou énergie.

2.2.3 Sols

Les sols constituent une ressource spécifique, ressource « support », qui peut être considérée selon deux aspects :

- Les sols considérés comme une ressource directe, usage pour lequel la métrique associée sera une composition d'une unité de surface et de temps
- Les sols considérés comme support d'autres fonctions : gestion de la ressource en eau, écosystèmes terrestre, stockage de CO₂, production biotique

C'est une ressource issue de l'écosphère, de la simili-écosphère ou de la technosphère, à capital. On peut donc considérer les sols comme une ressource renouvelable.

La disponibilité des sols ainsi que leur renouvelabilité dépendent de paramètres nécessitant une classification fine, fonction :

- De l'état initial des sols, avant usage
- Du type d'usage/transformation

Elle dépend :

- Des contraintes mécaniques
- Des pollutions (effets sur la biodiversité, sur la capacité de traitement de l'eau, d'effets de lixiviation...)

La renouvelabilité peut s'évaluer sur la base du temps nécessaire pour le retour à l'état initial.

Son exploitation peut impliquer :

- La modification des fonctions autres que celle concernées par l'usage considéré
- Une concurrence avec un autre usage

2.2.4 Déchet

Les déchets, pouvant être considérés comme une ressource, sont issus de la technosphère, biotiques ou abiotiques, et à capital. Dans les conditions technologiques actuelles, c'est une ressource à renouvellement constant. Cet aspect est néanmoins à nuancer, en fonction de l'usage envisagé.

On distingue quatre modes d'exploitation de la ressource :

- Recyclage en boucle fermée
- Recyclage en boucle ouverte
- Valorisation par récupération de chaleur sur l'incinération
- Valorisation de la fraction fermentescible (compostage, méthanisation)

Leur disponibilité et leur renouvellement sont néanmoins dépendants de l'intensité de la génération de déchets, ainsi que des procédés de collecte et de tri mis en œuvre. Leur valeur en tant que ressource dépend par ailleurs des procédés de recyclage/réemploi/réutilisation mis en œuvre. Ils ne peuvent donc pas être considérés comme une ressource intrinsèquement renouvelable.

2.3 Listing et typologie des ressources renouvelables

L'évaluation qualitative des différentes caractéristiques listées précédemment permet donc d'établir un listing exhaustif des ressources considérées comme potentiellement renouvelables. Elles intègrent ainsi :

- La ressource solaire
- La ressource éolienne
- La ressource hydraulique
- La ressource géothermique
- Les ressources végétales terrestres naturelles
- Les ressources végétales terrestres produites par l'homme
- Les ressources animales terrestres naturelles
- Les ressources animales terrestres produites par l'homme
- Les ressources végétales aquatiques naturelles
- Les ressources végétales aquatiques produites par l'homme
- Les ressources animales aquatiques naturelles
- Les ressources animales aquatiques produites par l'homme

3 ETAT DE L'ART SUR LA PRISE EN COMPTE DE LA RENOUVELABILITE EN ACV

3.1 Introduction

3.1.1 Les différents types d'indicateurs rencontrés en ACV

L'ACV est une procédure que l'on peut découper en plusieurs étapes, les deux premières étant obligatoires :

- a) Modélisation systémique des scénarios
- b) Calcul matriciel permettant de générer l'inventaire des flux → indicateur de flux
- c) Caractérisation des flux → indicateur midpoints
- d) Evaluation de dommages → indicateur de dommage
- e) Agrégation, pondération → indicateur(s) agrégés, pondérés

La modélisation se fait à partir de sets de données sélectionnés dans une base de données d'inventaire ou créés par l'analyste. L'inventaire des flux générés à l'étape b est donc directement lié à la liste des flux gérés par la base de données d'inventaire ou créés par l'analyste lors de la modélisation.

Les étapes c, d et e sont proposés par des auteurs de Méthodes de Calcul d'Impacts. Ces étapes sont optionnelles et substituables, c'est-à-dire que l'on trouve des Méthodes de Calcul d'Impacts qui délivrent des midpoints et des dommages, d'autres des midpoints seulement et d'autres un indicateur agrégé pondéré seulement.

3.1.2 Qu'évalue-t-on ?

Il convient de distinguer :

- Le bénéfice obtenu en utilisant une ressource renouvelable, en comparaison avec une alternative non-renouvelable, sur l'ensemble des mécanismes environnementaux
- La renouvelabilité d'une ressource renouvelable.

Le premier point est couramment intégré en ACV pendant l'étape a) de modélisation.

- Dans la définition du périmètre de l'étude, on exclut du périmètre les ressources considérées comme gratuites ou illimitées. C'est notamment le cas pour les ressources dites de flux, lorsqu'elles sont exploitées de façon directe (apports solaires dans un bâtiment, énergie éolienne pour la ventilation naturelle...). Dans ce cas de figure, l'usage d'une ressource a lieu, mais cet usage n'apparaît pas dans le bilan environnemental.

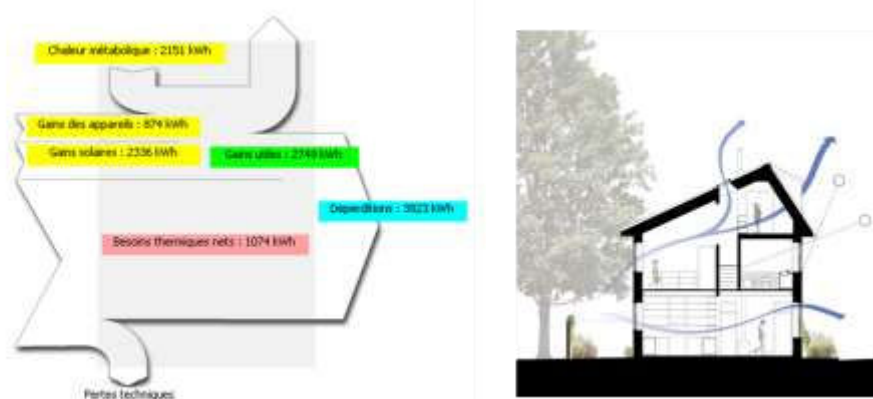


Figure 6: illustration de ressources exclues du périmètre de l'analyse. Cas de l'énergie solaire dans la thermique du bâtiment et de la ventilation naturelle

Ainsi les apports solaires contribuant à réchauffer l'intérieur du bâtiment en période de chauffe, bien que constituant une consommation de ressource renouvelable, ne sont pas intégrés dans le bilan environnemental par ACV. En revanche, la consommation d'énergie pour le chauffage en est diminuée. Autre exemple, le recours à la ventilation naturelle dans un bâtiment, en lieu et place d'une ventilation mécanique, n'apparaîtrait dans aucun indicateur d'impact en ACV mais se traduira par une consommation d'électricité plus faible.

Ce choix méthodologique est fait en considérant que l'impact environnemental de l'usage est nul ou négligeable, mais peut devoir être pris en compte dans le cadre d'une étude portant une attention forte sur les ressources renouvelables.

- Dans la gestion des multifonctionnalités, par l'utilisation de méthodes d'allocation portant sur le périmètre de l'étude, et donc de celui de l'inventaire. L'utilisation de la méthode des impacts évités par exemple permet de valoriser la production d'énergie à partir de ressources renouvelables en lieu et place de ressources qui ne le sont pas, et donc d'affecter un bonus environnemental au système, supposé rendre compte des caractéristiques écologiques de la variante concernée.

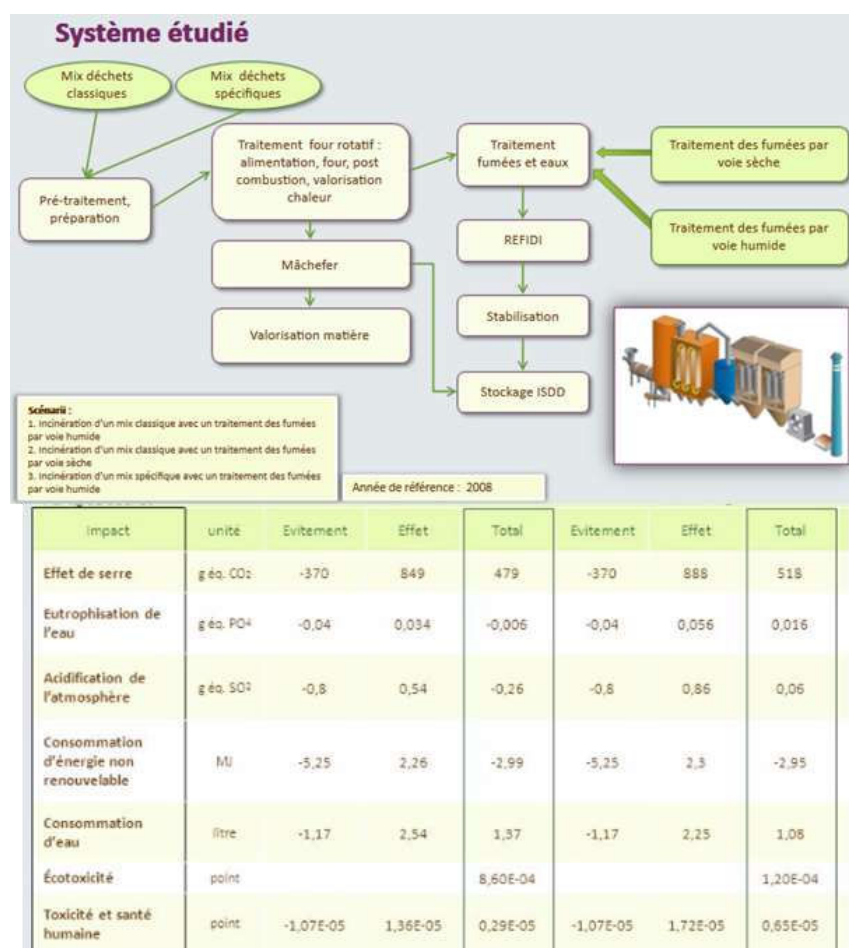


Figure 7: illustration de résultats obtenus par utilisation de la méthode des impacts évités, cas de la récupération de chaleur sur incinération de déchet (source : Analyse de cycle de vie d'un incinérateur rotatif, Yvon Guilbaud, <https://slideplayer.fr/slide/1192090/>)

Ainsi une production locale d'électricité injectée sur le réseau peut être considérée comme permettant d'éviter la production équivalente fournie par le parc électrique concerné. Le recyclage d'un matériau peut amener à intégrer dans le bilan environnemental la soustraction des impacts correspondant la production d'une même quantité de matériau neuf.

L'évaluation de la renouvelabilité, notamment à travers l'évaluation d'indicateurs spécifiques, n'est pas courante. Cela dit, on trouve dans la littérature de nombreux travaux portant sur différents indicateurs focalisés sur les ressources renouvelables. Le tableau fourni en annexe 3 constitue une synthèse des méthodes ayant été identifiées. On s'attache dans ce chapitre à comprendre ce qu'ils évaluent et comment ils sont construits.

3.2 Méthodes de Calcul d'Impacts sur les ressources renouvelables

3.2.1 Les ressources biotiques

3.2.1.1 Notion de capacité de charge

Avant de mener l'analyse de l'état de l'art sur la prise en compte de ces ressources en ACV, il convient de clarifier l'usage qui peut être fait du terme « capacité de charge » (traduction de carrying capacity). C'est un terme qui peut en effet prendre plusieurs sens, selon le domaine où il est utilisé et l'objet que

l'on cherche à caractériser. En écologie fondamentale, la capacité de charge est la taille maximale d'une population qu'un milieu donné peut supporter. C'est une grandeur associée à une population donnée dans le cadre des modèles de dynamiques de population. Elle est directement liée à la notion de rendement maximal soutenable d'une population (Sustainable Maximum Yield) : il existe une relation directe entre la capacité de charge et la quantité de ressource que l'on peut prélever dans une population sans en affecter la pérennité. Appliquée à l'espèce humaine, cette notion de capacité de charge est directement liée aux différents polluants que nous émettons dans l'environnement : la capacité de charge des écosystèmes devient alors une mesure de leur sensibilité à ces polluants, de leur capacité à les absorber et donc à perdurer. Pour plus de clarté dans ce document, nous expliciterons dans ce document les occurrences du concept portant sur cette acceptation, en utilisant la formulation « capacité de charge des écosystèmes ».

3.2.1.2 Trois références principales

Les travaux traitant de la prise en compte de ressources biotiques en ACV (qu'il soit question de revue bibliographique ou de développement de nouvelles méthodes, généralistes ou spécifiques à un domaine particulier de la gestion et de l'exploitation des ressources) s'accordent pour dire que cette catégorie n'est que très mal couverte [Klinglmair & al, 2014] [Crenna & al, 2018] [Helias & al, 2018]. Il n'existe ainsi que peu de méthodes de calcul d'indicateurs portant sur cette thématique, et la plupart des flux de ressources biotiques sont absents des bases de données d'inventaires. Nous baserons ici principalement notre état de l'art sur ces trois dernières références.

3.2.1.3 Indicateurs d'épuisement

Klinglmair et al [Klinglmair & al, 2014], dans un travail portant sur l'évaluation de l'épuisement des ressources en ACV de façon générale, ont listé les méthodes concernant l'épuisement des ressources abiotiques et biotiques.

Tableau 1 : méthodes de calcul d'indicateurs portant sur l'épuisement des ressources [Klinglmair & al, 2014]

Table 1 Metrics for resource depletion	Model	Metric		Source
		Abiotic	Biotic	
Midpoint				
Eergy	–	–	–	Finnveden and Östlund (1997); Dewulf et al. (2007)
CML 2002	kg Sb-eq.; MJ	–	–	Guinée et al. (2002); van Oers et al. (2002)
EcoIndicator 99	–	–	–	Goedkoop and Spriensma (2001)
EcoPoints 2006	kg	kg	–	Frischknecht et al. (2008)
EDIP 1997	kg/cap	kg/cap	–	Hauschild and Wenzel (1998)
EPS 2000	kg	kg	–	Steen (1999)
IMPACT 2002+	kg; MJ	–	–	Joliet (2008)
ReCiPe	kg Fe-eq.; MJ	–	–	Goedkoop et al. (2009)
Endpoint				
Eergy	MJ _{energy}	MJ _{energy}	–	Finnveden and Östlund (1997); Dewulf et al. (2007)
CML 2002	–	–	–	Guinée et al. (2002); van Oers et al. (2002)
EcoIndicator 99	MJ _{energy}	–	–	Goedkoop and Spriensma (2001)
EcoPoints 2006	(Dimensionless)	(Dimensionless)	–	Frischknecht et al. (2008)
EDIP 1997	–	–	–	Hauschild and Wenzel (1998)
EPS 2000	\$ _{WTP}	\$ _{WTP}	–	Steen (1999)
IMPACT 2002+	MJ _{energy}	–	–	Joliet (2008)
ReCiPe	\$ _{energy}	–	–	Goedkoop et al. (2009)

Blank fields indicate the resource category is not covered

On distingue ici quatre types de méthodes pouvant potentiellement s'appliquer aux ressources renouvelables :

- Les méthodes se basant sur la notion de réserve et/ou de taux d'extraction (CML 2002, EDIP 1997). La plupart de ces méthodes ne sont néanmoins pas opérationnelles pour les ressources biotiques : si la méthode CML inclut une catégorie spécifique concernant les ressources biotiques, tenant compte de la notion de renouvellement de la ressource, le manque de données nécessaire à l'évaluation de cet aspect ne permet pas le calcul de facteurs de caractérisation. L'approche existante pour les ressources biotiques se limite ainsi à la prise en compte du taux d'extraction ramené au stock au carré, comme pour les ressources abiotiques.
- Les approches exergétiques (Exergy). Cet indicateur évalue la quantité d'énergie utile nécessaire pour extraire et exploiter une ressource, ainsi que la quantité d'énergie utile qui peut en être tirée. D'un point de vue thermodynamique, elle permet d'évaluer à la fois la quantité et la qualité des énergies concernées par l'analyse. Ces approches sont applicables à un large nombre de ressources, énergétiques ou non. Elles sont néanmoins critiquées, notamment quand appliquées aux ressources non énergétiques, puisque cette méthode ne rend pas compte de la fonctionnalité d'une ressource au-delà de son contenu énergétique, et n'évalue donc pas l'effet de son éventuelle substitution lors de la définition de variantes, par une autre ressource de même fonction. Ces approches ne reflètent pas la renouvelabilité d'une ressource.
- Les approches Willingness To Pay (WTP, volonté de payer) (EPS 2000). Cette approche cherche à évaluer le coût impliqué par le fait d'éviter un impact environnemental, dans notre cas par exemple le recours à une ressource biotique épuisable, qui serait substituée par une ressource d'une autre nature, mais de même fonction. Cette approche est basée sur le prix sur le marché de chaque ressource.
- Les approches Distance To Target (distance de l'objectif) (EcoPoints 2006, correspondant à la méthode Swiss Ecological Scarcity). Elles se basent sur la définition d'une valeur limite, ici un taux d'extraction critique de la ressource. Dans le cas des ressources biotiques renouvelables, cette valeur correspondrait au rendement maximum soutenable d'extraction de la ressource (Maximum Sustainable Yield, MSY). Cette méthode tient compte d'un taux d'extraction anthropique et d'un taux de renouvellement mais ce dernier est un paramètre d'entrée fixe, et non pas le résultat (cf.3.2.1.4 Des illustrations du taux de renouvellement naturel)

En conclusion, les méthodes présentées dans le Tableau 1 : méthodes de calcul d'indicateurs portant sur l'épuisement des ressources [Klinglmaier & al, 2014] ne permettent pas d'estimer la renouvelabilité effective des ressources biotiques.

3.2.1.4 Des illustrations du taux de renouvellement naturel

Le travail de Crenna & al, portant lui plus particulièrement sur les ressources biotiques issues de l'écosphère, liste les méthodes concernant spécifiquement ces dernières, ne constituant pas nécessairement un indicateur d'épuisement mais plutôt des illustrations du taux de renouvellement naturel des ressources.

Tableau 2 : méthodes portant sur les ressources naturelles biotiques rencontrées dans la littérature [Crenna & al, 2018]

Model	Indicator	Unit	Natural Biotic Resources	References
Exergy	Cumulative Energy Extracted from the Natural Environment	MJex/unit	wood	Dewulf et al. (2007); Alvarenga et al. (2013); Taelman et al. (2014)
Emergy	Solar Energy Factor (SEF)	MJse/unit	wood	Rugani et al. (2011)
EPS 2000	Environmental Load Units (ELU)	ELU/kg	wood, fish & meat	Steen (1999)
BRD-fish (Biotic Resource Depletion)	1/maximum sustainable yield (MSY) or 1/current fish catches (Ct) [to be applied in case of overexploitation]	yr/t	Fish	Langlois et al. (2014)
LPY-fish (Lost Potential Yield)	Lost Potential Yields (LPY)	dimensionless	Fish	Emanuelsson et al. (2014)
BIRD	Biotic Resource Availability (BRA)	dimensionless	Terrestrial biotic materials	Bach et al. (2017)

On retrouve ici un indicateur d'Exergy, dont l'évaluation est basée sur la composition chimique de la biomasse considérée. Son extraction, et la dégradation de la qualité de la ressource accompagnant

cette extraction, modifie la composition chimique de cette dernière, et fait ainsi diminuer son contenu en énergie utile. L'indicateur d'Emergy, suivant une logique proche, évalue la consommation d'énergie solaire nécessaire à l'extraction d'une ressource.

Les indicateurs BRD et LPY constituent eux des approches cherchant à évaluer la surexploitation des stocks de poisson. L'indicateur d'épuisement des ressources biotiques (BRD, Biotic Resource Depletion) se base sur le rendement maximal soutenable (Maximum Sustainable Yield, MSY), soit la quantité de biomasse maximale pouvant être prélevée pour une espèce sur une durée illimitée sans épuiser la ressource. Le facteur de caractérisation correspondant ($1/\text{MSY}$) est disponible pour 127 flux régionalisés. Le résultat est exprimé en nombre d'années sans autre prélèvement, par tonne de ressource prélevée à $t=0$. A savoir que la première version de l'indicateur a déjà été améliorée une première fois (modification des valeurs de facteurs de caractérisation dans le cas d'une surexploitation de la ressource).

Helias & al [Helias & al, 2018] ont, dans l'objectif d'améliorer encore la prise en compte de la surexploitation des ressources, développé une méthode permettant d'appliquer aux flux (les masses de poisson prélevées) des facteurs de caractérisation amenant à une évaluation de la fraction de stock épuisée (Depleted Fraction of the Stock, DSF). Cette évaluation se fait sur la base de la quantité de biomasse existante, du taux de prélèvement et du taux de renouvellement de l'espèce considérée.

$$\frac{dB}{dt} = -C + rB \times \left(1 - \frac{B}{K}\right)$$

$$\text{DSF} = \frac{C}{rB}$$

$$\frac{\partial \text{DSF}}{\partial B} = -\frac{C}{rB^2}$$

$$\text{CF} = \frac{C}{rB^2}$$

Figure 8 : étapes du calcul des facteurs de caractérisation du modèle de [Hélias & al, 2018]. B est la quantité de biomasse considérée, C le prélèvement, r le taux de renouvellement, K la capacité de charge de la population concernée. L'équation différentielle est issue du modèle de Schaeffer de description de la dynamique d'une population

L'indicateur de perte de rendement potentiel (Lost Potential Yield, LPY) évalue lui pour 31 espèces de poisson l'effet de la surexploitation des stocks, et la baisse future des stocks liés à cette surexploitation.

Les indicateurs portant sur la notion de taux de prélèvement soutenable ou sur la perte de rendement liée à la surexploitation (MSY, LPY) sont critiqués pour leur dimension simplificatrice, qui ne tient pas compte de la complexité de la structure des écosystèmes, voire de la population de l'espèce considérée. Ils constituent en effet généralement une approche mono-espèce, pour laquelle la population est considérée à l'équilibre (et néglige donc les variations naturelles de la population), et sans prise en compte de la structure de cette population (âge notamment). Le taux de renouvellement est aussi estimé sans considération des effets de l'intervention humaine sur les ressources supports. Ainsi, la définition même d'une valeur maximale unique de prélèvement soutenable est contestée : les variations (naturelles ou anthropiques) des conditions environnementales dans lesquelles l'espèce considérée évolue ont une influence sur cette grandeur [Langlois & al, 2014]. A priori, les interventions anthropiques peuvent affecter le taux de renouvellement :

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

- En l'améliorant par la mise en culture ou l'élevage. L'écosphère est ainsi transformée en simili-écosphère. La mise en place de process optimisant les rendements peut augmenter la vitesse de renouvellement de la ressource.
- Et/ou en le dégradant, parce que le mode d'exploitation n'est pas soutenable
- Voire en l'annulant de manière irréversible : si la capacité de charge de l'écosystème est dépassée, la ressource n'est plus renouvelée.

La méthode BIRD (Biotic mateRials in proDuct systems), elle, calcule un indicateur inspiré de celui d'épuisement des ressources abiotiques : elle évalue ainsi la différence entre l'exploitation de la ressource et son renouvellement, rapportée à la quantité totale de ressource au carré, et évalue ainsi la disponibilité de la ressource biotique. Dans cette méthode aussi le taux de renouvellement est un paramètre d'entrée fixe, et non pas le résultat. Cette méthode adopte la même logique que celle de Lindeijer et al [Lindeijer & al, 2002], qui proposent par ailleurs d'intégrer les ressources biotiques dans un indicateur global d'évaluation de l'épuisement des ressources (biotiques et abiotiques, donc).

Crenna et al [Crenna & al, 2018] ont cherché à développer un indicateur d'impact caractérisant les ressources biotiques naturelles renouvelables (NOBr : Natural Occurring Biotic ressources), en se basant sur le taux de renouvellement des espèces et leur durée de régénération (grandeurs issues d'une revue de la littérature sur le sujet). En fonction du type de ressource considérée, l'indicateur retenu comme facteur de caractérisation est :

- Le temps de doublement de la population dans les cas des espèces animales
- La période de rotation pour les plantes

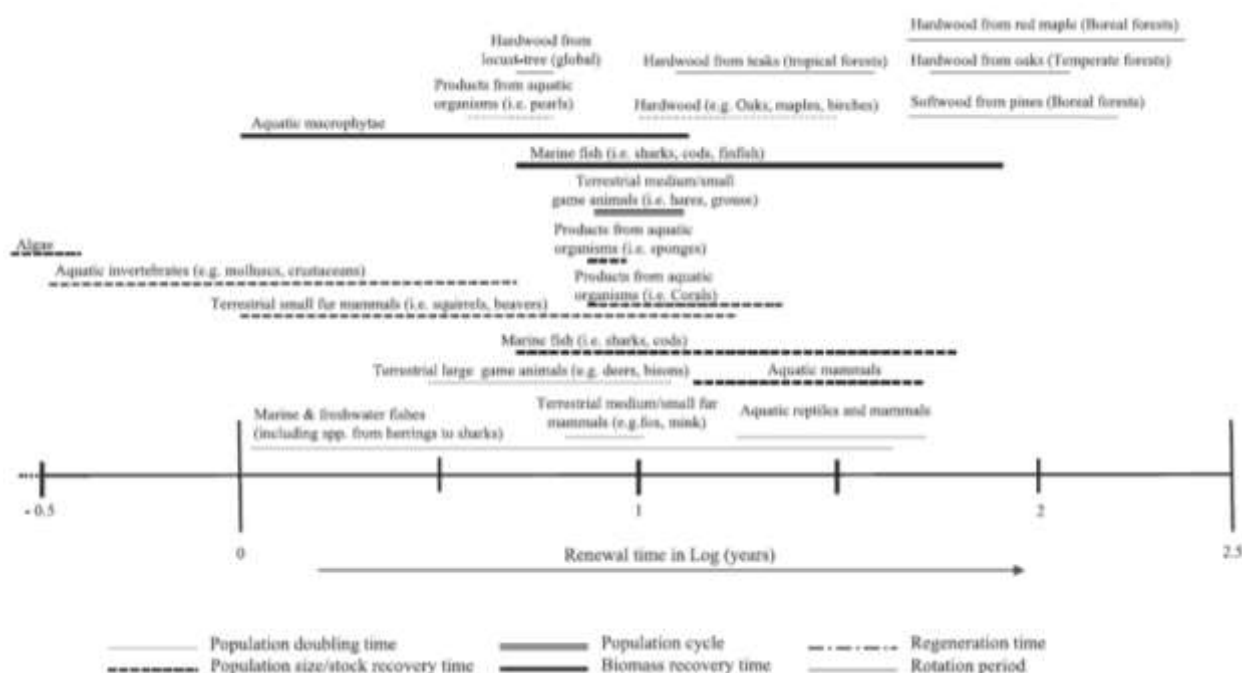


Figure 9 : durée de renouvellement de quelques espèces, en échelle logarithmique [Crenna & al, 2018]

Une des problématiques soulevées par Crenna et al est que peu de flux élémentaires sont présents à ce jour dans la base ecoinvent. Seuls sont présents des flux concernant la masse animale, la biomasse, le carbone organique, la ressource en poisson, la tourbe, et le bois sous différentes formes.

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Tableau 3: liste des ressources naturelles biotiques incluses dans la base de données ecoinvent V 3.3 [Crenna & al, 2018]

List of natural biotic resources and their units currently included in one LCA inventory database, i.e. Ecoinvent v.3.3 (2016).

Resource name in Ecoinvent 3.3	unit
Animal matter	kg
Biomass	kg
Biomass, feedstock	MJ
Carbon, organic, in soil or biomass stock	kg
Fish, unspecified, in sea	kg
Peat	kg
Wood (16.9 MJ/kg)	kg
Wood and wood waste, 20.9 MJ per kg, oven dry basis	kg
Wood and wood waste, 9.5 MJ per kg	kg
Wood, dry matter	kg
Wood, feedstock	kg
Wood, hard, NE-NC, standing	m ³
Wood, hard, standing	m ³
Wood, primary forest, standing	m ³
Wood, soft, INW, standing	m ³
Wood, soft, NE-NC, standing	m ³
Wood, soft, standing	m ³
Wood, soft, US PNW, standing/m3	m ³
Wood, soft, US SE, standing/m3	m ³
Wood, unspecified, standing/kg	kg
Wood, unspecified, standing/m3	m ³

NE-NC: Northeast North Central; INW: Inland West; US PNW: United States Pacific Northwest; US SE: United States Southeast.

Ainsi, les auteurs proposent une liste des flux « économiques » à prendre en compte en ACV, en se limitant dans ce cas aux ressources biotiques produites naturellement (sans intervention humaine), et en incluant le sol. Elles sont regroupées selon les catégories suivantes :

- Vertébrés aquatiques et terrestres
- Invertébrés aquatiques et terrestres
- Plantes terrestres
- Plantes aquatiques et algues
- Champignons
- Produits issus des animaux aquatiques et terrestres
- Produits issus de plantes terrestres

Le détail des flux listés est donné en Annexe 1.

Par ailleurs, parmi les méthodes généralistes pouvant concerner les ressources biotiques, citons la méthode ecological footprint [Wackernagel, 1994] [Lin & Al, 2018], qui n'est originellement pas spécifiquement développée pour l'ACV, mais qui peut aujourd'hui s'y articuler. Dans cette méthode, chaque prélèvement de ressources et émission de déchets dans l'environnement est converti en surface équivalente, ou en surface.année équivalente. Cette évaluation se fait de façon non-localisée, considérant l'économie mondialisée, et permet par exemple de calculer le « jour du dépassement », jour à partir duquel la population mondiale a consommé l'intégralité des ressources que la planète est capable de renouveler en un an. Cette méthode intègre à la fois la notion de capacité de charge et de rendement maximal soutenable (Maximum Sustainable Yield, MSY), mais la granularité des données ainsi que l'aspect global de son approche ne la rendent pas pertinente ici.

Citons enfin les indicateurs utilisant la notion de production primaire nécessaire (Primary Production Required, PPR) [Cashion & al, 2016]. Cette approche a pour objectif d'évaluer la quantité de carbone, originellement produite par photosynthèse, nécessaire pour la production d'une certaine quantité de biomasse (animale, végétale, bactérienne ou fongique). Il intègre l'efficacité des transferts de carbone

au sein de l'écosystème, et caractérise l'espèce concernée par son niveau trophique (niveau dans le réseau de chaînes alimentaires d'un écosystème).

$$PPR = \frac{C}{M} \cdot (1/TE)^{TL-1}$$

Figure 10 : calcul de la production primaire requise pour une production biotique donnée. C est la quantité de biomasse prélevée, M le ratio entre la masse sèche de biomasse et le contenu carbone de l'espèce concernée, TE l'efficacité de transfert trophique de l'écosystème concerné, TL le niveau trophique de l'espèce considérée

Cet indicateur permet ainsi, lorsqu'appliqué à une espèce prélevée ou produite par l'homme, d'évaluer la quantité de carbone qu'il s'approprie. Lorsque ramené au niveau total de carbone présent dans le périmètre considéré, il caractérise la pression anthropique sur celui-ci. La démarche permet par exemple de tenir compte, dans le cas de l'élevage, des impacts de la production des différents produits agricoles servant à nourrir l'espèce concernée.

L'indicateur PPR, présente, lui aussi, de nombreuses limites. L'approche ne tient en effet que difficilement compte des variations naturelles liées aux différents paramètres de calcul, et sont basées sur des approches moyennes, concernant l'efficacité du transfert entre niveaux trophiques. Par ailleurs les évaluations actuelles de la PPR ne permettent pas de déterminer l'importance de l'impact ramené à la productivité globale de l'écosystème. Cet indicateur ne tient pas non plus compte du rôle des espèces dans un écosystème, et ne permet donc pas d'évaluer sa qualité (diversité génétique, espèces sensibles, structure de l'écosystème).

Parmi les travaux qui ont été réalisés dans le but d'évaluer un indicateur relatif aux ressources biotiques, on distingue tout d'abord ceux qui s'intéressent à l'épuisement de la ressource. Plusieurs propositions ont été identifiées dont celles visant à l'évaluation (1) des ressources prélevées, ramenées à un stock disponible (ex : CML, EDIP, BIRD); (2) de la marge restante avant épuisement (EcoPoint 2006), (3) du nombre d'années sans autre prélèvement par tonne de ressource prélevée à t=0 (BRD-fish); (4) du rendement futur potentiellement perdu (LPY-fish). Plusieurs de ces méthodes tiennent compte d'un taux d'extraction anthropique et/ou d'un taux de renouvellement mais ce dernier est un paramètre d'entrée fixe estimé, le plus souvent, sur la base des caractéristiques intrinsèques de la ressource uniquement, c'est à dire sans considération des variations (naturelles ou anthropiques) des conditions environnementales dans lesquelles l'espèce considérée évolue. Or ce sont ces interventions qui permettront d'améliorer le taux de renouvellement (parce qu'il y a culture ou élevage et que l'écosphère est dynamisée en simili-écosphère pour produire plus) et/ou de le dégrader (parce que le mode d'exploitation n'est pas soutenable), voire de l'annuler de manière irréversible (si la capacité de charge de l'écosystème est dépassée, la ressource n'est plus renouvelée). C'est justement ces effets que nous cherchons à mesurer.

Ensuite, des méthodes permettant le calcul d'autres indicateurs que l'épuisement (emergy, exergy, coût de l'évitement d'un impact, nombre d'année pour le renouvellement de la ressource) ont été investigués mais n'ont pas été identifiés comme pertinents pour la présente étude.

On souligne cependant l'intérêt de la notion de production primaire de carbone nécessaire (PPR), en ce qu'il permet d'établir un lien entre, d'un côté, l'exploitation des ressources supports pour la production de ressource biotique et, de l'autre, le flux carbone ; avec possibilité d'y intégrer, cette fois, les effets anthropiques. Cet indicateur pourrait ainsi contribuer à l'élaboration d'une métrique commune pour les ressources issues de l'écosphère et de la simili écosphère, qu'elles soient végétales ou animales. La mise en parallèle de cette valeur avec une valeur totale de production primaire totale

(à une échelle pertinente) présente par ailleurs un intérêt certain pour l'évaluation de la rareté d'une ressource, et donc sa renouvelabilité [Cashion & al, 2016].

Notons enfin que la plupart des méthodes citées ici ont une opérationnalité limitée. Elles sont en effet pour la plupart issue d'un champ d'expertise précis, ne sont pas diffusées dans des outils et bases de données généralistes d'ACV, et dépendent de flux élémentaires souvent non disponibles dans ceux-ci.

3.2.2 Les sols et sous-sols

3.2.2.1 Flux élémentaires

La prise en compte de l'occupation et de la transformation des sols se fait en ACV par l'intermédiaire de flux élémentaires incluant des éléments sur le type de sol considéré, une dimension spatiale, une dimension temporelle et une localisation géographique [Koellner & al, 2012]. On obtient ainsi des flux élémentaires de ce type :

- Pour l'occupation des sols, $m^2 \cdot an$, usage du sol de type i, région k
- Pour la transformation des sols, m^2 , usage du sol initial type i -> usage du sol final type j, région k

Le travail mené par Koellner et al fournit une classification pour les usages du sol, ainsi que pour la régionalisation de ces données. Cette classification a servi de base à l'élaboration de la version 3 de la base de données ecoinvent, listant les usages du sol inclus dans les inventaires [Weidema et al, 2013] :

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Tableau 4 :classification des sols et de leurs usages dans la base de données ecoinvent 3, [Weidema et al, 2013]

Land use class	Description
Unspecified	
Unspecified, natural (non-use)	
Forest, unspecified	Areas with tree cover >15%.
Forest, primary (non-use)	Forests (tree cover >15%), minimally disturbed by humans, where flora and fauna species abundance is near pristine.
Forest, secondary (non-use)	Areas originally covered with forest or woodlands (tree cover >15%), where vegetation has been removed, forest is re-growing and is no longer in use.
Forest, extensive	Forests (tree cover >15%), with extractive use and associated disturbance like hunting, and selective logging, where timber extraction is followed by re-growth including at least three naturally occurring tree species, with average stand age >30 years and deadwood > 10 cm diameter exceeds 5 times the annual harvest volume.
Forest, intensive	Forests (tree cover >15%), with extractive use, with either even-aged stands or clear-cut patches exceeding 250 m length, or less than three naturally occurring species at planting/seeding, or average stand age <30 years, or deadwood less than 5 times the annual harvest volume.
Wetland, coastal (non-use)	Areas tidally, seasonally or permanently waterlogged with brackish or saline water. Includes coastal marshland and mangrove. Excludes coastal land with infrastructure or agriculture.
Wetland, inland (non-use)	Areas partially, seasonally or permanently waterlogged. The water may be stagnant or circulating. Includes inland marshland, swamp forests and peat bogs.
Shrub land, sclerophyllous	Shrub-dominated vegetation. May be used or non-used. Includes also abandoned agricultural areas, not yet under forest cover
Grassland, natural (non-use)	Grassland vegetation with scattered shrubs or trees (e.g., steppe, tundra, savanna).
Grassland, natural, for livestock grazing	Grasslands where wildlife is replaced by grazing livestock.
Arable land, unspecified use	Land suitable for crop production, in unspecified use
Pasture, man made	Arable land used for forage production or livestock grazing.
Pasture, man made, extensive	+ no artificial fertiliser applied, mechanically harvested less than 3 times per year or equivalent livestock grazing
Pasture, man made, intensive	+ artificial fertiliser applied, or mechanically harvested 3 times or more per year or equivalent livestock grazing
Annual crop	Cultivated areas with crops that occupy the land < 1 year, e.g. cereals, fodder crops, root crops, or vegetables. Includes aromatic, medicinal and culinary plant production and flower and tree nurseries.
Annual crop, non-irrigated	Annual crop production based on natural precipitation (rainfed agriculture).
Annual crop, non-irrigated, extensive	+ Use of fertiliser and pesticides is significantly less than economically optimal.
Annual crop, non-irrigated, intensive	+ Fertiliser and pesticides at or near the economically optimal level.
Annual crop, irrigated	Annual crops irrigated permanently or periodically. Most of these crops could not be cultivated without an artificial water supply. Does not include sporadically irrigated land.
Annual crop, irrigated, extensive	+ Use of fertilizer and pesticides is significantly less than economically optimal.
Annual crop, irrigated, intensive	+ Fertiliser and pesticides at or near the economically optimal level.
Annual crop, flooded crop	Areas for rice cultivation. Flat surfaces with irrigation channels. Surfaces regularly flooded.
Annual crop, greenhouse	Crop production under plastic or glass.
Field margin/hedgerow	Land between fields with natural vegetation.
Heterogeneous, agricultural	Agricultural production intercropped with (native) trees.
Permanent crop	Perennial crops not under a rotation system which provide repeated harvests and occupy the land for >1 year before it is ploughed and replanted; mainly plantations of woody crops.
Permanent crop, non-irrigated	Perennial crops production based on natural precipitation (rainfed agriculture).
Permanent crop, non-irrigated, extensive	+ Use of fertilizer and pesticides is less than economically optimal.
Permanent crop, non-irrigated, intensive	+ Fertiliser and pesticides at economically optimal level.
Permanent crop, irrigated	Perennial crops irrigated permanently or periodically. Most of these crops could not be cultivated without an artificial water supply. Does not include sporadically irrigated land.
Permanent crop, irrigated, extensive	+ Use of fertilizer and pesticides is significantly less than economically optimal.
Permanent crop, irrigated, intensive	+ Fertiliser and pesticides at or near the economically optimal level.
Cropland fallow (non-use)	Cropland, temporarily not in use (<2 years).
Urban/industrial fallow (non-use)	Areas with remains of industrial buildings; deposits of rubble, gravel, sand and industrial waste. Can be vegetated.

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Land use class	Description
Urban, continuously built	Buildings cover most of the area. Roads and artificially surfaced area cover almost all the ground. Non-linear areas of vegetation and bare soil are exceptional. At least 80% of the total area is sealed.
Urban, discontinuously built	Most of the area is covered by structures. Buildings, roads and artificially surfaced areas, associated with areas with vegetation and bare soil, which occupy discontinuous but significant surfaces. Less than 80% of the total area is sealed.
Urban, green area	Areas with vegetation within urban fabric. Includes parks with vegetation.
Industrial area	Artificially surfaced areas (with concrete, asphalt, or stabilized, e.g., beaten earth) devoid of vegetation on most of the area in question, which also contains buildings and/or areas with vegetation.
Mineral extraction site	Areas with open-pit extraction of industrial minerals (sandpits, quarries) or other minerals (opencast mines). Includes flooded gravel quarries, except for riverbed extraction.
Dump site	Landfill or mine dump sites, industrial or public.
Construction site	Areas under construction development, soil or bedrock excavations, earthworks.
Traffic area, road network	Motorways, including associated installations (stations).
Traffic area, rail network	Railways, including associated installations (stations, platforms).
Traffic area, rail/road embankment	Vegetated land along motorways and railways.
Bare area (non-use)	Areas permanently without vegetation (e.g., deserts, high alpine areas).
Snow and ice (non-use)	Areas permanently covered with snow or ice considered as undisturbed areas.
Inland waterbody, unspecified	Freshwater bodies.
River, natural (non-use)	Natural watercourses.
Lake, natural (non-use)	Natural stretches of water.
River, artificial	Artificial watercourses serving as water drainage channels. Includes canals.
Lake, artificial	Reservoir in a valley because of damming up river.
Seabed, unspecified	Area permanently under seawater.
Seabed, natural (non-use)	Natural seabed.
Seabed, bottom fishing	Seabed disturbed by bottom trawling or fishing dredge
Seabed, sediment displacement	Seabed disturbed by dumping or shellfish- or sediment-dredging
Seabed, infrastructure	Seabed disturbed by infrastructure like harbours or platforms
Seabed, drilling and mining	Seabed disturbed by drilling and mining, including cuttings and tailings disposal

Ainsi, il existe un consensus sur la nature et la liste des flux élémentaires utilisés pour caractériser l'usage des sols. Ces flux spécifiques aux sols incluent : le type d'usage (*forest, arable crop, urban land...*), le mode d'exploitation (*intensive vs extensive, irrigated vs non-irrigated...*), et la dynamique d'occupation et de changement d'usage. De plus, ces flux sont intégrés dans la plupart des BDD d'ICV existante, dont la base ecoinvent.

3.2.2.2 Panorama des méthodes d'évaluation d'impact existantes

L'usage des sols a des influences sur plusieurs aspects, résumés dans le graphique suivant, issu de [Koellner & al, 2013].

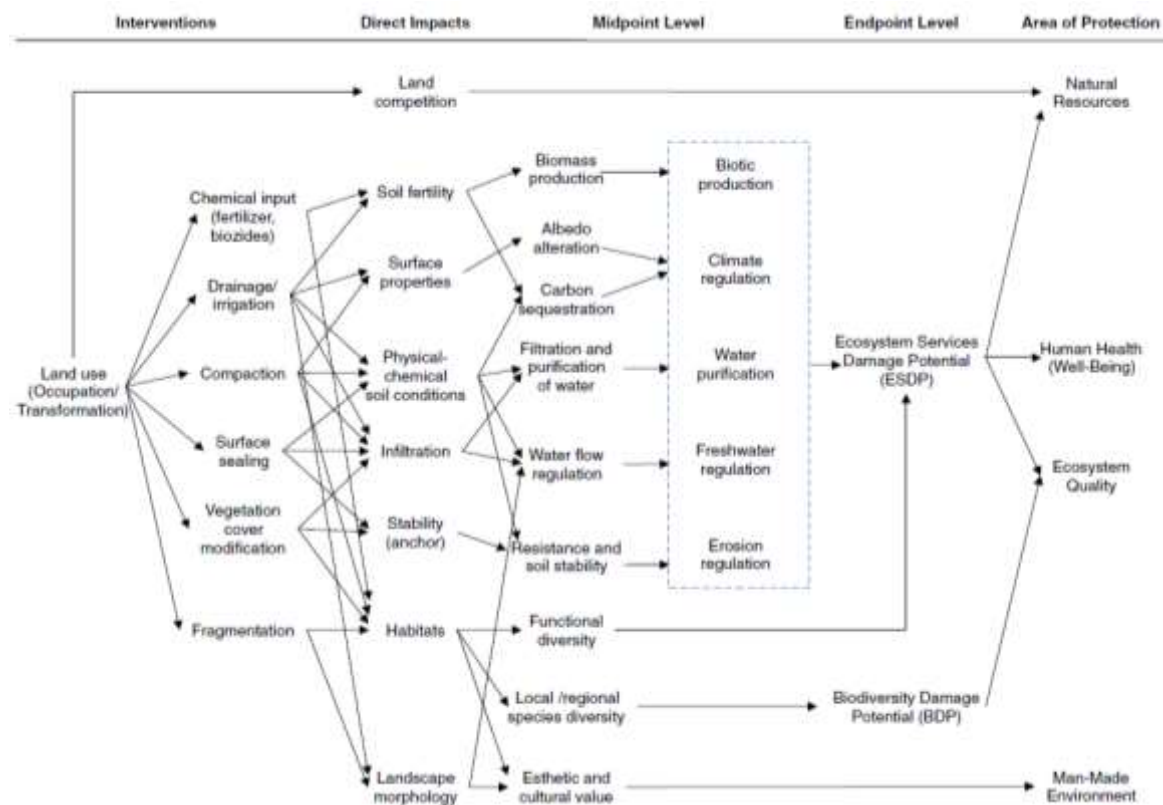


Figure 11 : chaîne de cause à effets concernant les impacts liés à l'usage des sols [Koellner & al, 2013]

On le voit, on peut considérer plusieurs types d'impacts, et donc plusieurs indicateurs d'impacts, pour caractériser l'usage des sols.

On peut tout d'abord considérer un indicateur directement issu des flux élémentaires qui permet de rendre compte du phénomène de compétition de l'usage des sols, et donc de la raréfaction du sol comme ressource.

Les méthodes existantes peuvent aussi évaluer l'influence de l'usage des sols sur plusieurs fonctions assurées par les sols, et amener à considérer des indicateurs midpoint relevant de la production de ressources biotiques, la régulation climatique, la purification de l'eau, la régulation des stocks d'eau douce, et la régulation de l'érosion. En bout de chaîne, on retrouve des indicateurs endpoint cherchant à caractériser les impacts sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources naturelles.

L'ILCD (International Life Cycle Database) [ILCD, 2010] liste ainsi les méthodes suivantes :

Midpoint :

- CML 2002 (m2.yr/m2.yr)
- Eco Indicator 99 (MJ surplus energy, Resources, based on Chapman and Roberts (1982), and Müller-Wenk (1998))
- Impact 2002+ (m2 organic arable crop)
- LIME ((occupation) m2.yr, (transformation) m2)
- ReCiPe ((occupation) m2.yr, (transformation) m2)
- Swiss Eco Scarcity (Ecofactors per m2 landfill area occupied)
- TRACI (Use of a certain amount of land. (m2))

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Endpoint :

- EPS 2002d (Normalised Extinction of species (NEX) is calculated for use of arable land, forest and roads. Based on Swedish study. Rough estimation.)
- ReCiPe (Based on species-area relationship ($s=cAz$), with variable z-factors and c-factors depending on the land use type. Three types of land use intensiveness are considered.)

Ces indicateurs, se basant sur les flux d'usage et de transformation des sols listés précédemment, permettent ainsi d'évaluer la contribution de ces aspects à une catégorie de dommage donnée. Il peut s'agir de compétition sur l'usage de la ressource mais aussi d'effet sur la qualité de celle-ci (en se ramenant à un sol équivalent considéré comme une référence par exemple).

On constate ainsi bien la coexistence d'indicateurs de flux et d'indicateurs plus élaborés d'évaluation de l'impact sur la biodiversité, les fonctions écologiques ou les services écosystémiques. Néanmoins Koellner et al [Koellner & al, 2013] relèvent que ces derniers indicateurs sont pour la plupart basés sur des études géographiquement localisées, et donc difficilement généralisables.

Plus largement, on constate l'existence de nombreuses approches, certaines prenant en compte plusieurs fonctions et impacts, d'autres plus spécifiques [Legaz, 2017] :

Tableau 5: méthodes d'évaluation des impacts des usages des sols, de leur qualité et fonctions en ACV [Legaz, 2107]

Model	Main indicators	Unit (for land occupation impact)
Brandão and Milà i Canals (2013)	- Soil Organic Carbon (SOC) – as indicator of Biotic Production Potential (BPP)	(tC-year)/(ha-year)
LANCA- Land Use Indicator Value Calculation in Life Cycle Assessment (Beck et al., 2010; CFs associated to land use flows developed by Bos et al., 2016)	- Erosion resistance - Mechanical filtration - Physicochemical filtration - Groundwater replenishment - Biotic production	kg/m ² year m ³ /m ² year mol/m ² m ³ /m ² year kg/m ² year
Saad et al. (2013)	- Erosion resistance - Mechanical filtration - Physicochemical filtration - Groundwater recharge	t/(ha year) cm/day cmol/kg soil mm/year
SALCA-SQ Oberholzer et al. (2012)	- Soil properties indicators: rooting depth, macro-pore volume, aggregate stability, organic carbon, heavy metals - organic pollutants, earthworm biomass, microbial biomass, microbial activity - Impact indicators: risk of soil erosion, risk of soil compaction	(many different)
Núñez et al. (2010)	- Desertification index	dimensionless
Garrigues et al. (2013)	- Total soil area compacted - Loss of pore volume	m ² /ha, m ³ /t m ³ /ha, m ³ /t
Núñez et al. (2013)	- Energy - Net Primary Production (NPP) depletion	MJse g ⁻¹ soil loss m ² year
Alvarenga et al. (2013)	- Exergy of natural land (biomass extraction-based) - Exergy of human-made land (potential NPP-based)	MJ ex/m ² year
Alvarenga et al. (2015)	- Human Appropriation of NPP (HANPP)	kg dry matter/m ² year
Gardi et al. (2013)	- Soil pressure (on biodiversity)	
Burkhard et al. (2012)	- Ecosystem integrity indicators (7) - Ecosystem services indicators (22) - Demand of ecosystem services (22)	dimensionless (ranking)

Ces constats ont régulièrement amené des propositions et la mise en place d'initiatives ayant pour but l'homogénéisation des pratiques, modes d'évaluation et méthodes autour de la question de l'usage des sols, ainsi que la couverture complète des éléments caractérisant la qualité des sols d'un point de vue environnemental.

Canals & al [Canals & al, 2007] ont ainsi cherché à établir un cadre reposant sur la prise en compte de trois principaux effets :

- L'effet sur la biodiversité. L'usage d'un sol aura tendance à réduire la biodiversité sur l'espace considéré, de façon directe ou indirecte (altération des fonctions écosystémiques du sol)

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

- L'effet sur le potentiel de production biotique. La capacité de production de ressource par les sols, principale fonction exploitée par l'homme, peut être affectée de plusieurs manières (compactage des sols, érosion, disparition d'espèces nécessaires à la culture)
- L'effet sur les fonctions autres que fertiles. Ces effets concernent par exemple le captage de CO₂, le ruissèlement, l'infiltration de l'eau et donc l'influence sur la ressource d'eau douce, les cycles de transformation des nutriments, ou encore la fonction de filtre et de tampon pour certains polluants.

Koellner & al ont par la suite proposé des lignes directrices pour le développement d'une méthode s'appliquant de façon globale, portant sur la biodiversité et les services écosystémiques, en s'appuyant notamment sur les approches existantes et la généralisation de leurs facteurs de caractérisation.

Tableau 6 : catégories d'impact, indicateurs considérés pour l'évaluation des impacts liés à l'usage des sols, selon [Koellner & al, 2013]

Life Cycle Impact Category	Description	Early methodologies	Consolidated CFs on a global scale	Indicators
Biodiversity Damage Potential (BDP)^a	Impacts on biodiversity			
1) Species diversity (SD)	Capacity of ecosystems to support global species diversity	(Goedkoop et al. 2009)	(de Baan et al. 2013)	Species diversity lost per area for a specific land cover relative to reference land cover [%]
2) Functional diversity (FD)	Capacity of ecosystems to support functional diversity	–	(Souza et al. 2013)	Functional diversity lost per area for a specific land cover relative to reference land cover [%]
Ecosystem Services Damage Potential (ESDP)^b	Impacts on global ecosystem services			
1) Biotic Production Potential (BPP)	Capacity of ecosystems to produce biomass	(Baitz et al. 2000; Milà i Canals et al. 2007b)	(Brandão and Milà i Canals L. 2013)	Deficit of Soil Organic Matter (SOM) due to land use [Mg SOM year]
2) Climate Regulation Potential (CRP)	Capacity of ecosystems to uptake carbon from air	–	(Müller-Wenk and Brandão 2010)	Carbon flows [t C/m ² year] change due to land use
3) Freshwater Regulation Potential (FWRP)	a) Capacity of ecosystems to regulate peak flow and base flow of surface water b) Capacity of ecosystems to recharge ground water	a) – b) (Baitz et al. 2000; Milà i Canals et al. 2009)	a) – b) (Saad et al. 2013)	a) Water regulation capacity [dimensionless] b) Ground water recharge rate [mm/ year]
4) Erosion Regulation Potential (ERP)	Capacity of ecosystems to stabilise soil and to prevent sediment accumulation downstream	(Baitz et al. 2000)	(Saad et al. 2013)	Erosion resistance [ton/ha year]
5) Water Purification Potential (WPP)	Chemical, physical and mechanical capacity of ecosystems to clean a polluted suspension of water	(Baitz et al. 2000)	(Saad et al. 2013)	Cation exchange capacity [cmol _c /kg _{soil}]

Les fonctions remplies par les sols prises en compte en ACV sont donc considérées de façon large, et recouvrent plusieurs catégories d'impacts et compartiments écologiques. La méthode LANCA [Bos & al, 2016], implémentée dans le référentiel PEF (Product Environmental Footprint) [Manfredi & al, 2012][Fazio & al, 2018] propose 5 indicateurs couvrant les impacts, liés à l'usage des sols, portant sur la résistance à l'érosion, la filtration mécanique, la filtration physicochimique, la régénération de l'eau souterraine et la production biotique. Dans le cadre du PEF, ces cinq indicateurs sont agrégés en une unique valeur, selon la méthode présentée dans De Laurentiis & al [De Laurentiis & al, 2019]

3.2.2.3 Focus sur l'indicateur Potentiel de production biotique

Les indicateurs relevant de la production biotique sont d'un intérêt particulier pour notre étude : ils constituent en effet un élément de caractérisation du lien existant entre qualité des sols et production de biomasse, ressource considérée comme renouvelable. Il en existe plusieurs [Brandao & Mila i Canals, 2013] :

Tableau 7 : méthode de calcul d'indicateur concernant le potentiel de production biotique des sols [Brandao & Mila i Canals, 2013]

Indicateur	Relationship to BPP	Applicability in LCA/Has it been used in LCA?	Relevant references
Back-up technology (endpoint)	Alternative and artificial way for restoring the same productivity levels of BPP (e.g., by fertiliser use)	Yes, but mainly related to non-land resources (e.g., desalinisation for water use impacts)	Stewart and Weidema (2005)
Net Primary Production (NPP)	NPP refers to actual biomass production	Appropriate for non-biotic production life cycle stages. The limitation with NPP is that it may be completely determined by the particular management regime to which the land is subjected to (e.g., high crop yields sustained by fertiliser use) and/or short-term natural factors. The long-term and inherent ability of the ecosystem itself to produce biomass is, therefore, bypassed.	Weidema and Lindeijer (2001)
Human Appropriation of Ecosystem Carbon Stock (HAPECS)	Refers to the carbon exported from the system in the form of biomass and CO ₂	Yes, as an aggregate indicator of impacts on ecosystem services and biodiversity.	Brandao et al. (2010)
Erosion	Physical loss of soil undermines and decreases the potential of soil to perform its functions, including biotic production.		Cowell and Clift (2000)
Salinisation	The increase in concentrations of salts in soil due to poor irrigation and other agricultural practices and extensive land clearing cause soil degradation and may inhibit biotic production by reducing the ability of plant roots to uptake water and nutrients.	This indicator may not be fully compatible with a whole life cycle approach, being more suitable to the agricultural phase of the life cycle. As in the case of erosion, the choice of this indicator might not be meaningful for sealed soils or stages of the life cycle outside the agricultural stage. On the other hand, when salinisation occurs other indicators for BPP will be less relevant.	Feitz and Lundie (2002)
Energy/exergy	Energy and carbon balances are closely related (see NPP and HAPECS).		Wagendorp et al. (2006)
Microbial biomass and diversity	Soil organisms are crucial in the ecological functioning of the soil due to their role in mineralisation and cycling of SOM and nutrients, degrading pollutants, controlling pests, improving soil structure, fixing CO ₂ and producing SOM.	Whilst it may be useful in the assessment of industrial systems, indicators based on energy/exergy are less suitable for the assessment of biotic systems. Its applicability in LCA is limited to the post land-use stages of the life cycle. It helps the soil perform its functions. Rosado et al. (2006) found that soil bacterial communities were extremely sensitive to land management. This indicator is closely related to SOC as soil biota is sustained mainly by organic matter. However, this indicator is limited by difficulty of measurement.	Peixoto et al. (2006)
Soil organic matter (SOM)/Soil organic carbon (SOC)	SOM affects most of the chemical, physical and biological properties of soil. Despite the relatively minor quantity in soil, SOM plays an important role as a soil constituent and as source of food and energy for soil biota. Therefore, SOM is a keystone for soil functioning. It influences soil texture and soil structure, which together determine the general productivity of cropping systems by influencing the availability of nutrients. Before the invention and use of synthetic fertilisers, SOM was at the core of biomass production.	SOM is recognised as the best stand-alone indicator for soil quality, despite not considering all aspects of soil functioning. Indeed, SOM is probably the most cited indicator of soil quality within soil science research. The reason for this is that not only does it influence soil fertility but also a range of indicators of soil and environmental quality. As an indicator, SOC has been widely used outside the LCA methodology, and even within it, it has already been suggested. SOM is best measured by SOC. The value of this indicator lies in the fact that it is closely related to other soil quality indicators, such as cation-exchange capacity, soil biota, and structure. However, not all aspects of soil quality are captured by the SOM indicator. These include build-up of toxic substances, acidification and salinisation.	Mila i Canals et al. (2007c)

Trois méthodes retiennent ici particulièrement notre attention :

- L'indicateur NPP : cet indicateur a été utilisé pour évaluer la productivité des écosystèmes terrestres, et donc l'impact sur les ressources biotiques. Il évalue la capacité d'un sol à produire de la biomasse, et se base notamment sur l'utilisation d'un modèle global dynamique de végétation (Dynamic Global Vegetation Model, DGVM) [Haberl & al, 2007]. Son expression et sa définition est variable dans la littérature : elle peut ou non intégrer les effets de l'activité humaine, selon ce que l'on cherche à évaluer par cet indicateur (lorsqu'elle ne l'intègre pas, elle est généralement accompagnée de la grandeur HANPP, pour Human Appropriation of Net Primary Production, pourcentage de la NPP). Cet indicateur permet une bonne évaluation de la qualité des sols, mais peut amener à des résultats paradoxaux lorsque l'influence de l'homme est prise en compte (celle à la fois liée à la récolte et aux changements d'usage des sols) : on peut dans le cas de terres irriguées ou cultivées de façon intensive obtenir une production de biomasse plus élevée que dans le cas « naturel » (La valeur de HANPP devient ainsi négative).
- La méthode HAPECS : cet indicateur permet d'évaluer la quantité de carbone appropriée par l'homme, par évaluation de la teneur en carbone d'une biomasse cultivée et récoltée, auxquelles viennent s'ajouter les émissions de CO₂ liées à la culture, « prélevées » aux écosystèmes. Il constitue l'évaluation d'un impact sur la qualité des écosystèmes et sur la biodiversité, en considérant la quantité de carbone prélevé, et donc manquant pour le fonctionnement d'un écosystème.
- L'évaluation de la quantité de matière organique des sols (Soil Organic Matter, SOM). Cette caractéristique est généralement mesurée par une quantité de carbone (Soil Organic Carbon, SOC) [Fageria, 2012], et constitue un très bon indicateur de la qualité des sols [Brandao & Mila i Canals, 2013]. La matière carbonée joue en effet un rôle prépondérant pour assurer plusieurs de leurs qualités : physiques (texture, structure, masse, densité, rétention d'eau), chimique (disponibilité des nutriments, capacité d'échanges cationiques, gestion des polluants du sol) et biologique (minéralisation du nitrate, fixation des nutriments, biomasse microbienne), elle est ainsi un des éléments clés pour assurer la renouvelabilité des ressources biotiques végétales terrestres. Il permet par ailleurs de rendre compte de l'effet du mode d'exploitation de la biomasse sur la qualité des sols [Fageria, 2012]. Cet indicateur ne rend néanmoins pas compte d'autres impacts (érosion, salinisation). De plus, si l'évaluation de l'appauvrissement des sols en matière carbonée est possible, celle de seuils d'appauvrissement à ne pas dépasser pour assurer la pérennité d'une culture est plus complexe.

Il existe un consensus sur la nomenclature et le type de flux élémentaires concernant les sols dans les bases de données d'inventaire les plus courantes. Ces flux spécifiques aux sols incluent : le type d'usage (*forest, arable crop, urban land...*), le mode d'exploitation (*intensive vs extensive, irrigated vs non-irrigated...*), et la dynamique d'occupation et de changement d'usage. Sur cette base, la prise en compte des sols et de leurs usages en ACV peut se faire en première approche selon deux logiques, à considérer séparément.

La première consiste à les considérer comme une ressource en tant que telle, et donc à considérer des indicateurs de flux, agrégeant le type de sol considéré, la surface utilisée et la durée d'utilisation.

La deuxième implique de considérer les sols comme un support assurant d'autres services (biodiversité, traitement de la ressource en eau, séquestration de CO₂, production biotique...). La prise en compte des sols comme ressource n'est alors qu'un moyen d'évaluer la production d'autres ressources. L'évaluation des différentes caractéristiques des sols est aujourd'hui bien couverte par les méthodes disponibles. Certaines d'entre elles fournissent ainsi des informations sur leur qualité de

ressource « support », et peuvent être envisagée comme proxys pour l'évaluation de la renouvelabilité des ressources issues de leur exploitation (capacité de production biotique, notamment).

3.2.3 L'eau

3.2.3.1 Flux élémentaires

Le groupe de travail WULCA (Water Use in Life Cycle Assessment) issu de l'UNEP-SETAC travaille à l'élaboration d'un consensus autour de la question de la prise en compte de l'eau en ACV. Une revue des différentes approches existantes a ainsi dans un premier temps été menée [Kounina & al, 2013]. Ce travail se base sur l'analyse des relations de causes à effet existantes entre les inventaires et les zones de protection considérées en ACV (santé humaine, qualité des écosystèmes, ressources) et la façon dont ces aspects sont pris en compte à chacune des étapes de calcul des indicateurs. La chaîne de relation est présentée en Figure 12 : chaîne de causes à effets pour l'usage de l'eau [Kounina & al, 2013].

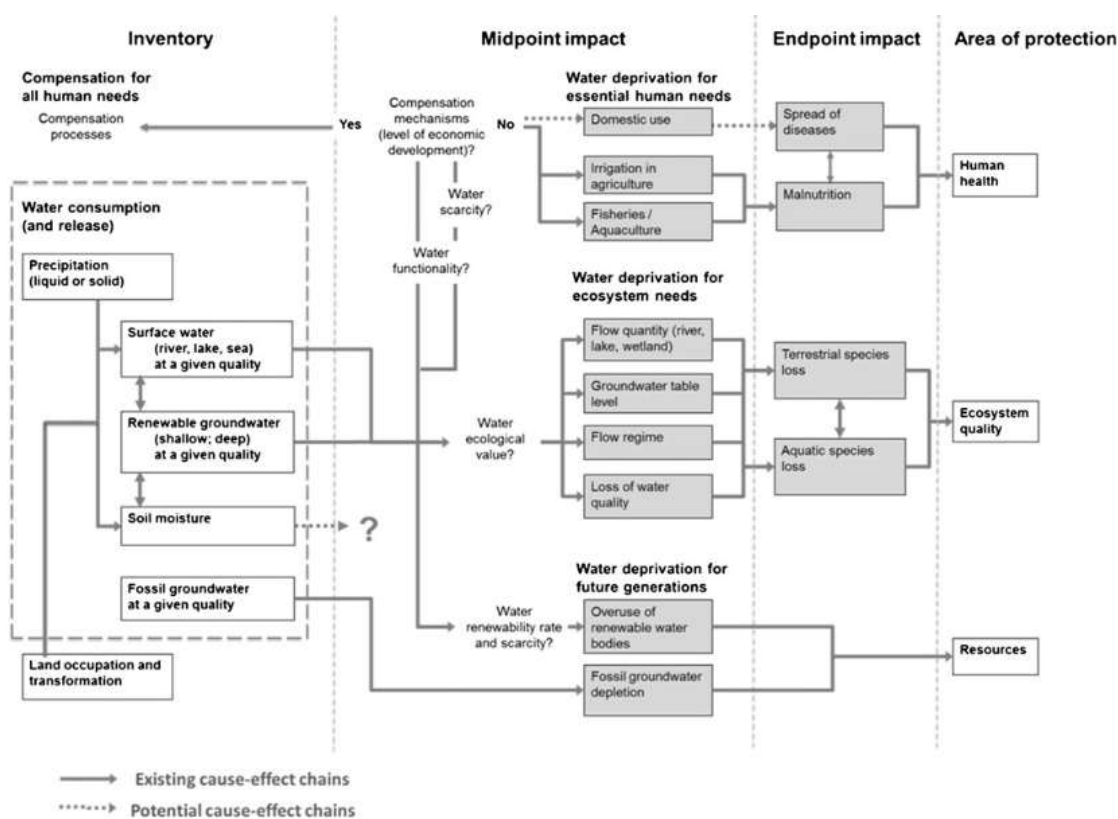


Fig. 1 Cause-effect chains leading from the inventory to the areas of protection of human health, ecosystem quality, and resources (adapted from Bayart et al. 2010)

Figure 12 : chaîne de causes à effets pour l'usage de l'eau [Kounina & al, 2013]

Cette étude aura permis de mettre en avant l'état de la prise en compte de la ressource eau en ACV, et d'émettre des recommandations. Retenons que le niveau de détail des flux élémentaires peut

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

varier. Le Tableau 8 donne un extrait de la liste des flux élémentaires spécifiques à l'eau dans la base ecoinvent.

Tableau 8 : illustration, les flux d'eau dans les inventaires de ecoinvent 3.5

Compartiment	Subcompartmen	Substance	/	CAS number
Brut		Water, cooling, drinking		007732-18-5
Brut		Water, cooling, salt, ocean		007732-18-5
Brut		Water, cooling, surface		007732-18-5
Brut		Water, cooling, unspecified natural origin/kg		007732-18-5
Brut		Water, cooling, unspecified natural origin/m3		007732-18-5
Brut		Water, cooling, well		007732-18-5
Brut		Water, fresh		007732-18-5
Brut		Water, lake		007732-18-5
Brut		Water, process and cooling, unspecified natural origin		007732-18-5
Brut		Water, process, drinking		007732-18-5
Brut		Water, process, salt, ocean		007732-18-5
Brut		Water, process, surface		007732-18-5
Brut		Water, process, unspecified natural origin/kg		007732-18-5
Brut		Water, process, unspecified natural origin/m3		007732-18-5
Brut		Water, process, well		007732-18-5
Brut		Water, river		007732-18-5
Brut		Water, salt, ocean		007732-18-5
Brut		Water, salt, sole		007732-18-5
Brut		Water, unspecified natural origin/kg		007732-18-5
Brut		Water, unspecified natural origin/m3		007732-18-5
Brut		Water, well		007732-18-5

On note que les flux élémentaires spécifiques à l'eau incluent généralement l'origine (*river, ocean...*) et le type d'usage (*process, cooling...*).

Les caractéristiques des sets de données de quatre bases sont analysées dans le tableau suivant.

Tableau 9: caractéristiques des sets de données de quatre bases de données

Caractéristiques des sets de données	Prise en compte des consommations d'eau	Prise en compte des rejets d'eau	Prise en compte de la qualité de l'eau dans les FE	Régionalisation pertinente du point de vue des cycles de l'eau
BDD				
ecoinvent	Permet de distinguer la source où est prélevée la ressource (eau de surface ou souterraine, notamment)	Ignoré	Non	Non
Gabi		Oui	Non	Oui, pour certains
Quantis		Oui	Non	Oui, pour certains
WFN	Ne considère que l'eau issue de précipitations stockée dans le sol et consommée par évapotranspiration des plantes et une catégorie regroupant les consommations d'eau de surface et d'eau souterraine.	Ignoré	Oui (« eau grise »)	Non

Plusieurs développements méthodologiques, liés notamment aux indicateurs développés sur la question de l'eau, ont permis d'améliorer la précision et la granularité des données d'inventaires. Le travail de Boulay et al [Boulay & al, 2011] par exemple permet, en se basant sur 137 paramètres, caractérisant l'origine et la qualité de la ressource, d'obtenir 11 flux d'inventaires entrants ou sortants.

3.2.3.2 *Panorama des méthodes d'impacts environnementaux*

Ainsi, l'eau est présente en tant que flux élémentaire dans les Inventaires de Cycle de Vie. En première approche, la prise en compte de son usage en ACV peut se faire par le calcul d'un indicateur de flux, agrégation des différents types d'eau prélevés dans l'environnement à considérer. Cette approche a par exemple été retenue en ACV bâtiment [AFNOR, 2014], pour notamment obtenir un indicateur permettant de rendre compte de la consommation d'eau impliquée par l'occupation du bâtiment, mais aussi celle liée aux autres éléments du cycle de vie (construction, démolition, entretien, fin de vie, production de l'énergie consommée dans le bâtiment...)

Cette méthode, strictement quantitative, se contente d'évaluer la quantité de ressource prélevée dans l'écosphère, et ne permet pas de tenir compte de la disponibilité de celle-ci, liée notamment à des caractéristiques hydrogéologiques, ainsi qu'aux mécanismes physiques qui assurent son renouvellement. On notera de plus que cette approche ne prend pas en compte l'influence de l'exploitation de l'eau sur sa qualité (perte de potabilité, pollution d'un gisement...).

Le travail du groupe WULCA a aussi porté sur les différentes méthodes de calcul d'indicateurs, en lien avec la problématique de l'eau [Kounina & al, 2013]. L'analyse recouvre les deux catégories d'indicateurs d'impacts considérées en ACV (midpoints et endpoints).

Les indicateurs midpoints proposés dans les méthodes existantes (exemple : consommation d'eau dans ReCiPe, déplétion de la ressource eau dans ILCD Midpoints) évaluent la rareté de la ressource consommée, en se basant sur des ratios prélèvement/disponibilité ou consommation/disponibilité (la consommation ne correspondant qu'à une fraction de ce qui est prélevé) pour le calcul des facteurs de caractérisation. La prise en compte de leurs limites a amené au développement de l'indicateur de criticité AWARE issu du groupe de travail WULCA.

La disponibilité est évaluée sur la base de modélisations de la ressource, qui intègrent des degrés de précision variés et la prise en compte des phénomènes physiques et hydrogéologiques pertinents.

La plupart des méthodes existantes tiennent compte de la dégradation en qualité de la ressource, en considérant que cette dégradation a une influence sur sa rareté, pour les usages anthropiques notamment. La plupart des méthodes permettent de plus de tenir compte des spécificités locales, en incluant des facteurs de caractérisation spécifiques à l'échelle nationale ou du bassin versant.

Par ailleurs, il existe des indicateurs midpoints qui portent sur un effet spécifique advenant dans le milieu (écotoxicité, eutrophisation), caractérisant ainsi la qualité de la ressource eau en tant que ressource support.

Les indicateurs endpoints s'intéressent classiquement à l'effet du prélèvement d'eau sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes et à la préservation des ressources.

En ce qui concerne la santé humaine, les méthodes existantes incluent l'influence du manque d'eau potable pour des usages hygiéniques et d'ingestion, les manques d'eau pour l'irrigation entraînant une malnutrition, ainsi que l'influence des manques de cette ressource sur l'aquaculture en eau douce et la pêche. Ces évaluations se basent sur des éléments hydrogéologiques et socioéconomiques.

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Les méthodes évaluant l'impact sur la qualité des écosystèmes couvrent, elles, la baisse de biodiversité terrestre liée à la consommation d'eau douce, la baisse de biodiversité aquatique liée à l'usage d'eau turbinée (pour la production d'électricité notamment), la disparition d'espèces végétales liée à l'usage des eaux souterraines, et enfin l'effet de la consommation d'eau douce sur les espèces de poissons d'eau douce. Ces méthodes ne se basent pas sur la même méthodologie que les indicateurs midpoints, et sont pour la plupart basées sur des observations empiriques ou des évaluations mécanistes du lien entre consommation d'eau douce et diversité des espèces (la baisse du niveau d'eau entraînant mécaniquement, selon cette approche, une baisse de la diversité des espèces).

En ce qui concerne la prise en compte de l'impact sur l'épuisement des ressources, les approches sont limitées, et évaluent soit l'impact sur la disponibilité future en eau douce, lié à la consommation d'eau au-delà de son taux de renouvelabilité (lié aux conditions climatiques, aux caractéristiques hydrogéologiques de la zone considérée...), soit le contenu exergétique de la ressource (indicateur considéré comme peu pertinent dans le cas des ressources non énergétiques).

[Berger & Finkbeiner, 2010], qui ont mené un travail d'analyse similaire, ont synthétisé les caractéristiques des différentes méthodes dans un tableau.

Tableau 10 : méthodes de mesure et d'évaluation de l'usage de l'eau en ACV [Berger et Finkbeiner, 2010]

Table 2. Scope of methods accounting and assessing water use in LCA.

Method	Type of water use		Type of water			Spatial differentiation	Quality differentiation	Impact assessment		ISO 14044 [22] compliance of comparative assertions disclosed to the public
	consumptive	degradative	green	blue	gray			Area of protection	Level in cause-effect-chain	
Water inventories [8,12-15]	off-stream	in-stream [12,13]	-	x	-	x	x	-	-	x
Virtual water [10], water footprint [11]	off-stream, in-stream	off-stream (gray water)	x	x	x	x	-	ecosystem (gray water)	midpoint (gray water)	x
EDIP resources [17]	off-stream	-	-	x	-	x	-	resources	midpoint	x
Exergy [18,19]	off-stream	in-stream (barrage water)	-	x	-	-	-	resources	midpoint	x
Ecological scarcity method [21]	off-stream	-	-	x	-	x	-	resources	midpoint	-
Brent [24]	off-stream	off-stream	-	x	-	x	-	ecosystem	midpoint	-
Mila i Canals et al. [25]	off-stream, in-stream	-	x	x	-	x	-	resources & ecosystem	midpoint	x
Bayart et al. [28]	off-stream	-	-	x	-	x	x	human health	midpoint	x
Motoshita et al. [29] (malnutrition)	off-stream	-	-	x	-	x	-	human health	endpoint	x
Motoshita et al. [32] (infectious diseases)	off-stream	-	-	x	-	x	-	human health	endpoint	x
van Zelm et al. [33]	off-stream	-	-	x	-	x	-	ecosystem	endpoint	x
Maendly and Humbert [36]	-	in-stream (barrage water)	-	x	-	x	-	ecosystem	endpoint	x
Pfister et al. [38]	off-stream	-	-	x	-	x	-	resources, ecosystem, human health	midpoint, endpoint	x (only midpoint and non-aggregated endpoint results)

3.2.3.3 Développements récents d'une méthode d'empreinte eau

Le groupe de travail WULCA a par la suite poursuivi la démarche et cherché à élaborer un modèle consensuel pour l'évaluation d'une empreinte eau et de sa rareté. Le modèle AWARE (Available Water Remaining) [Boulay et al., 2018], compatible avec la norme ISO portant sur la notion d'empreinte eau [ISO, 2014], fournit des facteurs de caractérisation évaluant la quantité d'eau disponible une fois les besoins humains et des écosystèmes satisfaits.

L'indicateur proposé se base sur l'évaluation de la différence entre la disponibilité de la ressource et la demande « de fond ». Pour un bassin versant donné i , on évalue ainsi la grandeur AMD_i , évaluant l'écart entre la quantité de ressource totale (availability), les besoins anthropiques actuels (Human

Water Consumption, HWC, comprenant les consommations domestiques, industrielles, agricoles, d'élevage et pour la production d'énergie) et les besoins des écosystèmes (EWR, Environmental Water Requirement), ramenée à la surface du bassin.

$$AMD_i = \frac{(Availability - HWC - EWR)}{Area}$$

Où *HWC* (Human Water Consumption) correspond aux besoins anthropiques de fond, *EWR* (Environmental Water Requirement) aux besoins des écosystèmes.

Plus AMD_i est grand, plus l'eau est abondante dans le bassin versant considéré.

En divisant la valeur de AMD_i par la moyenne mondiale des AMD_i (pondérée par la consommation), on obtient des facteurs de caractérisation adimensionnels, appliquées à des flux de prélèvement en eau (m3 ou l). L'indicateur est ainsi exprimé dans la même unité que les flux considérés.

$$CF_{AWARE} = \frac{AMD_{world\ average}}{AMD_i}$$

Dans les cas limites des valeurs seuils conventionnelles ont été considérées pour le facteur de caractérisation :

- Si $AMD_i < 0,01 * AMD_{world\ average}$ ou si la demande est supérieure à la disponibilité ($AMD_i < 0$)

$$CF_{AWARE} = 100$$

- Si $AMD_i > 10 * AMD_{world\ average}$

$$CF_{AWARE} = 0,1$$

Les données concernant la disponibilité en eau (ne tenant ici pas compte de la notion de dégradation de la ressource) et la demande anthropique (HWC) sont issues du modèle WaterGAP [Alcamo & al, 2003]. Les besoins des écosystèmes (EWR) sont issus d'un modèle développé par Pastor & al [Pastor & al, 2014], qui évalue la quantité minimale d'eau nécessaire, fraction du flux disponible, pour maintenir l'écosystème dans des conditions acceptables.

Cette approche a ici un intérêt tout particulier, dans le cadre d'une évaluation plus large des impacts sur les ressources renouvelables. Elle intègre en effet à la fois la notion de maintien de la qualité des écosystèmes, la prise en compte des besoins anthropiques « de fond », et le renouvellement naturel de la ressource.

Elle est par ailleurs opérationnelle (implémentée notamment sous Simapro), et utilise des flux élémentaires régionalisés disponibles (dans ecoinvent notamment).

Les développements récents (2017) menés en ACV sur la prise en compte de la ressource eau permettent de relever la plupart des aspects nécessaires à une bonne évaluation de la renouvelabilité. Un indicateur de criticité est développé. Il considère la disponibilité de la ressource, d'un point de vue hydrogéologique (et donc de façon différenciée selon la localisation considérée), et prend aussi en compte les besoins des écosystèmes et les besoins « de fond » générés par les activités humaines.

L'utilisation d'indicateurs de criticité pour cette ressource doit néanmoins, pour permettre une couverture de tous les aspects conditionnant le renouvellement de celle-ci, s'accompagner d'évaluations portant plus particulièrement sur la dégradation de la qualité de la ressource, qui peut être rendue impropre à certains usages, ou impliquer une pollution de l'écosphère.

3.2.4 Les ressources énergétiques

La base de données ecoinvent inclut plusieurs flux énergétiques renouvelables, correspondant à la définition donnée précédemment.

Tableau 11 : illustration, flux d'énergie renouvelable dans les inventaires d'ecoinvent 3.5

Compartment	Subcompartment	Substance	CAS number
Brut		Biomass, feedstock	
Brut		Energy, from biomass	
Brut		Energy, from wood	
Brut		Energy, gross calorific value, in biomass	
Brut		Energy, geothermal	
Brut		Energy, geothermal, converted	
Brut		Energy, kinetic (in wind), converted	
Brut		Energy, solar, converted	
Brut		Energy, from hydro power	
Brut		Energy, from hydrogen	
Brut		Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	
Brut		Water, barrage	007732-18-5

Les flux énergétiques considérés, bien que couvrant toutes les ressources renouvelables énergétiques considérées précédemment, restent définis de façon grossière. Ainsi la qualité de l'exploitation de la ressource ainsi que le mode d'exploitation ne sont pas détaillés, et les différentes options technologiques ne sont pas traitées séparément.

La prise en compte des ressources énergétiques en ACV se base en général sur l'approche de la Demande Cumulative d'Energie (Cumulative Energie Demand, CED [Frischknecht & al, 2007]), qui évalue en énergie primaire la consommation d'énergie du système étudié sur son cycle de vie. Cette méthode regroupe tous les vecteurs énergétiques considérés en ACV, et ne différencie pas les sources renouvelables des sources non-renouvelables. Il existe par ailleurs plusieurs modes de calcul de l'indicateur (qui ne quantifie pas un impact, mais relève des indicateurs de flux).

Frischknecht & al [Frischknecht & al, 2015] ont ainsi mené une étude comparative portant sur cinq différentes méthodologies existantes pour la prise en compte des différents vecteurs énergétiques considérés pour cet indicateur (avec différentes conventions de prise en compte de l'efficacité des infrastructures de production/transformation/distribution d'énergie).

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Tableau 12 : facteurs de caractérisation correspondant à cinq approches de calcul de l'indicateur CED [Frischknecht & al, 2015]

Energy sources from database ecoinvent v2.2+	Unit	CED standard	CED energy statistics	CED uranium low	CED uranium high	CED VDI 4600
Non-renewable, fossil						
Coal, brown	MJ/kg	9.90E+00	8.10E+00	9.90E+00	9.90E+00	8.10E+00
Coal, hard	MJ/kg	1.91E+01	1.84E+01	1.91E+01	1.91E+01	1.84E+01
Gas, mine, off-gas, process, coal mining/kg	MJ/kg	4.98E+01	4.53E+01	4.98E+01	4.98E+01	4.53E+01
Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m ³	MJ/m ³	3.98E+01	3.62E+01	3.98E+01	3.98E+01	3.62E+01
Gas, natural/m ³	MJ/m ³	3.83E+01	3.48E+01	3.83E+01	3.83E+01	3.48E+01
Gas, off-gas, oil production, in ground	MJ/m ³	3.98E+01	3.62E+01	3.98E+01	3.98E+01	3.62E+01
Oil, crude	MJ/kg	4.58E+01	4.32E+01	4.58E+01	4.58E+01	4.32E+01
Non-renewable, nuclear						
Uranium	MJ/kg	5.60E+05	4.70E+05	1.80E+05	7.72E+05	5.60E+05
Non-renewable, biomass						
Wood, primary forest, standing	MJ/m ³	1.08E+04	4.32E+03	1.08E+04	1.08E+04	4.32E+03
Renewable, biomass						
Wood, hardwood, standing	MJ/m ³	1.28E+04	5.12E+03	1.28E+04	1.28E+04	5.12E+03
Renewable, wind, solar, geothermal						
Energy, geothermal, converted	MJ/MJ	1.00E+00	7.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
Energy, kinetic (in wind), converted	MJ/MJ	1.00E+00	9.30E-01	9.30E-01	1.00E+00	3.72E+00
Energy, solar, converted	MJ/MJ	1.00E+00	9.35E-01	9.35E-01	1.00E+00	6.01E+00
Renewable, water						
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ/MJ	1.00E+00	9.50E-01	9.50E-01	1.00E+00	1.19E+00

On constate ainsi que la prise en compte des sources renouvelables d'énergie dans le calcul peut obéir à des conventions et modes de calculs variés. Par ailleurs les facteurs de caractérisation obtenus portent sur l'efficacité énergétique liée à l'exploitation de la ressource, et ne permettent pas ici la prise en compte de la renouvelabilité des ressources qui le sont.

On retrouve une méthode de calcul approchante dans la norme NF EN 15804 portant sur les déclarations environnementales des produits de construction [AFNOR, 2014]. Les indicateurs retenus dans cette norme, portant sur la consommation de ressources, considèrent notamment les ressources énergétiques renouvelables de façon séparées. Leur usage est par ailleurs décliné en deux types : un usage énergétique et un usage matière première.

Tableau 13 : prise en compte de l'usage des ressources dans la norme NF EN 15804 portant sur les déclarations environnementales des produits de construction [AFNOR, 2014]

Parameter	Unit(expressed per functional unit or per declared unit)
Use of renewable primary energy excluding renewable primary energy resources used as raw materials	MJ, net calorific value
Use of renewable primary energy resources used as raw materials	MJ, net calorific value
Total use of renewable primary energy resources (primary energy and primary energy resources used as raw materials)	MJ, net calorific value
Use of non renewable primary energy excluding non renewable primary energy resources used as raw materials	MJ, net calorific value
Use of non renewable primary energy resources used as raw materials	MJ, net calorific value
Total use of non renewable primary energy resources (primary energy and primary energy resources used as raw materials)	MJ, net calorific value
Use of secondary material	kg
Use of renewable secondary fuels	MJ, net calorific value
Use of non renewable secondary fuels	MJ, net calorific value
Net use of fresh water	m ³

La norme permet donc la prise en compte de façon séparée de la consommation de ressources énergétiques renouvelables. Néanmoins cette prise en compte se fait de façon purement quantitative,

et encore une fois sur la base de l'efficacité énergétique de la ressource. Il n'y a là encore pas d'éléments permettant de juger de la renouvelabilité d'une ressource, de tenir compte de son épuisement potentiel, et de l'évaluer.

Les ressources énergétiques sont considérées en ACV de façon spécifique. La ressource, au sens strict, étant l'énergie, la différenciation s'effectue sur la nature de la source. Il n'existe en effet pas de différence physique entre un MJ issu du soleil et un MJ issu du pétrole. Cette différenciation reste néanmoins pertinente, puisqu'elle permet de tenir compte des caractéristiques du vecteur énergétique.

Ainsi si la plupart des sources énergétiques considérées comme renouvelables peuvent en fait être considérées comme non épuisables et donc instantanément renouvelées (énergie solaire, éolienne, géothermique, hydraulique), leur exploitation implique des impacts variables sur l'écosphère. Par ailleurs la biomasse, considérée comme une ressource énergétique, voit sa renouvelabilité dépendre des critères appliqués aux ressources biotiques.

L'évaluation de la renouvelabilité de ce type de ressource implique donc, hormis dans le cas de la biomasse, un angle d'analyse particulier. Elle ne correspond ainsi pas à la prise en compte d'un niveau d'exploitation mettant en péril la disponibilité de la ressource, ni à celle d'une dynamique de renouvellement. Elle peut en revanche intégrer la notion de disponibilité, et de mode d'exploitation.

Les indicateurs existants, par l'utilisation de facteurs de conversion en énergie primaire, fournissent une information de cet ordre. Mais ils ne permettent pas une évaluation relevant de la criticité de la ressource. Celle-ci relèvera ainsi, dans le cas des ressources en flux, d'aspects liés aux impacts des modes d'exploitation.

3.2.5 Les écosystèmes et les services écosystémiques

Il existe aujourd'hui peu de méthodes en ACV concernant la prise en compte des écosystèmes et des services écosystémiques comme ressource. [Zhang & al, 2010 I] constatent en effet que seuls quelques travaux, portant notamment sur les biocarburants, se sont intéressés de façon plus poussée à cet aspect. Si la qualité des écosystèmes constitue une des catégories considérées par les indicateurs endpoint, ces derniers ne rendent en général pas compte d'aspects liés au fait que les écosystèmes constituent une ressource, valorisée au sein de l'écosphère.

Les travaux portés par l'ILCD (International Life Cycle Database) [ILCD, 2010] indiquent les indicateurs et méthodes existant, portant sur les écosystèmes :

Indicateurs midpoint :

- CML 2002 (kg 1,4-DCB-eq)
- Eco Indicator 99 (m2.yr)
- EDIP 2003 (volumes critiques)
- Impact 2002+ (kg triethylene glycol eq. into water / soil)
- LUCAS (kg triethylene glycol-eq. into water/kg emitted)
- ReCiPe (1,4-DCB to water or soil/kg emission. Categories are freshwater, marine water and soil ecosystems)
- TRACI (2,4-dichlorophenoxyacetic acid/ kg emission)

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Indicateurs endpoint :

- Eco Indicator 99 (PDF-m2-yr)
- Impact 2002+ (4 midpoint categories contribute to natural environment: PDF-m2-year; 1 PDF*m2-year = 1/2 PAF-m3-year/mean depth)
- ReCiPe (5 midpoint categories contribute to natural environment: PDF-m2-year or Number of Disappeared Species*yr)

Ces indicateurs, s'ils donnent une information pertinente sur l'impact du système étudié sur les écosystèmes, ne permettent pas d'évaluer l'influence dudit système sur le caractère renouvelable de ces écosystèmes considérés comme des ressources. Ils ne rendent par ailleurs pas compte de façon claire de la dégradation fonctionnelle de ceux-ci (la disparition d'une espèce, si elle est dommageable en tant que telle, peut aussi impliquer la mise en danger de l'équilibre de l'écosystème tout entier).

La deuxième partie des travaux de Zhang et al [Zhang & al, 2010 II] porte sur le développement d'une méthodologie ACV intégrant de façon plus poussée les services écosystémiques comme flux entrants du système étudié.

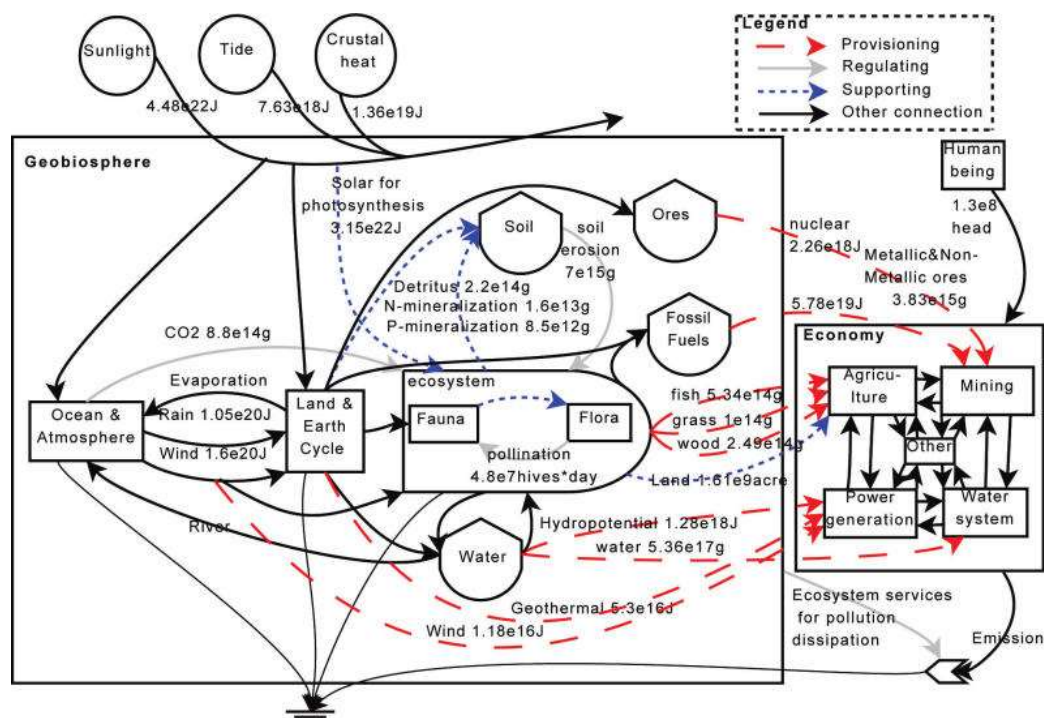


Figure 13 : flux de services écosystémiques vers l'économie américaine, 1997, base de la méthode d'EcoLCA [Zhang & al, 2010 II]

Si cette démarche relève plus des aspects méthodologiques de l'ACV, elle ouvre néanmoins la porte à l'intégration des écosystèmes comme ressource. Le développement, dans ces travaux, d'un indicateur appelé « Renewability Index », rapport entre la quantité de ressources renouvelables consommées et la quantité totale de ressources consommées, constitue une piste pour la prise en compte spécifique des ressources renouvelables en ACV.

Enfin la prise en compte de l'usage des sols implique souvent le calcul d'indicateurs d'impacts relevant des écosystèmes terrestres, considérant que la transformation ou l'occupation sont vecteurs de modifications des équilibres écosystémiques concernés.

Les écosystèmes et les services écosystémiques ne sont aujourd'hui généralement pas considérés comme une ressource en ACV. Ils constituent néanmoins la base de la plupart des flux entrants dans le système à l'étude. S'il semble complexe de les considérer comme une ressource en tant que telle, et d'élaborer une méthodologie permettant d'évaluer l'impact de leur « consommation » de façon cohérente et tenant compte de la variété de leurs caractéristiques, celles-ci pourront néanmoins permettre de préciser, dans le cas des ressources biotiques, les notions de capacité de charge, de capital naturel, et donc les éléments d'évaluation de la renouvelabilité de ces ressources.

3.3 Premiers enseignements

L'analyse de l'état de l'art portant sur les méthodes d'évaluation d'indicateurs d'impacts nous apporte de premiers enseignements. Comme mis en évidence dans le tableau présenté en Annexe 2, qui synthétise les méthodes concernant les ressources renouvelables ayant été identifiées, cinq types d'approches peuvent être considérés :

- Des indicateurs exprimant une quantité consommée
- Des indicateurs rendant compte d'une dégradation de la qualité de la ressource
- Des indicateurs concernant l'impact de la raréfaction et de la dégradation de la ressource sur la santé humaine
- Des indicateurs évaluant la volonté de payer (WTP, WillingnessTo Pay), et donc l'évaluation du coût pour l'évitement d'un impact
- Des indicateurs évaluant une durée pour le renouvellement
- Des indicateurs évaluant un épuisement des ressources renouvelables
- Un indicateur évaluant la criticité de la ressource

Trois de ces types d'indicateurs nous semblent ici particulièrement intéressants : ceux ayant trait à la qualité de la ressource, ceux portant sur l'épuisement des ressources renouvelables, et l'indicateur de criticité d'une ressource.

3.3.1 Les indicateurs de dégradation de la qualité d'une ressource

Ces indicateurs permettent d'évaluer la perte de qualité de la ressource considérée, et d'éventuellement évaluer l'influence de cette perte de qualité sur ses fonctions. Ils n'intègrent néanmoins que très rarement d'informations allant jusqu'à la prise en compte de la renouvelabilité : la réversibilité de l'impact n'est en général pas intégrée, l'effet de la perte de qualité de la fonction sur le renouvellement n'est souvent pas intégré à l'analyse.

Certaines des fonctions évaluées peuvent par ailleurs concerner, en plus de la qualité de la ressource considérée, une autre ressource. Ainsi la capacité des sols à réguler les écoulements d'eau ou à la purifier, fonctions des sols et marqueurs de leur qualité, traduisent en première approche un effet qui semble plus porter sur la renouvelabilité de l'eau que sur celle de la ressource sol. La vision utilitariste sous-tendue par ce type d'indicateurs ne rend compte que de façon marginale de la dégradation de la ressource, en ne rendant pas compte de l'évolution des caractéristiques intrinsèques de celles-ci.

Enfin, notons que dans la plupart des cas, ces méthodes de calcul d'indicateurs considèrent la ressource comme une aire de protection environnementale : on ne cherche ainsi pas à évaluer leur renouvelabilité au sens strict, mais plutôt à évaluer leur dégradation liée au système étudié.

Ils restent néanmoins porteurs d'informations fondamentales dans l'élaboration d'une démarche d'évaluation de la renouvelabilité. Leur prise en compte permet en effet d'intégrer des informations qualitatives concernant les ressources « support » (sols, eau, écosystèmes), qui pourront avoir une influence notable sur les caractéristiques de croissance, renouvellement et épuisement des ressources renouvelables que nous considérons ici. Certaines des caractéristiques évaluées peuvent aussi constituer un proxy pertinent rendant compte du lien existant entre ressource « support » et ressource dite secondaire : la capacité de production biotique des sols est ainsi une information pertinente dans l'évaluation de la renouvelabilité d'une ressource biotique végétale terrestre.

3.3.2 Des indicateurs portant sur l'épuisement des ressources renouvelables

Ces indicateurs sont particulièrement intéressants dans notre cas, puisqu'ils se basent sur les caractéristiques de renouvellement d'une ressource pour évaluer son épuisement, en fonction de son intensité d'exploitation.

Ces indicateurs, issus principalement du domaine halieutique, se basent pour la plupart sur des modèles simplifiés de dynamique des populations, et intègrent différentes grandeurs caractéristiques des espèces considérées, comme notamment leur capacité de charge et le taux de renouvellement dont l'estimation présente de nombreuses limites (absence de prise en compte des relations entre les espèces, de la structure d'une population, population supposée à l'équilibre). La démarche peut potentiellement être étendue aux ressources biotiques animales terrestres, voir aux ressources végétales, comme relevé dans Hélias & al. Cela étant dit, on note que ces indicateurs sont, pour l'instant, limités aux ressources potentiellement renouvelables « naturelles » (i.e. issue de l'écosphère, par exemple les animaux et plantes sauvages).

Ces indicateurs pourront potentiellement servir de base à l'évaluation d'un indicateur portant sur la renouvelabilité d'un capital. Le rendement maximal soutenable (MSY) pourrait ainsi servir de base pour évaluer une quantité de ressource à préserver (dont l'exploitation remet en cause la renouvelabilité), qui se rapproche de la notion de besoins des écosystèmes lors d'une approche mono espèce.

3.3.3 L'indicateurs de criticité

L'indicateur de criticité présente un intérêt tout particulier pour notre étude. Il permet en effet d'évaluer la disponibilité d'une ressource, en fonction de la quantité théorique disponible, mais aussi des conditions de pressions anthropiques actuelles et de besoins liés à l'écosphère. Ainsi seule une fraction de la ressource est considérée comme pouvant être exploitée.

La méthode AWARE, présentée ici, tient compte des besoins en eau des écosystèmes. La criticité des ressources « support » est ainsi liée aux besoins des ressources « produites ». Le calcul pourra donc devoir être adapté selon le type de ressource considéré (ressource « support », ressource « produite » naturelle, ressource « produite » par l'homme).

Cette approche permet d'introduire dans l'évaluation une notion de seuil de renouvelabilité : si l'effet des besoins anthropiques « de fond » dépasse la différence entre quantité totale et quantité prélevée par les écosystèmes, on pourra considérer que ces derniers sont impactés : la renouvelabilité du recours à la ressource n'est plus assurée. L'indicateur est ainsi un marqueur du contexte dans lequel une ressource est exploitée par le système étudié.

Le calcul de ce genre d'indicateurs dépend de l'existence et de la disponibilité des données nécessaires : si la quantité de ressource totale et le prélèvement anthropique de celle-ci peuvent souvent être assez aisément évalués, les besoins des écosystèmes relèvent en général d'évaluations simplificatrices, dont la pertinence peut parfois être remise en cause.

L'enjeu dans le cas des ressources renouvelables relèvera aussi de la prise en compte de l'intervention humaine potentielle pour la production de la ressource : c'est le cas notamment de celles issues de la simili-écosphère. Ainsi la quantité totale de ressource existante ne relève pas dans ce cas d'un état « naturel » sur lequel l'homme exerce une pression : elle est issue de la mise en œuvre de process ayant leur propre influence sur l'environnement, amenant à une « amélioration » de la disponibilité de la ressource, mais au prix de nouveaux impacts. Les approches de criticité peuvent ainsi dans ce cas devoir être adaptées.

L'évaluation de la criticité est généralement appliquée de façon purement quantitative (dans le cas de l'eau, l'impact de la baisse de qualité de l'eau n'est pas intégré dans l'indicateur afin d'éviter le double comptage lors du calcul d'autres indicateurs prenant en compte cet aspect), et ne considère pas une quantité de ressources rendue impropre à l'exploitation, que l'on pourrait considérer comme n'étant plus disponible. Elle doit donc, pour permettre une évaluation complète de la renouvelabilité, être accompagnée d'indicateurs d'évaluation qualitative.

4 VERS UNE METHODE D'ACV POUR LA PRISE EN COMPTE DES RESSOURCES RENOUVELABLES EN ACV

Nous proposons ainsi, en cohérence avec le cadre méthodologique proposé pour évaluer un indicateur de rareté de la ressource eau par le groupe de travail WULCA, le développement d'indicateurs et de principes méthodologiques pour l'ACV permettant une évaluation de la renouvelabilité du recours à une ressource renouvelable, pour chaque type de ressource considéré, dans le but de mettre en place un cadre cohérent sur cette question.

L'élaboration de ces indicateurs devra tenir compte des spécificités de chacune des ressources considérées. Ainsi les ressources biotiques végétales et leur dynamique d'évolution n'obéiront pas aux mêmes règles que dans le cas des ressources animales. Par ailleurs, ces dynamiques seront encore à différencier selon que les ressources soient issues de l'écosphère ou de la simili-écosphère : l'intervention humaine modifie la prise en compte de la notion de disponibilité.

De la même manière, l'évaluation devra se faire de façon différenciée selon que l'on considère une ressource « produite » ou une ressource « support ». La notion de criticité et de consommation non anthropique s'appréhende ainsi différemment : dans le cas des ressources supports, la ressource est consommée pour la production et le maintien des ressources « produites ». En revanche la renouvelabilité d'une ressource produite n'est pas associée à sa propre criticité, mais à celle de la ressource « support » à sa production, et plus particulièrement à la grandeur caractérisant la fonction de la ressource support servant la production de la ressource « produite ».

Comme pour toute autre méthode, l'évaluation d'un indicateur de renouvelabilité est fortement dépendante de la disponibilité des flux d'inventaires existants. Les travaux de Crenna & al ainsi que de Helias & al reposent à chaque fois sur l'élaboration ou la prise en compte d'un listing de flux d'inventaires non pris en compte dans les bases de données disponibles actuellement. L'opérationnalité des méthodes est ainsi limitée.

Nous proposons les bases méthodologiques pour le calcul d'un jeu d'indicateurs portant sur l'ensemble des ressources considérées comme renouvelables dans cette étude. L'objectif est ici de permettre l'évaluation de la perte potentielle de renouvelabilité liée à l'exploitation de ce type de ressource, en fonction de l'état actuel de disponibilité de celle-ci. Nous choisissons ainsi d'évaluer un indicateur de criticité, en lien avec leurs caractéristiques intrinsèques respectives.

La démarche est simplifiée : lorsque possible, nous cherchons à tirer parti des flux d'inventaires existant, qui peuvent constituer un proxy permettant de tenir compte de certaines propriétés des ressources. Une approche plus précise, nécessitant la prise en compte de flux spécifiques et donc l'analyse et la modélisation de leurs caractéristiques, pourra constituer une deuxième étape de développement.

La méthode porte principalement sur des ressources dites « secondaires », ou « produites ». Issues de transformations anthropiques ou naturelles, leur dynamique d'évolution repose fortement sur la disponibilité et la qualité des ressources « support ». L'intégration de cet aspect dans la méthode, et l'évaluation de la renouvelabilité des ressources support par un jeu d'indicateurs de criticité pourra faire l'objet de développements ultérieurs.

4.1 Les ressources biotiques

Les ressources biotiques, dont l'existence et la dynamique reposent fortement sur les ressources support (sols, eau et écosystèmes, notamment) dont elles sont issues, constituent une catégorie pouvant apparaître disparate : une ressource de même nature peut ainsi être issue directement de l'écosphère ou d'un processus de production (culture, élevage) anthropique. L'introduction de la notion de simili-écosphère pourra permettre d'éclaircir la frontière entre ces deux sous catégories en distinguant notamment les ressources biotiques naturelles (issues de l'écosphère) des ressources biotiques anthropiques (issues de la simili écosphère). Les grandeurs à évaluer pour l'élaboration d'un indicateur de criticité seront ainsi adaptées pour tenir compte de l'intervention humaine dans le calcul de l'impact.

4.1.1 Les ressources biotiques naturelles

Nous nous intéresserons dans un premier temps aux ressources biotiques naturelles, ou Naturally Occurring Biotic resources (NOBr), comme considéré dans Crenna & al. Ces ressources ne résultent pas d'une culture, et sont directement prélevées dans leurs écosystèmes.

L'évaluation de chacune des grandeurs nécessaires pour le calcul d'un indicateur de criticité (disponibilité, prélèvements anthropiques et besoins des écosystèmes ou de la population considérée) dépend du type de ressource considéré : animale ou végétale, terrestre ou aquatique. Nous proposerons ici, pour chacun des cas de figure, une grandeur issue de la littérature, permettant à minima d'obtenir un proxy pour chacun de ces aspects.

4.1.1.1 Proposition de méthode pour le calcul d'un indicateur de criticité

L'exploitation des ressources biotiques naturelles consiste en un prélèvement dans un capital, dont l'importance peut varier, en fonction des caractéristiques intrinsèques de la ressource, des conditions dans lesquelles elle évolue et se développe et de l'intensité du prélèvement. L'évaluation de la renouvelabilité de la ressource, et d'un indicateur de criticité, peut ainsi se faire sur la base des quantités liées aux caractéristiques de la ressource, et à ses modes d'évolution. On considèrera ainsi la quantité pouvant être exploitée sans mettre à mal la renouvelabilité de celle-ci, et la quantité effectivement prélevée.

Nous proposons ici, en première approche, de baser le calcul de l'indicateur sur la notion de Maximum Sustainable Yield (MSY), exprimé en nombre d'individus ou en masse (nous choisirons ici la tonne comme unité). Cette grandeur, bien que présentant plusieurs limites (cf 3.2.1.4), permet en effet de combiner la notion de disponibilité de la ressource et celle de quantité de ressource à préserver pour assurer son renouvellement (que l'on assimilera ici à un « besoin » de l'écosphère). En considérant le calcul de ces grandeurs sur une zone considérée comme pertinente pour l'espèce étudiée (qui sera notamment fonction des caractéristiques de l'espèce, ainsi que de l'écosystème dans lequel elle évolue et de données climatiques), on peut considérer que

$$B_i = MSY_i + MSB_i$$

Où B_i est la quantité totale de biomasse pour l'espèce i (dans la zone considérée), MSY_i le rendement soutenable maximal associé, et MSB_i (pour Minimum Sustainable Biomass) la quantité minimale de biomasse à préserver pour assurer la renouvelabilité. Par conséquent, en considérant un indicateur de criticité de la forme :

$$AMD_i = \frac{(B_i - C_i - MSB_i)}{S_i}$$

Avec : C_i le prélèvement actuel pour l'espèce i

On constate que l'expression se simplifie en :

$$AMD_i = \frac{(MSY_i - C_i)}{S_i}$$

MSY_i rendement maximum soutenable pour l'espèce i , C_i le prélèvement actuel pour l'espèce i , S_i la surface de la zone considérée pour l'espèce i , $\overline{AMD}_i$ la moyenne mondiale pondérée par les prélèvements concernant l'espèce i .

En considérant que

$$CF_{ABRRE} = \frac{\overline{AMD}_i}{AMD_i}$$

L'évaluation de l'indicateur se fait alors selon la formule suivante :

$$NOBR \text{ scarcity index} = H * CF_{ABRRE}$$

$NOBR$: Naturally Occuring Biotic Ressources, $ABRRE$: Available Biotic Ressource Remaining, H (*Harvest*) représentant la quantité de biomasse prélevée (en tonnes).

4.1.1.2 Données disponibles

Le calcul effectif de cet indicateur est ainsi dépendant d'un nombre limité de données.

Le rendement maximum soutenable (MSY) est une grandeur déterminée en fonction des caractéristiques de la ressource considérée, et de son milieu d'évolution. Issu de modèle de dynamique de la population dans le cas animal, il est directement lié à la capacité de charge du milieu où cette population évolue, et du taux de renouvellement de la population.

La valeur de MSY est ainsi calculée comme, pour une espèce i donnée

$$MSY_i = \frac{r_i K_i}{4}$$

r_i étant le taux de croissance intrinsèque de l'espèce considérée, K_i la capacité de charge de l'espèce dans son habitat (population maximale que l'habitat peut supporter).

Dans le cas végétal, cette grandeur peut être approximée par le temps de rotation de l'espèce, basée là encore sur le taux de renouvellement de celle-ci.

L'évaluation du MSY dans le cas animal soulève certaines difficultés : la capacité de charge est en effet dépendante du milieu considéré, et donc de ses caractéristiques et localisations. Ses caractéristiques peuvent par ailleurs être affectées par une pression anthropique, liée à l'exploitation de la ressource considérée ou issue d'un autre mécanisme (changement climatique, pollution du milieu, appauvrissement...). Dans le cas végétal, les caractéristiques des sols (ou des eaux, dans le cas des

ressources aquatiques) et du climat sont à prendre en compte. La détermination de ces grandeurs se fera donc nécessairement de façon régionalisée.

Il existe aujourd'hui plusieurs bases de données, fournissant directement les grandeurs nécessaires, ou des grandeurs permettant d'évaluer celles-ci. Citons notamment :

- Les bases de données de la FAO (Food and Agriculture Organization) (<http://www.fao.org/faostat/en/>)
- La RAM legacy stock assesment database, portant plus spécifiquement sur la ressource halieutique (<https://www.ramlegacy.org/>)

Par ailleurs la littérature scientifique spécialisée pour chaque type de ressource peut permettre d'obtenir des valeurs de référence exploitables pour caractériser les ressources et leur milieu.

4.1.1.3 Intérêt et limites

Cette méthodologie de calcul d'un indicateur de rareté d'une ressource biotique naturelles se base sur un nombre limité de données, disponibles ou pouvant être évaluées pour l'ensemble des ressources considérées.

L'évaluation du MSY tient potentiellement compte des aspects de pression anthropique sur l'habitat de l'espèce considérée : la capacité de charge de la population est en effet dépendant des caractéristiques de celui-ci (disponibilité des nutriments, qualité de l'écosystème...), qui peuvent être impactées à la fois par l'exploitation de la ressource et par les effets indirects des autres pressions de l'homme sur l'environnement.

Néanmoins l'utilisation de cette grandeur présente certaines limites. Elle est ainsi généralement évaluée en considérant un état d'équilibre pour la population, alors que cette dernière est soumise à variations constante (naturelle ou non), qu'il soit question de sa taille ou de sa structure (âge des individus notamment). Par ailleurs, les modèles permettant la détermination de cette grandeur sont mono-espèce : ils n'intègrent ainsi pas les interactions pouvant exister dans un écosystème, ni l'impact de l'exploitation de la ressource considérée sur celui-ci.

Enfin, comme identifié précédemment, les bases de données d'ACV n'intègrent pour la plupart pas de flux élémentaires correspondant aux ressources biotiques pouvant être concernées par cette méthode, ce qui limite en l'état l'opérationnalité de l'approche à des études spécifiques, ou nécessite le développement et l'intégration d'inventaires plus riches et de facteurs de caractérisation associés à leur nouvelle structure.

4.1.1.4 Développements nécessaires

La mise en place de cette méthode de calcul de l'indicateur nécessite plusieurs étapes de développement, notamment pour l'exploitation des données disponibles et le calcul des valeurs considérées. Il faudra notamment :

- Compiler les données disponibles sur le MSY et le prélèvement des ressources, ainsi que des données d'évolution des populations permettant d'évaluer le MSY lorsque celui-ci n'est pas directement disponible.
- Analyser les données en question, notamment leur représentativité et répartition géographique.
- Exploiter la littérature pour produire les données manquantes.

- Calculer des facteurs de caractérisation par espèce, régionalisés

4.1.1.5 Perspectives

L'évaluation de l'indicateur basée sur la valeur du MSY s'appuie sur la dynamique d'évolution de l'espèce considérée, modélisée de façon simplifiée, et constitue une première approche tenant compte des caractéristiques de renouvellement de la ressource.

Cette évaluation se fait néanmoins toutes choses égales par ailleurs : les caractéristiques de l'environnement et de l'habitat ne sont pas considérées comme modifiées par l'exploitation, et la taille de la population concernée n'évolue pas dans le temps si la valeur de MSY n'est pas considérée de façon dynamique.

Par ailleurs l'approche proposée ici ne constitue pas une vision écosystémique de l'impact et de la renouvelabilité de la ressource : les interactions de la population considérée avec les autres espèces présentes dans l'écosystème ne sont ainsi pas considérées, de la même façon que l'influence de l'exploitation sur la qualité de l'écosystème en lui-même est négligé.

Il apparaît ainsi pertinent d'envisager d'évaluer un impact incluant l'effet sur les ressources support impliquées dans la croissance de la ressource produite. Une première amélioration pourrait consister en la conversion des différentes quantités de biomasse considérées en carbone puisé dans l'écosystème, en utilisant notamment la notion de Primary Production Required (PPR, cf supra, [Cashion & al, 2016]), qui intègre des caractéristiques simplifiées des écosystèmes, comme son efficacité de transfert de carbone entre niveaux trophiques, dépendant notamment des conditions dans lesquelles il évolue et de sa structure propre.

L'utilisation de cette grandeur nécessiterait néanmoins un travail de recherche permettant de mettre en perspective cette valeur, notamment la détermination de la quantité totale de carbone présente dans l'écosystème et celle nécessaire à son bon fonctionnement, dans la perspective d'une approche de criticité portant sur les écosystèmes et le carbone comme ressource support.

4.1.2 Les ressources biotiques anthropiques

La méthodologie portant sur les ressources biotiques anthropiques, même si basée sur la notion de criticité, mobilisera des grandeurs de nature différente : il est ainsi question de ressources produites par l'homme, pour lesquelles les notions de population, de taux de renouvellement ne s'appliquent pas. La renouvelabilité de la ressource est principalement contrainte par la qualité des ressources support mobilisées pour sa production. Il convient donc ici d'utiliser un proxy, permettant d'évaluer la criticité des ressources « support » de la croissance de la ressource considérée.

4.1.2.1 Ressources végétales terrestres

Nous proposons ici de baser l'évaluation de la renouvelabilité des ressources végétales anthropiques sur la qualité des sols, et plus particulièrement sur sa capacité de production biotique, mesurée par son contenu carbone (SOC).

Cette quantité constitue ainsi une ressource, liée à la qualité des sols, qui sera potentiellement « consommée » par la culture. Elle sera évaluée sur une zone géographique pertinente, équivalent du bassin versant pris en compte pour la ressource eau. Dans le cas du SOC, cette zone pourra par exemple être déterminée par :

- Une homogénéité climatique (température, précipitation).
- Une même nature des sols.

4.1.2.1.1 Proposition de méthode pour le calcul d'un indicateur de criticité

Nous proposons de baser le calcul de l'indicateur sur le contenu maximal théorique de SOC atteignable sur les sols considérés, et sur la dégradation de cette quantité de SOC lié à l'usage des sols :

$$AMD = \frac{(SOC_{potential} - \Delta SOC_{biotic\ land})}{S}$$

$SOC_{potential}$ quantité potentielle de SOC sur la zone considérée (sur les sols biotiques), $\Delta SOC_{biotic\ land}$ différence entre quantité de SOC potentielle et actuelle sur les sols biotiques (fonction du type d'usage des sols), S surface de la zone considérée.

L'indicateur se base donc sur le contenu maximal théorique de SOC atteignable sur les sols considérés, et sur la dégradation de cette quantité de SOC lié à l'usage des sols. La grandeur $\Delta SOC_{biotic\ land}$ est ainsi considérée comme rendant compte à la fois de la quantité de SOC consommée par l'homme sur les sols biotiques cultivés et de celle nécessaire au maintien des écosystèmes actuels.

L'écart entre SOC potentiel et SOC actuel se calcule, sur une zone donnée, en additionnant les quantités de SOC correspondant à l'usage actuel des sols. Ces quantités, fournies notamment par les bases de données de l'IPCC [Penman & al, 2003] (SOC par hectare de sol, fonction de la nature du sol) et par différents outils cartographiques, se calcule ainsi :

$$\Delta SOC_{biotic\ land} = \sum_{S_{land\ use_i}}^S (SOC_{Potential_i} - SOC_{Actual_i})$$

Cette approche est une approximation : il n'existe en effet pas de consensus sur une valeur seuil de SOC entraînant la perte de renouvelabilité d'une culture [Fageira, 2012]. Nous considérons ainsi les besoins des écosystèmes comme étant ceux des écosystèmes se développant sur les sols biotiques non cultivés (ce qui ne veut pas dire non utilisés). En considérant que la qualité des écosystèmes sur ces sols constitue l'état minimal dans lequel ils doivent se trouver pour assurer leur fonctionnement (ainsi que pour assurer les services écosystémiques nécessaires aux cultures), cette démarche constitue néanmoins une bonne approximation.

Reportée dans l'expression AMD, le calcul de $\Delta SOC_{biotic\ land}$ donne ainsi :

$$AMD = \frac{SOC_{Actual}}{S}$$

Le facteur de caractérisation correspondant est alors :

$$CF_{ASOCRE} = \frac{\overline{AMD}}{AMD}$$

$\overline{AMD}$ moyenne mondiale.

L'indicateur est ainsi calculé comme étant le produit du facteur de caractérisation et de la valeur obtenue pour l'indicateur land use de la méthode ILCD [Brandao & Mila i Canals, 2013], évaluant le déficit de carbone des sols associé au système étudié :

$$AVBR \text{ scarcity index} = LandUse_{ILCD} * CF_{ASOCRE}$$

AVBR : Anthropic Vegetal Biotic Ressources, *ASOCRE* : Available Soil Organic Carbon Remaining.

4.1.2.1.2 Données disponibles

L'expression simplifiée de AMD, qui ne dépend plus que de la quantité de SOC actuelle dans les sols, rend l'accessibilité de la donnée plus aisée. La FAO a ainsi mis en place une initiative internationale de cartographie du contenu carbone des sols, GSOCmap¹⁰.

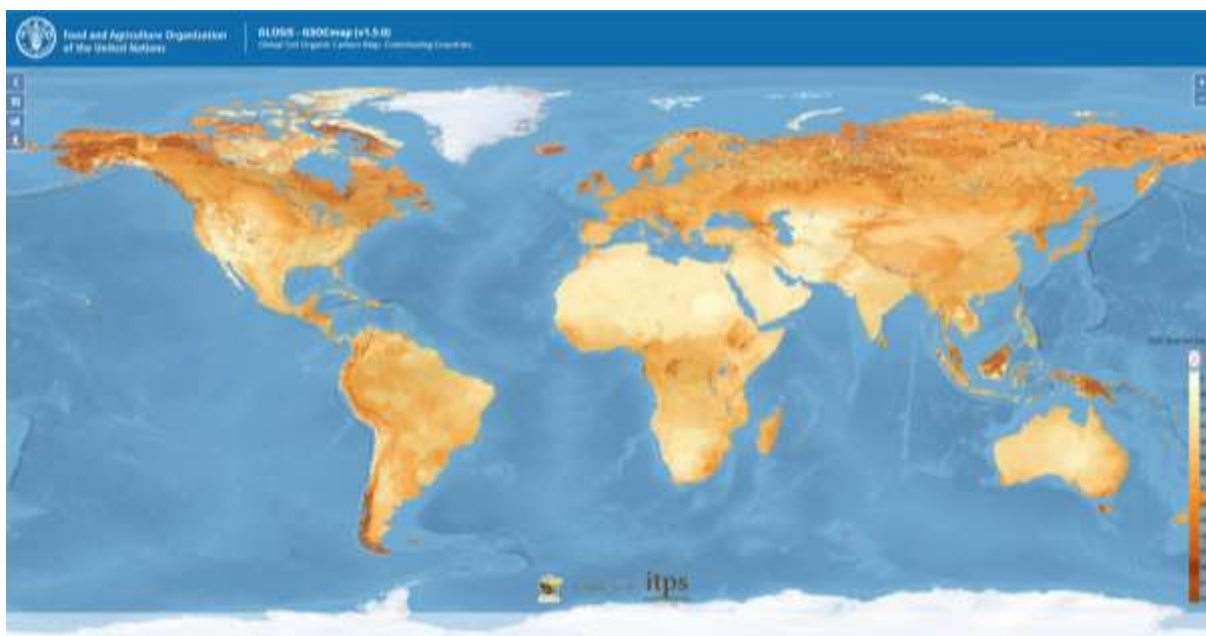


Figure 14 : cartographie mondiale du contenu carbone des sols (SOC), issue de l'initiative GSOCmap (<http://54.229.242.119/GSOCmap/>)

Cette initiative se base notamment sur les initiatives nationales correspondantes, portée en France par l'INRA [Meersmans & al, 2012].

L'analyse des caractéristiques des sols en tant que ressource, et des données chiffrées évaluant ces différentes caractéristiques, sont par ailleurs disponibles, à l'échelle globale et régionalisée, dans un rapport de l'International Technical Panel on Soils (ITPS) et la FAO sur le statut de la ressource sol mondiale [ITPS & FAO, 2015].

Comme indiqué précédemment, ces données doivent ici être croisées avec différents paramètres déterminant la maille à laquelle l'évaluation des facteurs de caractérisation doit se faire, données

¹⁰ <http://www.fao.org/3/a-i7292e.pdf>

climatiques et de nature des sols notamment. On pourra ainsi s'appuyer sur les zones climatiques mondiales et régionales (voir Figure 15), ainsi que sur des données cartographiques de nature des sols (voir Figure 16).

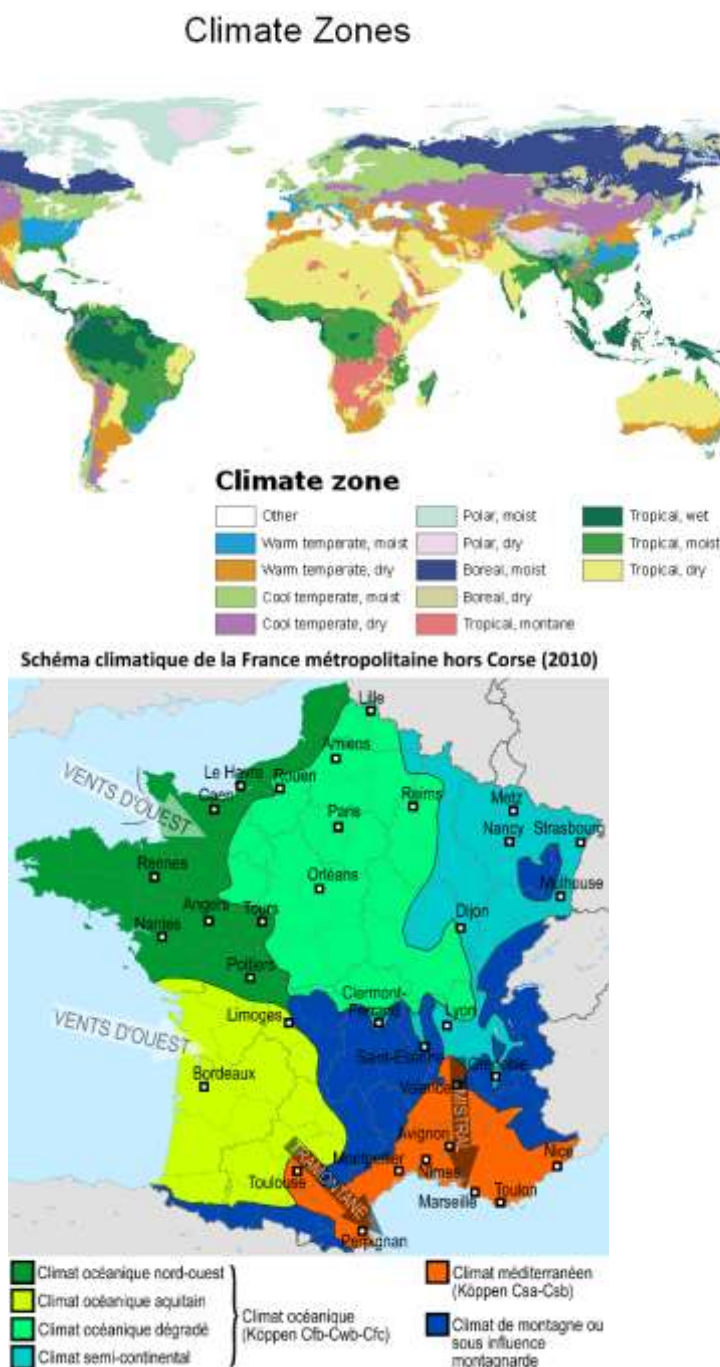


Figure 15 : zones climatiques dans le monde (<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/renewable-energy-directive>) et en France (https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_de_la_France, [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/))



Source : INRA, Base de données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000, 1998.

Figure 16 : cartographie des types de sols en France [Antoni & al, 2011]

L'indicateur ILCD s'appuie lui sur les modes d'usage et de transformation des sols, et ne tient pas compte des spécificités de la culture considérée, ni des caractéristiques des sols et des conditions climatiques, qui peuvent influencer l'évolution du SOC au cours de la culture. Il sera ainsi pertinent, lorsque possible, d'utiliser des données spécifiques, issues par exemple de la littérature, permettant d'évaluer de façon fine l'impact sur le contenu carbone des sols, de la culture considérée.

4.1.2.1.3 Intérêt et limites

La méthode proposée ici permet d'évaluer la renouvelabilité d'une ressource, potentiellement renouvelable, produite par l'homme (issue de la simili-écosphère) sur la base d'une caractéristique d'une ressource support. Elle permet ainsi de considérer l'état actuel de cette dernière, et d'évaluer l'impact de la culture sur sa capacité à assurer la fonction considérée.

Cette approche est généralisable à tout type de culture : le type de ressource végétal considéré comme le mode d'exploitation ont une influence quantifiable sur la teneur en SOC des sols.

Par ailleurs l'utilisation du carbone organique présent dans les sols comme proxy pour l'évaluation de la renouvelabilité d'une culture de biomasse rentre bien dans le cadre méthodologique considéré pour des indicateurs de criticité : la quantité de SOC potentielle considérée comme référence est une grandeur qui ne peut que diminuer avec l'usage des sols.

Le calcul de l'indicateur se heurte néanmoins à certains verrous méthodologiques et scientifiques. Comme expliqué précédemment, il est en effet complexe de déterminer une valeur seuil de SOC sous laquelle la renouvelabilité de la culture n'est plus assurée. Nous avons ici choisi de considérer que l'état actuel des sols biotiques non cultivés représente la valeur minimale de SOC sur une zone donnée qui doit être préservée pour assurer le fonctionnement des écosystèmes, mais cette hypothèse néglige le fait que les écosystèmes considérés peuvent d'ores et déjà être dégradés.

L'indicateur est ici exprimé en kg C deficit, en cohérence avec l'approche de l'indicateur ILCD sur l'usage des sols. Cette grandeur, bien que permettant de caractériser la capacité des sols à produire de la biomasse, n'est pas directement liée au contenu carbone de la ressource en question, qui est issu de l'atmosphère : l'utilisation de la méthode doit se faire en évitant tout risque de confusion.

La méthodologie proposée ici ne porte que sur une des caractéristiques et fonctions de la ressource support sol, sa capacité de production biotique. Si celle-ci semble pertinente pour l'analyse de la renouvelabilité de la production de biomasse, il est important de noter que la production effective de biomasse dépend d'autres facteurs, et d'autres ressources supports (services écosystémiques, eau, climat...).

Enfin, là encore, l'indicateur met en jeu des facteurs de caractérisation portant sur des flux élémentaires absents des bases de données : la valeur obtenue pour l'indicateur land use ILCD est ainsi utilisée comme un simili flux élémentaire, la méthode pouvant alors être considérée comme une pondération de celui-ci en fonction des caractéristiques des sols de la zone considérée. L'opérationnalité de l'indicateur dépend ainsi de la disponibilité future de flux élémentaires sur le déficit de carbone organique dans les sols, par type d'usage des sols et par type de culture, afin d'améliorer la précision de l'indicateur Land use existant.

4.1.2.1.4 Développements nécessaires

La mise en place de cette méthode de calcul de l'indicateur nécessite plusieurs étapes de développement, notamment pour l'exploitation des données disponibles et le calcul des valeurs considérées. Il faudra notamment :

- L'exploitation des bases de données existantes sur le contenu SOC des sols.
- La clarification des classifications d'usage des sols existantes, et l'établissement d'une typologie unique.
- L'exploitation des données de la littérature pour les différentes cultures, notamment sur leur influence sur la quantité de carbone organique des sols, en fonction des différents paramètres pertinents (type de sols, localisation, données climatiques).
- La détermination des valeurs de SOC correspondant à la typologie des usages des sols, dans les cas où cette donnée n'est pas disponible dans une base de données.
- La détermination de la maille à considérer pour l'évaluation des facteurs de caractérisation, caractérisant une zone cohérente pour considérer l'exploitation des sols.

- Le calcul de facteurs de caractérisation régionalisés, à l'échelle des zones déterminées précédemment.
- La mise en place d'études de cas permettant d'analyser la capacité de la méthode à couvrir les cas de figure existants, et à correctement rendre compte de la renouvelabilité de la culture.

4.1.2.1.5 Perspectives

On l'a vu, la méthode proposée repose sur la prise en compte d'une unique ressource support comme élément conditionnant la renouvelabilité de la culture. Cette vision constitue une simplification : la production effective de biomasse est aussi conditionnée par la disponibilité d'eau, la présence de services écosystémiques (pollinisation) ou encore par les conditions climatiques, qui peuvent être vues comme une ressource support.

La prise en compte de façon cohérente de l'effet de la culture sur l'ensemble des ressources supports mobilisées, par le calcul d'indicateurs de criticité, pourra permettre une meilleure prise en compte et évaluation de la renouvelabilité de celle-ci, et permettra une meilleure couverture de son impact sur l'environnement, notamment dans des contextes où la quantité de SOC n'est pas une ressource considérée comme critique, et où la renouvelabilité peut donc dépendre d'autres facteurs (aridité, biodiversité...).

4.1.2.2 Ressources animales terrestres

La renouvelabilité des ressources animales terrestres anthropiques (issues de l'élevage) est étroitement liée à la renouvelabilité des intrants végétaux servant à l'alimentation du bétail. L'élevage constitue en effet une reproduction artificielle des mécanismes de chaîne alimentaire : la pression environnementale sur les ressources support peut ainsi être reportée, in fine, à un impact sur la qualité des sols.

Deux démarches sont ainsi envisageables pour l'évaluation d'un indicateur de criticité associé à la biomasse animale :

- Considérer la biomasse végétale comme une ressource « support » de la biomasse animale. L'indicateur de criticité portera alors sur la disponibilité de cette biomasse végétale, sur une zone donnée.
- Evaluer l'impact associé à la biomasse végétale consommée pour l'élevage, en se basant sur l'approche ASOCRE dans le cas de biomasse cultivée, et l'approche ABRRE dans le cas de la biomasse prélevée dans l'écosphère.

4.1.2.2.1 La biomasse végétale comme ressources support

Notre première proposition se base ainsi sur la prise en compte des quantités de biomasse végétale disponibles et consommées, sur une zone donnée supposée pertinente, qui serviront de base au calcul des facteurs de caractérisation et à un indicateur de criticité.

Nous proposons ainsi d'utiliser la notion de Net Primary Production (NPP) [Haberl & al, 2007], grandeur rendant compte de la production de biomasse végétale d'une zone donnée. Nous adopterons ici les définitions et acceptations proposées dans cette publication. L'indicateur considèrera la biomasse produite naturellement par les écosystèmes comme référence pour la disponibilité, et exclura celle issue de la culture.

On pourra ainsi considérer les grandeurs suivantes :

- La production primaire nette potentielle, NPP_0 . Cette grandeur rend compte de la capacité des écosystèmes à produire de la biomasse, sans intervention humaine. Son évaluation intègre la prise en compte de la qualité des sols, des conditions climatiques et hydrogéologiques.
- Les besoins en biomasse des écosystèmes terrestres, NPP_{eco} : cette grandeur permet d'évaluer la part de la ressource qu'il est nécessaire de préserver pour assurer le bon fonctionnement des écosystèmes.
- L'appropriation humaine de la production nette primaire, Human Appropriation of Net Primary Production (HANPP) [Haberl & al, 2007]. Cette grandeur permet d'évaluer la part de production nette primaire appropriée par l'homme, que ce soit de façon directe (récolte) ou par modification de l'usage des sols ou de façon accidentelle (incendies causés par l'homme).

Ainsi, nous proposons d'évaluer la différence entre la disponibilité de la biomasse végétale et la demande selon la formule suivante :

$$AMD = \frac{(NPP_0 - NPP_{eco} - HANPP)}{S}$$

S étant la surface de la zone considérée.

$$CF_{AVFR} = \frac{\overline{AMD}}{AMD}$$

$\overline{AMD}$ moyenne mondiale. L'évaluation de l'indicateur se fait alors selon la formule suivante :

$$AABR \text{ scarcity index} = A * CF_{AVFR}$$

$AABR$: Anthropic Animal Biotic Ressource, $AVFR$: Available Vegetal Foodstock Remaining, A représentant la quantité de biomasse prélevée (en tonnes).

L'une des limites et difficulté de l'utilisation de la notion de NPP et de HANPP en ACV et plus largement en analyse environnementale vient du fait que les changements d'usage des sols n'impliquent pas nécessairement de réduction de la NPP (par rapport à sa valeur potentielle). L'agriculture intensive ou l'irrigation permettent d'augmenter la productivité, comparativement à la situation initiale. La valeur de NPP correspondant à un usage des sols peut donc être supérieure à NPP_0 . On peut ainsi constater sur la Figure 17 : cartographie de l'appropriation humaine de production primaire nette (HANPP), excluant l'appropriation liée aux incendies dus à l'homme. (a) réduction de la production primaire net (NPP) due au changement d'usage des sols (en % de la NPP initiale), (b) HANPP totale (en % de la NPP initiale) [Haberl & al, 2007]. Les valeurs en bleu (négatives) indiquent une augmentation de la NPP liée à l'intervention de l'homme. des valeurs de HANPP négatives, traduisant cette augmentation de productivité.

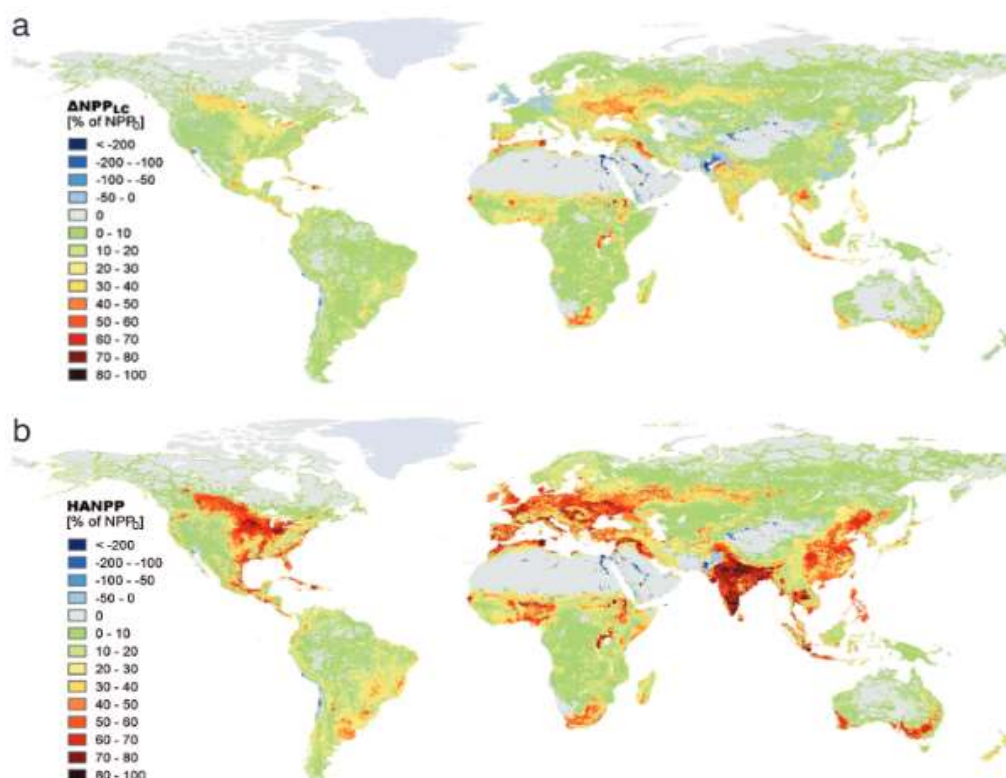


Figure 17 : cartographie de l'appropriation humaine de production primaire nette (HANPP), excluant l'appropriation liée aux incendies dus à l'homme. (a) réduction de la production primaire net (NPP) due au changement d'usage des sols (en % de la NPP initiale), (b) HANPP totale (en % de la NPP initiale) [Haberl & al, 2007]. Les valeurs en bleu (négatives) indiquent une augmentation de la NPP liée à l'intervention de l'homme.

Cet aspect nous amène ici à devoir considérer une modification de la détermination du facteur de caractérisation dans les cas où HANPP est négatif. Nous supposons ainsi, de façon conservatrice, que ces cas correspondent à une production non renouvelable de biomasse, et proposons d'y associer une valeur seuil pénalisante pour CF_{AVFR} .

Cette proposition démontre ici l'une de ses limites : la valeur de HANPP, même si rapportée à NPP_0 , n'est pas nécessairement caractéristique d'une appropriation par l'homme d'une ressource disponible « naturellement ». Son intégration dans une approche « disponibilité – demande » apparaît donc complexe. Une analyse plus poussée de la capacité de cette méthode à décrire une rareté réelle de la ressource apparaît nécessaire.

Par ailleurs l'estimation de NPP_{eco} reste complexe : si elle peut être évaluée par la part de NPP_0 consommée par la fraction herbivore des écosystèmes terrestres, additionnée à celle entrant en décomposition, nourrissant les microorganismes assurant le recyclage des nutriments dans l'écosystème [Swift & al, 1979], la détermination de valeurs seuils assurant le bon fonctionnement de celui-ci nécessite là encore un travail de compilation de données de la littérature et la prise en compte des particularités des écosystèmes selon la zone considérée.

4.1.2.2.2 Evaluation de l'impact sur le SOC de l'élevage de biomasse animale

Notre autre proposition consiste à considérer que la renouvelabilité de la biomasse anthropique animale est directement déterminée par celle de la biomasse végétale consommée par l'élevage, et donc utilisée comme intrant.

Ainsi nous pouvons considérer que la prise en compte de la quantité de biomasse végétale consommée, ainsi que ses caractéristiques (naturelle ou anthropique, espèce végétale et mode de culture dans le cas anthropique) fournissent les éléments pour l'évaluation de la renouvelabilité de la biomasse animale.

Ainsi, lors d'une ACV portant sur la production de biomasse animale anthropique, nous proposons de baser l'évaluation sur :

- Dans le cas d'intrants biotiques végétaux cultivés, la méthode ASOCRE
- Dans le cas d'intrants biotiques naturels (pâturage par exemple), la méthode ABBRE.

L'indicateur de criticité pour les ressources biotiques animales anthropiques sera alors :

$$AABR\ scarcity\ index = A * \left(\frac{AVBR\ scarcity\ index}{V_{tot}} + \frac{NOBR\ scarcity\ index}{V_{tot}} \right)$$

Avec

$$AVBR\ scarcity\ index = \sum_i^{\substack{\text{ressources} \\ \text{anthropiques} \\ \text{végétales}}} V_{anthro_i} * CF_{ASOCRE_i}$$

$$NOBR\ scarcity\ index = \sum_j^{\substack{\text{ressources} \\ \text{anthropiques} \\ \text{végétales}}} V_{natural_j} * CF_{ABBRE_j}$$

V_{anthro_i} la quantité de ressource végétale anthropique de l'espèce i (en tonnes), CF_{ASOCRE_i} le facteur de caractérisation associé à l'espèce i , $V_{natural_j}$ la quantité de ressource naturelle végétale j (en tonnes), CF_{ABBRE_j} le facteur de caractérisation associé, V_{tot} la quantité totale de biomasse consommée (en tonnes), A la quantité de biomasse animale produite.

4.1.2.2.1 Discussion

Si les deux méthodes présentées ci-dessus reposent sur la prise en compte de la biomasse végétale comme facteur déterminant la renouvelabilité de la biomasse animale, leur représentativité et leur sens physique est à discuter.

La première approche utilise la disponibilité des intrants végétaux comme paramètre d'évaluation. Si elle apparait comme une évaluation de l'impact de l'élevage animal sur les écosystèmes le supportant, la définition de $HANPP$ n'est pas strictement homogène à celles de NPP_0 et NPP_{eco} . Ainsi si pour ces deux dernières grandeurs il est question de caractéristiques intrinsèques des écosystèmes, $HANPP$ est une combinaison d'une fraction de la production primaire issue des écosystèmes et d'une fraction de la production de biomasse issue de modification de ceux-ci (culture intensive, irrigation), dont l'importance varie selon les contextes. Même si dans la majorité des cas la valeur de $HANPP$ est inférieure à NPP_0 , la prise en compte de cette appropriation ne rend pas nécessairement compte de la renouvelabilité de la biomasse considérée : la possibilité d'une production primaire supérieure à la production primaire potentielle, et donc une appropriation humaine supérieure à celle-ci constitue un contre sens.

La deuxième approche permet de ramener l'analyse au niveau trophique le plus faible de l'écosystème : la capacité des sols à produire de la biomasse végétale, et donc à alimenter le simili-écosystème sur lequel s'appuie l'élevage de biomasse animale. Il intègre ainsi bien la renouvelabilité de la biomasse végétale consommée dans l'analyse. Si cette approche semble moins directement opérationnelle, et si elle néglige par ailleurs la disponibilité de cette biomasse sur une zone jugée pertinente, elle reste celle que nous recommandons ici de façon privilégiée.

4.1.2.3 *Les ressources aquatiques*

Les ressources aquatiques anthropiques renouvelables, issues de l'aquaculture relèvent principalement de deux grandes catégories :

- Les algues, cultivées en milieu ouvert ou fermé, pour des applications alimentaires, chimiques ou énergétiques.
- La biomasse animale, soit majoritairement la pisciculture, la conchyliculture et la crustaciculture, principalement pour l'alimentation humaine ou animale.

Les ressources aquatiques présentent la particularité d'évoluer dans un milieu qui constitue à la fois leur habitat et une ressource support à leur croissance. Ainsi le lien entre production de biomasse et qualité de l'eau obéit à des règles complexes, mêlant la disponibilité des nutriments, le pH, la concentration en carbone et oxygène dissous, la turbidité et l'accès à la lumière...

Les facteurs limitant la croissance des algues sont ainsi principalement l'accès à la lumière pour la photosynthèse, et la disponibilité d'azote et de phosphore. La présence d'autres nutriments (carbone, silice, micronutriments) reste cependant nécessaire [Deas & Orlob, 1999].

Dans le cadre de l'aquaculture, la production de biomasse animale peut reposer sur le développement d'une population détritivore (recyclant les déchets organiques produits naturellement ou apportés par l'homme) dont les poissons élevés vont se nourrir. Dans le cas d'une exploitation intensive, la majeure partie des nutriments est apportée par l'homme, et repose sur de la biomasse végétale (farines) et animale (huile de poisson).

Les mécanismes de transferts des nutriments dans le milieu aquatique apparaissent complexes. Par ailleurs il existe de nombreuses interactions, positives ou négatives, entre les espèces constitutives d'un écosystème et le milieu dans lequel il évolue. Une forte augmentation de la teneur en azote de l'eau peut par exemple conduire à une forte croissance de la population d'algue, entraînant un phénomène d'eutrophisation : la teneur en oxygène du milieu n'est plus suffisante pour permettre une respiration correcte des espèces de l'écosystème.

Nous n'avons ainsi pas pu, à l'heure actuelle, identifier de grandeur, caractéristique de la qualité de l'eau, pouvant servir de base à l'évaluation d'un indicateur de criticité pour les ressources anthropiques aquatiques. Si les écosystèmes semblent pouvoir constituer une ressource support dont il serait pertinent d'évaluer la qualité et la renouvelabilité, la mise en place d'une méthodologie nécessite une analyse approfondie de la littérature sur le sujet.

Enfin, une approche similaire à celle proposée pour la biomasse animale, reposant sur la renouvelabilité des intrants utilisés pour la culture, est complexifiée par la diversité des intrants utilisés (d'origine végétale et animale).

Nous ne sommes ainsi pas en mesure de proposer ici une méthodologie d'évaluation de la renouvelabilité des ressources biotiques anthropiques aquatiques basée sur une approche de criticité.

Les différentes méthodes développées et présentées dans l'état de l'art (voir notamment [Crenna & al, 2018] et [Helias & al, 2018]), bien que ne se basant pas sur la vision méthodologique, restent pertinentes dans ce but, et méritent d'être soulignées ici. Un travail de recherche et de développement reste à mener pour proposer un indicateur de criticité sur les ressources aquatiques anthropiques.

4.2 Les ressources abiotiques

Les ressources abiotiques renouvelables correspondent ici à des ressources énergétiques de flux, considérées comme infinies et inépuisables à l'échelle de temps humaine. La notion de criticité et la logique l'évaluant est ainsi modifiée. En l'absence de besoins des écosystèmes, la disponibilité n'est conditionnée que par les besoins anthropiques et des aspects liés à l'exploitation de la ressource : il est ainsi possible de considérer les ressources épuisables mobilisées par l'exploitation comme l'équivalent d'une ressource support. La criticité, et donc la disponibilité de ces ressources, est alors influencée par des éléments liés à leur épuisement, mais aussi à leur dissémination, leur difficulté d'extraction, et les besoins en raffinement/transformation pour exploitation.

La commission européenne a publié la dernière version de sa liste de matières premières considérées comme critiques (au nombre de 27) pour l'Europe¹¹. Cette publication s'accompagne d'un document présentant la méthodologie d'évaluation de la criticité [European Commission, 2017a], ainsi que le détail des études menées pour les ressources considérées comme critiques [European Commission, 2017a].

Cette évaluation s'appuie notamment sur quatre indicateurs :

- L'importance économique (Economic Importance, EI)
- Le risque sur l'approvisionnement (Supply Risk, SR)
- Un index de substitution lié à l'importance économique (Substitution Index for economic importance, SI(EI))
- Un index de substitution lié au risque sur l'approvisionnement (Substitution Index for Supply Risk, SI(SR))

La Figure 18 : caractérisation de la criticité de l'antimoine, [European Commission, 2017b] donne une illustration de ces indicateurs dans le cas de l'antimoine.

¹¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0490&from=EN>

1. ANTIMONY

Key facts and figures

Material name and element symbol	Antimony, Sb	World / EU production (tonnes) ¹	42,833 / 0
Parent group	n.a.	EU import reliance ¹	100%
Life cycle stage / material assessed	Processing/ Sb metal	Substitution index for supply risk [SI(SR)] ¹	0.93
Economic importance (EI) (2017)	4.3	Substitution Index for economic importance [SI(EI)] ¹	0.91
Supply risk (SR) (2017)	4.3	End of life recycling input rate (EOL-RIR)	28%
Abiotic or biotic	Abiotic	Major global end uses in 2014	Flame retardants (43%) Lead-acid batteries (32%) Lead alloys (14%)
Main product, co-product or by-product	Main product or co or by product of Au, Pb, Zn	Major world producers ¹ (Sb metal production)	China (87%) Vietnam (11%)
Criticality results	2011 Critical	2014 Critical	2017 Critical

Figure 18 : caractérisation de la criticité de l'antimoine, [European Commission, 2017b]

L'importance économique d'une ressource est calculée sur la base de l'importance du matériau considéré dans les usages finaux de matériaux pour l'Europe, ainsi que sur la performance d'éventuels substituts pour ces applications. Le risque sur l'approvisionnement est lui estimé à partir de facteurs mesurant le risque de perturbation dans la fourniture du matériau (e.g. apports mondiaux, apports internes à l'UE, dépendance à l'égard des importations, performances de gouvernance des pays fournisseurs mesurées par l'indicateur de gouvernance mondiale (WGI, World Governance Indicator), restrictions et accords commerciaux, disponibilité et caractère critique des produits de remplacement).

Les indices de substitutions sont eux des grandeurs, comprises entre 0 et 1, caractérisant la possibilité de substituer le matériau considéré par un autre, une valeur de 1 correspondant à un matériau non substituable.

Ces valeurs sont des valeurs pouvant rapidement fluctuer : elles sont en effet dépendantes d'un contexte économique et géopolitique, en perpétuelle évolution. Nous considérons ici qu'ils représentent néanmoins une source d'information sur les difficultés pouvant être rencontrées pour assurer l'exploitation des ressources en flux, qu'il pourra être pertinent de mettre à jour en cas de modification majeure du contexte.

4.2.1 Propositions méthodologiques pour l'évaluation de la criticité des ressources énergétiques renouvelables

Nous proposons ici de nous appuyer sur les facteurs liés au risque sur l'approvisionnement pour alimenter un indicateur de criticité des ressources énergétiques abiotiques renouvelables. Ces grandeurs seront combinées à l'évaluation du potentiel de déplétion abiotique (ADP, Abiotic Depletion Potential) [Guinée, 2001], pour déterminer un indice de criticité.

Notre proposition passe par l'exploitation de l'ICV du vecteur énergétique donné : on identifie dans celui-ci les quantités de matériaux critiques consommés pour la production d'une quantité d'énergie finale donnée.

Ainsi, pour un vecteur énergétique renouvelable donné, on considère :

$$IC_{Renewable\ Energy} = \sum_i^{Critical\ EF} \frac{m_i}{m_{tot}} * ADP_i * SR_i * SI(SR)_i$$

$IC_{Renewable\ Energy}$ l'indice de criticité pour une ressource énergétique renouvelable abiotique m_i flux élémentaire correspondant à la ressource critique i , m_{tot} somme des flux élémentaires correspondant aux ressources critiques, ADP_i facteur de caractérisation pour l'épuisement des ressources abiotiques correspondant à la ressource critique i , SR_i score concernant le risque sur l'approvisionnement pour la ressource i , $SI(SR)_i$ l'index de substitution correspondant. Valeurs obtenues pour l'ensemble des ressources critiques identifiées dans l'inventaire des procédés d'infrastructure nécessaires à l'exploitation du flux EnR.

Nous proposons ici deux utilisations de cette grandeur :

- Dans la pratique d'une ACV, et dans la simulation d'un système comportant des sous process d'EnR abiotique de premier plan. Chaque quantité d'énergie renouvelable abiotique incluse dans le périmètre de l'étude est multipliée par l'indice de criticité correspondant aux process nécessaires pour l'approvisionnement du système étudié. Un indicateur de flux est ensuite calculé en additionnant chacune des valeurs obtenues, multipliées par le ratio entre la quantité d'énergie renouvelable considérée et la quantité totale d'énergie consommée par le système (renouvelable et non renouvelable).

$$Abiotic\ Renewable\ Energy\ criticity\ index = \sum_i^{Renewable\ energy} E_i * \frac{E_i}{E_{tot}} * IC_i$$

E_i la quantité d'énergie renouvelable de type i consommée, E_{tot} la quantité totale d'énergie finale (renouvelable et non renouvelable) consommée, IC_i l'indice de criticité de la ressource énergétique renouvelable abiotique i .

- Comme méthode de calcul généraliste d'un indicateur d'impact, se basant sur les flux élémentaires de consommation d'énergie primaire des ICV. Cette proposition est détaillée dans le paragraphe suivant.

4.2.2 Proposition de méthode pour le calcul d'un indicateur de criticité

Cette proposition constitue une généralisation et une systématisation du calcul pouvant être mené lors de la réalisation d'une ACV, présentée dans le paragraphe précédent. Elle s'appuie sur les flux élémentaires de consommation d'énergie présents dans les ICV, ainsi que sur leur définition. Pour un flux élémentaire énergétique renouvelable abiotique donné, l'objectif est ainsi d'évaluer, en fonction de la façon dont sont construits les flux élémentaires (représentativité technologique, hypothèses pour le calcul des valeurs d'inventaires associées), un facteur de caractérisation :

$$CF_{PAREC} = \sum_i^{critical\ EF} \frac{m_i}{m_{tot}} * ADP_i * SR_i * SI(SR)_i$$

m_i flux élémentaire correspondant à la ressource critique i , m_{tot} somme des flux élémentaires correspondant aux ressources critiques, ADP_i facteur de caractérisation pour l'épuisement des ressources abiotiques correspondant à la ressource critique i , SR_i score concernant le risque sur l'approvisionnement pour la ressource i , $SI(SR)_i$ l'index de substitution correspondant.

$$\text{Abiotic Renewable Energy criticality index} = EF_{\text{energy}} * \frac{EF_{\text{energy}}}{\sum EF_{\text{energy}}} * CF_{\text{PAREC}}$$

EF_{energy} : flux élémentaire énergie (Les flux élémentaires considérés sont ici ceux présentés dans le Tableau 11 : illustration, flux d'énergie renouvelable dans les inventaires d'ecoinvent 3.5, hors biomasse), $PAREC$: Primary Abiotic Renewable Energy Criticality

4.2.3 Données disponibles

Le calcul de l'indice de criticité et de l'indicateur repose ici sur des données facilement disponibles et opérationnelles dans la pratique de l'ACV. Citons notamment :

- Les bases de données d'ICV pour les quantitatifs de ressource critique par vecteur.
- La méthode CML pour les facteurs de caractérisation du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques ADP [Guinée, 2001]. Le détail des valeurs considérées est donné en Annexe 4 : facteurs de caractérisation pour l'indicateur ADP de la méthode CML.
- Les publications de la commission européenne et du BRGM pour les ressources critiques et leurs caractéristiques (<https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en>), ainsi que les publications similaires dans d'autres contextes géographiques et économiques.

4.2.4 Intérêt et limites

Cette méthodologie permet ici de mettre en perspective la renouvelabilité de l'exploitation des ressources en flux, théoriquement infinies et inépuisables, mais qui mobilisent des ressources à la fois épuisables et dont la disponibilité (ou plus précisément l'accessibilité) peut être mise à mal.

Par ailleurs elle permet de rendre visible et tangible le recours à des ressources classiquement exclues du périmètre de l'ACV, car considérées comme gratuites.

L'utilisation et l'analyse de cet indicateur doit tenir compte de la manière dont il est construit : il est ainsi l'expression, pondérée par des éléments de prise en compte de criticité, du recours à des énergies dites renouvelables. Cette consommation d'énergies renouvelables peut, dans certains cas, être encouragée, dans une optique d'écoconception ou d'évaluation. La comparaison entre variantes ^par cet indicateur devra alors tenir compte de cette spécificité.

Le calcul de l'indicateur est représentatif du contexte technologique actuel : il devra être mis à jour en cas de modification future de celui-ci (plus spécifiquement lorsque cette modification porte sur la substitution d'une ressource critique par une ressource non critique). En l'état, l'indicateur ne tient pas compte de la durée de vie des systèmes considérés, et donc de l'amortissement dans le temps du recours à une ressource épuisable et critique.

Enfin, notons que si cette proposition méthodologique repose sur la notion de criticité, l'acceptation de ce terme dans le cas de ressources abiotiques rend compte de facteur d'une nature fondamentalement différente de ceux considérés dans le cas des ressources biotiques.

4.2.5 Développements nécessaires

Les développements à mener portent ici sur :

- La collecte des données pour les ressources critiques présentes dans les ICV et absentes de la méthode CML
- L'élaboration de bases de données régionalisées sur les paramètres de caractérisation de la criticité des ressources critiques.
- La détermination de facteurs de caractérisation pour les flux élémentaires énergétiques des BDD, régionalisés. Cette détermination se base sur les hypothèses considérées pour l'élaboration de ces flux élémentaires, et notamment sur les caractéristiques technologiques considérées pour chaque vecteur.

4.2.6 Perspectives

La méthode proposée ici porte sur les ressources énergétiques renouvelables abiotiques de flux, et repose sur une acceptation de la criticité principalement liées à des questions économiques, politiques et géostratégiques. Si cette démarche permet de rendre compte de la renouvelabilité du recours à ces ressources, lorsque l'on considère qu'elle constitue un proxy pour l'évaluation de la difficulté à pérenniser son exploitation, elle obéit à des logiques autres que dans le cas de la criticité des ressources biotiques.

Les ressources correspondant à cette catégorie sont en effet des ressources de flux, théoriquement infinies et inépuisables : leur renouvellement peut être considéré comme instantané et non conditionnel. Le mode d'exploitation de la ressource est ici utilisé comme proxy pour évaluer la renouvelabilité : l'évaluation de sa pérennité (en l'état actuel de la technologie) est supposée représenter un indicateur pertinent pour caractériser le caractère pseudo-renouvelable de la ressource. Cet aspect représente une limite de l'approche, qu'il pourra être nécessaire de dépasser : ainsi dans le cas des ressources biotiques, ces ressources épuisables peuvent aussi être mobilisées pour leur exploitation. Nous supposons néanmoins qu'elles ne constituent pas le facteur clé permettant d'évaluer leur renouvelabilité.

Un travail de mise en cohérence, peut-être via l'harmonisation des plages de variations des valeurs de facteurs de caractérisation pour les cas biotiques et abiotiques ou la prise en compte de plusieurs ressources support dans le calcul de l'indicateur pour chaque type de ressource, pourra permettre une approche globale de la criticité des ressources renouvelables. Cela permettra de traiter selon une méthode d'évaluation unique la biomasse énergie et les ressources énergétiques de flux.

5 CAS D'ETUDES

Notre travail s'appuie sur des cas d'études précis, permettant d'interroger et d'analyser la prise en compte en ACV de certains aspects influençant la renouvelabilité effective des ressources. L'objectif est ici d'illustrer certaines des propositions méthodologiques faites précédemment, et de tester leur pertinence et leur capacité à rendre compte de l'impact sur la renouvelabilité des ressources considérées. Nous nous focalisons sur deux cas, permettant d'interroger certains verrous méthodologiques. Le premier cas concerne la culture de biomasse à visée énergétique : cette étude permettra de questionner la notion de ressources renouvelables issues de la simili-écosphère, et d'analyser les liens pouvant exister entre les ressources « support » (eau, sol, air, climat) que l'on pourra considérer comme consommées, et les ressources biomasses, que l'on pourra considérer comme produites. Le deuxième cas d'étude porte lui plus particulièrement sur les ressources énergétiques, et leur mobilisation pour satisfaire un besoin. Il s'appuie sur les plateformes expérimentales « maisons INCAS », pour lesquels des données fiables concernant les besoins énergétiques sont disponibles dans la littérature. Nous nous intéressons plus particulièrement à la façon dont les ressources énergétiques de flux sont considérées en ACV, et cherchons à établir une méthode de prise en compte des caractéristiques de celles-ci.

5.1 Cas d'étude sur la culture du miscanthus : consommation de la ressource sol, production de biomasse

Comme on a pu le voir précédemment, des approches ont été proposées pour l'évaluation de la renouvelabilité des ressources biotiques [Crenna & al, 2018]. Elles reposent sur l'évaluation des caractéristiques de renouvellement de la ressource considérée. Dans le cas de la culture de biomasse terrestre, il existe néanmoins un lien fort entre la capacité de croissance d'une plante et les conditions dans lesquelles cette croissance a lieu. Le renouvellement de la ressource est donc lié à la qualité des ressources support à cette croissance : les sols et l'eau à minima, l'air et le climat si on les considère comme des ressources. Nous chercherons donc ici à analyser la façon dont les caractéristiques des sols influent sur le bilan environnemental d'une ressource biotique, ainsi qu'à la consommation de la ressource « sol », sa caractérisation et sa prise en compte en ACV.

5.1.1 Présentation du miscanthus

Le miscanthus est une plante herbacée graminée, originaire d'Afrique du sud et d'Asie du sud-est. La variété *Miscanthus x giganteus* (miscanthus géant), issue d'un croisement naturel rare entre deux autres variétés, est considérée avec un fort intérêt par la filière de la biomasse énergie, vu sa productivité élevée et sa forte teneur en lignocellulose.



Figure 19: plan de miscanthus géant, source : http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Miscanthus_giganteus.jpg. Photo par Pschmitz, [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported](#)

Le miscanthus est une plante pérenne, dont la durée de culture théorique productive est comprise entre 15 et 25 ans. Cette notion de culture productive est importante à considérer dans le cadre d'un travail portant sur les ressources renouvelables : **la plante est ainsi considérée ici comme une ressource sur une durée plus courte que celle correspondant à sa durée de vie potentielle réelle.**

En France, la culture existe principalement à l'état expérimental ou de test industriel, et représente environ 5000 ha de culture. Les caractéristiques de la plante la rendent peu dépendantes à l'usage d'intrants : l'utilisation commerciale de la plante peut en effet se faire sans fertilisation, la plante ne nécessitant que des apports azotés faibles pour sa croissance. Par ailleurs elle ne nécessite que peu de traitement pesticide ou de désherbage (ces traitements seront limités aux premières années de culture). La récolte a généralement lieu en automne ou hiver, voir début printemps : les nutriments ont été ainsi stockés dans le rhizome, et ne seront pas prélevés. Cette période de prélèvement rend la biomasse favorable à la combustion (par réduction de NOx dans les fumées, notamment).

Par ailleurs, notons la capacité du miscanthus à recharger les sols en carbone prélevé dans l'atmosphère, contribuant à la mise en place d'un captage de CO2 pérenne. L'effet de cette culture sur d'autres aspects (les autres impacts sur la qualité des sols, notamment) reste aujourd'hui néanmoins encore mal connus. De même l'influence de cette culture sur la biodiversité reste à évaluer. Par exemple, la culture doit se faire sur sol bien drainé, ce qui impliquerait une modification probable des écosystèmes dans le cas d'une mise en culture sur sols initialement humides.

5.1.2 Objectif et périmètre de l'étude : notion de sol marginal, évaluation de la renouvelabilité des sols et du miscanthus

L'objectif de notre étude est ici de chercher à identifier les paramètres et facteurs influençant la renouvelabilité du miscanthus, et d'analyser la façon dont la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie et les méthodes de calcul d'indicateurs d'impacts rendent compte de cette renouvelabilité. Nous nous intéresserons ainsi plus particulièrement à l'influence des caractéristiques des sols sur le bilan environnemental de la production d'une quantité donnée de miscanthus, sur une durée donnée.

Nous nous appuierons pour ceci sur la notion de « terres marginales ». Si les aspects permettant de définir une terre comme marginale sont nombreux, on peut en première approche considérer cette définition :

Les sols marginaux sont « des sols non adaptés, non économiquement intéressants ou productifs dans la plupart des circonstances, pour un type donné d'utilisation de la terre, en raison de contraintes climatiques, pédologiques ou géographiques. »¹²

Les définitions et acceptations de la notion sont nombreuses, fonction notamment du cadre dans lesquelles elles sont utilisées. Shortall [Shortall, 2015] a classifié celles rencontrées dans la littérature selon trois catégories :

- Les terres impropres à la culture alimentaire.
- Les terres de mauvaise qualité (appauvries).
- Les terres non viables économiquement pour la culture.

Ce qui rend une terre marginale peut néanmoins être compensé par le recours à des moyens technologiques mobilisés pour rendre la terre cultivable. En fonction du cas de figure, il peut s'agir d'intrants de fertilisation (cas de sols pauvres), de moyens mécaniques (cas de sols difficilement accessibles), ou encore de la mise en place de moyens d'irrigation (cas des sols arides).

Par ailleurs les sols marginaux, dans certains cas, peuvent être considérés comme des sols impropres à la culture alimentaire (sols pollués notamment) : leur marginalité est alors considérée comme un argument pour la mise en place de culture non alimentaire, permettant ainsi d'éviter la problématique de concurrence de l'usage des sols.

Pour notre étude, où nous cherchons à analyser le lien entre qualité des sols, renouvelabilité des sols et évaluation de la renouvelabilité de la biomasse produite, nous définissons ainsi trois variantes :

- La culture de miscanthus sur 1 ha de terres très marginales, appauvries et nécessitant une irrigation.
- La culture de miscanthus sur 1 ha de terres peu marginales, appauvries.
- La culture de miscanthus sur 1 ha de terres non marginales, avec culture préalable.

La durée d'analyse considérée est de 20 ans.

Le périmètre de l'analyse est celui de la parcelle cultivée, et inclut l'ensemble des procédés mis en œuvre sur site, la fourniture d'eau, la fourniture d'intrants (fertilisation et traitement), ainsi que la production des rhizomes plantés en début de culture.

5.1.3 ICV : modélisation du système, paramètres clés

Le processus de culture du miscanthus peut se décomposer en plusieurs catégories :

- Une phase de traitement chimique du sol (atrazine, pesticide, 1,76 kg/ha, la première année)
- Une phase de préparation mécanique du sol, incluant le labour, l'hersage, le désherbage mécanique, le déchaumage au chisel, le passage du rouleau agricole
- La fertilisation, comprenant la chaux (100 kg/ha, 4 fois en 20 ans), le nitrate d'ammonium (30 kg N/ha pour un sol non marginal, 60 kg N/ha pour un sol peu marginal, 90 kg N/ha pour un sol très marginal, 9 fois en 20 ans), le sulfate de potassium (99 kg K₂O /ha, 9 fois en 20 ans), le triple superphosphate (9kg superphosphate/ha, 9 fois en 20 ans)
- La plantation (20000 rhizomes/ha)
- Traitements pesticides en cours de culture (bipyridylum, 7,7 kg/ha, une application la deuxième année, glyphosate, 2,5 kg/ha, une application la première année)

¹² <https://www.aquaportail.com/definition-5558-terre-marginale.html>

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

- La récolte (19 fois en 20 ans)
- La fin de culture : fauchage (deux rotations de culture la 20^{ème} année) et traitement pesticide (glyphosate, 2,5 kg/ha, une application la dernière année)
- Irrigation dans le cas très marginal (1600 tonnes d'eau sur 20 ans)

On obtient ainsi, pour une unité fonctionnelle de 1ha de culture de miscanthus sur 20 ans, la modélisation suivante :

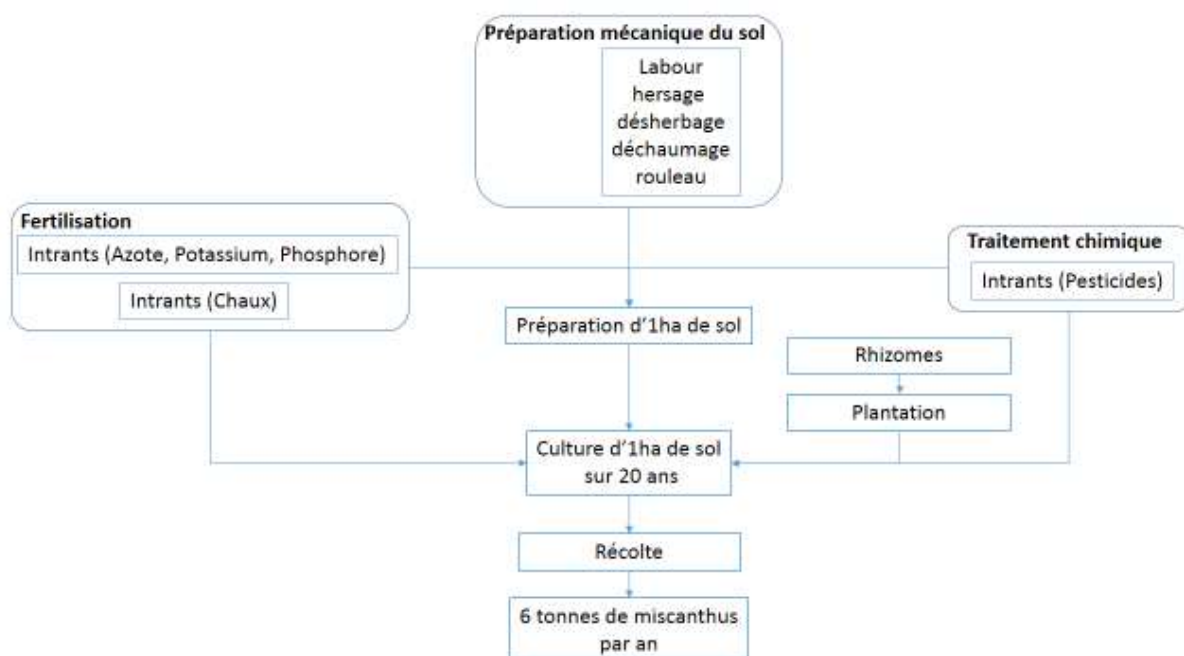


Figure 20 : schéma de principe de la modélisation de la culture d'un hectare de miscanthus

La production de rhizomes se décompose ainsi :

- Une phase de traitement chimique du sol (glyphosate, pesticide, 4 kg)
- Une phase de préparation mécanique du sol, incluant le labour, l'hersage
- La fertilisation, comprenant le nitrate d'ammonium (30 kg N), le sulfate de potassium (60 kg K2O), le triple superphosphate (26 kg de P2O5)
- La récolte
- L'irrigation (400 tonnes d'eau)

5.1.4 AICV : état des lieux des méthodes et analyse de leur capacité à caractériser la renouvelabilité

Nous nous focaliserons ici sur trois types d'indicateurs, facilement opérationnels et pour lesquels les données sont disponibles, permettant d'évaluer l'impact sur les sols et l'eau de la culture de miscanthus.

Nous considérerons ainsi :

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

- Les indicateurs d'empreinte eau (Boulay & al, ecological scarcity, Pfister & al, hoekstra & al, AWARE), considérés comme un proxy de la dégradation de la quantité et la qualité de la ressource support eau
- Les indicateurs d'écotoxicité terrestre (ReCiPe midpoint, ReCiPe endpoint, EDIP, CML baseline, Impact 2002+), considérées comme un proxy de la dégradation de la qualité de la ressource support sol
- Les indicateurs d'usage des sols (Environmental FootPrint (LANCA), ReCiPe endpoint, ReCiPe midpoint, ILCD (SOM), Ecoindicator 99 E), considérées comme un proxy de la dégradation de la quantité de la ressource support sol

On précise que l'on n'a évalué dans cette partie aucun des indicateurs relatifs aux ressources biotiques listés dans l'état de l'art, car ils ne sont pas opérationnels (non-disponibles dans la dernière version du logiciel utilisé). En tout état de cause, on rappelle que, sauf pour l'un d'entre eux (PPR), ils n'ont pas été identifiés comme pertinents pour le cas d'une ressource biotique issue de la simili-écosphère.

La valeur de chacun de ces indicateurs est ramenée à une année et à la production d'une tonne de miscanthus (la productivité des parcelles pour chacune de nos variantes étant, sauf mention contraire, similaire, la quantité produite dépend linéairement de la surface).

5.1.4.1 Empreinte eau

La culture de biomasse repose fortement sur la disponibilité et la qualité des ressources « support », et plus particulièrement sur le sol et l'eau, et donc de la disponibilité de cette dernière, et dans le cas de sols arides, sur la mise en place d'un système d'irrigation. L'évaluation des indicateurs sur la consommation d'eau et sur sa rareté/disponibilité est donc ici particulièrement pertinente. Les résultats fournis par les différentes méthodes de calcul d'une empreinte eau sont présentés en Figure 21.

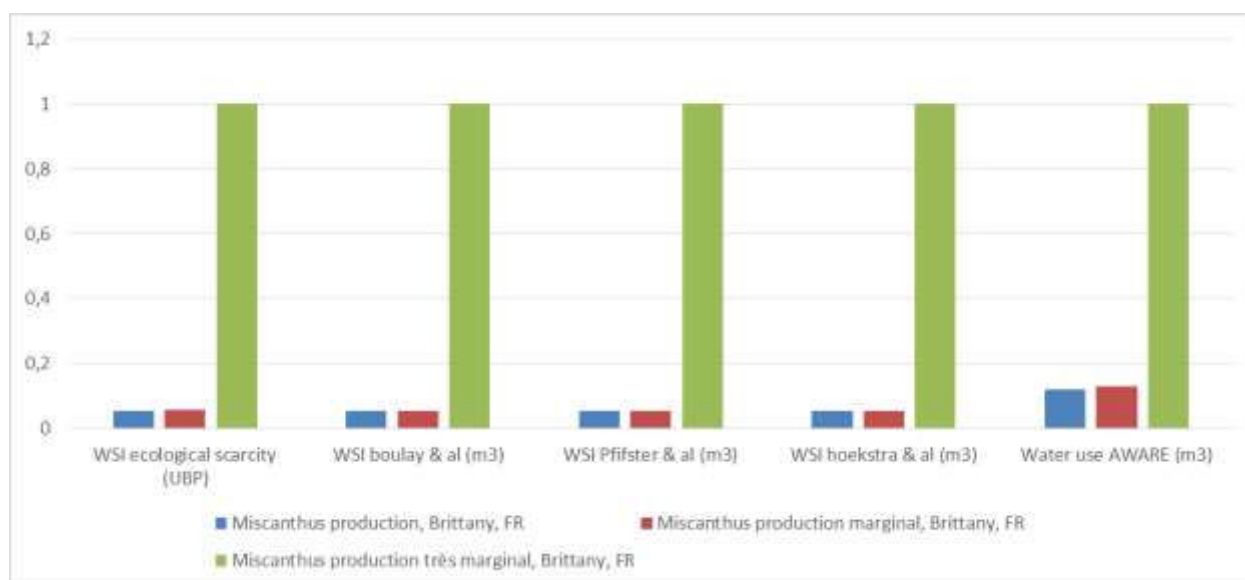


Figure 21 : comparaison des variantes de culture de miscanthus à partir des indicateurs d'empreinte eau

On constate ici des valeurs relativement proches concernant les variantes normales et marginales, qui ne se différencient que par un usage accru d'engrais nitraté dans le cas marginal, et pour lesquels la majorité de l'impact est issue de la culture des rhizomes. Le cas très marginal apparaît lui de façon logique bien plus impactant : comme on le constate sur les graphiques présentés en Figure 22, l'impact

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

issu des process d'irrigation et de production d'eau (irrigating et tap water), introduits pour répondre aux besoins en eau de la culture sur terre marginale représentent selon les méthodes entre 94 et 86 % de l'impact.

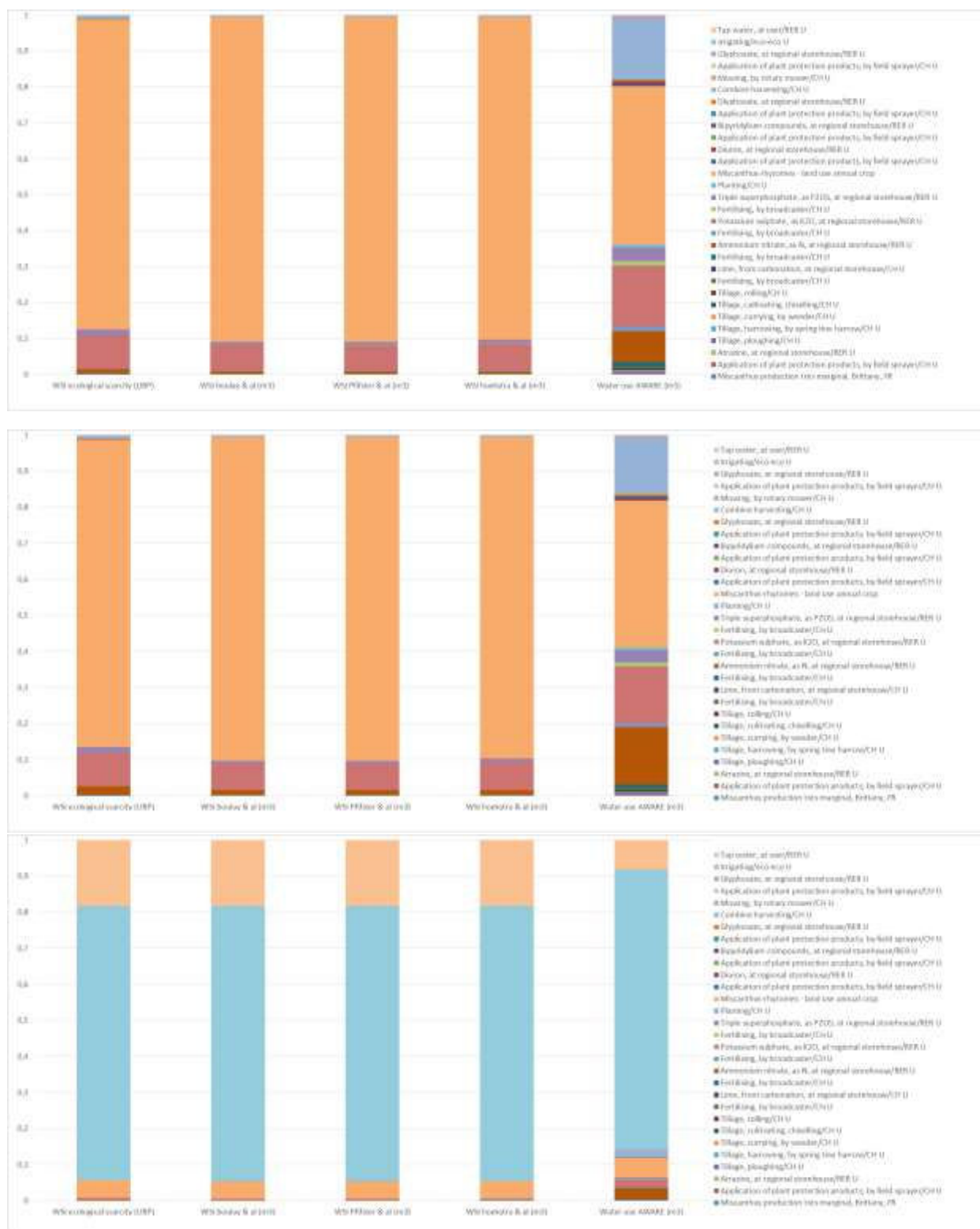


Figure 22 : détail par contributeur des résultats obtenus pour les trois variantes sur les indicateurs empreinte eau (non marginal (haut), marginal (milieu), très marginale (bas))

Cette différence entre méthodes est liée aux sources de prélèvement considérées : la consommation d'eau se décompose en effet en 1200 m³ issus de rivière, et 400 m³ issus du réseau, auxquels seront donc associés des facteurs de caractérisation différenciés. Par ailleurs les facteurs de caractérisation peuvent varier assez fortement : dans le cas de la méthode AWARE, l'électricité hydraulique consommée pour l'irrigation constitue un des principaux contributeurs.

Les indicateurs WSI (Water Scarcity Index) permettent ainsi une bonne discrimination de nos variantes, et caractérisent de façon efficace la dépendance de la culture sur sol marginal à la disponibilité en eau. Cet aspect, qui constitue un des éléments pouvant caractériser la renouvelabilité de la biomasse, est un élément à considérer dans une méthode d'évaluation de cette dernière.

5.1.4.2 Ecotoxicité terrestre

Les sols constituent l'autre ressource « support », concernée par la culture de biomasse, pour laquelle nous disposons de méthodes d'analyse d'impact opérationnelles. Nous nous intéressons ainsi dans un premier temps aux indicateurs concernant l'impact de la culture sur la biodiversité terrestre. Cette catégorie regroupe ici des indicateurs midpoint, avec des métriques variables (substance équivalente ou volume critique) et un indicateur endpoint, évaluant la disparition des espèces.

Les résultats concernant les trois variantes sont présentés en Figure 23.

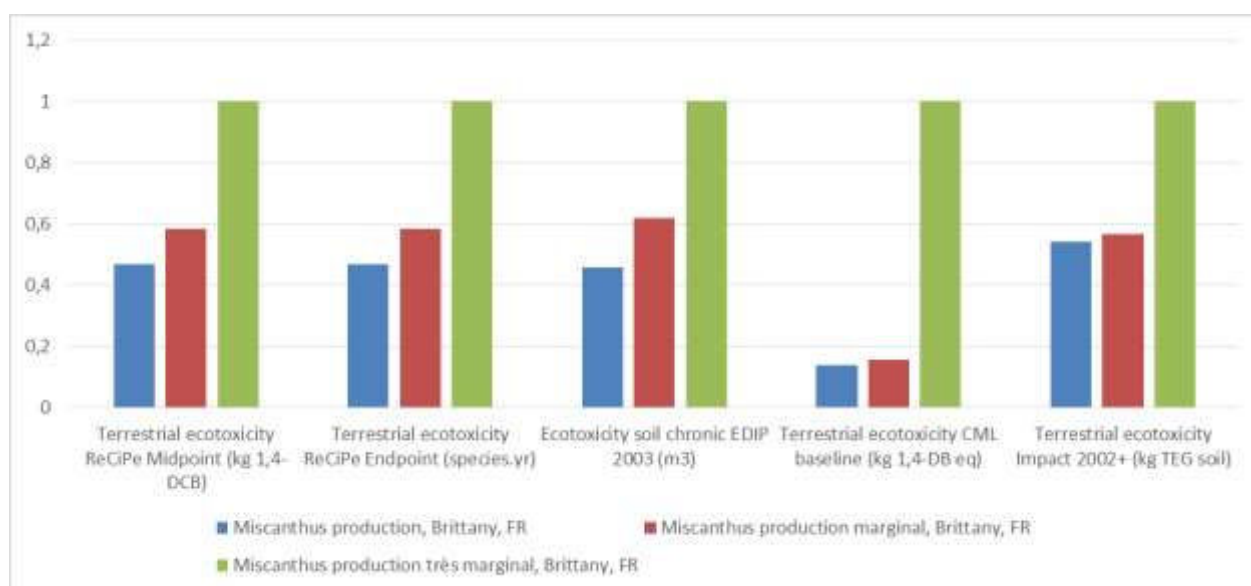


Figure 23 : comparaison des variantes de culture de miscanthus à partir des indicateurs écotoxicité terrestre

On constate là encore une bonne discrimination des variantes, dont l'intensité varie selon les méthodes, la méthode CML étant la plus différenciante. Dans le détail (Figure 24), on constate que dans le cas normal et le cas marginal, l'impact est fortement lié à l'usage et donc la production d'intrants de fertilisation (potassium et nitrate), ainsi qu'au process de récolte.

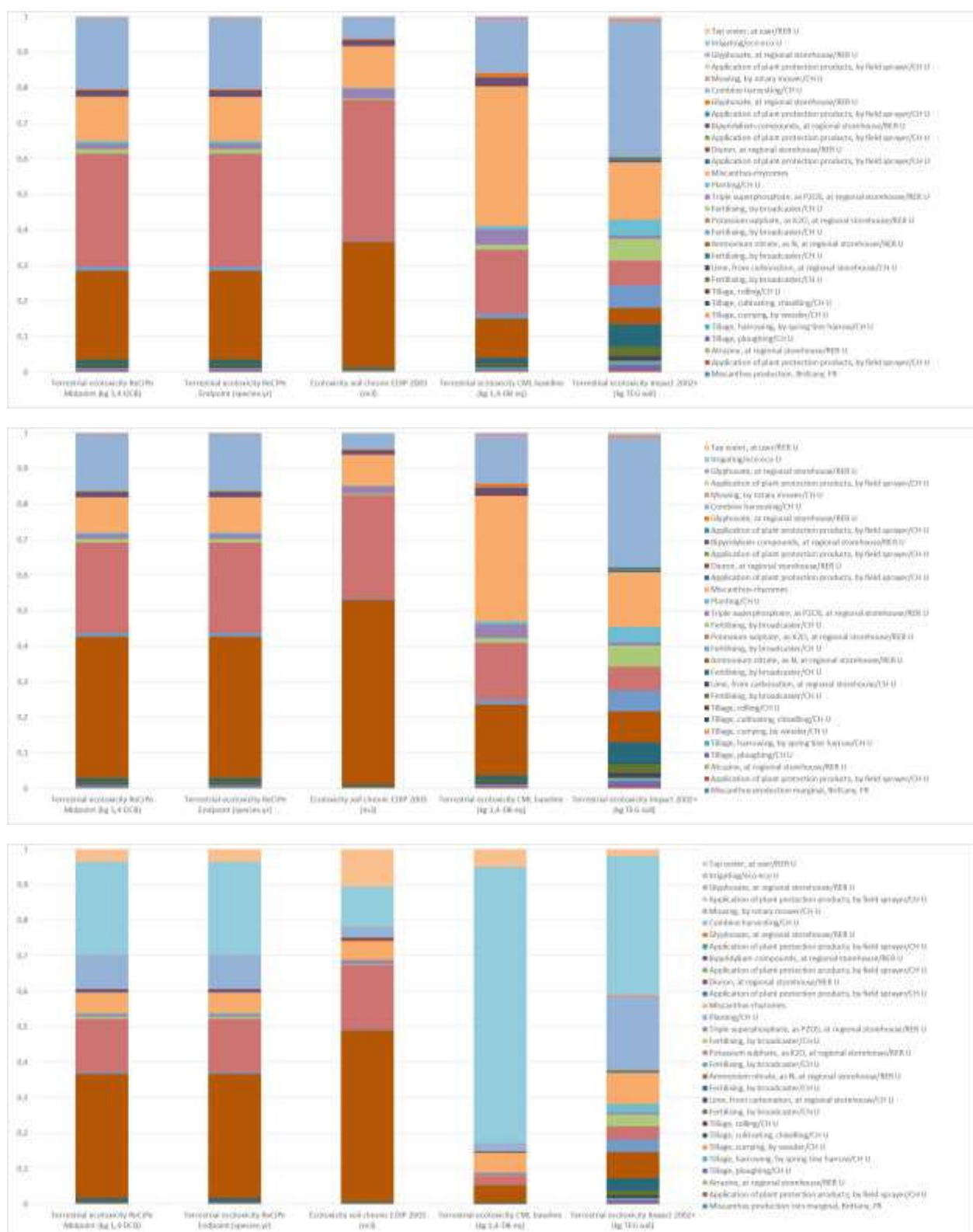


Figure 24 : détail par contributeur des résultats obtenus pour les trois variantes sur les indicateurs écotoxicité terrestre (non marginal (haut), marginal (milieu), très marginale (bas))

L'irrigation apparaît aussi fortement impactante dans le cas marginal : selon les méthodes, l'impact sur l'écotoxicité de ce process est principalement lié à la consommation de minéraux (ReCiPe), à la consommation de combustibles fossiles (EDIP) et au recours à l'électricité, et plus particulièrement au réseau de transport de l'électricité (CML, Impact 2002+).

Le poids des rhizomes dans le bilan environnemental s'explique de la même manière : leur production implique là aussi le recours aux intrants et à l'irrigation.

On constate donc que les indicateurs d'écotoxicité permettent de caractériser un autre aspect de la marginalité des sols : les plus gros contributeurs à l'indicateur sont ici les flux issus de la technosphère qui compensent cette marginalité (fertilisation, irrigation). On intègre ainsi dans cet indicateur des aspects liés au mode d'exploitation des sols dans le bilan environnemental global.

Ces indicateurs et les grandeurs associées ne permettent néanmoins pas d'évaluer la renouvelabilité de la culture : elles ne fournissent ainsi pas d'information sur la capacité de charge des écosystèmes, et sur la réversibilité des altérations conséquences de l'émission de polluant. Par ailleurs ces indicateurs ne renseignent pas sur la capacité des écosystèmes à maintenir leurs fonctions, notamment leur apport à la production biotique des sols concernés.

5.1.4.3 Usage des sols

Les indicateurs concernant l'usage des sols constituent complètent l'évaluation par l'ACV des impacts concernant les sols considérés comme une ressource. Ils constituent en effet une approche s'appuyant spécifiquement sur des flux élémentaires d'usage et de transformation. Même si, comme tout indicateur calculé en ACV, ils ne sont pas calculés de façon localisée, ils constituent dans le cas des cultures une information clé concernant l'usage des sols, usage constituant un aspect environnemental primordial.

Il est ici important de noter la variabilité des flux intégrés en fonction de la méthode considérée. Ainsi la méthode de l'environnemental footprint inclut 160 flux d'usage ou de transformation des sols, là où la méthode ReCiPe (endpoint et midpoint) n'en inclut que 91. Les méthodes ILCD et Ecoindicator 99 tiennent compte elles respectivement de 207 et 136 flux. Par ailleurs la nature des flux compris dans le périmètre peut changer.

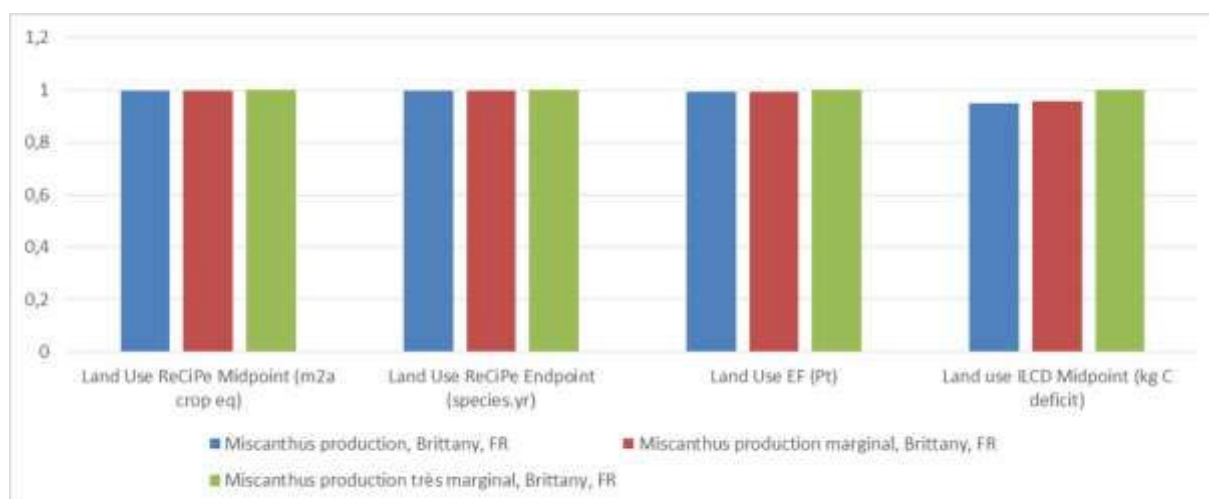


Figure 25 : comparaison des variantes de culture de miscanthus à partir des indicateurs d'usage des sols

On constate ici que la capacité de discrimination des variantes de notre étude par ces méthodes est faible : les indicateurs land use ne s'appuient que sur la prise en compte des flux d'usage et de transformation dans l'évaluation des impacts, et n'intègre pas par défaut l'influence des différentes caractéristiques de la culture considérée. Ces flux étant constants selon les variantes au premier plan,

la différenciation ne se fait que sur les contributions de second plan (usage et transformation des sols liés aux intrants et à l'irrigation). Ainsi dans le cas du miscanthus, le rechargement en carbone biogénique du sol, par captage de CO₂ atmosphérique, n'influe en rien sur nos résultats.

Afin de tester la prise en compte de cet effet sur un indicateur d'usage des sols, la méthode ILCD [Brandao & Canals, 2013], portant spécifiquement sur l'appauvrissement en matière carbonée des sols, a été modifiée pour permettre l'évaluation de l'effet puits carbone de la culture de miscanthus, ainsi que celui d'augmentation de la teneur en carbone organique du sol.

L'évolution de la quantité de SOC liée à l'usage des sols est ainsi par défaut évaluée, dans la méthode ILCD, par l'usage d'un facteur de caractérisation associé au flux élémentaire, dans notre cas « occupation, permanent crop ». La valeur retenue pour ce flux est de 4 kg C déficit/m².

Le miscanthus étant une plante pouvant avoir un effet notable sur cette caractéristique des sols sur lequel il est cultivé, plusieurs valeurs spécifiques, plus représentatives, sont disponibles dans la littérature. Issues de simulations ou de mesures, elles tiennent compte des conditions de culture (conditions climatiques) et des caractéristiques des sols, et rendent compte de l'influence de la culture sur la qualité des sols. Nous choisissons ainsi de remplacer le facteur de caractérisation de la méthode ILCD par une valeur issue d'une étude de Gabrielle & al [Gabrielle & al, 2014]. Elle est supposée représentative du cas étudié ici.

Tableau 14 : pertes en N_r, modifications du carbone organique des sols, rendement en matière sèches et rendement énergétique pour différentes culture de biomasse biocarburant [Gabrielle & al, 2014]

	Winter wheat	Sugar beet	Oilseed rape	Miscanthus on cropland	Miscanthus on fallow
<i>N₂O (direct)</i>					
CERES-EGC	1.04 (0.11–2.98)	1.49 (0.11–3.97)	0.42 (0.10–0.87)	0.23 (0.10–0.60)	0.23 (0.14–0.35)
NO	0.80	0.99	0.86	0.41	0.42
NH ₃	4.10	5.14	2.31	–0.16	–0.16
Nitrate	36.8	30.4	9.4	8.9	10.3
<i>Soil C stock variations (kg C ha⁻¹ yr⁻¹)</i>					
5		–34	41	575	577
<i>Crop yields (t DM or fresh tuber ha⁻¹)</i>					
7.53		82.2 ^a	4.19	13.1	13.2
<i>Energy yield, whole-plant basis (GJ ha⁻¹)</i>					
257		392	274	210	211

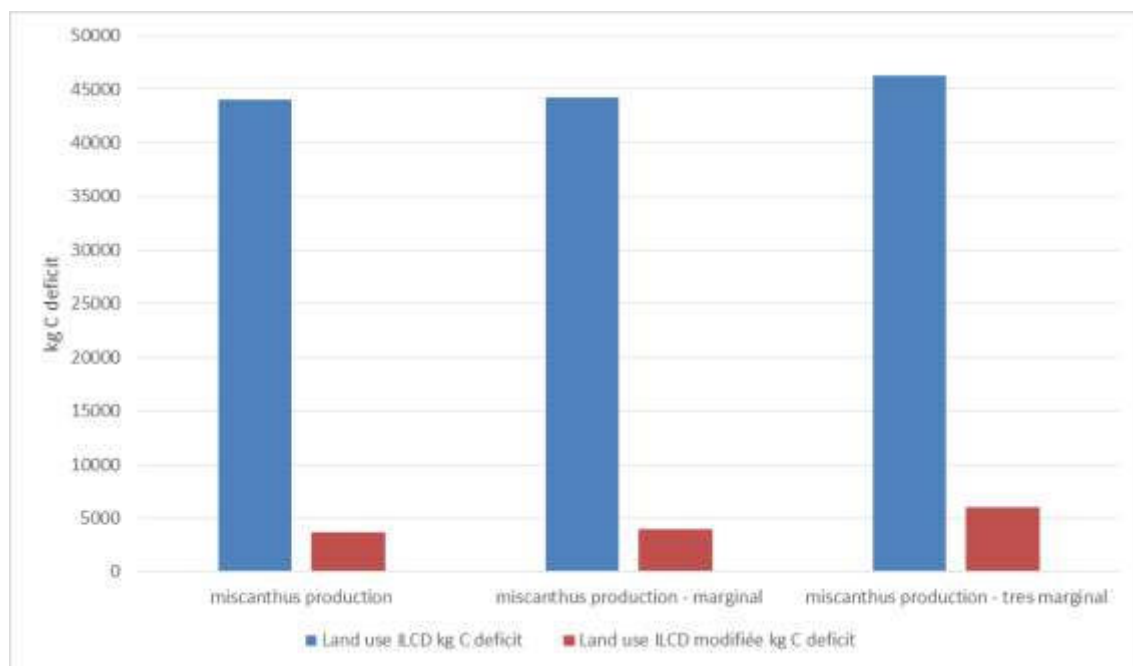


Figure 26 : comparaison des variantes sur l'indicateur « land use », à partir de la méthode ILCD et la méthode ILCD modifiée

Les résultats ont été obtenus en tenant compte du rendement du cas étudié (6 tonnes/ha/an) et de celui choisi comme référence pour la valeur spécifique au miscanthus (13,1 tonnes/ha/an) (la modification du carbone du sol est ici supposée dépendre de façon linéaire de la productivité). On constate que cette modification de la méthode permet une réduction notable de l'impact, ce quelle que soit la variante considérée. Cette approche, spécifique (la valeur retenue est liée à des conditions de culture précise), peut apparaître comme une base de la prise en compte de la renouvelabilité de la culture de miscanthus, puisqu'elle permet de tenir compte partiellement du lien existant entre biomasse et qualité des sols, et de caractériser l'effet de la culture sur sa propre pérennité.

La quantité de matière organique des sols (SOM) est ainsi largement considérée comme un indicateur caractérisant de façon forte la qualité des sols et des écosystèmes terrestres. Si elle ne rend pas compte de toutes les caractéristiques des sols, ni de tous les impacts potentiels que peut subir cette ressource (résistance à l'érosion, compacité, salinisation), elle peut être utilisée comme un proxy fiable pour décrire une bonne partie des propriétés physico-chimiques des sols [Brandao & Canals, 2012]. Dans le cas qui nous intéresse, celui de l'évaluation de la renouvelabilité des ressources biotiques terrestres, cet indicateur pourra notamment fournir une information quantifiée de l'impact sur la capacité de production biotique des sols utilisés pour la culture, et donc constituer un élément de l'évaluation de la renouvelabilité de la biomasse. La démarche nécessitera, dans une démarche d'évaluation de la criticité, la prise en compte d'autres grandeurs, qui permettront notamment d'introduire dans le calcul d'un indicateur la disponibilité initiale du carbone dans le sol, ainsi qu'une valeur permettant la prise en compte des besoins en matière organique des écosystèmes.

5.1.4.4 Conclusion

L'analyse menée ici concernant les indicateurs ayant trait à l'impact sur la qualité des sols (usage et impact sur les écosystèmes terrestres) nous amène à de premières conclusions. On constatera tout d'abord que notre cas d'étude ne montre pas de corrélation forte entre indicateurs portant sur des

impacts différents, et qu'aucun d'entre eux ne peut rendre compte seul de l'impact de la culture sur la qualité des sols.

Les indicateurs portant sur la consommation d'eau rendent nettement compte des besoins en irrigation d'un sol considéré comme aride. Cet aspect, important pour l'évaluation de la renouvelabilité d'une culture (en lien avec la renouvelabilité et la disponibilité de la ressource eau), ne constitue pas une évaluation suffisante de celle-ci.

Les indicateurs d'écotoxicité terrestre, s'ils rendent compte de l'effet sur la culture des écosystèmes terrestre, intègrent, comme pour toute ACV, les contributions des processus non localisés sur le site de culture. Par ailleurs ils ne rendent pas compte d'une éventuelle réversibilité des dommages, ou d'une capacité des écosystèmes à supporter la pollution.

Les indicateurs land use ont, eux, une capacité de discrimination faible dans notre cas. Si l'indicateur land use issu de la méthode ecological footprint a pour objectif, en présentant un indicateur agrégé recouvrant plusieurs fonctions des sols (et donc impact sur la qualité des sols) à fournir une grandeur unique d'évaluation de l'impact d'un système sur ceux-ci, cette agrégation rend plus complexe l'évaluation de leur renouvelabilité, plusieurs types d'impacts et de caractéristiques, parfois liés, étant considérés. L'indicateur ILCD semble permettre une meilleure discrimination, et il évalue une caractéristique et fonction du sol particulièrement pertinente pour l'évaluation de la renouvelabilité de la ressource cultivée : la capacité de production biotique. Son approche générique, portant sur le type d'usage des sols, ne rend néanmoins pas compte des spécificités de la plante cultivée, et des effets, positifs ou négatifs, des propriétés intrinsèques de celle-ci sur le carbone organique présent dans les sols.

Ainsi, si cette variété d'indicateurs permet malgré tout une bonne couverture et description des impacts sur les sols considérés comme ressource, ils ne constituent pas pour autant à proprement parler une évaluation de l'effet de la culture sur leur renouvelabilité.

Enfin, la renouvelabilité de la biomasse en tant que ressource n'est en l'état pas évaluée par ces indicateurs : ils fournissent des informations sur la dégradation des ressources support sur lesquelles s'appuie la croissance de la biomasse, mais n'évalue pas directement la durabilité de la biomasse en tant que telle. Cette évaluation, et le développement d'un nouvel indicateur, pourra néanmoins s'appuyer sur les données et modèles déjà développés, modèles pouvant s'appuyer sur des concepts et grandeurs pertinents pour notre étude.

5.1.5 Application de la proposition méthodologique sur le cas d'étude

Afin d'évaluer la pertinence de l'approche, et de mesurer la représentativité de l'indicateur vis-à-vis de la notion de renouvelabilité, nous testons ici la proposition méthodologique pour l'évaluation d'un indicateur de criticité sur les ressources biotiques anthropiques végétales sur le cas d'étude, en définissant une nouvelle variante. Notre cas d'étude compare ainsi :

- La culture de miscanthus sur 1 ha de terres non marginales, sans culture préalable.
- La culture de miscanthus sur 1 ha de terres peu marginales, appauvries.
- La culture de miscanthus sur 1 ha de terres très marginales, appauvries et nécessitant une irrigation.
- La culture de biomasse énergétique en rotation sur 1 ha de terres non marginales, sans culture préalable

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Cette nouvelle variante est modélisée sur la base du travail de Lesur-Dumoulin & al [Lesur-Dumoulin & al, 2018]. Nous considérons ainsi l'un des prototypes de gestion de la culture de biomasse énergétique défini dans leur étude, impliquant une rotation de culture n'impliquant pas le miscanthus (Figure 27).

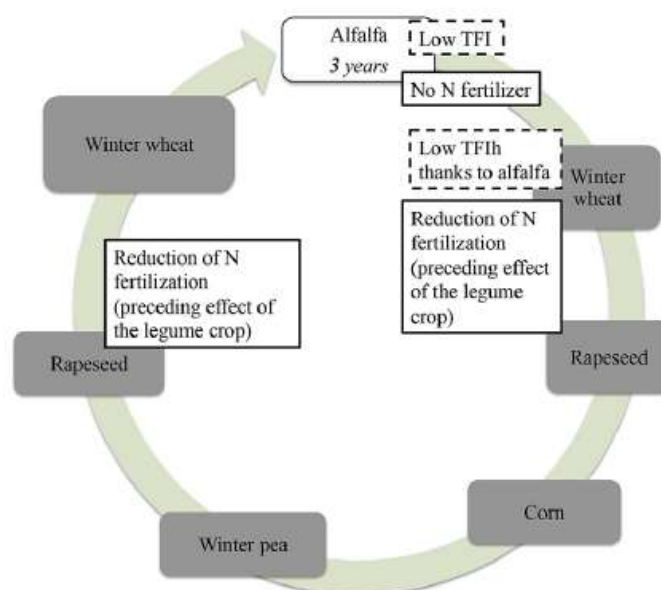


Figure 27 : rotation des cultures simulée [Lesur-Dumoulin & al, 2018]

La simulation, basée sur des process existants dans la base de données ecoinvent, prend en compte l'effet de la rotation sur le mode de culture, et notamment la réduction du recours aux intrants azotés. Les valeurs retenues sont issues du Tableau 15. Le rendement moyen de la culture est ici de 7,5 tonnes/ha/an.

Tableau 15 : caractéristiques de la culture en rotation considérée pour le cas d'étude, issues de [Lesur-Dumoulin & al, 2018]

Cropping systems		NoMisc
Alfalfa	Tillage ¹	MP
	N rate ² (kg ha ⁻¹)	0
	P and K rate ³ (kg ha ⁻¹)	90 – 175
	Crop Protection ⁴	-
Oil seed rape	Tillage	RT
	N rate (kg ha ⁻¹)	120*
	P and K rate (kg ha ⁻¹)	50 – 50
	Crop Protection	0F – 0I
Corn	Tillage	MP
	N rate ((kg ha ⁻¹)	140
	P and K rate (kg ha ⁻¹)	40 – 40
	Crop Protection	2F – 1I
Spring/winter pea	Tillage	MP
	N rate ((kg ha ⁻¹)	0
	P and K rate (kg ha ⁻¹)	40 – 40
	Crop Protection	1.5F – 1.5I
Winter wheat	Tillage	RT
	N rate (kg ha ⁻¹)	150 (110*)
	P and K rate (kg ha ⁻¹)	10 – 50
	Crop Protection	2F – 0I – 0R

¹ MP: mouldboard ploughing; RT: reduced tillage. ² * indicates that N rate is reduced thanks to the presence of a legume as preceding or ante-preceding crop. ³ Assuming that the soils had adequate amounts of available P and K, winter wheat and sunflower (for INT) received no P or K fertilizer. The removal of P and K by straw export in MPRWAW and NoMisc was compensated when relevant by an additional supply of 50 kg ha⁻¹ of P and 10 kg ha⁻¹ of K. ⁴ Number of fungicide (F), insecticide (I) and growth regulator (R) applications. Herbicide applications are not described since they were similar across crops and cropping systems, except for winter wheat and oilseed rape

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Les deux variantes simulées sont évaluées avec la méthode land use ILCD modifiée. Le facteur de caractérisation CF_{ASOCRE} est obtenu en première approche, par l'évaluation des valeurs AMD pour la France et en moyenne mondiale. La valeur française est issue de [Meersmans & al, 2012], la valeur mondiale de [ITPS & FAO, 2015].

On obtient alors :

$$AMD_{France} = 7,36 \text{ kg C/m}^2$$

$$AMD_{World} = 5,21 \text{ kg C/m}^2$$

$$CF_{ASOCRE} = 0.71$$

La comparaison des variantes selon les méthodes donne ainsi :

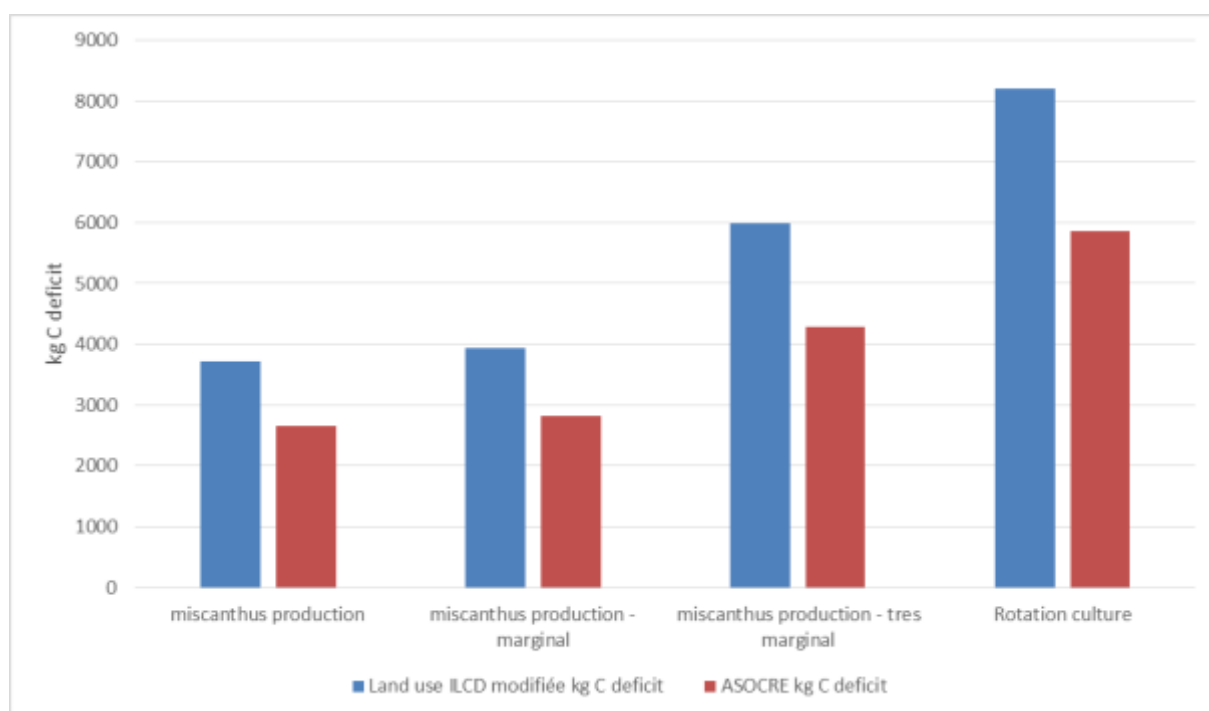


Figure 28 : comparaison des variantes de production du miscanthus et de production de biomasse énergétique par rotation des cultures, indicateur land use ILCD modifié et ASOCRE

On constate ainsi que l'approche ASOCRE a tendance dans notre cas à réduire les différences entre variantes. Les valeurs de AMD considérées montrent en effet que la disponibilité du SOC est plus grande en France que dans le monde.

La méthode ASOCRE transcrit donc cette faible criticité, relativement à la situation mondiale : un épuisement du carbone biogénique du sol a une importance moindre en France qu'en moyenne dans le monde.

Dans notre cas, toutes les variantes se voient affecter la même valeur de CF_{ASOCRE} . Chacune des variantes est en effet considérée comme cultivée dans la même zone géographique, et donc à un contexte de disponibilité de SOC similaire.

5.1.6 Conclusion

Ce cas d'étude nous a ici permis de tester la pertinence de différentes méthodes d'AICV pour l'évaluation de la renouvelabilité d'une production de biomasse. Si la plupart des méthodes existantes et opérationnelles aujourd'hui considérées dans notre cas d'étude rendent compte d'un impact sur les ressources support à la culture, elles ne permettent pas une à une d'évaluer la renouvelabilité de celle-ci.

L'indicateur ILCD présente un intérêt particulier, puisqu'il cherche à évaluer l'impact sur la capacité de production biotique des sols, caractéristique fortement liée à la durabilité d'une culture de biomasse. Le cas d'étude a néanmoins mis en avant ses limites pour décrire les spécificités des plantes mises en culture, et leur influence sur le SOC. Il apparaît ainsi pertinent de caractériser précisément, sur la base de la littérature, de mesures ou de simulations, l'influence de la culture et donc de l'occupation des sols sur cette valeur de SOC.

La méthode ASOCRE, qui a pour objectif d'évaluer la disponibilité du carbone dans le sol sur une zone donnée, permet de positionner l'impact considéré dans un contexte donné. Les résultats obtenus ici traduisent la relative disponibilité des sols pour la production biotique en France. En ce sens, l'indicateur apparaît comme un indicateur *Land use* pondéré. La méthodologie proposée dans cette étude s'apparente donc plus à une méthodologie de pondération que d'évaluation. Une étude de cas intégrant comme paramètre la localisation de la culture, et donc des contextes différents, pourra permettre une meilleure analyse de la représentativité et de la capacité de discrimination de la méthode.

5.2 Cas d'étude maisons INCAS : prise en compte des ressources énergétiques renouvelables

Notre deuxième cas d'étude se focalise sur les ressources énergétiques, notamment renouvelables, et la façon dont elles sont prises en compte en ACV. La majorité des énergies renouvelables sont ainsi des ressources dites de flux, considérées comme non épuisables à l'échelle humaine. La notion de renouvelabilité, et donc celle de criticité qui peut servir de support au calcul d'un indicateur, ne sont ainsi plus opérantes : la démarche doit ici être adaptée. Les maisons INCAS servent ici de support à l'analyse des relations pouvant exister entre les impacts environnementaux liés à la consommation d'énergie renouvelable de flux, et à leur capacité à rendre compte de leur renouvelabilité.

5.2.1 Présentation des maisons INCAS

La plateforme énergétique bâtiment INCAS, portée par l'Institut National de l'Energie Solaire et le CEA, constitue une infrastructure expérimentale de référence en ce qui concerne l'énergie du bâtiment. Localisée au Bourget du Lac, près de Chambéry, elle est constituée de quatre maisons de 100m² construites selon quatre modes constructifs, instrumentées par plus de 1000 capteurs et qui permettent de simuler le comportement d'occupants selon différents scénarios. Cette plateforme a notamment pour but de tester en conditions quasi réelles des équipements permettant d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et leur confort¹³.

¹³ <http://www.ines-solaire.org/fr/recherche-innovation/energetique-batiment/>



Figure 29 : les trois premières maisons INCAS construites sur le site de l'INES

Ces bâtiments ont été très largement étudiés et ont servi de base pour des projets de recherche et le développement d'outils de simulation du comportement des bâtiments (voir par exemple [Brun & al, 2011]). Ils ont par ailleurs fait l'objet de plusieurs ACV [Roux & al, 2016][Pannier, 2014][Fouquet & al, 2014].

La conception de ces bâtiments s'est faite dans une perspective de haute performance énergétique, en respectant les principes de la conception bioclimatique et par des choix de modes constructifs très performants. L'objectif visé correspond ainsi aux performances définies par le label allemand «PassivHaus » qui limite les besoins de chauffage à 15 kWh/m²/an, la consommation énergétique totale (chauffage, climatisation, ECS, auxiliaires et électricité domestique) à 120 kWh/m²/an et le débit d'infiltration d'air à 0,6 Vol/h.

Les quatre variantes constructives sont présentées dans le Tableau 16.

Tableau 16 : modes constructifs pour les murs des maisons INCAS [Pannier, 2014]

Dénomination	Composition	Remarques
I-DM	Double Mur : deux couches de blocs creux en béton séparés par de la laine de verre	Inertie lourde 1ère maison bâtie
I-BB	Béton Banché : enveloppe en béton et isolation par l'extérieur avec du polystyrène extrudé	Inertie lourde 2nde maison bâtie
I-OB	Ossature Bois et laine de bois pour l'isolation	Inertie légère 3ème maison bâtie
I-MA	Briques Monomur	Inertie lourde 4ème maison bâtie

Notre étude se basera sur les caractéristiques de la deuxième maison (I-BB), et sur une simulation thermique dynamique de celle-ci. Cette simulation, menée sur le logiciel Pleiades-COMFIE. Elle repose sur les paramètres suivants [Pannier, 2014] :

- Consigne de température est de 19°C lorsqu'occupation du bâtiment. 16°C lors d'une inoccupation de moins de 48h. 7°C lors d'une inoccupation de plus de 48h.
- Occupation par 1,9 adultes équivalent. Occupants absents en journée, sauf le mercredi après-midi et les week-ends. Absents lors des semaines de vacances. Scénario issu de la RT2012
- Puissance dissipée : 1,14 W/m² lorsque bâtiment inoccupé et la nuit, aucune puissance dissipée pendant les semaines de vacances, 5,70 W/m² le reste du temps.
- Eclairage : adaptation de la puissance dissipée pour correspondre aux hypothèses de la RT 2012 (puissance dissipée de 1,4 W/m² ajoutée au scénario, de 7h à 9h et de 19h à 22h).

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

- Ventilation externe : ventilation mécanique contrôlable à double flux avec un échangeur de chaleur d'efficacité 90%, débit entrant, bypassé en été.
- Ventilation externe estivale : ouverture des fenêtres pour une température supérieure à 27°C dans une zone. Les fenêtres sont refermées lorsque la température de la zone repasse en dessous de 24°C. Débit de surventilation fixé à 15 Vol/h.
- Occultations : protections mobiles de type volets roulants sur toutes les fenêtres. 10% d'occultation en hiver, 40% l'été et 80% en période de vacances.
- Ponts thermiques issus du catalogue RT2012
- Fichier météo Macon RT2012

Les maisons INCAS sont par ailleurs équipées d'infrastructures de production locale d'eau chaude sanitaire (ECS) et d'électricité photovoltaïque. On considère ainsi :

- 3 m² de panneaux solaires thermiques, et un ballon de 200l à appoint électrique intégré.
- 39,3 m² de panneaux photovoltaïques (PV) en silicium polycristallin installés en surimposition en toiture, puissance nominale 5 kWc.

L'outil de STD pleiades+COMFIE permet ainsi, à partir de ces éléments, l'évaluation de besoins en énergie finale des différents postes de consommation dans le bâtiment, ainsi que la quantité d'énergie produite localement. On obtient ainsi les résultats suivants [Pannier, 2014] :

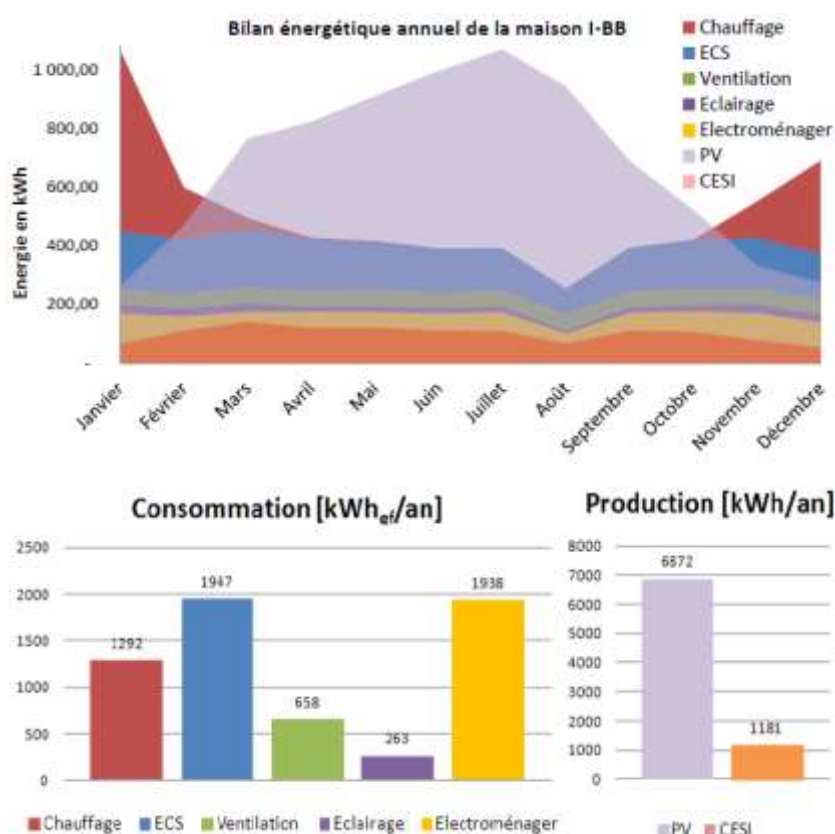


Figure 30 : bilan énergétique annuelle de la maison INCAS I-BB [Pannier, 2014]

Notons que la consommation d'ECS évaluée regroupe à la fois la production solaire (61 % du total) et la production en appoint (39 %). Par ailleurs on constate que la production PV est supérieure à la somme des besoins en énergie finale. L'analyse du détail au pas horaire des valeurs de besoins et de productions permet de constater que 22 % de la production PV peut être utilisée en

autoconsommation, sous l'hypothèse que l'électricité sert à répondre à l'ensemble des besoins. Ces éléments sont à la base de notre cas d'étude.

5.2.2 Objectif et périmètre de l'étude : la problématique des vecteurs énergétiques, prise en compte des ressources de flux

L'objectif est ici de tenter de déterminer des relations entre les impacts issus de vecteurs énergétiques renouvelables de flux et de stock. Dans l'optique d'intégrer ces ressources, considérées comme inépuisables, dans un indicateur portant sur la renouvelabilité, il convient en effet d'identifier des éléments quantitatifs permettant d'approcher ce concept, dans un cas où il n'est pas stricto sensu pertinent.

Afin de simplifier l'analyse des résultats, nous limiterons ici notre périmètre à deux postes de consommation énergétique (chauffage et ECS) ainsi qu'aux productions locales d'électricité PV et d'ECS. Par ailleurs nous intégrerons dans le bilan un flux correspondant aux apports solaires utiles pour le chauffage de la maison.

Les variantes considérées porteront sur les choix de vecteurs énergétiques :

- Une variante électrique
- Une variante chauffage et ECS biomasse
- Une variante chauffage et ECS gaz naturel

Par ailleurs notre simulation intégrera plusieurs modes d'allocation des impacts en ce qui concerne la production locale de PV :

- Exportation de l'intégralité de la production sur le réseau, impacts évités (par défaut)
- Prise en compte de l'autoconsommation (20%) et exclusion de la part non autoconsommée et du pourcentage de panneaux correspondant du périmètre

Les éléments inclus dans le périmètre, selon le mode d'allocation, sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 17 : périmètre considéré selon la méthode d'allocation choisie

	100% export	20% autoconsommation + exclusion
Variante biomasse	- Energie biomasse consommée pour l'ECS et le chauffage - Ballon d'eau chaude - Panneaux solaires thermiques - Panneaux solaires PV - Electricité PV exportée (impacts évités)	- Energie biomasse consommée pour l'ECS et le chauffage - Ballon d'eau chaude - Panneaux solaires thermiques
Variante électricité	- Energie électrique (réseau) consommée pour l'ECS et le chauffage - Ballon d'eau chaude - Panneaux solaires thermiques - Panneaux solaires PV - Electricité PV exportée (impacts évités)	- Energie électrique consommée pour l'ECS et le chauffage (réseau - 20% d'autoconsommation) - Ballon d'eau chaude - Panneaux solaires thermiques - 20% Panneaux solaires PV

Variante gaz naturel	-	Energie gaz naturel consommée pour l'ECS et le chauffage	-	Energie gaz naturel consommée pour l'ECS et le chauffage
	-	Ballon d'eau chaude	-	Ballon d'eau chaude
	-	Panneaux solaires thermiques	-	Panneaux solaires thermiques
	-	Panneaux solaires PV		
	-	Electricité PV exportée (impacts évités)		

5.2.3 ICV : modélisation du système, paramètres clés

Le système considéré inclut les infrastructures de production et de distribution de l'énergie produite et consommée, que la production ait lieu localement ou non.

Le périmètre intègre ainsi :

- 39,3 m² de panneaux photovoltaïques
- 3 m² de panneaux solaires thermiques
- Un ballon d'eau chaude de 200l, avec appoint électrique dans le cas de la variante électrique
- La consommation d'énergie pour répondre aux besoins de chauffage et d'ECS
- L'exportation de l'électricité photovoltaïque produite localement, selon le ratio d'autoconsommation considéré

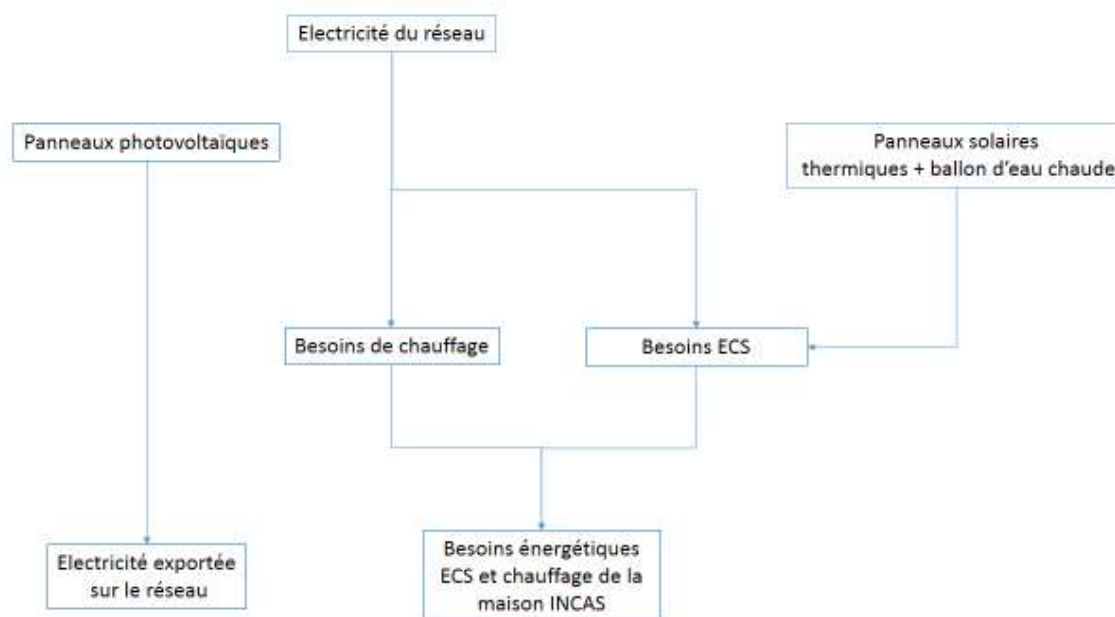


Figure 31: schéma de principe de la simulation des besoins en chauffage et ECS et de la production PV et solaire thermique pour la maison INCAS variante électrique et 100% électricité PV injectée sur le réseau

5.2.4 AICV : état des lieux des méthodes et analyse de leur capacité à caractériser la renouvelabilité

5.2.4.1 Evaluation de 15 indicateurs midpoints par IMPACT 2002+

En première approche, nous comparons les variantes énergétiques, en considérant une autoconsommation nulle, et donc une exportation à 100% de la production PV, selon la méthode impact 2002+, méthode généraliste, afin d'identifier les impacts prépondérants pour chaque vecteur.

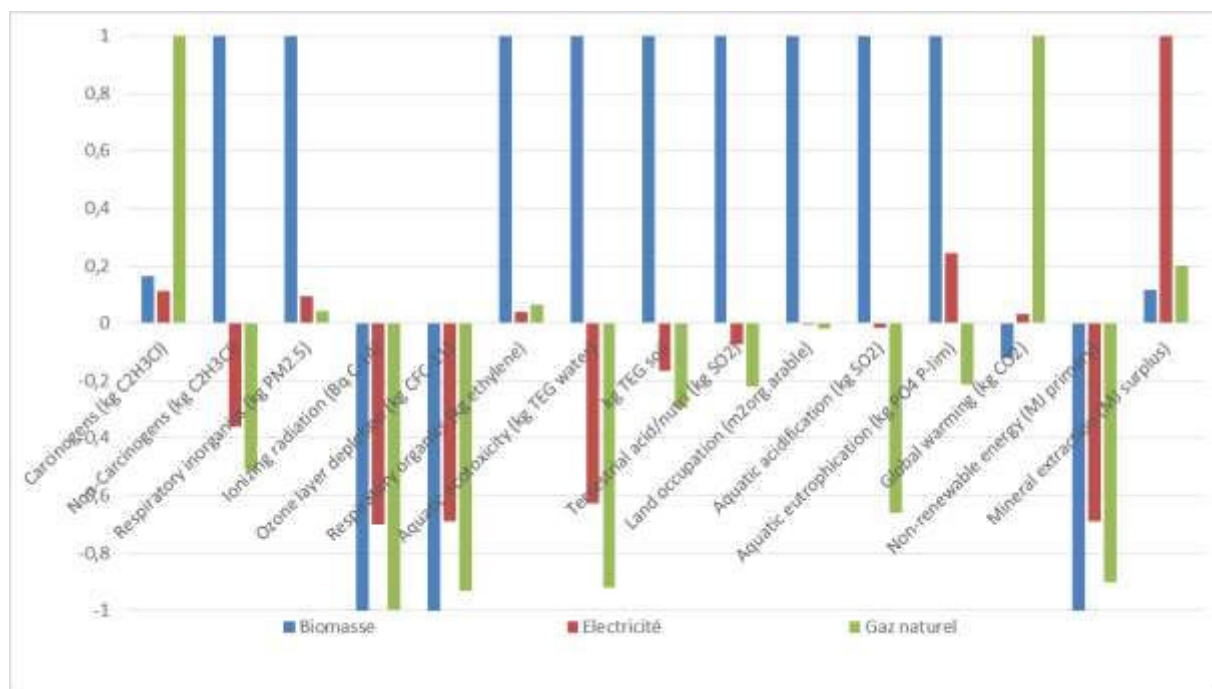


Figure 32 : comparaison des variantes avec la méthode impact 2002+, 100% export PV, impacts évités

Les résultats obtenus ici caractérisent clairement les spécificités des différents vecteurs mobilisés pour répondre aux besoins énergétiques considérés. Ainsi la contribution au réchauffement climatique est logiquement la plus grande dans le cas de la variante gaz naturel, et les impacts liés aux sols, leurs usages ainsi que les impacts sur les écosystèmes aquatiques et terrestres sont eux les plus importants dans le cas de la variante biomasse.

L'hypothèse d'une exportation totale de l'électricité produite localement, ainsi que l'utilisation de la méthode des impacts évités pour rendre compte de l'effet de cette exportation sur le bilan environnemental conduit ici à l'obtention d'un grand nombre de valeurs négatives pour les impacts considérés.

Nous menons donc ici une deuxième évaluation, en modifiant le périmètre de l'analyse : en considérant une autoconsommation de 20% de l'électricité, seule cette quantité est incluse dans le périmètre. La quantité correspondante de panneau photovoltaïque est elle aussi intégrée à l'analyse. La part exportée, ainsi que la fraction de panneau PV correspondant à cette électricité exportée sont ainsi exclues du périmètre.

La prise en compte de l'autoconsommation se traduit dans le cas de la variante électricité par une réduction de la quantité d'électricité du réseau consommée, égale à 20% de la quantité d'électricité PV produite. Dans le cas des variantes biomasse et gaz naturel, qui ne mobilisent pas, dans le périmètre défini, de consommation électrique, la production d'électricité photovoltaïque n'est ici pas considérée.

La comparaison de variantes selon la méthode impact 2002+ donne ainsi :

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

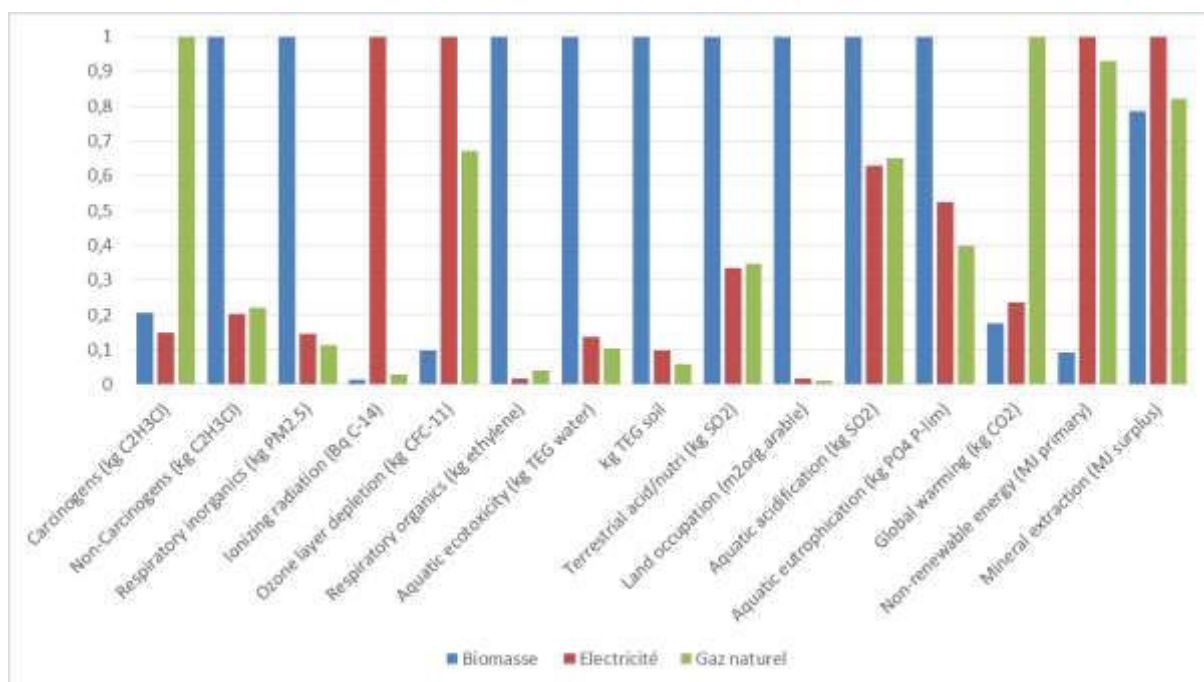


Figure 33 : comparaison des variantes avec la méthode impact 2002+, 20% autoconsommation, exportation exclue du système

La table suivante liste les impacts les plus importants pour chaque variante considérée.

Tableau 18 : impacts les plus importants pour chaque variante considérée. En orange : les indicateurs midpoints ayant un effet sur la santé humaine, en bleu : les indicateurs midpoints ayant un effet sur la qualité des écosystèmes, et en gris : les indicateurs midpoints ayant un effet sur l'épuisement des ressources

Impacts les plus importants	
Biomasse	Non-carcinogen Respiratory inorganics Respiratory organics Aquatic ecotox kg TEG soil, Terrestrial acid/nutri Land occupation Aquatic eutrophisation
Electricité	Ionizing radiation Ozone layer depletion Non-renewable energy Mineral extraction
Gaz	Carcinogens Global warming Non-renewable energy

On note que chaque vecteur impacte toujours les ressources supports sur lesquelles leur production repose :

- La biomasse a un impact sur la qualité des écosystèmes terrestres et aquatiques
- L'électricité (photovoltaïque) impacte elle la consommation d'énergie primaire non renouvelable et l'extraction des minéraux
- Le gaz impacte la consommation d'énergie primaire non renouvelable

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Par ailleurs, les résultats obtenus sont ici fortement dépendants de la définition du périmètre et du choix du mode d'allocation pour chaque vecteur considéré. La prise en compte dans une même analyse d'énergie consommée, produite localement ou non nécessite ainsi la mise en place d'hypothèses censées être représentatives des caractéristiques du système étudié.

Ces choix méthodologiques sont pour partie liés aux caractéristiques des ressources considérées, et à leur caractère limité ou illimité. Ils ne permettent néanmoins pas de rendre compte clairement du caractère renouvelable de la ressource énergétique mobilisée.

5.2.4.2 Evaluation des indicateurs de demande d'énergie de la méthode CED

Les mêmes comparaisons ont été menées en se basant sur la méthode CED [Frischknecht & al, 2007]. Cette méthode permet d'obtenir une valeur cumulant les contributions en énergie primaires des différents vecteurs mobilisés pour la consommation totale d'énergie. Elle permet ainsi de rendre compte de la structure du mix énergétique pour un système donné.

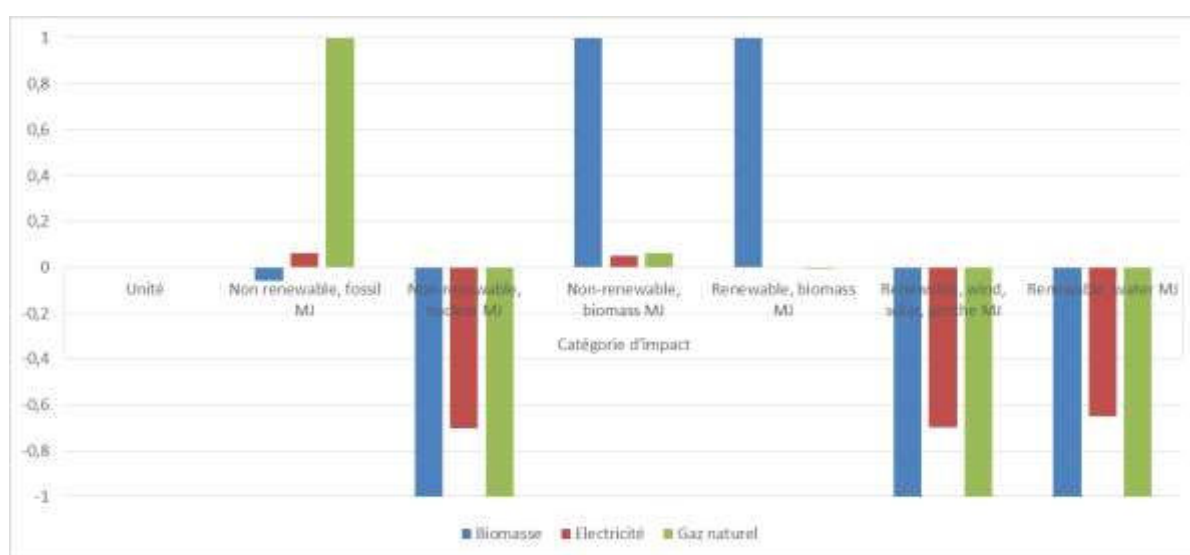


Figure 34 : comparaison des variantes avec la méthode CED, 100% export PV, impacts évités

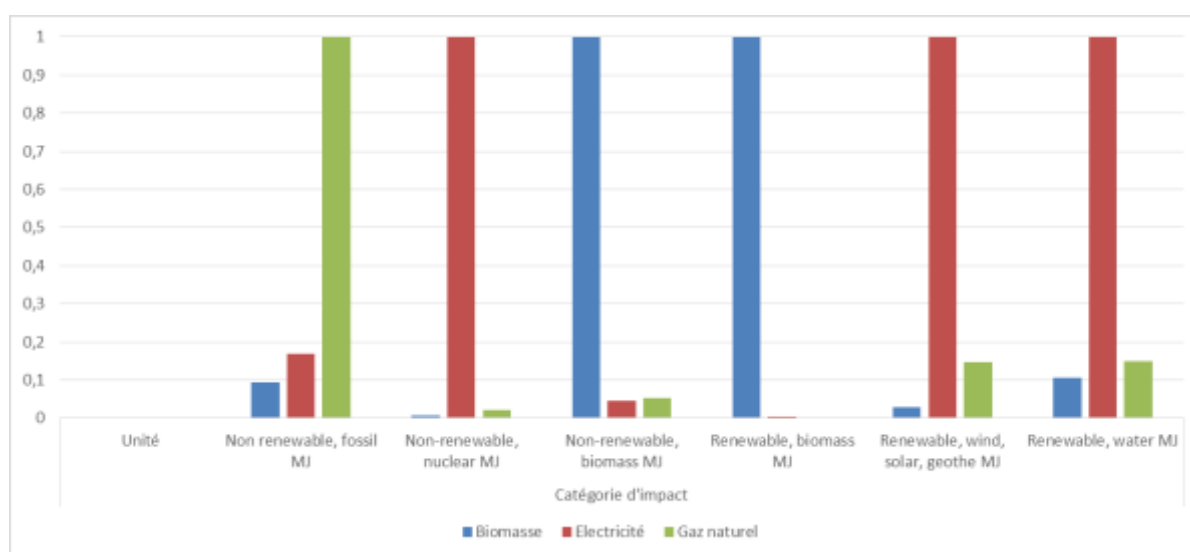


Figure 35 : comparaison des variantes avec la méthode CED, 20% autoconsommation, exportation exclue du système

Là encore, on constate des résultats fortement dépendant de la définition des frontières du système, et de la méthode d'allocation choisie pour les productions locales d'énergie. On note que la méthode CED n'intègre pas la consommation d'énergie photovoltaïque dans son périmètre. Dans notre cas, l'influence de la production et de la consommation de cette énergie n'est ici caractérisée que par ces choix méthodologiques.

5.2.4.3 Evaluation de l'indicateur d'épuisement des ressources de la méthode CML

Enfin, nous comparons nos variantes sur la base de l'indicateur d'épuisement des ressources de la méthode CML.

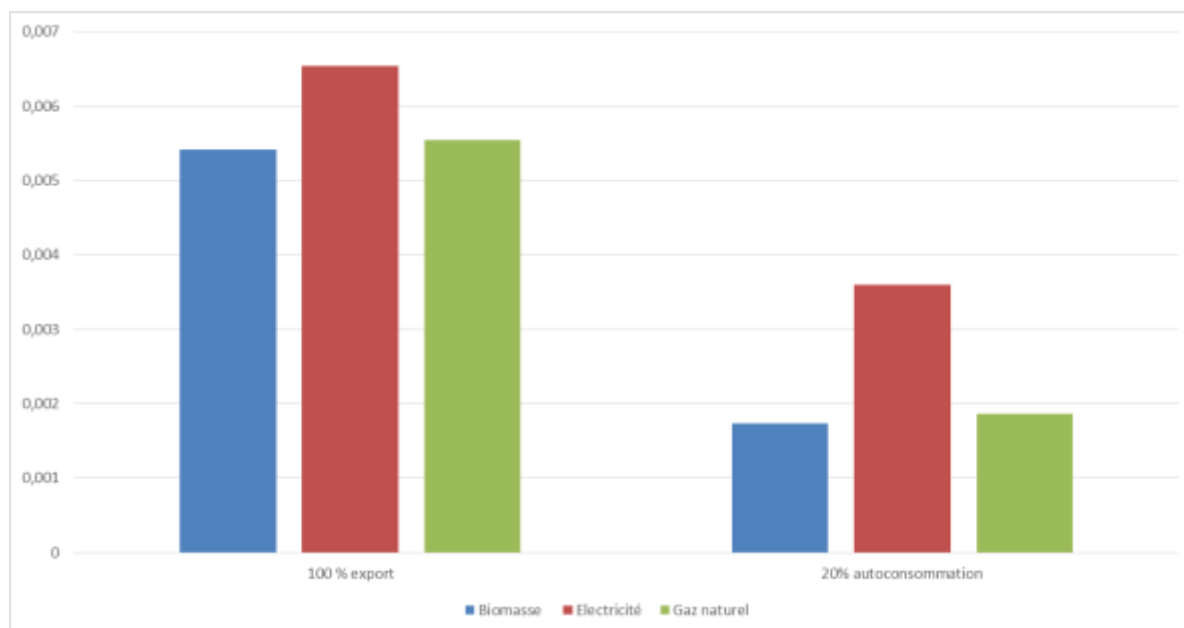


Figure 36 : comparaison des variantes avec l'indicateur ADP de la méthode CML, 100% export de PV (gauche) et 20% autoconsommation, exportation exclue du système (droite)

On note là encore la forte influence des méthodes d'allocation sur les résultats. La plus forte différenciation des variantes dans le cas autoconsommation est ici liée à l'exclusion des panneaux photovoltaïques du périmètre des variantes biomasse et gaz naturel. De la même façon la valeur de l'indicateur est supérieure dans le cas 100% export pour la variante électrique : les panneaux photovoltaïques sont dans ce cas intégralement inclus dans le périmètre, là où seul 20% de ceux-ci le sont pour la variante autoconsommation. La diminution de l'impact liée à une production évitée par l'exportation de la production locale d'électricité n'est ici pas compensée par l'influence de cette modification de périmètre.

L'épuisement des ressources abiotiques apparaît ainsi ici comme pouvant être un marqueur pertinent des caractéristiques des flux abiotiques renouvelables, et notamment de la pérennité de leur exploitation par les techniques actuelles. Ce résultat tend à valider la proposition méthodologique pour un indicateur de criticité des ressources abiotiques naturelles.

5.2.5 Application de la proposition méthodologique sur le cas d'étude

Nous appliquons ici la proposition méthodologique de prise en compte de la criticité des ressources abiotiques mobilisées pour l'exploitation d'une ressource énergétique abiotique renouvelable. Nous

incluons dans l'analyse l'ensemble des énergies renouvelables de flux comprises dans le périmètre. Le calcul de l'indice de criticité se base sur les éléments présentés dans le

Tableau 19.

Tableau 19 : éléments pour le calcul des indices de criticité associés aux ressources renouvelables abiotiques de flux dans le cas des maisons INCAS

EnR consommée	Process associés
Part renouvelable de l'électricité du réseau	Électricité hydraulique Électricité éolienne Electricité PV réseau
Electricité photovoltaïque produite localement	Panneaux photovoltaïques
Solaire thermique	Panneaux solaires thermiques Ballon d'eau chaude

L'analyse des flux d'inventaires correspondant aux process pris en compte pour chaque vecteur énergétique, ainsi que les quantités associées aux process dans la simulation globale nous permettent de déterminer les indices de criticité pour chaque flux d'énergie abiotique consommée pour chacune de nos variantes (Figure 37).

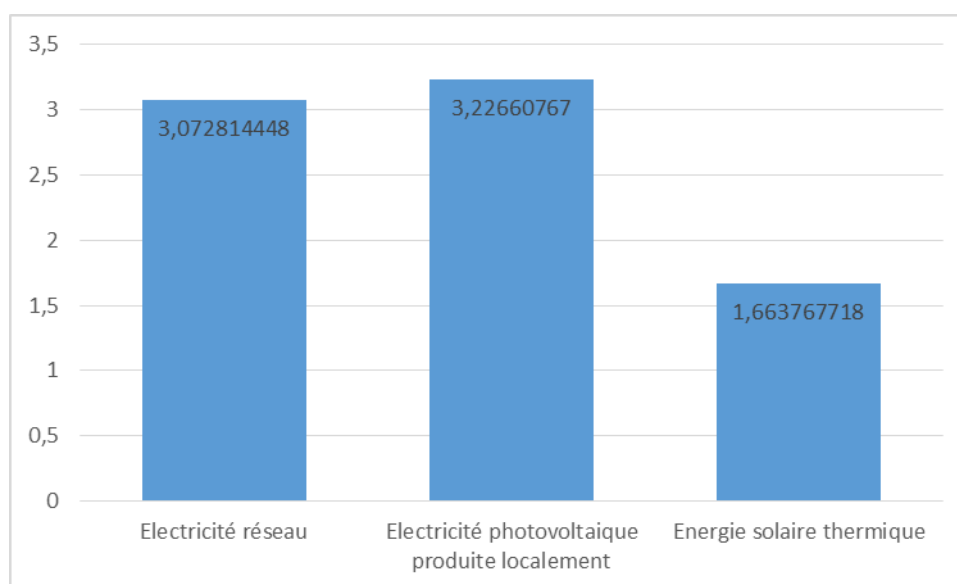


Figure 37 : valeurs de l'indice de criticité (IC) pour les ressources énergétiques abiotiques renouvelables pour le cas d'étude maison INCAS

L'indicateur permettant de rendre compte de la criticité du recours aux énergies renouvelables abiotiques est alors calculé ainsi :

$$\text{Abiotic Renewable Energy criticity index} = \sum_i^{\text{Renewable energy}} E_i * \frac{E_i}{E_{tot}} * IC_i$$

E_i la quantité d'énergie renouvelable de type i consommée, E_{tot} la quantité totale d'énergie finale (renouvelable et non renouvelable) consommée, IC_i l'indice de criticité de la ressource énergétique renouvelable abiotique i .

Le calcul de cette grandeur nous permet ainsi de comparer nos variantes. Une variante fictive, correspondant à une électricité du réseau produite à 100% par le parc renouvelable abiotique, a aussi ici été considérée.

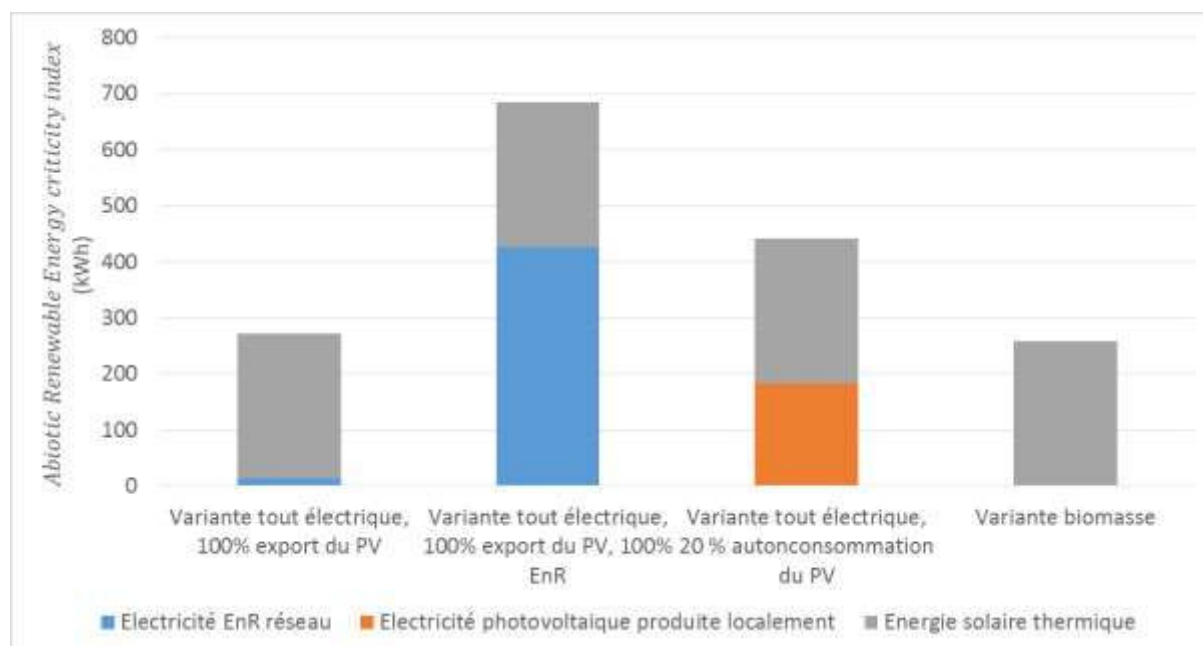


Figure 38 : résultats du calcul de l'index de criticité des ressources renouvelables abiotiques pour notre cas d'étude

Nous obtenons ainsi des valeurs dépendant à la fois de la quantité d'énergie renouvelable abiotique consommée dans notre système, en fonction des variantes considérées, et de la criticité de chaque type de ressource.

La variante biomasse est la moins impactante : seule l'énergie solaire thermique est comptabilisée dans l'indicateur, puisqu'elle est la seule énergie renouvelable abiotique consommée dans cette variante. Vient ensuite la variante électrique 100% export. Ce résultat s'explique par le fait que, hormis l'ECS solaire, l'ensemble des besoins énergétique de la variante est couverte par l'électricité du réseau. Ainsi, parmi cette quantité, seule la part renouvelable (18% du total) est prise en compte par l'indicateur. La variante fictive correspondant à une électricité du réseau 100% renouvelable permet de visualiser l'influence de la modification du mix électrique considéré. Enfin, l'indicateur calculé pour la variante tout électrique avec autoconsommation montre l'influence de l'utilisation d'une ressource abiotique renouvelable très critique pour répondre aux besoins du système considéré : le recours au photovoltaïque autoconsommé augmente la quantité d'EnR consommée (l'autoconsommation se substitue à de l'électricité du réseau, composé de seulement 18% d'EnR, dont il ne reste qu'une consommation résiduelle).

5.2.6 Conclusion

L'analyse de notre cas d'étude par les méthodes d'AICV généralistes et opérationnelles nous a montré la forte dépendance des résultats aux choix de périmètres et de méthodes d'allocation pour les productions locales d'énergie renouvelables abiotiques. Ces choix méthodologiques, s'ils reposent en partie sur les caractéristiques intrinsèques de celles-ci (« gratuité » de la ressource, possibilité techniques liées à leur exploitation), ne permettent pas pour autant de rendre compte de façon robuste de la renouvelabilité de leur exploitation.

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

La contribution de chaque mode de production et de consommation des ressources abiotiques renouvelables à l'indicateur d'épuisement des ressources abiotiques montre la pertinence d'intégrer cet aspect dans l'évaluation de la renouvelabilité, et dans une approche de criticité : ces dernières représentent ainsi des ressources support à l'exploitation de ressources en flux.

Notre proposition méthodologique permet ainsi de classifier les variantes par leur contribution à la perte de renouvelabilité des modes d'exploitation des ressources abiotiques renouvelables, liée à la fois à la quantité d'EnR consommée et la criticité des vecteurs considérés. Cet indicateur, qui ne concerne que les ressources abiotiques renouvelables de flux, doit être analysé et utilisé à la lumière des indices de criticité de chaque vecteur, représentatif de la technologie actuelle considérée. Il ne rend pas ailleurs pas compte de l'ensemble des caractéristiques environnementales du recours à ces ressources.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'ensemble des méthodes proposées dans ce travail a pour ambition de proposer une démarche de prise en compte de la renouvelabilité des ressources potentiellement renouvelables selon des principes méthodologiques communs. Ils se basent ainsi sur la notion de criticité, qui se décline en fonction des caractéristiques des ressources considérées.

Cette approche n'évalue pas le renouvellement de la ressource : elle l'intègre dans la grandeur évaluée. La criticité rend ainsi compte du contexte dans lequel est prélevée la ressource. Elle peut permettre d'intégrer le lien entre des ressources produites et des ressources « support ».

Les méthodes proposées s'appuient sur des données disponibles, dans la littérature scientifique ou dans des bases de données. Elles sont en l'état surtout quantitatives : de futurs travaux de recherche pourront investiguer la possibilité de traiter les aspects qualitatifs des ressources support de façon intégrée.

Dans le cas des ressources biotiques, l'évaluation de la différence entre disponibilité et demande d'une grandeur représentative de la renouvelabilité est la base du calcul des facteurs de caractérisation, et donc de l'indicateur. On distingue deux cas de figure :

- Le cas des ressources naturelles. L'indicateur repose ici sur l'évaluation de la disponibilité et de la demande de la ressource elle-même. Ce mode de calcul suppose que l'on considère la ressource comme un flux élémentaire pour l'ACV, que ce flux soit actuellement disponible dans les bases de données ou non.
- Le cas des ressources anthropiques. Ici, l'évaluation repose sur la prise en compte de la disponibilité et de la demande d'un élément issu de l'écosphère, et plus spécifiquement d'une ressource support, ou d'une de ses caractéristiques.

Dans le cas des ressources abiotiques, la criticité de la ressource est évaluée sur la base des caractéristiques des modes d'exploitation, supposés déterminer la pérennité du recours à celles-ci.

La question de l'évaluation de la renouvelabilité en ACV et du développement d'un indicateur sur cet aspect soulève un questionnement de fond sur la méthode et son caractère opérationnel. Il apparaît en effet que la capacité de l'ACV à porter cette évaluation est fortement dépendante de la structuration des inventaires, et des données intégrées à ceux-ci. De nombreux flux « élémentaires » absents des ICV sont ainsi nécessaires pour rendre opérationnels les méthodologies présentées dans ce document. L'opportunité de l'extension des ICV à ces flux est par ailleurs sujet à débat : pour des questions d'opérationnalité, mais aussi en fonction du niveau de transformation de la ressource considérée, et donc de son positionnement par rapport à la frontière entre écosphère et technosphère.

Cette question est particulièrement prégnante dans le cas des ressources biotiques, qui peuvent tout à la fois relever de l'écosphère que de la simili-écosphère, et donc dans ce dernier cas plus avoir vocation à être l'objet d'une ACV. La présence dans la structure actuelle des inventaires de flux relevant à la fois de l'écosphère et de la technosphère laisse néanmoins la porte ouverte à l'intégration des nouveaux flux en question. En attendant ces potentiels futurs développements, il reste tout à fait envisageable de développer un indicateur nécessitant de renseigner « à la main » les flux nécessaires.

Les développements méthodologiques proposés ici sont à la croisée des chemins : ils s'appuient sur des flux élémentaires existants dans les bases de données, mais nécessitent par ailleurs une certaine expertise permettant de fournir les informations manquantes lors de la simulation.

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Leur cohérence pourra par ailleurs être améliorée par la production des flux d'inventaires nécessaires, et la production de facteurs de caractérisation correspondant.

On le voit, les logiques mobilisées sont notablement différentes selon les cas de figure. Une mise en cohérence de l'évaluation des indicateurs, et notamment des amplitudes de variation des facteurs de caractérisation, pourra permettre une analyse homogène de l'ensemble des ressources dites renouvelables.

Cette mise en cohérence devra néanmoins se faire sur la base de valeurs seuils potentiellement représentatives de la renouvelabilité de la ressource. Ainsi la valeur maximale du facteur de caractérisation, correspondant à une ressource surexploitée (demande supérieure à disponibilité), devra idéalement rendre compte de la conséquence de la surexploitation.

Si l'on considère le principe de niveaux de transformation d'une ressource, que ce soit une transformation naturelle ou anthropique, et la distinction entre ressource support et ressource produite, il semble pertinent de chercher à harmoniser les approches vers la prise en compte, pour chaque type de ressource considéré, de l'impact final sur l'ensemble des ressources support. Celles-ci constitueraient ainsi un socle dont la qualité, la disponibilité et la renouvelabilité conditionnerait celle de l'ensemble des ressources produites.

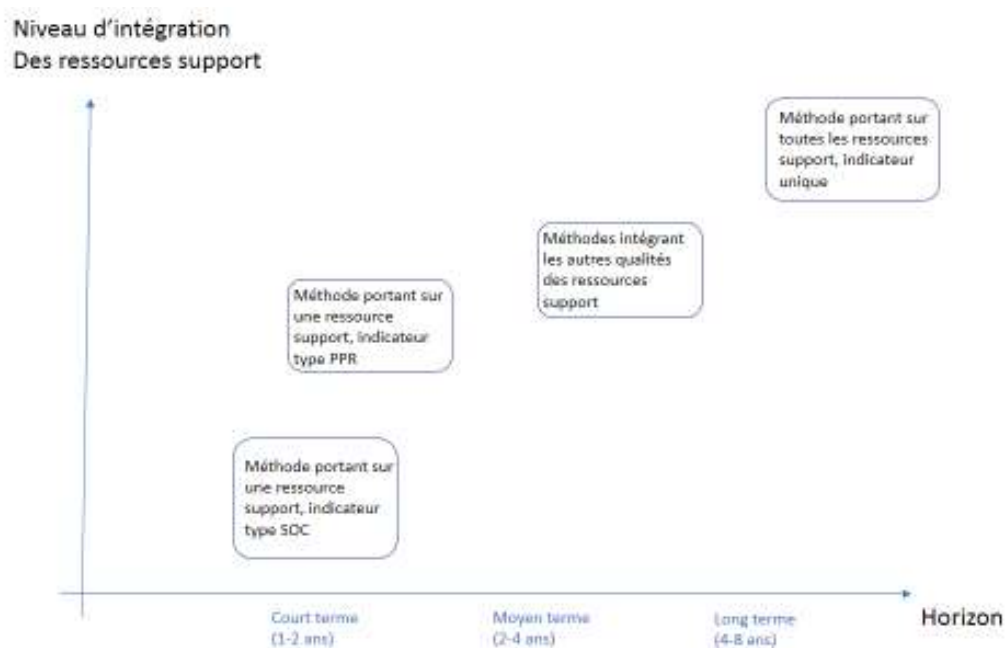


Figure 39 : perspectives de développements méthodologiques pour l'évaluation des ressources renouvelables en ACV

On soulignera en particulier que le climat en tant que ressource support n'a pas été intégré aux modèles alors que le GIEC souligne dans son dernier rapport que différentes études de confiance indiquent que le changement climatique réduit la capacité des espèces à perdurer (renouvelabilité des ressources naturelles) et les rendements agricoles (renouvelabilité des ressources anthropiques).

« Evidence of observed climate change impacts is strongest and most comprehensive for natural systems. In many regions, changing precipitation or melting snow and ice are altering hydrological systems, affecting water resources in terms of quantity and quality (medium confidence). Many terrestrial, freshwater and marine species have shifted their geographic ranges, seasonal activities, migration patterns, abundances and species interactions in response to ongoing climate change (high confidence). Some impacts on human systems have also been attributed to climate change, with a

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

major or minor contribution of climate change distinguishable from other influences. Assessment of many studies covering a wide range of regions and crops shows that negative impacts of climate change on crop yields have been more common than positive impacts (high confidence). » [Pachauri & al, 2014]

L'ACV permet en effet de considérer que la perte de renouvelabilité se traduit in fine dans les aires de protection considérées par la méthode, et que l'impact sur la qualité des ressources « support » conditionne celle-ci.

Ainsi, la méthode proposée pourrait se voir mise en application en tant que méthode de pondération d'indicateurs midpoints illustrant le maintien des ressources supports. Elle permettrait d'obtenir la gravité du scénario étudié en termes d'exploitation de ressources potentiellement renouvelables au regard du capital disponible.

REFERENCES

AFNOR - NF EN 15804 + A1, Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction, 2014.

AFNOR - NF EN ISO 14046, Management environnemental - Empreinte eau - Principes, exigences et lignes directrices, 2016.

ALCAMO, Joseph, DÖLL, Petra, HENRICHS, Thomas, et al. Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences Journal*, 2003, vol. 48, no 3, p. 317-337.

ALTHAUS, Hans-Jörg, DOKA, Gabor, DONES, Roberto, et al. Overview and Methodology ecoinvent report No. 1. Dübendorf. <https://www.presustainability.com/download/manuals/EcoinventOverviewAndMethodology.pdf>, 2007.

ANTONI, Véronique, ARROUAYS, Dominique, BISPO, Antonio, et al. L'Etat des sols de France. 2011.

ARMSTRONG A. John & HAMRIN Jan, The renewable energy policy manual. Organization of American States, undated. <http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea79e/oea79e.pdf>.

BELTRATTI, Andrea, CHICHILNISKY, Graciela, et HEAL, Geoffrey. Sustainable use of renewable resources. In : *Sustainability: Dynamics and Uncertainty*. Springer, Dordrecht, 1998. p. 49-76.

BERGER, Markus et FINKBEINER, Matthias. Water footprinting: How to address water use in life cycle assessment?. *Sustainability*, 2010, vol. 2, no 4, p. 919-944.

BERGER, Markus, VAN DER ENT, Ruud, EISNER, Stephanie, et al. Water accounting and vulnerability evaluation (WAVE): considering atmospheric evaporation recycling and the risk of freshwater depletion in water footprinting. *Environmental science & technology*, 2014, vol. 48, no 8, p. 4521-4528.

BOULAY, Anne-Marie, BARE, Jane, BENINI, Lorenzo, et al. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, vol. 23, no 2, p. 368-378.

BOULAY, Anne-Marie, BOUCHARD, Christian, BULLE, Cecile, et al. Categorizing water for LCA inventory. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011, vol. 16, no 7, p. 639-651.

BOULAY, A.-M.; BULLE, C.; BAYART, J.-B.; DESCHENES, L.; MARGNI, M. Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health *Environmental Science & Technology* 2011, 45, 8948-8957.

BOS, Ulrike, HORN, Rafael, BECK, Tabea, et al. LANCA® Characterization Factors for Life Cycle Impact Assessment. Fraunhofer Institute for Building Physics IBP, Stuttgart, Germany, 2016.

BULLE, Cécile, MARGNI, Manuele, PATOUILLARD, Laure, et al. IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, p. 1-22.

BRANDÃO, Miguel et I CANALS, Llorenç Milà. Global characterisation factors to assess land use impacts on biotic production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, vol. 18, no 6, p. 1243-1252.

CANALS, Llorenç Milà, BAUER, Christian, DEPESTELE, Jochen, et al. Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA (11 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2007, vol. 12, no 1, p. 5-15.

CASHION, Tim, HORNBORG, Sara, ZIEGLER, Friederike, et al. Review and advancement of the marine biotic resource use metric in seafood LCAs: a case study of Norwegian salmon feed. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, vol. 21, no 8, p. 1106-1120.

CHOMKHAMRSRI, Kirana, WOLF, Marc-Andree, et PANT, Rana. International reference life cycle data system (ILCD) handbook: review schemes for life cycle assessment. In : *Towards Life Cycle Sustainability Management*. Springer, Dordrecht, 2011. p. 107-117.

COSTANZA, Robert et DALY, Herman E. Natural capital and sustainable development. *Conservation biology*, 1992, vol. 6, no 1, p. 37-46.

CRENNA, Eleonora, SOZZO, Sara, et SALA, Serenella. Natural biotic resources in LCA: Towards an impact assessment model for sustainable supply chain management. *Journal of cleaner production*, 2018, vol. 172, p. 3669-3684.

DALY, Herman E. Sustainable development: from concept and theory to operational principles. *Population and development review*, 1990, vol. 16, p. 25-43.

DALY, Herman E. Sustainable development—definitions, principles, policies. In : *The future of sustainability*. Springer, Dordrecht, 2006. p. 39-53.

DEAS, M. L. et ORLOB, G. T. Klamath River modeling project: Assessment of alternatives for flow and water quality control in the Klamath River below Iron Gate Dam. Center for Environmental and Water Resources Engineering, University of California, Davis. Report, 1999, no 99-04, p. 236.

DE LAURENTIIS, Valeria, SECCHI, Michela, BOS, Ulrike, et al. Soil quality index: Exploring options for a comprehensive assessment of land use impacts in LCA. *Journal of cleaner production*, 2019, vol. 215, p. 63-74.

EKOénergie, EKOénergie - Réseau et label, https://www.ekoenergy.org/wp-content/uploads/2013/06/EKOenergy_Text_French.pdf, 2013.

EUROPEAN COMMISSION. Analysis of the fundamental concepts of resource management, 2000

EUROPEAN COMMISSION. Study on the review of the list of critical raw materials - Final report - Study, 2017a, <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08fdab5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en>

EUROPEAN COMMISSION. Study on the review of the list of critical raw materials - Critical raw materials factsheets, 2017b, <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en>

FAGERIA, N. K. Role of soil organic matter in maintaining sustainability of cropping systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2012, vol. 43, no 16, p. 2063-2113.

FAO and ITPS. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. 2015

FAZIO, S. BIGNANZIOLI, F. DE LAURENTIIS, V., Zampori, L., SALA, S. DIACONU, E. Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods, version 2, from ILCD to EF 3.0, EUR 29600 EN, European Commission, Ispra, 2018, ISBN 978-92-79-98584-3, doi:10.2760/002447, PUBSY No.JRC114822

FRISCHKNECHT, Rolf, JUNGBLUTH, Niels, ALTHAUS, H.-J., et al. Overview and methodology. Data v2. 0. Ecoinvent report No. 1. Ecoinvent Centre, 2007.

FRISCHKNECHT, Rolf, WYSS, Franziska, KNÖPFEL, Sybille Büsser, et al. Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, vol. 20, no 7, p. 957-969.

FSC, FSC Principles and Criteria for Forest Stewardship. <https://ic.fsc.org/file-download.fsc-principles-and-criteria-for-forest-stewardship.a-409.pdf>, 2015.

GABRIELLE, Benoît, GAGNAIRE, Nathalie, MASSAD, Raia Silvia, et al. Environmental assessment of biofuel pathways in Ile de France based on ecosystem modeling. Bioresource technology, 2014, vol. 152, p. 511-518.

GILLON, Yves. Du bon usage des ressources renouvelables. IRD Editions, 2000.

GLAVIČ, Peter et LUKMAN, Rebeka. Review of sustainability terms and their definitions. Journal of cleaner production, 2007, vol. 15, no 18, p. 1875-1885.

GUINÉE, Jeroen. Handbook on life cycle assessment—operational guide to the ISO standards. The international journal of life cycle assessment, 2001, vol. 6, no 5, p. 255-255.

HABERL, Helmut, ERB, K. Heinz, KRAUSMANN, Fridolin, et al. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, vol. 104, no 31, p. 12942-12947.

HANDBOOK, I. L. C. D. Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. Joint Research Centre-European commission, 2010.

HARRIS, Jonathan M. Basic principles of sustainable development. Dimensions of Sustainable Development, 2000, p. 21-41.

HÉLIAS, Arnaud, LANGLOIS, Juliette, et FRÉON, Pierre. Fisheries in life cycle assessment: Operational factors for biotic resources depletion. Fish and Fisheries, 2018, vol. 19, no 6, p. 951-963.

HOEKSTRA, Arjen Y., MEKONNEN, Mesfin M., CHAPAGAIN, Ashok K., et al. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. PLoS One, 2012, vol. 7, no 2, p. e32688.

JO, Code de l'énergie, LIVRE II, TITRE 1ER, Article L211-2. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000023983208&idArticle=LEGIARTI000023986186>, 2011.

KLINGLMAIR, Manfred, SALA, Serenella, et BRANDÃO, Miguel. Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, vol. 19, no 3, p. 580-592.

KOELLNER, Thomas, DE BAAN, Laura, BECK, Tabea, et al. Principles for life cycle inventories of land use on a global scale. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013, vol. 18, no 6, p. 1203-1215.

KOELLNER, Thomas, DE BAAN, Laura, BECK, Tabea, et al. UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, vol. 18, no 6, p. 1188-1202.

KOUNINA, Anna, MARGNI, Manuele, BAYART, Jean-Baptiste, et al. Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, vol. 18, no 3, p. 707-721.

LANGLOIS, Juliette, FRÉON, Pierre, DELGENES, Jean-Philippe, et al. New methods for impact assessment of biotic-resource depletion in life cycle assessment of fisheries: theory and application. *Journal of cleaner production*, 2014, vol. 73, p. 63-71.

LEGAZ, B. Vidal, DE SOUZA, D. Maia, TEIXEIRA, R. F. M., et al. Soil quality, properties, and functions in life cycle assessment: an evaluation of models. *Journal of cleaner production*, 2017, vol. 140, p. 502-515.

LEHMANN, Johannes et KLEBER, Markus. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 2015, vol. 528, no 7580, p. 60.

LESUR-DUMOULIN, C., LAURENT, A., REAU, R., et al. Co-design and ex ante assessment of cropping system prototypes including energy crops in Eastern France. *Biomass and bioenergy*, 2018, vol. 116, p. 205-215.

LIN, David, HANSCOM, Laurel, MURTHY, Adeline, et al. Ecological Footprint Accounting for Countries: Updates and Results of the National Footprint Accounts, 2012–2018. *Resources*, 2018, vol. 7, no 3, p. 58.

LINDEIJER, Erwin, MÜLLER-WENK, Ruedi, STEEN, Bengt, et al. Impact assessment of resources and land use. *Life cycle impact assessment: striving towards best practice*. SETAC, Pensacola, 2002, p. 11-64.

LOZANO, R., « Envisioning sustainability three-dimensionally », *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, n° 17, p. 1838-1846, nov. 2008.

MANCINI, Maria Serena, GALLI, Alessandro, NICCOLUCCI, Valentina, et al. Stocks and flows of natural capital: Implications for Ecological Footprint. *Ecological Indicators*, 2017, vol. 77, p. 123-128.

MANFREDI, Simone, ALLACKER, Karen, PELLETIER, Nathan, et al. Product environmental footprint (PEF) guide. <http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/footprint/PEF%20methodology%20final%20draft.pdf> 2012.

MEERSMANS, Jeroen, MARTIN, Manuel Pascal, LACARCE, Eva, et al. A high resolution map of French soil organic carbon. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, vol. 32, no 4, p. 841-851.

MORELLI, John. Environmental sustainability: A definition for environmental professionals. *Journal of environmental sustainability*, 2011, vol. 1, no 1, p. 2.

MOTOSHITA, Masaharu, ITSUBO, Norihiro, et INABA, Atsushi. Development of impact factors on damage to health by infectious diseases caused by domestic water scarcity. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011, vol. 16, no 1, p. 65-73.

PACHAURI, Rajendra K., ALLEN, Myles R., BARROS, Vicente R., et al. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Ippc*, 2014.

PASTOR, A. V., LUDWIG, F., BIEMANS, H., et al. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, vol. 18, no 12, p. 5041-5059.

PEFC, Sustainable Forest Management – Requirements. <https://www.pefc.org/resources/technical-documentation/pefc-international-standards-2010/2641-sustainable-forest-management-pefc-st-1003-2018>, 2018.

PENMAN, Jim, GYTARSKY, Michael, HIRAISHI, Taka, et al. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry., 2003.

PFISTER, Stephan, KOEHLER, Annette, et HELLWEG, Stefanie. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environmental science & technology*, 2009, vol. 43, no 11, p. 4098-4104.

PFISTER, Stephan, SANER, Dominik, et KOEHLER, Annette. The environmental relevance of freshwater consumption in global power production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011, vol. 16, no 6, p. 580-591.

ROWLANDS, I.H.« The European directive on renewable electricity: conflicts and compromises », *Energy Policy*, vol. 33, n° 8, p. 965-974, mai 2005.

SHORTALL, O. K. “Marginal land” for energy crops: Exploring definitions and embedded assumptions. *Energy Policy*, 2013, vol. 62, p. 19-27.

SWIFT, Michael John, HEAL, Oliver W., ANDERSON, Jonathan Michael, et al. Decomposition in terrestrial ecosystems. Univ of California Press, 1979.

UNITED NATIONS. Glossary of environment statistics, studies in methods. 1997. <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=2290>

WACKERNAGEL, Mathis. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: a tool for planning toward sustainability. 1994. Thèse de doctorat. University of British Columbia.

WEIDEMA, B. P. et LINDEIJER, E. Physical impacts of land use in product life cycle assessment. Final report of the EURENVIRON-LCAGAPS sub-project on land use. Technical University of Denmark, Lyngby, 2001.

WEIDEMA B P, BAUER C, HISCHIER R, MUTEL C, NEMECEK T, REINHARD J, VADENBO C O, WERNET G. Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3), 2013. St. Gallen: The ecoinvent Centre

ZHANG, Y. I., BARAL, Anil, et BAKSHI, Bhavik R. Accounting for ecosystem services in life cycle assessment, part II: toward an ecologically based LCA. *Environmental science & technology*, 2010, vol. 44, no 7, p. 2624-2631.

ZHANG, Y. I., SINGH, Shweta, et BAKSHI, Bhavik R. Accounting for ecosystem services in life cycle assessment, Part I: a critical review. *Environmental science & technology*, 2010, vol. 44, no 7, p. 2232-2242.

ZOEBELEIN, Hans, et al. Dictionary of renewable resources. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2001.

GLOSSAIRE

Capacité de charge : quantité de polluants, perturbateurs, que peut absorber un écosystème sans que sa capacité de renouvellement soit mise à mal. La capacité de charge diminue au fur et à mesure que la pollution de l'écosystème augmente. Si, à un instant t , la capacité de charge est dépassée, l'écosystème se dégrade et disparaît. La capacité de charge d'un écosystème peut être augmentée par l'intervention humaine (dépollution mécanique, apport de matière organique, plantations...).

Criticité d'une ressource : évaluation de la difficulté rencontrée pour se procurer une ressource. Par extension, niveau de disponibilité d'une ressource pour exploitation

Ecosphère : Désigne les composants physiques et biologiques de la terre, lorsque considérée comme un écosystème. Elle est constituée d'un biotope (l'atmosphère, la géosphère, l'hydrosphère auquel on peut ajouter la magnétosphère) et d'une biocénose (la biosphère)¹⁴ ¹⁵. Nous considérerons ici également le flux solaire comme faisant partie de l'écosphère.

Exploitation d'une ressource : Action d'exploiter, de faire valoir une ressource en vue d'une production¹⁶.

Modes d'exploitation d'une ressource : Différentes façons d'exploiter, de faire valoir une ressource. Du mode d'exploitation de la ressource va découler une technologie d'extraction, de transformation, d'acheminement et d'usage.

Rendement maximal soutenable : quantité de ressource animale pouvant être prélevé dans un lieu donné sans que sa capacité de renouvellement soit mise à mal. Le rendement maximal soutenable diminue au fur et à mesure que les prélèvements augmentent. Si, à un instant t , le rendement maximal soutenable est dépassé, la ressource animale s'épuise et disparaît. Le rendement maximal soutenable ne peut être augmenté par l'intervention humaine (si ce n'est en régulant les prélèvements).

Ressources en stock : ressources qui existent dans le milieu naturel en quantité finie, sans possibilité de nouvelle croissance du stock après consommation (cas des minéraux, notamment), ou sur une durée d'un ordre de grandeur beaucoup plus élevée que l'échelle de temps humaine (pétrole par exemple) [Klinglmair & al, 2013]

Ressources à capital : ressources qui peuvent s'épuiser, à une vitesse dépendant du ratio entre son exploitation et son renouvellement. L'épuisement total ou le développement du capital de ressource disponible sont deux options possibles [Klinglmair & al, 2013]

Ressources de flux : ressources qui ne sont pas épuisables, même si leur disponibilité n'est pas constante dans le temps et dans l'espace [Klinglmair & al, 2013]

Ressource support : ce sont les ressources sur lesquelles s'appuient les fonctionnements écosystémiques ainsi que les transformations naturelles. Elles intègrent notamment l'eau, les sols, le soleil (et plus largement le climat). Elles ont pour particularité de ne pas pouvoir être produite : aucune action de l'homme ne peut en augmenter la quantité. En revanche leur qualité peut être altérée ou améliorée par l'homme.

¹⁴ http://www.cof.orst.edu/cof/fs/turner/pdfs/lexicon_of_the_spheres.pdf

¹⁵ <https://sciencehelpdesk.com/unit/science2/11>

¹⁶ <https://www.cnrtl.fr/definition/exploitation>

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Ressource produite : ce sont les ressources issues de transformations, naturelles ou anthropiques, de ressources « support ». Leur quantité comme leur qualité peut potentiellement être modifiée par l'homme.

Technosphère : Partie physique de l'environnement affecté par les modifications d'origine anthropique¹⁷. Elle inclue la somme de tous les artefacts produits par l'homme, ainsi que les déchets générés, et la population humaine elle-même¹⁸. Elle est le pendant anthropique de la biosphère, et est alimentée par des flux issus de l'écosphère

¹⁷ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Technosph%C3%A8re>

¹⁸ http://www.cof.orst.edu/cof/fs/turner/pdfs/lexicon_of_the_spheres.pdf

ANNEXES

Annexe 1 : recherche bibliographique sur la notion de durabilité et de développement durable

Une recherche bibliographique montre la difficulté d'établir un consensus scientifique sur la notion de développement durable. Le travail de [Lozano, 2008] a permis de montrer l'existence de plus de 70 définitions du développement durable, que l'on peut regrouper en cinq catégories :

- L'approche conventionnelle économiste
- L'approche de non dégradation environnementale
- L'approche intégrative (qui traite à la fois des aspects économiques, environnementaux et sociaux)
- L'approche intergénérationnelle
- L'approche holistique, qui articule l'approche intégrative et l'approche intergénérationnelle

Cette diversité des approches et les contradictions qu'elles peuvent engendrer tendent à discréditer le concept. Morelli [Morelli, 2011] partage ce constat, mais ajoute que la démarche regagne en crédibilité lorsque son champs d'application est délimité et borné. Il propose ainsi par exemple une définition de la durabilité (ou soutenabilité) environnementale :

« ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY: a condition of balance, resilience, and interconnectedness that allows human society to satisfy its needs while neither exceeding the capacity of its supporting ecosystems to continue to regenerate the services necessary to meet those needs nor by our actions diminishing biological diversity. »

Cette définition introduit une notion d'équilibre entre les sociétés humaines et l'écosphère, qui permet d'entretenir à la fois les services rendus par l'écosphère et la diversité biologique des écosystèmes, et donc d'éviter une dégradation qualitative de ceux-ci.

Cette notion de services rendus par l'écosphère et qualité des écosystèmes est au cœur des débats sur la notion de développement durable, et de ce qui doit être effectivement durable. Deux des auteurs principaux de l'approche environnementale du développement durable, Daly et Costanza, développent une vision basée sur la définition d'un capital environnemental à préserver, et de ses caractéristiques [Daly, 2006][Daly, 1990][Daly & Costanza, 1992]. La durabilité porte ici sur la préservation fondamentale du capital environnemental, c'est-à-dire notamment de la préservation de sa capacité de charge, des services écosystémiques, des ressources disponibles, et s'oppose à une approche utilitariste du développement durable : ainsi ce n'est pas seulement les services rendus par l'écosphère qui doivent être préservés, mais les flux physiques entre l'écosphère et la technosphère.

De façon plus précise, [Harris, 2000] définit un système environnemental durable :

*« An environmentally sustainable system must maintain a stable resource base, **avoiding over-exploitation of renewable resource systems or environmental sink functions**, and depleting non-renewable resources only to the extent that investment is made in adequate substitutes. This includes maintenance of biodiversity, atmospheric stability, and other ecosystem functions not ordinarily classed as economic resources. »*

Cette approche du développement durable, plus poussée qu'une simple vision utilitariste de la notion, est à retenir dans une perspective d'évaluation environnementale. C'est par ailleurs elle qui sous-tend la mise en place de certifications (voir par exemple [FSC, 2012][PEFC,2018]), qui intègrent dans leurs objectifs la préservation ou la restauration de la biodiversité, de la qualité des sols, et limitent les

modes d'exploitation des ressources en ce sens (recours aux pesticides, modification de l'usage des sols...)

Appliquée à l'exploitation de la ressource renouvelable, cela signifie qu'au-delà d'éviter la surexploitation de la ressource (qui empêcherait son renouvellement), il conviendrait aussi d'intégrer les mécanismes environnementaux en œuvre lors de l'exploitation afin de s'assurer qu'ils sont bien compatibles avec « le maintien de la biodiversité, la stabilité atmosphérique et des autres fonctions éco-systémiques non classés habituellement comme ressources économiques ».

Les initiatives internationales pour l'évaluation et la promotion du développement durable tendent à épouser cette approche holistique. Ainsi la méthode du product environmental footprint [Manfredi & al, 2012] se base sur l'ACV, et intègre donc dans l'analyse l'ensemble des flux existants entre l'écosphère et la technosphère associés à un produit (*« A life-cycle approach refers to taking into consideration the spectrum of resource flows and environmental interventions associated with a product or organisation from a supply chain perspective »*). Cette exhaustivité, associée à l'évaluation d'indicateurs d'impacts pouvant recouvrir plusieurs thématiques, en font un outil permettant de dépasser la simple vision utilitariste du développement durable et de tenir compte de potentielles dégradations et pollutions dans la prise de décision.

Annexe 2 : proposition de flux d'inventaires et de facteurs de caractérisation portant sur les ressources renouvelables biotiques, issue de [crenna & al, 2018]

Commercial group	Species	Common name	Renewal time - Range from literature (years)		Average renewal time (years/kg)	Ref.
Amphibians	<i>Lithobates catesbeianus</i>	Bullfrog	> 3	D	3.00	1
Anchovies	<i>Engraulis encrasicolus</i>	European anchovy	1.4 - 4.4	D	2.90	2
Aquatic mammals	<i>Balaena mysticetus</i>	Bowhead whale	52	D	52.00	3
	<i>Balaenoptera musculus</i>	Balaenoptera	31	D	31.00	3
	<i>Orcinus orca</i>	Killer whale	23	D	23.00	4
Barbels	<i>Barbus barbus</i>	Barbel fish	4.5 - 14	D	9.25	2
Carp	<i>Cyprinus carpio</i>	Common carp	1.4 - 4.4	D	2.90	2
Crocodiles & alligators	<i>Crocodylus acutus</i>	American crocodile	< 20	D	20.00	5
	<i>Crocodylus niloticus</i>	Nile crocodile	< 23	D	23.00	6
	<i>Alligator mississippiensis</i>	Alligator	< 50	D	50.00	7
Flounders	<i>Platichthys flesus</i>	European flounder	1.4 - 4.4	D	2.90	2
Halibuts	<i>Hippoglossus hippoglossus</i>	Atlantic halibut	> 14	D	14.00	2
Herrings	<i>Clupea harengus</i>	Atlantic herring	1.4 - 4.4	D	2.90	2
Paddlefishes	<i>Polyodon spathula</i>	Mississippi paddlefish	4.5 - 14	D	9.25	2

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

River eels	<i>Anguilla anguilla</i>	European anguilla	4.5 - 14	D	9.25	2
Salmons	<i>Salmo salar</i>	Atlantic salmon	1.4 - 4.4	D	2.90	2
	<i>Oncorhynchus gorbusha</i>	Pink salmon	1.4 - 4.4	D	2.90	2
Sardines	<i>Sardina pilchardus</i>	European pilchard	1.4 - 4.4	D	2.90	2
Shads	<i>Hemistaurichthys polylepis</i>	Alosina	< 1.3	D	1.30	2
Sharks	<i>Alopias vulpinus</i>	Common thresher	6.7 - 11.6	D	9.15	8
	<i>Carcharhinus leucas</i>	Bull shark	17.1 - 30.8	D	23.95	8
	<i>Carcharodon carcharias</i>	White shark	12.2 - 20.1	D	16.15	8
	<i>Isurus oxyrinchus</i>	Mako shark	9.4 - 15.9	D	12.65	8
	<i>Lamna nasus</i>	Porbeagle	> 14	D	14.00	2
	<i>Mustelus californicus</i>	Gray smooth hound	3.3 - 5.8	D	4.55	8
	<i>Prionace glauca</i>	Blue shark	7.7 - 13.2	D	10.45	8
	<i>Pristis pectinata</i>	Smalltooth sawfish	4.5 - 14	D	9.25	2
	<i>Pristis perotteti</i>	Large-tooth sawfish	4.5 - 14	D	9.25	2
	<i>Rhizoprionodon terranovae</i>	Atlantic sharpnose	5.0 - 9.2	D	7.10	8
	<i>Sphyrna tiburo</i>	Bonnethead	4.2 - 7.5	D	5.85	8
	<i>Squalus acanthias</i>	Spiny dogfish	28.9-46.2	D	37.55	8
	<i>Triakis semifasciata</i>	Leopard shark	14.9 - 25.7	D	20.30	8
Smelts	<i>Osmerus eperlanus</i>	European smelt	1.4 - 4.4	D	2.90	2
Sturgeons	<i>Acipenser oxyrinchus</i>	Atlantic sturgeon	> 14	D	14.00	2
Tilapias & other cichlids	<i>Gadus morhua</i>	(Eastern) Baltic Cod	1.4 - 4.4	D	2.90	2
	<i>Oreochromis mossambicus</i>	Mozambique tilapia	1.4 - 4.4	D	2.90	2
	<i>Oreochromis niloticus</i>	Nilotic tilapia	1.4 - 4.4	D	2.90	2
Trouts	<i>Salmo trutta</i>	Brown trout	< 1.3	D	1.30	2

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Tunas, bonitos, billfishes	<i>Istiophorus platypterus</i>	Sailfish	2.9 - 4.4	<i>D</i>	3.45	8
	<i>Kajikia audax</i>	Striped marlin	3.7 - 5.6	<i>D</i>	4.65	8
	<i>Katsuwonus pelamis</i>	Skipjack tuna	1.3 - 2.9	<i>D</i>	2.10	8
	<i>Makaira nigricans</i>	Blue marlin	3.7 - 5.5	<i>D</i>	4.60	8
	<i>Thunnus alalunga</i>	Albacore tuna	4.2 - 6.2	<i>D</i>	5.20	8
	<i>Thunnus albacares</i>	Yellowfin tuna	1.4 - 4.4	<i>D</i>	2.90	2
	<i>Thunnus maccoyii</i>	Southern bluefin tuna	5.2 - 7.5	<i>D</i>	6.35	8
	<i>Thunnus obesus</i>	Bigeye tuna	2.5 - 4.9	<i>D</i>	3.70	8
	<i>Thunnus orientalis</i>	Northern bluefin tuna	4.6 - 6.5	<i>D</i>	5.55	8
	<i>Thunnus thynnus</i>	Atlantic bluefin tuna	4.5 - 14	<i>D</i>	9.25	2
	<i>Xiphias gladius</i>	Swordfish	4.8 - 6.9	<i>D</i>	5.85	8
Terrestrial crustaceans	<i>Scylla serrata</i>	Crabs	1.4 - 4.4	<i>D</i>	2.90	9
Fur or skin terrestrial vertebrates	<i>Canis lupus</i>	Wolf	4.7	<i>D</i>	4.70	3
	<i>Kinixys belliana</i>	Bell's hinge-back tortoise	15	<i>D</i>	15.00	10
	<i>Martes martes</i>	Pine marten	7	<i>D</i>	7.00	11
	<i>Mustela erminea</i>	Stoat	10	<i>D</i>	10.00	12
	<i>Mustela vison</i>	European mink	10	<i>D</i>	10.00	13
	<i>Ondatra zibethicus</i>	Muskrat	10	<i>D</i>	10.00	14
	<i>Vulpes vulpes</i>	Red fox	10	<i>D</i>	10.00	15
Game birds	<i>Branta canadensis</i>	Canada goose	3	<i>D</i>	3.00	16
Game mammals	<i>Bison bonasus</i>	European bison	5.0 - 6.0	<i>D</i>	5.50	17
	<i>Cervus elaphus</i>	Red deer	10.0 - 14.0	<i>D</i>	12.00	18
	<i>Odocoileus virginianus</i>	deers	2.0 - 3.0	<i>D</i>	2.50	19

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

	<i>Odocoileus bezoharticus</i>	deers				
Hardwood	<i>Acer platanoides</i>	Maple	100 - 120	R	110.00	20
	<i>Acer pseudoplatanus</i>	Sycamore maple	100	R	100.00	20
	<i>Acer rubrum</i>	Red maple	50 - 110	R	80.00	21
	<i>Platanus spp.</i>	Sycamore spp.	60 - 80	R	70.00	20
	<i>Populus spp.</i> (<i>alba, nigra, tremula</i>)	Poplar	80 - 120	R	100.00	22
	<i>Prunus avium</i>	Wild cherry	60 - 80	R	70.00	20
	<i>Quercus spp.</i>	Oak spp.	60 - 120	R	90.00	23; 24
	<i>Quercus suber</i>	Cork oak	10 - 12	R	11.00	25
	<i>Robinia pseudoacacia</i>	black locust	5	R	5.00	26
	<i>Sorbus torminalis</i>	wild service tree	120 - 150	R	135.00	27
	<i>Tectona grandis</i>	Teak	20 - 40	R	30.00	28
Softwood	<i>Betula spp.</i>	Birch	70 - 140	R	105.00	29
	<i>Fraxinus spp.</i>	Ash	60 - 80	R	70.00	20
	<i>Picea spp.</i>	Spruce	100	R	100.00	30
	<i>Pinus strobus</i>	White pine	90 - 150	R	120.00	31
	<i>Pinus sylvestris</i>	Red pine	150-200	R	175.00	30

Annexe 3 : synthèse des méthodes d'aicv concernant les ressources renouvelables identifiées

Cf document joint.

Annexe 4 : facteurs de caractérisation pour l'indicateur ADP de la méthode CML

Impact category	Abiotic depletion	kg Sb eq			
Raw	(unspecified)	Gold, Au 9.7E-5%, Ag 7.6E-5%, in ore	52	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Gold, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore	52	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Gold, Au 7.1E-4%, in ore	52	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Gold, Au 6.8E-4%, Ag 1.5E-4%, in ore	52	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Gold, Au 6.7E-4%, in ore	52	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Gold, Au 5.4E-4%, Ag 1.5E-5%, in ore	52	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Gold, Au 4.9E-5%, in ore	52	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Gold, Au 4.3E-4%, in ore	52	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Gold, Au 2.1E-4%, Ag 2.1E-4%, in ore	52	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Gold, Au 1.8E-4%, in mixed ore	52	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Gold, Au 1.3E-4%, Ag 4.6E-5%, in ore	52	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Gold, Au 1.1E-4%, Ag 4.2E-3%, in ore	52	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Gold	52	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Tellurium	40,7	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Platinum, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore	2,22	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Platinum, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore	2,22	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Platinum	2,22	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Silver, Ag 9.7E-4%, Au 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore	1,18	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Silver, Ag 7.6E-5%, Au 9.7E-5%, in ore	1,18	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Silver, Ag 5.4E-3%, in mixed ore	1,18	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Silver, Ag 4.6E-5%, Au 1.3E-4%, in ore	1,18	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Silver, Ag 4.2E-3%, Au 1.1E-4%, in ore	1,18	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Silver, Ag 2.1E-4%, Au 2.1E-4%, in ore	1,18	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Silver, Ag 1.5E-5%, Au 5.4E-4%, in ore	1,18	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Silver, Ag 1.5E-4%, Au 6.8E-4%, in ore	1,18	kg	kg Sb eq / kg

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Raw	(unspecified)	Silver, 3.2ppm in sulfide, Ag 1.2ppm, Cu and Te, in crude ore	1,18	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Silver, 0.007% in sulfide, Ag 0.004%, Pb, Zn, Cd, In	1,18	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Silver	1,18	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Antimony	1	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Rhenium	0,603	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Palladium, Pd 7.3E-4%, Pt 2.5E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore	0,571	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Palladium, Pd 2.0E-4%, Pt 4.8E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore	0,571	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Palladium	0,571	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Selenium	0,194	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Cadmium	0,157	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Mercury	0,0922	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Bismuth	0,0411	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Iodine	0,025	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Molybdenum, 0.11% in sulfide, Mo 0.41% and Cu 0.36% in crude ore	0,0178	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Molybdenum, 0.025% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.39% in crude ore	0,0178	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Molybdenum, 0.022% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.36% in crude ore	0,0178	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Molybdenum, 0.022% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.22% in crude ore	0,0178	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Molybdenum, 0.016% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.27% in crude ore	0,0178	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Molybdenum, 0.014% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.81% in crude ore	0,0178	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Molybdenum, 0.010% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 1.83% in crude ore	0,0178	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Molybdenum	0,0178	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Tin	0,0162	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Indium	0,00689	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Lead, Pb 3.6E-1%, in mixed ore	0,00634	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Lead, Pb 0.014%, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, in ore	0,00634	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Lead	0,00634	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Tungsten	0,00452	kg	kg Sb eq / kg

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Raw	(unspecified)	Bromine	0,00439	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Boron	0,00427	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Arsenic	0,00297	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Uranium, 560 GJ per kg	0,0014	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Uranium, 451 GJ per kg	0,0014	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Uranium, 2291 GJ per kg	0,0014	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Uranium	0,0014	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Copper, Cu 5.2E-2%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2% in ore	0,00137	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Copper, Cu 3.2E+0%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0% in ore	0,00137	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Copper, Cu 0.38%, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Pb 0.014%, in ore	0,00137	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Copper, Cu 0.2%, in mixed ore	0,00137	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Copper, 2.19% in sulfide, Cu 1.83% and Mo 8.2E-3% in crude ore	0,00137	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Copper, 1.42% in sulfide, Cu 0.81% and Mo 8.2E-3% in crude ore	0,00137	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Copper, 1.18% in sulfide, Cu 0.39% and Mo 8.2E-3% in crude ore	0,00137	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Copper, 1.13% in sulfide, Cu 0.76% and Ni 0.76% in crude ore	0,00137	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8.2E-3% in crude ore	0,00137	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Copper, 0.97% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 4.1E-2% in crude ore	0,00137	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Copper, 0.59% in sulfide, Cu 0.22% and Mo 8.2E-3% in crude ore	0,00137	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Copper, 0.52% in sulfide, Cu 0.27% and Mo 8.2E-3% in crude ore	0,00137	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Copper	0,00137	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Zinc, Zn 3.1%, in mixed ore	0,000538	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Zinc, Zn 0.63%, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore	0,000538	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Zinc 9%, Lead 5%, in sulfide	0,000538	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Zinc	0,000538	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Chromium	0,000443	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Sulfur	0,000193	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Nickel, Ni 3.7E-2%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Cu 5.2E-2% in ore	0,0000653	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Nickel, Ni 2.3E+0%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Cu 3.2E+0% in ore	0,0000653	kg	kg Sb eq / kg

INDICATEUR RESSOURCES RENOUVELABLES

Raw	(unspecified)	Nickel, 1.98% in silicates, 1.04% in crude ore	0,0000653	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Nickel, 1.13% in sulfides, 0.76% in crude ore	0,0000653	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Nickel, 1.13% in sulfide, Ni 0.76% and Cu 0.76% in crude ore	0,0000653	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Nickel	0,0000653	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Tantalum	0,0000406	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Chlorine	0,0000271	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Thallium	0,0000243	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Niobium	0,0000193	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Cobalt	0,0000157	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Beryllium	0,0000126	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Lithium	0,0000115	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Barium	0,00000604	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Phosphorus, 18% in apatite, 4% in crude ore	0,00000552	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Phosphorus	0,00000552	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Zirconium	0,00000544	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Manganese	0,00000254	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Vanadium	0,00000077	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Strontium	7,07E-07	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Germanium	6,52E-07	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Yttrium	5,69E-07	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Gallium	1,46E-07	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Sodium	5,5E-08	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Iron	5,24E-08	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Titanium	2,79E-08	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Potassium	1,6E-08	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Magnesium	2,02E-09	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Aluminium	1,09E-09	kg	kg Sb eq / kg
Raw	(unspecified)	Silicon	1,4E-11	kg	kg Sb eq / kg