

Contribution of Life Cycle Assessment for the objective of carbon neutrality: bibliographic review

Fanny CAIARDI^{1,2}, Catherine AZZARO-PANTEL¹, Denis LE-BOULCH²

1 : Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

2 : EDF R&D, Département TREE, Groupe E3M, EDF Lab les Renardières, Moret-Loing-et-Orvanne, France

Abstract

The Paris Agreement adopted in 2015 (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015) set the objective of containing the rise in the average temperature of the planet well below 2°C, ideally at 1.5°C, compared to pre-industrial levels. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2018), this requires achieving carbon neutrality by 2050. This objective has become a major issue and has led to the development of multiple scenarios, responding to specific questions from different sectors (ADEME, 2021; Ministère de la Transition Ecologique, 2020; négaWatt, 2021; RTE, 2021) and supporting various strategies at the international, national and even regional level. France, as a signatory of the Paris Agreement, has thus developed a trajectory, described in the National Low Carbon Strategy (SNBC) (Ministère de la Transition Ecologique, 2020) to achieve carbon neutrality by 2050. However, this issue raises many methodological questions on quantification metrics. Furthermore, Life Cycle Assessment (LCA) is a recognized method for the environmental assessment of products and services, taking into account the entire life cycle. Carbon neutrality strategies would benefit from being enriched by the LCA method, on two counts: in order to extend the carbon dimension to a broader, multi-criteria environmental dimension, and in order to take into account the entire life cycle rather than just emissions from the territory. Nevertheless, the question of the feasibility of translating carbon neutrality scenarios into LCA modeling arises. This article reviews the literature on this subject. Research has highlighted the growing interest in these two subjects for several years, while revealing an ill-defined semantic around carbon neutrality: the term is mainly used to contextualize decarbonization projects. Thus, no article dealing with the carbon neutrality of France assessed by an LCA study has been identified. A test case would make it possible to understand the feasibility of such an approach: the scenario of the SNBC (Ministère de la Transition Ecologique, 2020) seems to be a relevant support for such an exercise.

1. Introduction

En 2015, 196 parties se sont engagées dans la lutte contre le changement climatique en adoptant l'Accord de Paris (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015). La France, signataire de cet accord, s'est fixée une trajectoire décrite dans la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) (Ministère de la Transition Ecologique, 2020) pour parvenir à la neutralité carbone en 2050. Ce défi implique des réductions drastiques des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans toutes les composantes du système économique ainsi que le déploiement de solutions pour extraire le carbone de l'atmosphère par la maximisation des puits de carbone naturels (e.g. reforestation et utilisation durable des terres) et le développement de technologies innovantes.

Par ailleurs, l'analyse du cycle de vie (ACV), méthode standardisée selon les normes ISO 14040-44 (International Organization for Standardization (ISO), 2006a, 2006b), permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un système en considérant toutes les étapes de son

cycle de vie. Ses résultats environnementaux multicritères permettent d'identifier les éventuels déplacements de pollution.

Les approches de neutralité carbone gagneraient ainsi à être enrichies par la méthode ACV, et ce à double titre :

- l'extension de la dimension « carbone » à une dimension environnementale multicritère, permettrait d'intégrer la question du transfert d'impact environnemental (épuisement des ressources, perte de biodiversité, acidification etc.)

- l'approche systémique de l'ACV permettrait de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie plutôt que seulement les émissions du territoire (Finkbeiner and Bach, 2021), et ainsi questionner les limites de l'approche territoriale.

Afin d'éclairer la faisabilité et l'intérêt d'une telle convergence, cette étude dresse un bilan des travaux d'ACV mentionnant le terme de neutralité carbone, avec pour objectif d'identifier les méthodes et approches de ces études et de fournir des conclusions générales sur l'utilisation de l'ACV ciblant la neutralité carbone.

2. Méthodes

Cette revue bibliographique est basée sur un recensement des publications croisant les concepts de « neutralité carbone » ou de « décarbonation » avec la notion d'« analyse du cycle de vie ». Une recherche orientée sur les mots clés « life cycle assessment », « life cycle analysis » en combinaison avec les termes « carbon neutrality », « carbon neutral », et « decarbonization » a été effectuée. Quatre bases de données ont été interrogées afin d'élargir au maximum le champ de recherche : Web of knowledge, Science Direct, Scopus et Wiley Online Library. Cette recherche a fourni 660 publications distinctes, après suppression des doublons en suivant l'approche méthodologique PRISMA (Mateo, 2020), pour les années 2001 à avril 2022.

Sur cette base, nous avons établi un panorama général (année, pays, thématique) des études, qui révèle l'intérêt porté pour le sujet neutralité carbone et ACV. La répartition géographique par pays, entre 2001 et avril 2022, a été effectuée grâce à l'outil Netscity (cet outil ne permettant d'analyser qu'une seule base de données à la fois, seuls les articles issus de Web of Science, i.e. 431 articles, sont comptés dans cette répartition). Cette répartition est mise en parallèle avec la carte des pays engagés vers un objectif de neutralité carbone, elle-même réalisée sur le logiciel MapChart, à partir des données issues de Net Zero Tracker ("Net Zero Tracker," 2022).

Toutes les publications retenues ont ensuite été examinées en détail pour identifier la méthode appliquée. A ce stade, l'analyse de certains articles, relevant d'apparence d'études ACV, n'en étaient finalement pas (ce fut le cas des revues, ou des articles citant les résultats d'une ACV précédente). Ainsi 235 articles ont été exclus du cadre de la recherche détaillée ci-après. Les 425 publications restantes ont alors été examinées selon les critères suivants : sujet d'étude, unité fonctionnelle/périmètre, ACV mono ou multicritère, méthode ACV (attributionnelle, prospective etc.) et couplage avec une autre méthode. Nous avons également investigué le cadre d'utilisation du terme « neutralité carbone ». Enfin, pour compléter l'état de l'art, les thèses françaises en cours ou soutenues ont été étudiées (Agence bibliographique de l'enseignement supérieur (ABES), 2022).

3. Résultats

3.1. Caractéristiques générales des études qui mentionnent « neutralité carbone » et « ACV »

L'évolution du nombre de publications entre 2001 et avril 2022 est illustrée sur la Figure 1. Il apparaît que le sujet (neutralité carbone et ACV) a été très peu étudié jusqu'en 2009 et qu'il a fallu attendre 2010 pour qu'il apparaisse progressivement dans la littérature. Depuis 2019, le sujet suscite un intérêt croissant, avec un total de 202 articles en 2021. Le bilan en avril 2022 montre que le sujet est au cœur

des préoccupations actuelles. Ce résultat est en accord avec le nombre croissant de pays qui s’engagent vers un objectif de neutralité carbone via un texte de loi, comme le révèle la Figure 2.

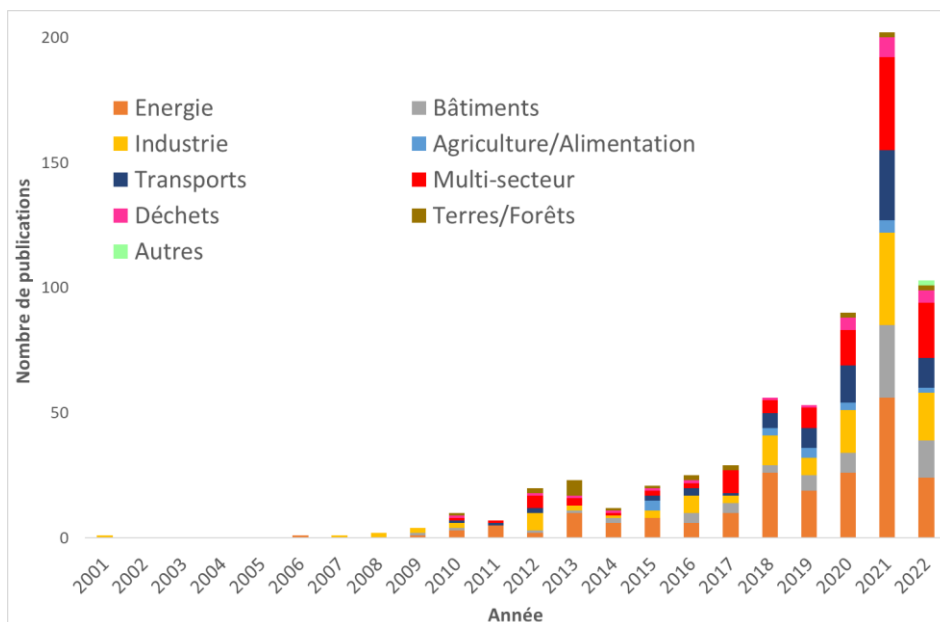


Figure 1 : Evolution du nombre de publications entre 2001 et avril 2022 sur le sujet « ACV » et « Neutralité Carbone » - 4 bases de données interrogées

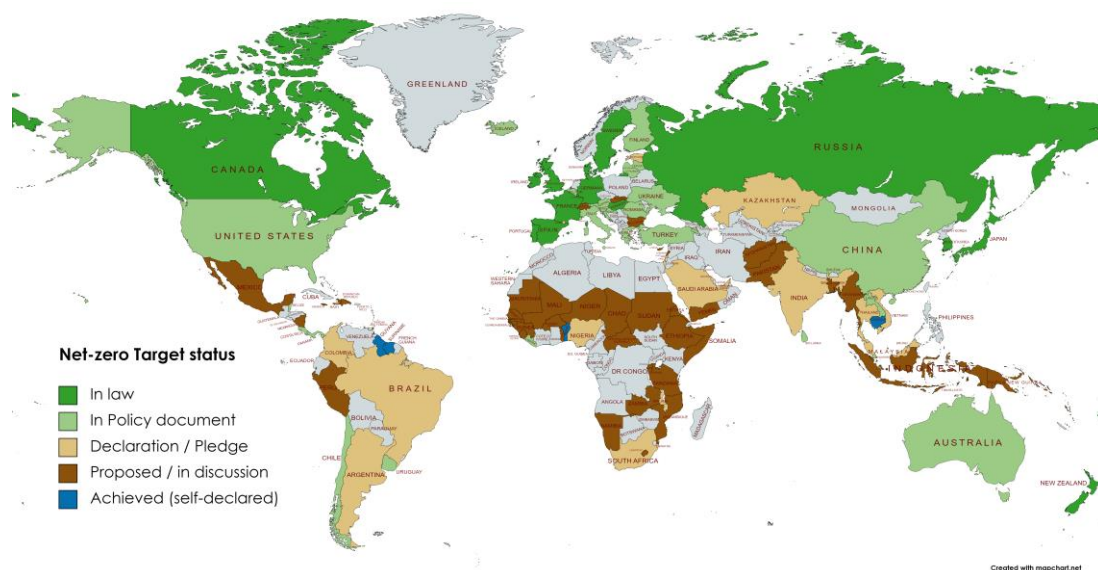


Figure 2 : Engagement des pays vers un objectif de neutralité carbone (selon que l’objectif soit atteint, inscrit dans la loi, dans un document politique, dans une déclaration ou seulement au stade de discussion). Données issues de Net Zero Tracker au 05/07/2022.

L'analyse géographique (Figure 3) met clairement en évidence que l'Europe, la Chine et les Etats-Unis se sont largement emparés du sujet, ce qui concorde avec les ambitions politiques de ces puissances économiques (Figure 2).

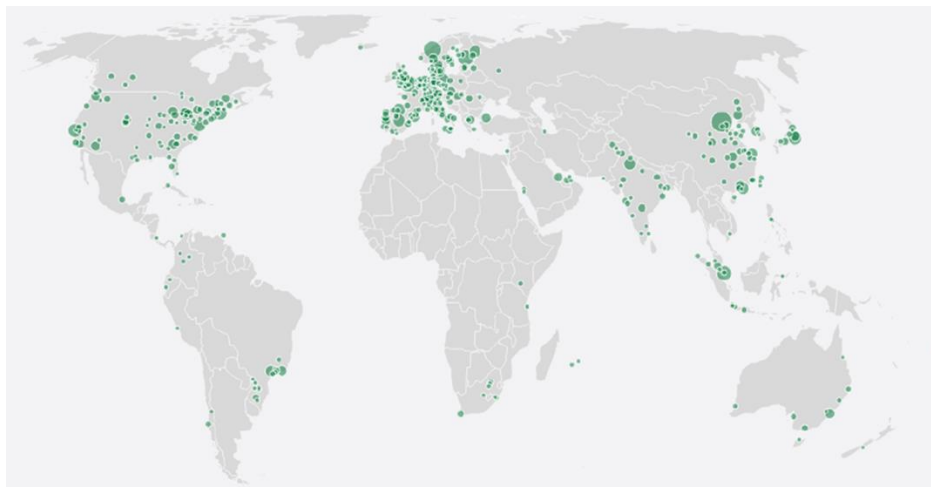



Figure 3 : Répartition géographique des travaux sur le sujet ACV et neutralité carbone entre 2001 et avril 2022 – base de données analysée : Web of Science – outil Netscity 

De cet examen général, on peut conclure que l'engagement des pays vers un objectif de neutralité carbone coïncide avec une croissance des travaux sur le sujet. L'étude des thèses françaises souligne l'importance des sujets de neutralité carbone et d'ACV (environ 100 thèses traitant de la neutralité carbone, et plus de 1000 soutenues ou en cours en France sur le sujet de l'ACV). Cependant, une seule thèse croisant les deux notions a été trouvée (Neves mosquini, 2020), appliquée au secteur des bâtiments.

3.2. Analyse des publications mentionnant neutralité carbone et ACV

Les résultats de l'analyse sont présentés selon les principales étapes de la méthode ACV.

3.2.1. Champ des études

La suite de l'analyse cible les secteurs d'activités des 425 articles recensés associant une démarche de neutralité carbone et les résultats d'une ACV (Figure 4). Toutes les composantes du système économique sont représentées, avec une forte contribution de l'énergie, de l'industrie, des bâtiments et des transports. Les travaux de recherche sur le secteur de l'énergie sont prédominants : l'utilisation d'énergie, tous secteurs confondus, représentait 75,6 % des émissions en 2017 en France (Ministère de la Transition Ecologique, 2020), renforçant ainsi l'enjeu de réduction des émissions de ce secteur.

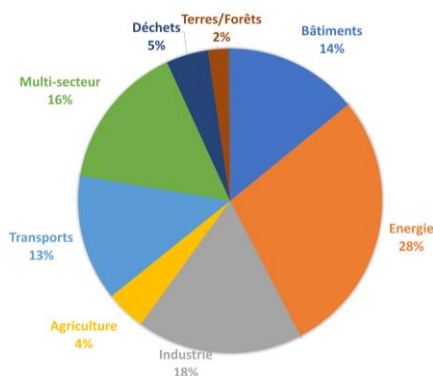


Figure 4 : Secteurs étudiés par les 425 travaux d'ACV recensés dans l'état de l'art.

La majorité des études ne couvrent qu'un seul secteur économique. Cependant, certains travaux (16 %) couvrent plus d'un secteur, c'est le cas des études de bioraffineries, ou d'unités de méthanisation, qui peuvent allier le secteur de l'agriculture, des déchets et de la production d'énergie par exemple.

Concernant les thèses, deux ont été soutenues sur l'ACV de scénarios de transitions énergétiques (Besseau, 2019; Er-Raki, 2021) et une en cours de préparation étudie l'objectif de neutralité carbone des bâtiments avec utilisation de l'outil ACV (Neves mosquini, 2020).

Néanmoins, aucune publication ne couvre l'ensemble des secteurs d'activités pris en compte dans la SNBC.

3.2.2. Unité fonctionnelle

L'étude des unités fonctionnelles des 425 publications révèle que, dans l'ensemble, les ACV menées ont une approche « produit » (production d'énergie, de matériau etc.) ou service (km parcouru, m², traitement de déchets etc.) (Figure 5). Quelques études ont une approche territoire et portent sur des scénarios de décarbonation ou la mise en place de politiques publiques. Ces dernières traitent néanmoins de la décarbonation d'un seul secteur (souvent l'énergie ou l'électricité).

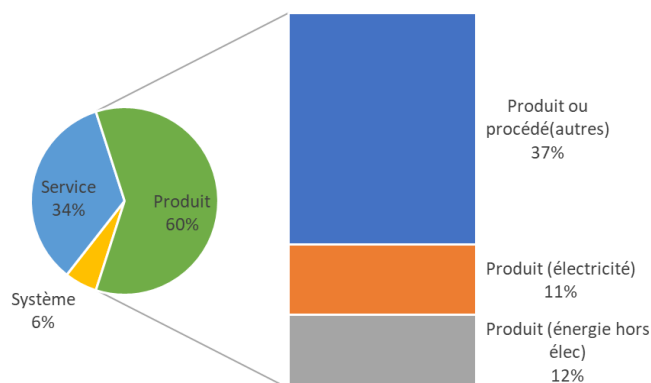


Figure 5 : Approches ACV des 425 publications de l'état de l'art

3.2.3. Critères environnementaux

La majorité des études (58 %) concernent le seul critère des émissions de gaz à effet de serre. Le potentiel multicritère de la démarche ACV n'est donc pas pleinement exploité.

3.2.4. Couplage avec une analyse technique, économique ou sociale

En termes de méthodologie, il est très fréquent que l'analyse environnementale par l'ACV soit couplée à une analyse technique, économique ou sociale, mettant en œuvre divers outils de modélisation (Modèle TIMES, MARKAL, PRIMES, MFA-Material Flow Analysis, BIM – Building Information Modeling, IAM- Integrated Assessment Model, Analyse Input-Output etc.). Ce résultat est aussi souligné par les auteurs d'une revue sur l'ACV et les scénarios prospectifs, qui ont comptabilisé que sur 498 articles, 41 % ont eu recours à l'utilisation d'un outil de modélisation supplémentaire (Bisinella et al., 2021).

3.2.5. Concept de neutralité carbone

La définition de la neutralité carbone à l'échelle mondiale est claire : pour l'atteindre, les émissions anthropiques de CO₂ devront être équilibrées par les méthodes d'absorption anthropique (IPCC, 2018). Cependant l'utilisation de ce terme dans les publications est beaucoup plus équivoque. Nous avons investigué le cadre d'utilisation de ce terme dans les 425 articles. La terminologie utilisée est très variable : on mentionne les notions de neutralité carbone, de neutralité climatique, d'objectif zéro

émissions nettes, d'objectif 2°C etc., la frontière entre les termes demeurant floue. Par ailleurs, la notion de neutralité carbone se décline à de nombreux champs d'applications : pays, ville, secteur économique, chaîne de production, matériaux etc., elle est aussi régulièrement employée pour caractériser les produits biosourcés.

On relève également que dans la majorité de ces cas, le terme neutralité carbone n'est utilisé que pour contextualiser la recherche, pour des travaux traitant uniquement de la décarbonation d'un secteur. De fait, les études qui mentionnent neutralité carbone et ACV se concentrent majoritairement sur l'objectif de réduction des émissions sans prise en compte de l'aspect compensation - cette notion apparaît toutefois dans les articles qui traitent des forêts, de la biomasse et de l'utilisation des terres. Ainsi, les ACV évaluent plutôt les mesures de réduction des émissions de GES, sans aller jusqu'au concept complet de neutralité carbone.

4. Enjeux de traduction d'un scénario de neutralité carbone en modélisation ACV

La revue bibliographique n'a donc pas identifié à notre connaissance d'application de l'ACV au concept de neutralité carbone. Elle a montré que la modélisation d'un scénario de neutralité carbone par ACV présente plusieurs défis car l'ACV est généralement plus adaptée à l'étude de produits commercialisés qu'à l'étude de systèmes dynamiques inscrits dans des contextes politiques et économiques complexes (Grubert, 2021).

Premièrement, il s'agit de s'adapter au caractère prospectif d'un scénario pour 2050. Bien que l'état de l'art ait révélé que l'ACV de scénarios prospectifs est un exercice courant, il n'en demeure pas moins complexe. Les difficultés inhérentes à la combinaison entre ces deux outils sont nombreuses : incertitudes élevées dues à l'impossibilité de modéliser le futur avec exactitude, absence de lignes directrices, collecte des données plus complexe etc.

Il faut aussi s'adapter au caractère multifonctionnel d'un territoire. Il ne s'agit pas d'évaluer un produit ayant une seule fonction et dont la définition de l'unité fonctionnelle est simple, mais de modéliser l'ensemble des sphères de l'économie, à travers la modélisation de secteurs très différents (tels que la production d'énergie, l'agriculture ou le traitement des déchets). Dans ce cadre, les données utilisées dans l'ACV ne seront pas spécifiques à une usine ou une entreprise, mais plutôt des moyennes sur le territoire.

Une autre difficulté est liée à la divergence des approches entre la vision territoriale et macro-économique des scénarios de neutralité et la vision « cycle de vie » d'un produit propre à l'ACV. Tandis que l'approche territoriale fournit une « photographie » des émissions françaises sur une année, la méthode ACV fournit une photographie des impacts sur l'ensemble du cycle de vie du produit ou service étudié, pouvant s'étaler sur plusieurs années et sur plusieurs territoires.

A ces difficultés s'ajoutent aussi les limites intrinsèques de l'ACV : les impacts calculés sont des impacts potentiels et non réels, les modèles ACV se basent sur la performance moyenne des processus, sans prise en compte d'évènements rares mais très problématiques (marées noires, accidents industriels etc.). Enfin l'ACV est généralement utilisée à des fins d'analyse ou de comparaison, sans prétendre fournir une évaluation absolue (Hauschild et al., 2018).

Enfin, la durée de réalisation d'une étude ACV peut varier fortement en fonction de l'objectif. De manière générale, la collecte de données est l'étape la plus chronophage, mais la fiabilité des résultats dépend de la précision de ces données. Ainsi, l'enjeu global de cet exercice est de tester l'applicabilité de l'ACV à des scénarios de neutralité carbone, afin de bénéficier de la rapidité et de la souplesse de calcul offerte par cette méthode.

5. Perspectives

Afin d'évaluer cette faisabilité, nous proposons de développer un cas test. Le scénario « Avec Mesures Supplémentaires » (AMS) de la SNBC (Ministère de la Transition Ecologique, 2020) sera retenu comme support méthodologique pour cette étude pour deux raisons majeures. D'une part, il s'inscrit naturellement dans le respect des objectifs de la loi et les orientations de la SNBC sont engageantes pour les décideurs publics, pour les entreprises et pour les citoyens. D'autre part, il dessine une trajectoire possible de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans tous les secteurs d'activité, jusqu'à l'atteinte de la neutralité carbone en 2050. Le bilan GES effectué par la SNBC repose sur une vision sectorielle et territoriale qui diffère de la vision ACV, comme illustré sur la Figure 6. Ainsi, l'enjeu sera de parvenir à extraire et adapter les données primaires fournies par la SNBC pour les adapter à une approche ACV, pour chaque secteur d'activité. Le logiciel Simapro sera utilisé pour développer le modèle ACV. Les données seront majoritairement issues de recherches bibliographiques, éventuellement validées par des experts et de la base de données Ecoinvent.

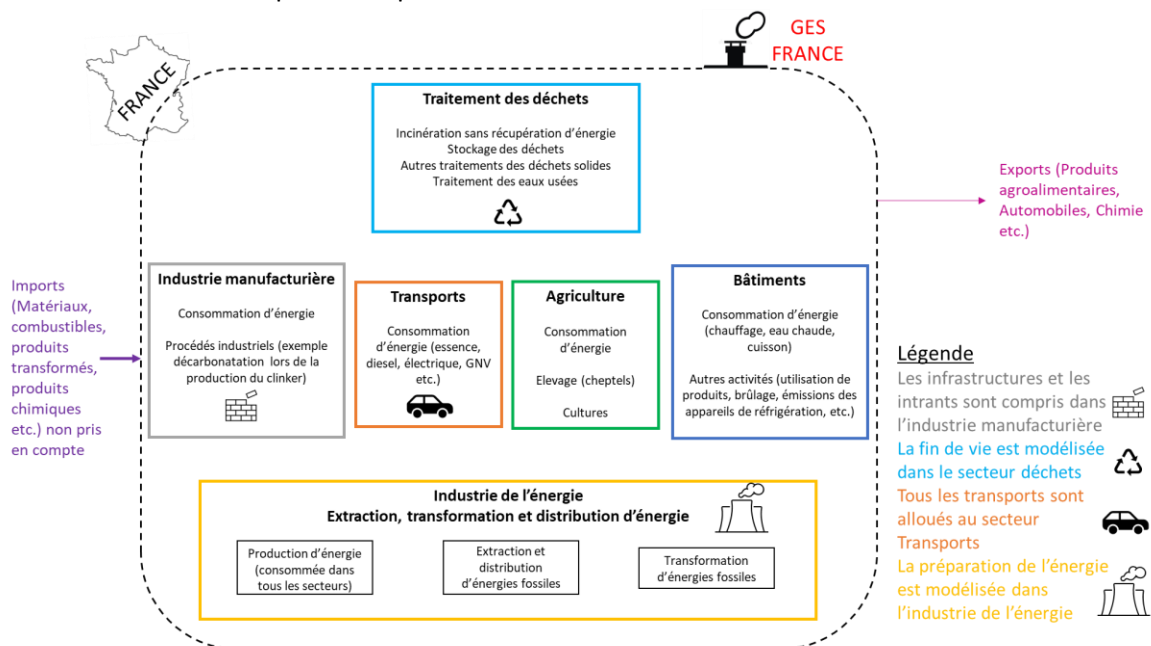


Figure 6 : Vision de la SNBC et parallèle avec les étapes de l'ACV

Conclusion

L'ACV apparaît comme un outil régulièrement mentionné lors des évaluations des scénarios de décarbonation. Néanmoins, l'ensemble des articles et des thèses explorés ne traitent généralement que d'un seul secteur (transports, bâtiments, énergie etc.) et ne couvrent pas l'ensemble des activités considérées dans les scénarios de neutralité carbone pour la France. Ainsi, jusqu'à présent, aucune étude traitant la neutralité carbone de la France sous l'angle ACV n'a été identifiée. Nos futurs travaux se proposent donc d'explorer l'application de l'ACV à des scénarios de neutralité carbone. Pour cela, on réalisera un cas test, fondé sur un scénario de référence public de neutralité carbone (par exemple, celui de la Stratégie Nationale Bas Carbone), et mis sous format ACV à l'aide d'un outil connu, afin de bénéficier de la rapidité et de la souplesse de calcul associé à l'ACV. Enfin, pour aborder l'objectif de neutralité, les deux états, actuel et horizon 2050 (cible de la neutralité carbone) serviront de référence pour la modélisation ACV.

Références bibliographiques

ADEME, 2021. Transition(s) 2050.

- Agence bibliographique de l'enseignement supérieur (ABES), 2022. Thèses [WWW Document]. URL <http://www.theses.fr> (accessed 7.11.22).
- Besseau, R., 2019. Analyse de cycle de vie de scénarios énergétiques intégrant la contrainte d'adéquation temporelle production-consommation (phdthesis). Université Paris sciences et lettres.
- Bisinella, V., Christensen, T.H., Astrup, T.F., 2021. Future scenarios and life cycle assessment: systematic review and recommendations. *Int. J. Life Cycle Assess.* 26, 2143–2170. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01954-6>
- Er-Raki, A., 2021. Etudes des impacts environnementaux pour l'évaluation dynamique des filières industrielles : application au déploiement des scénarios de la transition énergétique (These de doctorat). Toulouse, INPT.
- Finkbeiner, M., Bach, V., 2021. Life cycle assessment of decarbonization options—towards scientifically robust carbon neutrality. *Int. J. Life Cycle Assess.* 26, 635–639. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01902-4>
- Grubert, E., 2021. Beyond carbon in socioenvironmental assessment: Life cycle assessment as a decision support tool for net-zero energy systems. *Energy Clim. Change* 2, 100061. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100061>
- Hauschild, M.Z., Rosenbaum, R.K., Olsen, S.I. (Eds.), 2018. *Life cycle assessment theory and practice*. Springer International Publishing.
- International Organization for Standardization (ISO), 2006a. *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*, ISO 14040: 2006/Amd 1:2020.
- International Organization for Standardization (ISO), 2006b. *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*, ISO 14044: 2006/ Amd 2:2020.
- IPCC, 2018. *Summary for Policymakers of IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C approved by governments — IPCC*.
- Mateo, S., 2020. Procédure pour conduire avec succès une revue de littérature selon la méthode PRISMA. *Kinésithérapie Rev.* 20, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2020.05.019>
- Ministère de la Transition Ecologique, 2020. *Stratégie nationale bas-carbone*.
- négaWatt, 2021. *Scénario négaWatt 2022*.
- Net Zero Tracker [WWW Document], 2022. URL <https://zerotracker.net/> (accessed 7.6.22).
- Neves mosquini, L., 2020. *La neutralité carbone des bâtiments: combler le fossé entre les actions à court et à long terme* (These en préparation). Université Grenoble Alpes.
- RTE, 2021. *Futurs énergétiques 2050 - Principaux résultats*.
- UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015. *Paris Agreement*.