



**HAL**  
open science

## Guyomarc'h Fanny\_\_EVOLI\_\_Biblio

Mélanie Brumont, Fanny Guyomarc'H

► **To cite this version:**

Mélanie Brumont, Fanny Guyomarc'H. Guyomarc'h Fanny\_\_EVOLI\_\_Biblio. INRAE-IARA UMR 1253 Science et Technologie du Lait et de l'OEuf. 2022. hal-04584497

**HAL Id: hal-04584497**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04584497>**

Submitted on 23 May 2024

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

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

## Synthèse bibliographique en Biologie

Performances environnementales de produits alimentaires à base de viande, de lait ou d'œufs comparées à celles de leurs alternatives végétales, par analyse du cycle de vie.

Par Mélanie Brumont  
Année 2021-2022

Tutrice : Fanny Guyomarc'h

Science et Technologie du Lait et de l'Œuf

INRAE - Département TRANSFORM « Aliments, produits biosourcés et déchets »

*Master 2 Biologie Gestion – Université de Rennes 1*

**Remerciements**

Il est indispensable pour moi de remercier ma tutrice, Fanny Guyomarc'h, ingénieure de recherche à l'INRAE, sans qui la réalisation de cette synthèse bibliographique n'aurait été possible. Je souhaite la remercier pour sa gentillesse, sa réactivité, sa disponibilité et sa bienveillance à mon égard. Ses conseils et nombreuses connaissances ont permis d'aboutir au résultat attendu. Ce fut un réel plaisir et un honneur pour moi d'apprendre à ses côtés.

**Note des responsables du diplôme :** « Le tuteur chercheur a pour rôle de conseiller l'étudiant, l'orienter dans ses recherches bibliographiques, l'aider à comprendre les articles, en faire une synthèse de manière logique et rigoureuse. Il ne peut vérifier toutes les citations et interprétations de l'étudiant. Il ne peut donc s'engager vis à vis d'éventuelles erreurs ».

## L'évaluation des performances environnementales des produits végétaux comparés aux produits analogues à base de viande ou de lait, grâce à l'analyse du cycle de vie.

Mélanie Brumont

### Résumé

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode qui permet d'évaluer, de façon quantitative et multicritère, des impacts environnementaux liés à la fourniture d'un produit ou d'un service défini comme « unité fonctionnelle ». Cette synthèse bibliographique recense les travaux ayant comparé les performances environnementales de produits animaux vis-à-vis de leurs substituts végétaux grâce à cet outil, ou occasionnellement par des évaluations monocritères d'empreinte « carbone » ou « eau ». Les indicateurs étudiés concernent in fine les impacts sur la santé humaine, la santé des écosystèmes et les ressources naturelles. Les aliments d'origine animale ont un impact sur la planète plus nocif que les produits végétaux, c'est notamment le cas de la viande par rapport à ses analogues d'origine végétale. C'est également vrai pour le lait animal mais de façon moins évidente, car certaines boissons végétales comme celles à base d'amande sont parfois plus nocives pour l'environnement que le lait animal. De plus, il ne faut pas oublier de prendre en compte les besoins nutritionnels journaliers de l'Homme, qui sont, pour certains nutriments, couverts par de plus petites quantités de sources animales que de sources végétales. Bien que les informations sur ce sujet soient déjà nombreuses, les connaissances qui restent à découvrir sont encore larges, notamment au sujet des œufs et de leurs analogues végétaux.

### Sommaire

Introduction.....	4
I- La transition actuelle : alimentation et environnement.....	5
1- Impact de l'alimentation sur l'environnement : chiffres clés.....	5
2- La demande d'alternatives aux produits animaux.....	6
II- Analyse du cycle de vie.....	8
1- Catégorie d'impact et dommages.....	9
2- Méthodologie de l'ACV.....	11
3- Avantages et limitations de l'ACV.....	14
III- Le cycle de vie d'un produit animal comparé à un produit	

végétal.....	16
1- Viandes animales vs produits végétaux.....	16
2-        Produits                laitiers                animaux                vs                boissons	
végétales.....	23
3- Œufs vs produits végétaux.....	30
Conclusion.....	33
Bibliographie.....	35
Annexes.....	40

## Introduction

Dans un monde où le développement durable est plus que jamais au centre de l'attention, il est question de s'intéresser aux effets de l'alimentation adoptée par les Hommes sur la planète. En France, l'alimentation représente 24% de l'empreinte carbone des ménages, dont une large part est imputée à l'élevage (Barbier *et al.*, 2019). En Europe, l'agriculture est intensive et la demande de la viande est forte, aux dépens de la consommation de légumineuses (Cusworth *et al.*, 2021). En effet, selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 323 millions de tonnes de viande ont été produites dans le monde en 2017, avec des impacts négatifs majeurs sur le réchauffement climatique mais aussi sur les ressources en eau potable (Poore et Nemecek, 2018). Au vu de ces conséquences, les experts proposent alors une rééquilibration du ratio protéines végétales/protéines animales dans les régimes alimentaires en France vers 50% / 50%, contre 35% / 65% actuellement (INRAE, 2021). Les protéines végétales peuvent être apportées par les légumes secs et produits céréaliers mais également par les matières protéiques végétales issues du fractionnement de graines, feuilles ou encore tubercules. Ces sources protéiques peuvent présenter diverses propriétés et structures selon leur origine, leur localisation dans la plante ou encore les technologies mises en œuvre. Différents domaines d'innovation ont donc été identifiés pour favoriser leur utilisation plus large en alimentation humaine (Guéguen *et al.*, 2016).

Ces préoccupations s'expriment également au sein du grand public en France, comme en ont témoigné les travaux de la Convention citoyenne pour le climat, à l'origine de l'adoption de la loi Climat et résilience en 2021 (Ministère de la transition écologique, 2021). Cette loi dispose que les consommateurs et consommatrices devront pouvoir être informé·e·s des impacts environnementaux des produits achetés. Un vaste chantier d'élaboration d'une métrique « d'affichage environnemental » a donc été lancé par le gouvernement et arrive à son terme (Agence de la transition écologique, 2021).

De manière anticipée, 10 acteurs « engagés pour une alimentation durable » ont lancé un indicateur similaire, l'écoscore qui « note » l'empreinte environnementale des produits alimentaires. Celui-ci classe les aliments de A (impact le plus faible) à E (impact le plus fort), avec un code couleur du vert au rouge. La méthodologie est fondée l'analyse du cycle de vie (ACV), en s'appuyant sur la base de données publiques Agribalyse propre aux produits agricoles et alimentaires, pour calculer les impacts environnementaux : de la production, du transport, de la fabrication des emballages, etc (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, 2021). Dans ce contexte, cette synthèse bibliographique vise à recenser, au plan international, les études ayant évalué les performances environnementales des produits à base de viande, de lait ou d'œuf, en comparaison de celles de substituts d'origine végétale, en utilisant également l'analyse du cycle de vie ou des versions plus simples telles que l'empreinte carbone ou eau. Elle présentera tout d'abord le contexte avec l'empreinte de l'alimentation, puis s'intéressa à la méthode de l'ACV et enfin, à la comparaison des cycles de vie de produits animaux et de leurs alternatives végétales. Par ce recensement, nous pourrons dégager les grandes tendances qui émergent de ces comparaisons entre produits animaux et végétaux. Une conclusion clôturera cette synthèse et apportera des ouvertures sur le sujet.

## **I- La transition actuelle : alimentation et environnement**

### **1- Impact de l'alimentation sur l'environnement : chiffres clés**

L'alimentation d'une population mondiale de bientôt 8 milliards d'êtres humains, de la culture à l'assiette, est aujourd'hui un réel problème pour les écosystèmes. Elle est en lien direct avec l'appauvrissement des ressources (sols, eau, minéraux, énergies fossiles...), le changement climatique, la diffusion des polluants dans les écosystèmes ou encore l'érosion de la biodiversité (Poore et Nemecek, 2018). C'est donc l'ensemble des activités composant le système alimentaire qui est en cause à des niveaux divers : la production agricole, la transformation, la distribution et la consommation, de par leurs interactions respectives avec l'environnement (République Française, 2019). Au niveau mondial, l'étape de production agricole représente 61% des émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à l'alimentation, 79% de l'acidification et 95% de l'eutrophisation (Poore et Nemecek, 2018). Parmi les productions agricoles, c'est de loin l'élevage de ruminants qui est le plus impactant. Remplacer une viande rouge par une viande blanche n'est qu'une solution partielle, car porcs et volailles (monogastriques) sont nos concurrents alimentaires directs sur des ressources comme les

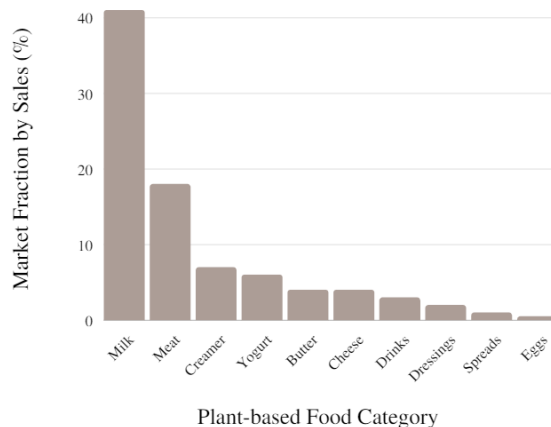
céréales dont ils sont de gros consommateurs. Il est donc temps d'encourager la population à remplacer une partie de leurs aliments d'origine animale par des aliments d'origine végétale. Certains pays essaient de s'y engager. Le PNNS (Programme National Nutrition Santé) français recommande plusieurs pratiques à travers le slogan « manger bouger ». Pour un mode de vie plus équilibré, il est conseillé d'augmenter son activité physique, la consommation de légumes secs et de fruits et légumes, mais aussi d'aller vers les féculents complets, le poisson ainsi que l'huile de colza, de noix et d'olive. Le PNNS propose également de réduire la consommation de viande rouge, d'alcool, de boissons sucrées, des aliments gras, salés, sucrés et ultra-transformés (MangerBouger, 2021). Conscient de ces problématiques et enjeux, l'Homme des pays développés s'interroge sur les alternatives pour mieux consommer et limiter son impact sur la planète.

## **2- La demande d'alternatives aux produits animaux**

Les consommateurs et consommatrices sont désormais à la recherche de produits plus durables et éthiques afin d'améliorer leur santé, d'une part, et le bien-être de la planète, d'autre part. L'industrie agroalimentaire connaît une transition importante et se tourne vers des produits à base de végétaux pour répondre à ces attentes. Il s'agit pour les producteurs d'imiter au mieux les aliments d'origine animale comme la viande, le poisson ou encore le lait, que ce soit au niveau de la texture, du visuel ou du goût ou bien de diversifier les aliments en proposant de nouvelles façons de consommer des protéines, par exemple galettes végétales ou mélanges de graines. Cette transition lance un défi majeur aux scientifiques en termes de formulation. En effet, ces aliments doivent présenter des profils nutritionnels intéressants : composition en micronutriments, biodisponibilité ou encore digestibilité, afin de remplir les mêmes fonctions alors que les nutriments comme les glucides, les protéines ou encore les lipides, ne sont pas les mêmes que dans produits à base de viande, de lait ou d'œuf (McClements et Grossmann, 2021).

Ce marché est actuellement en croissance exponentielle. Une organisation à but non lucratif basée à Washington DC, le Good Food Institute, a dévoilé qu'entre 2017 et 2019, une augmentation en valeur de près de 29% a été observée concernant les aliments à base de plantes aux Etats-Unis, parvenant à un marché de quasiment 5 milliards de dollars. En 2019, le segment générant le plus de ventes est le secteur des boissons végétales, suivies par les imitations de viande et les aides culinaires

(« creamer », Figure 1). Les alternatives au lait semblent faire l'unanimité et générer une forte demande de la part des consommateurs, contrairement aux substituts d'œufs (McClements et Grossmann, 2021).



**Figure 1 :** Partie du marché des ventes au détail d'aliments d'origine végétale par catégorie. Les produits d'origine végétale les plus vendus sont les boissons (« milk »), suivies par les substituts de la viande (« meat »), les aides culinaires (« cream ») et les alternatives au beurre ou au fromage. En dernière position et avec une très petite fraction des ventes, sont présents les alternatives aux œufs. (Figure personnelle réalisée d'après McClements et Grossmann, 2021).

De par une demande en constante évolution, ces ventes pourraient être multipliées par 7 pour atteindre 35 milliards de dollars en 2024 aux Etats Unis. Les principales motivations d'achat sont le bénéfice pour sa propre santé, des questions éthiques liées au bien-être animal et le bénéfice pour l'environnement (Schiano *et al.*, 2020). Bien sûr, la consommation de protéines végétales peut aussi être liée à des raisons telles que les croyances familiales, les religions ou bien les influences parentales, sociétales ou politiques. Enfin, les producteurs visent à satisfaire au mieux les consommateurs et consommatrices : les produits se doivent d'être sûrs, pratiques, savoureux et surtout abordables (McClements et Grossmann, 2021).

De telles opportunités incitent les opérateurs de l'agroalimentaire à se mettre à l'alimentation végétale pour recruter de nouveaux consommateurs. Nous pouvons citer la gamme Garden Gourmand de Nestlé ou encore The Vegetarien Butcher d'Unilever qui visent une population française flexitarienne, végétarienne ou simplement curieuse d'expérimenter une nouvelle assiette. Xerfi, cette catégorie pourrait d'ailleurs générer 40 millions de chiffre d'affaires supplémentaires par an en France.



Cette offre permettrait, avec celles des acteurs historiques tels que Nutrition & Santé, Triballat ou Bjorg, de toucher 66 millions de consommateurs (LSA, 2020). De plus, il en ressort d'une étude de l'institut YouGov que 58% des Français de 55 ans et plus ont diminué leur consommation de viande depuis 10 ans (LSA, 2021). Pour être en bonne santé, 53% de la population pense qu'il faut manger de la viande. A contrario, 23% des personnes interrogées par YouGov déclarent pouvoir devenir végétariennes ; et les 18-24 ans sont plus nombreux à envisager un régime sans viande. Enfin, les consommateurs et consommatrices sont 67% à penser que les marques devraient proposer davantage de produits végétaux. Dans les gammes les plus achetées, c'est le « Bon végétal » qui est en tête de la marque Herta avec 18%. Ce produit est particulièrement acheté par la tranche d'âge 35-44 ans (27%). Ce sont les gammes « Carrefour Veggie » et « Côté Végétal » de Fleury Mignon qui complètent le top 3. En revanche, une étude de l'institut YouGov indique que seulement 19% des Français trouvent que l'offre des produits végétaux en GMS est de qualité. Tous les substituts de viande ne sont pas forcément durables, certains peuvent parfois même être ultra-transformés ; et les consommateurs et consommatrices en sont conscients (LSA,2021). Ils exigent des informations plus claires et une réglementation car l'étiquetage ou la sécurité réveillent leurs inquiétudes (Alcorta et *al.*, 2021). La majorité (61%) de la population trouve que ces produits sont proposés à des prix trop élevés (LSA, 2021).

Enfin, pour 74% des français, un repas végétarien partagé entre amis ou en famille peut avoir une connotation négative. Au niveau culturel, 67% de la population française juge qu'il est compliqué d'adapter les recettes traditionnelles et authentiques françaises à la cuisine végétarienne. En outre, 51% trouvent que les plats réalisés à partir d'aliments d'origine végétale manquent de saveur. Toutefois, les mentalités et modes de consommation ne cessent d'évoluer, et le végétal a plutôt l'air de se faire une place dans l'alimentation des Français (CultureNutrition, 2021). Nous pouvons donc dire que même si la demande en alimentation végétale est en hausse, le pas à sauter pour se mettre à une consommation plus verte n'est donc pas toujours évident. En outre, il est primordial de bien sélectionner et associer les aliments afin d'obtenir l'adhésion des consommateurs tout en informant sur les risques de carences nutritionnelles pour les consommateurs qui choisissent ce type de produits, dont le profil protéique et vitaminique est parfois moins bien adapté que les produits animaux (Alcorta *et al.*, 2021).

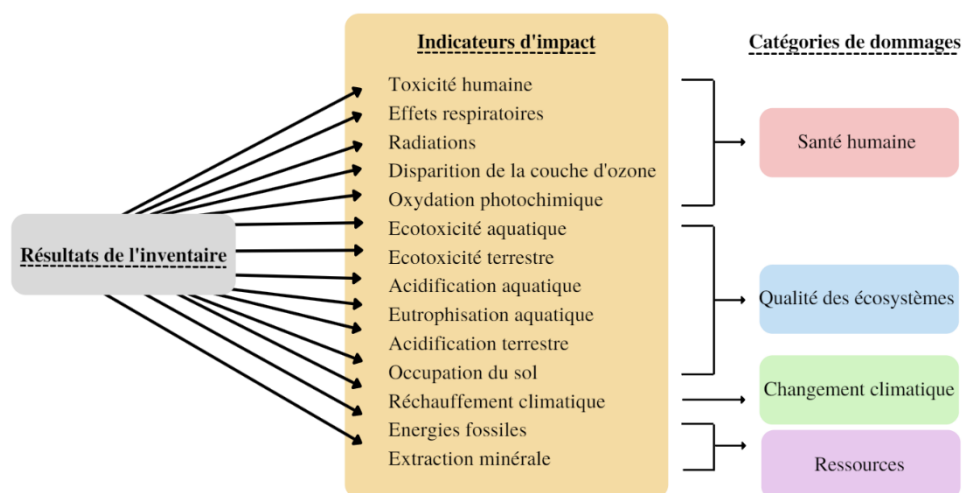
## II- Analyse du cycle de vie

Afin d'analyser l'impact de l'alimentation sur l'environnement, il est nécessaire de s'intéresser aux cycles de vie des produits consommés. Une forme monocritère courante de l'évaluation du cycle de vie est le bilan environnemental des gaz à effet de serre (ou BEGES ou « bilan carbone » qui est le nom donné par le bureau d'étude Carbone 4). L'empreinte hydrique, ou empreinte « eau », en est une autre. Une forme multicritère, plus complète est représentée par l'analyse du cycle de vie, autrement dénommée « écobilan » ou « ACV ». En plus des impacts associés aux émissions de gaz à effet de serre, l'ACV évalue les impacts associés à d'autres émissions, tels que ceux induits par les polluants, les poussières, etc ; ainsi que les impacts associés à la consommation des ressources naturelles, telles que l'eau, les ressources fossiles et la terre. L'intérêt de l'analyse de cycle de vie est de proposer une métrique permettant de quantifier les impacts, sur la base d'une méthodologie normée à l'échelle internationale (ISO 14044). Cette quantification permet d'établir un diagnostic de l'état actuel d'un système, de comparer différents systèmes permettant de fournir la même fonction (produit ou services) et surtout d'apporter et de mesurer des améliorations apportées au système (Agence de la transition écologique, 2021).

### 1- Catégories d'impact et dommages

De manière consensuelle, l'analyse des impacts environnementaux fait intervenir deux grands « espaces » conceptuels : l'écosphère et la technosphère, représentant respectivement les équilibres naturels et le domaine des interventions humaines. Chaque intervention humaine produit *a priori* des échanges entre la technosphère et l'écosphère, qu'on appelle *flux élémentaires* entrants (les prélèvements sur le milieu naturel) ou sortants (les émissions vers le milieu naturel). Chacun de ces flux produit *a priori* un ou des *impacts environnementaux* ; par exemple, une émission de dioxyde de soufre aura un impact sur le réchauffement climatique mais aussi sur la pollution aérienne et l'entretien du smog.

Réciproquement, un impact peut être causé par différents flux ; on parle alors de *catégorie d'impact*. L'exemple typique est celui du réchauffement climatique, qui peut être induit par l'émission de plusieurs types de gaz à effet de serre, dans différentes circonstances (combustion de carburants, épandage d'effluents d'élevage, etc). Enfin, les catégories d'impact, dites aussi « impacts intermédiaires » ou « midpoint » induisent ultimement des *dommages* ou « impact finaux » ou « endpoint » sur 3 domaines de protection : la qualité des écosystèmes, la santé humaine et les ressources naturelles. Le changement climatique est parfois sorti des écosystèmes pour être lui-même distingué comme un dommage ultime (Figure 2 – Moign, 2010).



**Figure 2 :** Indicateurs et catégories d'impact de la méthode "impact 2002+". La méthode ACV nécessite le choix d'indicateurs environnementaux et d'une méthode de calcul associée. La méthode nommée « impact 2002+ » permet l'obtention d'un score environnemental global. Celle-ci comprend 14 facteurs d'impact qui se regroupent en 4 catégories de dommages : celui sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes, le changement climatique et enfin les ressources (Figure personnelle inspirée de celle de Moign, 2010).

Dans le domaine agro-alimentaire, les catégories d'impact les plus saillantes sont le réchauffement climatique, l'occupation du sol et/ou le changement d'usage des terres, l'eutrophisation des eaux, l'acidification (terre et eaux) et l'écotoxicité (sur les écosystèmes et sur l'humain) :

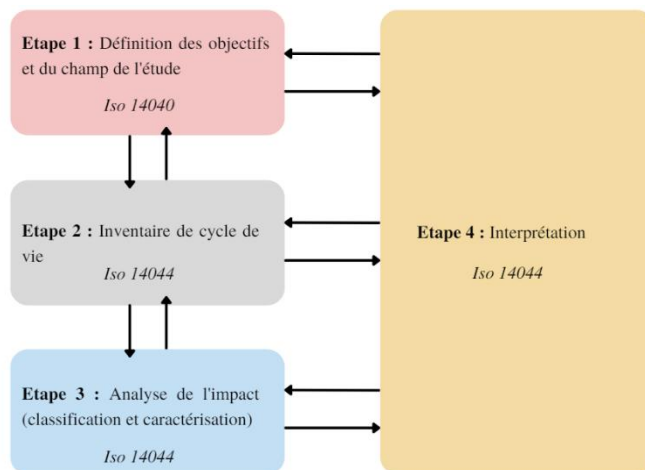
- L'agriculture émet notamment du méthane et du protoxyde d'azote. Ces deux gaz étant respectivement 28 et 210 fois plus « réchauffant » que le dioxyde de carbone, ils contribuent fortement au réchauffement climatique de par l'épandage des engrais azotés minéraux et organiques (WWF, 2021). Une autre source importante du réchauffement climatique d'origine agricole est la déforestation en zone tropicale (Pendrill *et al.*, 2019).
- L'écotoxicité d'un milieu est due à la dégradation induite par la pollution issue de produits phytosanitaires (antifongiques, pesticides, herbicides) utilisés pour la production agricole et destinés à l'élimination des nuisibles en culture (Aquaportail, 2021). Attention, les relations de cause à effets sont multiples et encore mal quantifiées.
- L'eutrophisation est la conséquence d'une saturation des cours d'eau et des eaux de surface par un excès de nutriments. Ce phénomène s'explique notamment par l'agriculture et l'élevage intensifs. Effectivement, les engrais chimiques, les fumiers et lisiers utilisés engendrent la contamination des milieux naturels car leurs excès sont drainés par les intempéries (youmatter, 2020).
- La moitié des terres émergées ont été touchées par des changements d'origine anthropique, dans le cas de conversions, de passage d'une catégorie d'occupation à une autre, ou bien de par des modifications engendrant une évolution à l'intérieur d'une catégorie même (comme un changement de type de production sur une terre agricole par exemple). Les phénomènes agricoles, notamment l'extension de l'agriculture, sont en partie responsables de ces problématiques environnementales (Turner et Mc Candless, 2004).
- L'acidification des océans est causée par l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Ce gaz se transforme par réaction chimique en acide carbonique et l'océan s'acidifie alors progressivement. Le CO<sub>2</sub> présent dans l'air provient des activités agricoles et anthropiques engendrant des émissions de GES (République Française, 2019).
- L'acidification des sols peut être un phénomène naturel dans certains contextes comme les tourbières acides. Mais, l'Homme, par le biais des engrais utilisés en agriculture ou de la pollution atmosphérique par le SO<sub>2</sub> aggrave fortement ce phénomène (Collier *et al.*, 1990).

Dans la section suivante, nous allons détailler la manière dont sont réalisées les ACV. Brièvement, la première étape consiste à préciser les objectifs et champ de l'étude, en particulier la *fonction* ( fourniture d'un produit ou service) qui nous intéresse, le *système* (séquence d'opérations) qui permet de réaliser cette fonction, et les *limites* de ce système qui permet de définir les opérations incluses ou excues du systèmes. Sur cette base, on réalise un *inventaire de cycle de vie*, c'est-à-dire un

recensement de tous les flux intervenant dans les limites du système étudié : le *flux de référence* (flux principal orienté vers la satisfaction de la *fonction*) et les *flux intermédiaires* entrants (matières premières, énergies, eau) et sortants (co-produits, déchets). Idéalement, ces flux intermédiaires sont eux-mêmes détaillés sous la forme de leurs flux élémentaires. Par exemple, on peut calculer une émission de méthane liée à l'épandage d'un effluent d'élevage, via un modèle mathématique de diffusion des molécules dans l'air, l'eau ou le sol qui tiendrait compte des caractéristiques locales et météorologiques. Sauf si ce niveau de détail est important, on recourt généralement à des bases de données internationales pour inventorier les flux élémentaires à partir de la désignation des flux intermédiaires. Par exemple, en inventoriant un flux entrant de carton d'emballage dans un système, la base de données y associera les flux élémentaires de consommation de ressources, de consommation d'énergie et d'émission de polluants, déterminés de façon coopérative par des groupes de travail internationaux. Une fois l'inventaire complété, un logiciel d'ACV pourra réaliser le calcul des impacts et des dommages pour chaque catégorie (Penicaud et Fonseca, 2019).

## 2- Méthodologie de l'ACV

La norme *ISO 14040 Management environnemental – Analyse du cycle de vie* se compose de quatre étapes : définition des objectifs et du champ de l'étude, réalisation et analyse de l'inventaire du cycle de vie, analyse de l'impact et l'interprétation (Figure 3).



**Figure 3 :** Les différentes étapes de l'analyse de cycle de vie (Figure personnelle réalisée à partir des informations de Penicaud et Fonseca, 2019 et de Moign, 2010).

La première étape est la définition des objectifs et du champ de l'étude, c'est un point décisif

pour l'ACV : il s'agit de définir quel est l'objet que l'on veut étudier, quelle est sa fonction, pour quelles raisons l'ACV est réalisée (afin de fixer le niveau d'exigence souhaitée sur la qualité des données) mais aussi qui sont les destinataires de l'étude. L'*unité fonctionnelle* (unité, masse ou portion par exemple, permettant de remplir la fonction) servira à déterminer un *flux de référence* (intrants et sortants permettant la production d'une unité fonctionnelle) pour la collecte des données, et est également utile pour pouvoir comparer deux ou plusieurs processus remplissant une même fonction (par exemple, choisir des lentilles ou des lunettes pour corriger la vue). L'ACV a pour principe d'élargir le périmètre le plus possible afin de pouvoir étudier l'ensemble du cycle de vie du produit, notamment dans le cas des produits alimentaires. En effet, dans ces produits le poids de l'amont (production agricole) est déterminant et celui de l'aval (gaspillage alimentaire) est souvent mal évalué mais porteur de sens pour le public. Pour un usage en interne de l'ACV, un périmètre concernant seulement les étapes sur lesquelles une action est possible peut être suffisante. Si un système génère différents produits et que l'on se s'intéresse qu'à un seul d'entre eux, il est nécessaire de réaliser une allocation pour attribuer les impacts aux différents produits, ce qui peut être par exemple être fait en calculant le pourcentage de l'impact total à attribuer à chacun, sur une base de calcul physique (par exemple les masses respectives) ou économique (valeurs respectives - Penicaud et Fonseca, 2019).

La seconde étape concerne l'inventaire du cycle de vie. Il consiste en la réalisation d'un bilan quantifié des flux de référence en matière et en énergie sur la totalité du cycle de vie, ce bilan étant ramené à l'unité fonctionnelle. Pour chaque processus, il faut collecter la nature et quantité de chaque intrant matière et énergie, de même que chaque émission de déchets et de pollutions. Les données sont classées par catégories (intrants, produits, émissions...) et doivent être cohérentes. Si elles peuvent être mesurées, site-spécifique, ce sont alors des données primaires. En revanche, si elles sont obtenues par simulation, requête de base de données, dans la bibliographie ou encore en interrogeant des experts ou en consultant la réglementation : il s'agit de données secondaires. Les données peuvent être spécifiques du système étudié (premier plan) ou être génériques (d'arrière-plan ; comme par exemple la fourniture d'électricité du réseau). Il est indispensable de sélectionner les flux élémentaires (incluant l'utilisation des ressources, émissions dans l'air, l'eau et la terre associés au système) qui sont intéressants pour la collecte des données car une collecte exhaustive serait impossible. Certaines règles existent : une sélection des flux contribuant à davantage de 5% en masse de la totalité des intrants est admise, mais doit être adaptée. C'est-à-dire qu'un composé toxique représentant moins de 5% de la totalité des intrants, mais plus de 5% des impacts, doit quand même être inclus dans l'étude. Dans le but d'évaluer

la qualité des données, leur exactitude, leur représentativité (temporelle, géographique et technologique) et leur complétude sont notées à partir d'une grille d'évaluation. Il s'agit alors de s'intéresser à la justesse et la fidélité de l'instrument de mesure, la temporalité des mesures et le nombre d'échantillons si la donnée a été obtenue par mesure, tandis que si elle est obtenue par calcul, il faut s'attarder sur la pertinence des modèles mathématiques utilisés ainsi que les compétences de l'expert.

La troisième étape est l'analyse de l'impact qui consiste à convertir les flux matières et énergies collectés en impacts environnementaux. Il est important de définir les catégories d'impact que l'on souhaite évaluer : le changement climatique par exemple, les indicateurs pertinents ainsi que les modèles de caractérisation utilisant des facteurs d'émissions calculés dans l'inventaire ou disponibles dans les bases de données. Ces facteurs reflètent la pression environnementale exercée par unité d'émission (rejet) ou de ressource consommée pour chaque impact. Comme nous l'avons déjà mentionné, les impacts peuvent être répartis en deux grandes catégories : « midpoint » pour intermédiaire et « endpoint » pour final, selon la place occupée dans la chaîne de causalités du système (Penicaud et Fonseca, 2019).

**Tableau 1:** Différences entre les catégories « endpoint » et « midpoint » (Tableau personnel réalisé à partir des informations de Penicaud et Fonseca, 2019).

Endpoint	Midpoint
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concerne 3 dommages : santé humaine, disponibilités des ressources et dommages liés aux écosystèmes naturels,</li> <li>- Méthodes de calcul ne font pas consensus internationalement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impacts généralement quantifiés : changement climatique, destruction de la couche d'ozone, eutrophisation...</li> <li>- Méthodes plus précises : évaluation faite en amont de la chaîne de causalité.</li> </ul>

A savoir que les méthodes « midpoint » sont plus souvent utilisées dans les ACV. Le calcul et l'analyse de l'impact se fait grâce à l'utilisation feuilles de calculs ou de logiciels dédiés tels que Bilan Produit, Open LCA ou SimaPro, eux-mêmes adossés à des bases de données pour alimenter les données d'arrière-plan. Il suffit de construire le cycle de vie du produit, de documenter son inventaire puis de sélectionner la méthode de caractérisation souhaitée, le logiciel donne les résultats quantifiés de

la contribution du système aux dommages environnementaux. Quand les indicateurs sont obtenus, ils



peuvent être agrégés pour être compris par des non spécialistes mais cela peut engendrer des pertes

d'informations et des mauvaises interprétations, c'est donc une technique qui doit être utilisée avec

précaution. La *dernière étape* est l'interprétation. L'ACV est une méthode qui demande de poser des

hypothèses et limites conditionnant les résultats, l'interprétation est transversale aux étapes

précédentes. Effectivement, pour chacune d'entre elles, il est nécessaire de s'interroger sur la

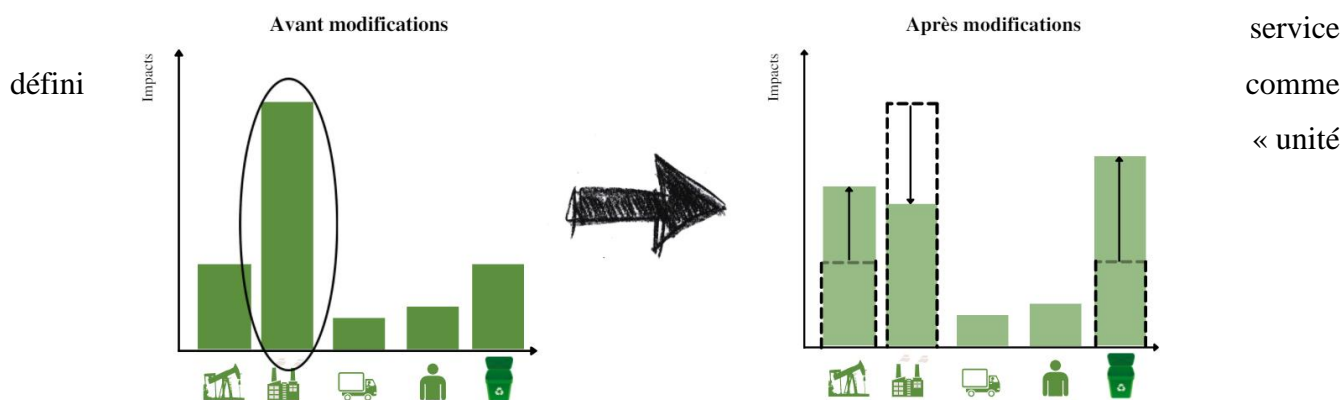
pertinence et la cohérence des choix faits et des biais qui auraient pu être faits et qui modifieraient les

résultats. C'est souvent le cas pour le choix du périmètre de l'analyse, de l'unité fonctionnelle et des

données utilisées mais aussi pour la pertinence et de la méthode de caractérisation employée (Penicaud et Fonseca, 2019). L'interprétation doit pouvoir identifier les éléments majeurs (étapes du cycle de vie, catégorie de données), d'expliquer les limites, la sensibilité à certains paramètres clés susceptibles de faire varier le résultat si eux-mêmes varient, et les incertitudes de l'étude réalisée. Dans le cadre de ces précautions, l'étude permet de fournir des conclusions sur la question posée et des recommandations pour améliorer les problèmes environnementaux (Figure 2).

### 3- Avantages et limitations de l'ACV

En résumé, l'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode permettant une évaluation quantitative et multicritères des impacts environnementaux liés à la fourniture d'un produit ou d'un



fonctionnelle ». En bref, elle réalise le bilan de toutes les consommations de ressources et de toutes les émissions chimiques ou physiques, rapportés à la fourniture d'une unité fonctionnelle, en tenant compte de toutes les étapes amont à aval. Cette analyse multi-étape est extrêmement complète, c'est une méthode de référence tant dans l'univers scientifique que socio-économique. De plus, c'est une technique normalisée, ce qui cadre la méthodologie, les possibilités d'application mais également les risques et écueils à éviter. Comparée au BEGES ou à l'empreinte « eau », la force de cette méthode réside dans son caractère multicritère, qui permet d'acquérir des connaissances sur le(s) lien(s) entre le processus étudié, ses différents impacts et les dommages environnementaux qu'il cause, dans toute leur variété. Ainsi, on évite les transferts d'impact en étant capable de mesurer si l'amélioration d'un critère ne crée pas une aggravation sur un autre critère (Figure 4 – Orée, 2013).



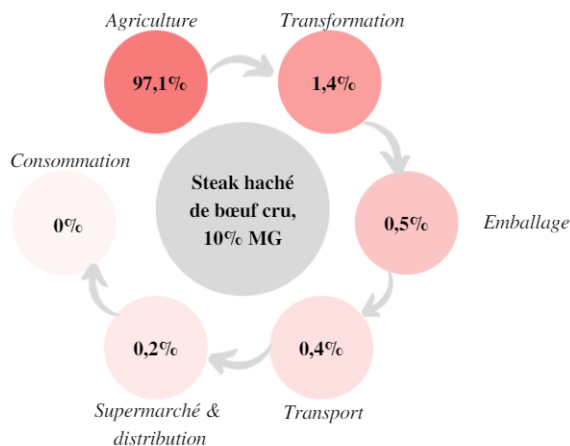
**Figure 4 :** Illustration d'un transfert d'impact après modification d'un procédé (Figure personnelle réalisée d'après Orée, 2013).

Elle présente toutefois certaines limites : il faut faire des choix pour définir les hypothèses qui la rendront pertinente (allocations, périmètre, unité fonctionnelle). Les résultats multicritères ne sont pas faciles à interpréter ni à communiquer, ce qui nécessite parfois de les agrégés sous la forme d'un indicateur unique, comme l'empreinte écologique. En outre, c'est une méthode qui n'est pas vraiment bien adaptée pour l'analyse d'une innovation de rupture, pour laquelle les données nécessaires sont la plupart du temps assez parcellaires, qualitatives voire inexistantes (Penicaud et Fonseca, 2019).

#### 4- Exemples

Prenons l'exemple de l'empreinte environnementale d'un steak haché de bœuf cru comportant 10% de matières grasses. Le score environnemental du steak haché est de 3,42 millipoints/kg, il s'agit d'une moyenne pondérée des 15 indicateurs indiqués dans la Figure 5, ils sont calculés grâce à la méthodologie européenne nommée « Product Environmental Footprint », qui agrège les résultats des 15 autres impacts montrés dans le tableau. Il faut savoir que plus le score est bas, plus son impact sur l'environnement est faible. La figure 5 indique également l'impact de ce produit par étapes du cycle de vie (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, 2021).

**Figure 5 :** Impact d’un steak haché de bœuf cru comportant 10% de matière grasses par étapes du cycle de vie et valeurs des indicateurs environnementaux utilisés pour calculer le score environnemental (Agence de l’environnement et de la maîtrise de l’énergie, 2021).



Indicateur	Mesure	Unité (par kg de produit)
Score unique EF	3,42	<i>mPt/kg</i>
Changement climatique	41,43	<i>kg CO2 eq</i>
Appauvrissement de la couche d'ozone	0,82	<i>E-06 kg CFC11 eq</i>
Rayonnements ionisants	1,95	<i>kBq U-235 eq</i>
Formation photochimique d'ozone	52,1	<i>E-03 kg NMVOCeq</i>
Particules	2,31	<i>E-06 disease inc.</i>
Acidification terrestre et eaux douces	0,49	<i>mol H+ eq</i>
Eutrophisation terrestre	2,19	<i>mol N eq</i>
Eutrophisation eaux douces	1,91	<i>E-03 kg N eq</i>
Eutrophisation marine	105,68	<i>E-03 kg N eq</i>
Utilisation du sol	2374,08	<i>CTUe</i>
Exotoxicité pour écosystèmes aquatiques d'eau douce	288,1	<i>CTUe</i>
Epuisement des ressources eau	6,93	<i>m3 depriv.</i>
Epuisement des ressources énergétiques	87,69	<i>MJ</i>
Epuisement des ressources minéraux	15,16	<i>E-06 kg Sb eq</i>

L’analyse du cycle de vie est donc une méthode très intéressante pour étudier l’impact environnemental des aliments et cela pour tout ou partie de leur cycle de vie. Dans un troisième temps, nous allons comparer les cycles de vie de produits animaux comparés à des substituts végétaux.

### III- Le cycle de vie d’un produit animal comparé à celui d’un produit végétal

Cette partie est majoritairement présentée sous forme de tableaux pour faciliter la présentation des résultats. Ils ne contiennent que les résultats de l’analyse du cycle de vie. Des calculs à partir des données publiées ont été réalisés dans le but de convertir et homogénéiser les résultats. Des détails sur les frontières, limites, calculs initiaux ou encore sur la provenance des produits des différents articles (hors données Agribalyse) sont présents dans les tableaux complets en annexes.

Il s’agit dans un premier temps de comparer des viandes animales à des analogues végétaux, puis nous nous intéresserons aux produits laitiers animaux en les comparant aux boissons végétales ; enfin, ce sont les œufs qui seront étudiés en parallèle de produits analogues végétaux.

#### 1- Viandes animales vs produits végétaux

**Tableau 2 :** Empreinte carbone du cycle de vie de viandes animales en comparaison à des substituts végétaux, en kg CO<sub>2</sub> eq, pour « masse équivalence de CO<sub>2</sub> émis », par kg de produit.

<u>EMPREINTE CARBONE / CHANGEMENT CLIMATIQUE</u>		
Auteur(e)s	Résultats (en kg CO <sub>2</sub> eq/kg)	Frontières

	<i>Végétal</i>	<i>Viande</i>	
Detzel <i>et al.</i> , 2021	- Alternative (lupin & sarrasin) : <b>2,40 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b> - Alternative (lupin & aramante) : <b>2,35 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b> - Variante optimisée : <b>1,32 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	- Poulet "haute performance" (poulets de chair hautement industrialisés) : <b>6,25 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b> - Poulet "conventionnel" : <b>9,47 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	- Viande : considération des GES dus au changement d'affectation des sols (alimentation au soja du Brésil) - ACV du "berceau à la porte". - Production, élimination et maintenance des infrastructure exclus, matériaux d'emballages des produits finaux aussi.
Peters <i>et al.</i> , 2010	/	- Viande de mouton : <b>12,32 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b> (valeur moyenne) - Viande de bœuf : <b>16,04 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b> (valeur moyenne)	Production
Delting <i>et al.</i> , 2016	Burger végétarien (ail et quinoa) : <b>7,38 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	Burger de bœuf : <b>61,6 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	Inclus : Production d'aliments pour animaux, élevage, fabrication, conditionnement, vente au détail et distribution, consommation.
Saerens <i>et al.</i> , 2021	Galette de burger de soja avec protéines végétales texturées : <b>0,7 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	Galette de bœuf pour burger : <b>22,4 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	De l'acquisition (production) des matières premières jusqu'à "la porte de l'usine" avant le transport. Exclusion de l'emballage, la distribution, de la consommation et du traitement des déchets.
Saget <i>et al.</i> , 2021	Boules de protéines de pois : <b>11 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	Boulettes de viande de bœuf à la suédoise : <b>147 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	- ACV suit les directives de l'empreinte environnementale du produit de la commission européenne 2018 pour les étapes agricoles, distribution, stockage et cuisson. - La fin de vie est exclue. - Le coût d'opportunité du carbone est incluse dans les valeurs.
Smetana <i>et al.</i> , 2015	Repas à base de farine de soja : <b>2,65 - 2,78 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	Poulet : <b>5,2 - 5,83 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	- Le système est envisagé du berceau (production de matières premières) à l'assiette (utilisation par le consommateur). - Le recyclage des emballages et le traitement des déchets après consommation humaine sont exclus.
Confidentiel (2016)	- Haché végétal : <b>1.4 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b> - Boulettes végétales : <b>1.8 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	- Haché de bœuf : <b>12.8 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b> - Boulettes au bœuf : <b>6.4 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	Frontières : du berceau à la tombe en incluant les emballages, le transport, distribution, consommation et traitement des déchets.

L'empreinte carbone est, pour les 6 articles étudiés, beaucoup plus importante (10 fois plus dans certains cas) pour les aliments d'origine animale que pour les analogues végétaux. On peut remarquer que selon le type d'animal ou selon la façon dont les produits sont cuisinés, les valeurs varient. Par exemple, les boulettes de bœuf à la suédoise étudiées par Saget *et al.* (2021) ont une empreinte bien plus forte que la viande de poulet étudiée par Smetana *et al.* (2015). Les valeurs de l'étude de Saget *et al.* (2021) incluent en effet le « coût d'opportunité du carbone », c'est-à-dire l'impact d'un changement d'usage de terres à des fins de production agricole (typiquement : la déforestation), au contraire des autres travaux, ce qui peut expliquer que les valeurs soient un peu plus importantes, même si elles restent totalement dans la même tendance. Des différences peuvent également être observées pour des produits similaires. En effet, on remarque que la galette de bœuf pour burger étudiée par Delting *et al.* (2016) a une empreinte carbone quasiment 3 fois plus importante que celle étudiée par Saerens *et al.* (2021) En réalité, cela est dû au fait que l'étude de Delting *et al.* (2016) a pris en compte des étapes du cycle de vie supplémentaires telles que le conditionnement, la vente au détail ainsi que la distribution et la consommation.

**Tableau 3 :** Empreinte hydrique du cycle de vie de viandes animales en comparaison à des substituts végétaux (en litres d'eau par kg de produit ou L/kg).

<b>EMPREINTE HYDRIQUE / CONSOMMATION D'EAU</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en L/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Végétal</i>	<i>Viande</i>	
Ercin <i>et al.</i> , 2012	Burger de soja produit aux Pays bas : <b>1053,3 L/kg</b>	Burger de bœuf produit aux Pays bas : <b>6666,7 L/kg</b>	- Les composants des empreintes eaux opérationnelles et de la chaîne d'approvisionnement sont exclus, tout comme l'empreinte eau liée au transport des matières et l'énergie utilisée lors de la production (négligeables). - Empreinte des matériaux d'emballages incluse : ils sont les mêmes pour viande et soja.
Fresán <i>et al.</i> , 2019	Galette de saucisse végétarienne : <b>1200 L/kg</b>	Galette de saucisse de porc : <b>2900 L/kg</b>	- Culture des ingrédients bruts, transport des ingrédients bruts, la fabrication du matériel d'emballage et toutes les activités en usine (stockage, transformation, conditionnement...) inclus. - De même pour les phases de génération d'analogues de viande (production, transport, transformation...).
Thrane <i>et al.</i> , 2017	- Maïs : <b>1222 L/kg</b> - Soja : <b>2145 L/kg</b> - Pomme de terre : <b>287 L/kg</b>	- Viande de porc : <b>5988 L/kg</b> - Poulet : <b>4325 L/kg</b> - Mouton : <b>10415 L/kg</b> - Bœuf : <b>15415 L/kg</b>	- ACV du berceau à la porte. - Résultats de l'ACV basés sur deux méthodologies différentes : la modélisation conséquentielle et la modélisation attributionnelle (manière différente de traiter les calculs d'impacts environnementaux).

Concernant l'empreinte hydrique ou consommation d'eau, les substituts végétaux présentent empreinte hydrique au moins deux fois inférieure à celle de la viande qu'ils remplacent. On peut voir que les viandes de mouton et de bœuf ont des empreintes hydriques supérieures à 10 000 L tandis que des légumes bruts comme la pomme de terre sont à moins de 300 L. Le soja a une empreinte hydrique plus importante que les autres végétaux, c'est une culture qui demande beaucoup d'eau. De plus, il faut savoir que le bétail est souvent nourri à base de plantes telles que le soja, ce qui accentue l'impact environnemental de l'alimentation à base de produits animaux. Concernant le bœuf, la valeur de l'étude d'Ercin *et al.*, (2012) est inférieure à celle de Thrane *et al.* (2017) car elle n'a pas tenu compte de la chaîne d'approvisionnement, des transports ni de l'énergie utilisée lors de la production.

**Tableau 4 :** Energie utilisée lors du cycle de vie de viandes animales en comparaison à des substituts végétaux (en mégajoules par kg de produit ou MJ/kg). Pour la référence de la viande de mouton pour Peters *et al.*, nous avons calculé la moyenne des données fournies pour différents pays et différents modes d'élevage, sans autre pondération.

<b>ÉNERGIE UTILISÉE</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en MJ/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Végétal</i>	<i>Viande</i>	
Heller <i>et Keoleian</i> , 2018	Galette de hamburger végétale (Beyond Meat) : <b>6,1 MJ/kg</b>	Galette de bœuf haché : <b>11,4 MJ/kg</b>	- Exclusion des activités au niveau de la vente au détail et des consommateurs. - - - Berceau à la distribution (les activités de vente au détail et de consommation sont considérées comme équivalentes et il s'agit de la chaîne d'approvisionnement contrôlée par Beyond Meat).

Peters <i>et al.</i> , 2010	/	- Viande de mouton : <b>32,9 MJ/kg</b> (valeur moyenne) - Viande de bœuf : <b>20 MJ/kg</b>	Production
-----------------------------	---	---	------------

Nous pouvons remarquer que le cycle de vie de la viande utilise plus d'énergie que celui des équivalents végétaux. Si l'on compare les valeurs d'énergie utilisée pour la viande de bœuf entre les deux articles, on observe que celle de Peters *et al.* (2010) est plus élevée alors qu'elle concerne seulement le processus de production. Il est expliqué dans l'article que la majorité des bovins de la chaîne d'approvisionnement passent 110 à 120 jours dans un parc d'engraissement avant d'être envoyés à l'usine de transformation. De plus, le système étudié englobe tous les processus sur site ainsi qu'en amont à la ferme, au parc d'engraissement, à l'usine de transformation complète ainsi que le transport entre les deux. Peut-être que dans l'article d'Heller et Keoleian, les valeurs sur la partie du cycle de vie concernant la production ne sont pas si précises. De plus, le bœuf étudié dans cet article provient des USA, contre l'Australie pour Peters *et al.* (2010), les variations étant très importantes selon le pays en raison des modes d'élevage différents.

**Tableau 5 :** Utilisation des terres lors du cycle de vie de viandes animales en comparaison à des substituts végétaux, en mètre carré \* année par kg de produit, ou m<sup>2</sup>a/kg, pour tenir compte de la saisonnalité et de la saisonnalité et de la succession des cultures.

<b>UTILISATION DES TERRES</b>			
<b>Auteur(e)s</b>	<b>Résultats (en m<sup>2</sup>a/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Végétal</i>	<i>Viande</i>	
Heller et Keoleian, 2018	Galette de hamburger végétale (Beyond Meat) : <b>0,45 m<sup>2</sup>a / kg</b>	Galette de bœuf : <b>3,8 m<sup>2</sup>a/kg</b>	- Exclusion des activités au niveau de la vente au détail et des consommateurs. - Berceau à la distribution (les activités de vente au détail et de consommation sont considérées comme équivalentes et il s'agit de la chaîne d'approvisionnement contrôlée par Beyond Meat).
Saerens <i>et al.</i> , 2021	Galette de burger de soja avec protéines végétales texturées : <b>1,39 m<sup>2</sup>a/kg</b>	Galette de bœuf pour burger : <b>5,91 m<sup>2</sup>a/kg</b>	De l'acquisition (production) des matières premières jusqu'à "la porte de l'usine" avant le transport. Exclusion de l'emballage, la distribution, de la consommation et du traitement des déchets.
Smetana <i>et al.</i> , 2015	Repas à base de farine de soja : <b>1,06 - 1,44 m<sup>2</sup>a/kg</b>	Poulet : <b>3,85 - 3,89 m<sup>2</sup>a/kg</b>	- Du berceau (production de matières premières) à l'assiette (utilisation par le consommateur). - Exclusion du recyclage des emballages et du traitement des déchets après consommation humaine.
Confidentiel (2016)	- Haché végétal : <b>1,8 m<sup>2</sup>a / kg</b> - Boulettes végétales : <b>1 m<sup>2</sup>a / kg</b>	- Haché de bœuf : <b>23 m<sup>2</sup>a / kg</b> - Boulettes au bœuf : <b>10,9 m<sup>2</sup>a / kg</b>	Frontières : du berceau à la tombe en incluant les emballages, le transport, distribution, consommation et traitement des déchets.

La consommation de produits animaux demande une superficie de terres supérieure à celle de leurs analogues végétaux. Nous observons que pour un produit analogue de la viande, il faut compter

environ  $1 \text{ m}^2\text{a/kg}$ , tandis que pour de la viande comme du bœuf ou du poulet, l'utilisation des terres est plus de trois fois plus importante, en raison des cultures nécessaires à l'alimentation et à l'élevage du bétail.

**Tableau 6 :** Appauvrissement de l'ozone lors du cycle de vie de viandes animales en comparaison à des substituts végétaux, en équivalent en masse de trifluorochlorométhane, ou kg CFC-11 eq, par kg de produit.

<b>APPAUVRISSMENT DE L'OZONE</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en kg CFC-11/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Végétal</i>	<i>Viande</i>	
Saget <i>et al.</i> , 2021	Boules de protéines de pois : <b><math>6,5e^{-7}</math> kg CFC-11 eq/kg</b>	Boulettes de viande de bœuf à la suédoise : <b><math>1,1e^{-6}</math> kg CFC-11 eq/kg</b>	- ACV suit les directives de l'empreinte environnementale du produit de la commission européenne 2018 pour les étapes agricoles, distribution, stockage et cuisson. - La fin de vie est exclue. - Le coût d'opportunité du carbone est inclus dans les valeurs.
Saerens <i>et al.</i> , 2021	Galette de burger de soja avec protéines végétales texturées : <b><math>4,3e^{-8}</math> kg CFC-11 eq/kg</b>	Galette de bœuf pour burger : <b><math>8,8e^{-8}</math> kg CFC-11 eq/kg</b>	De l'acquisition (production) des matières premières jusqu'à "la porte de l'usine" avant le transport. Exclusion de l'emballage, la distribution, de la consommation et du traitement des déchets.

La tendance générale de ces valeurs montrent que les produits carnés engendrent un appauvrissement de l'ozone plus fort que les produits végétaux. Les valeurs de l'étude de Saget *et al.* (2021), sont supérieures à celles de Saerens *et al.* (2021), pour les raisons méthodologiques déjà expliquées plus haut (Tableau 2).

**Tableau 7 :** Ecotoxicité terrestre du cycle de vie de viandes animales en comparaison à des substituts végétaux, en équivalent en masse de 1,4 di chlorobenzène par kg de produit, ou kg 1,4-DB eq/kg.

<b>ÉXOTOXICITÉ TERRESTRE</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en kg 1,4-DBeq/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Végétal</i>	<i>Viande</i>	
Saerens <i>et al.</i> , 2021	Galette de burger de soja avec protéines végétales texturées : <b>0,006 kg 1,4-DBeq/kg</b>	Galette de poulet pour burger : <b>0,14 mg kg 1,4-DBeq/kg</b>	De l'acquisition (production) des matières premières jusqu'à "la porte de l'usine" avant le transport. Exclusion de l'emballage, la distribution, de la consommation et du traitement des déchets.
Confidentiel (2016)	- Haché végétal : <b>0.007 kg 1,4-DB eq / kg</b> - Boulettes végétales : <b>0.004 kg 1,4-DB eq / kg</b>	- Haché de bœuf : <b>0.014 kg 1,4-DB eq / kg</b> - Boulettes au bœuf : <b>0.017 kg 1,4-DB eq / kg</b>	Frontières : du berceau à la tombe en incluant les emballages, le transport, distribution, consommation et traitement des déchets.

L'écotoxicité terrestre est environ 20 fois plus importante lors du cycle de vie (de la production à la porte de l'usine) pour une galette de poulet pour burger que pour une galette de soja, selon Saerens *et al.* (2021).

**Tableau 8 :** Ecotoxicité marine du cycle de vie de viandes animales en comparaison à des substituts végétaux, en équivalent en masse de 1,4 di chlorobenzène par kg de produit, ou kg 1,4-DB eq/kg.

<b>EXOTOXICITÉ MARINE</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en kg 1,4-DBeq/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Végétal</i>	<i>Viande</i>	
Fresán <i>et al.</i> , 2019	Analogues de viande : <b>0,0068 kg 1,4-DBeq/kg</b>	/	- Culture des ingrédients bruts, transport des ingrédients bruts, la fabrication du matériel d'emballage et toutes les activités en usine (stockage, transformation, conditionnement...) inclus. - De même pour les phases de génération d'analogues de viande (production, transport, transformation...).
Saerens <i>et al.</i> , 2021	Galette de burger de soja avec protéines végétales texturées : <b>0,0008 kg 1,4-DBeq/kg</b>	Galette de boeuf pour burger : <b>0,006 kg 1,4-DBeq/kg</b>	De l'acquisition (production) des matières premières jusqu'à "la porte de l'usine" avant le transport. Exclusion de l'emballage, la distribution, de la consommation et du traitement des déchets.

Concernant l'écotoxicité marine cette fois, elle est plus ou moins égale pour tous les produits étudiés ici, même si Fresán *et al.* (2019) ont étudié des cycles de vie plus longs que Saerens *et al.* (2021) en incluant le transport ainsi que les activités en usine. Nous pouvons donc dire que l'écotoxicité marine est plus ou moins similaire dans les cycles de vie de produits animaux par rapport aux produits végétaux.

**Tableau 9 :** Eutrophisation marine du cycle de vie de viandes animales en comparaison à des substituts végétaux, en kg d'équivalent azote par kg de produit, ou kg N eq/kg.

<b>EUTROPHISATION MARINE</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en kg N eq/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Végétal</i>	<i>Viande</i>	
Fresán <i>et al.</i> , 2019	Analogues de viande : $2,2 \times 10^{-3} = 0,0022 \text{ kg N eq/kg}$	Viande : <b>0.02-0.11 kg N eq/kg</b>	- Culture des ingrédients bruts, transport des ingrédients bruts, la fabrication du matériel d'emballage et toutes les activités en usine (stockage, transformation, conditionnement...) inclus. - De même pour les phases de génération d'analogues de viande (production, transport, transformation...).
Saget <i>et al.</i> , 2021	Boules de protéines de pois : <b>0,013 kg N eq/kg</b>	Boulettes de viande de bœuf à la suédoise : <b>0,19 kg N eq/kg</b>	- ACV suit les directives de l'empreinte environnementale du produit de la commission européenne 2018 pour les étapes agricoles, distribution, stockage et cuisson. - La fin de vie est exclue. - Le coût d'opportunité du carbone est inclus dans les valeurs.

On observe que les cycles de vie de produits animaux engendrent une eutrophisation marine plus importante (environ dix fois plus importante) que les cycles de vie de leurs substituts végétaux. Pour les substituts, les valeurs de Fresán *et al.* (2019) sont deux fois supérieures à celles de Saget *et al.* (2021), cela est probablement dû au fait que cette étude tient compte de la fin de vie des produits (stockage, conditionnement, transport, fabrication du packaging etc) contrairement à l'étude de Saget *et al.* (2021) qui exclut ces étapes, mais inclut en revanche le coût d'opportunité du carbone.

Attention, comme dit précédemment, les valeurs des impacts environnementaux sont pour la quasi-totalité du temps bien plus importantes pour les cycles de vie animaux que pour les cycles de vie de produits végétaux, mais il faut également tenir compte de la quantité de produits qui doit être consommée pour atteindre les besoins nutritionnels nécessaires par jour pour un homme ou une femme. Par exemple, une galette de soja retrouvée en grandes surfaces alimentaires contient entre 10 et 15 g de protéines pour 100g de produit tandis qu'une galette de bœuf en possède entre 20 et 25 g de protéines pour 100g. Même si les produits analogues à la viande possèdent une bonne dose de protéines, il faudra en manger davantage de steak haché pour atteindre ses besoins journaliers, ce qui pèse sur leur impact environnemental rapporté non plus à la masse, mais à la quantité de protéines. L'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) recommande 0,83 g/kg en moyenne de protéines par jour pour un adulte en bonne santé, soit 58 g de protéines pour un adulte de 70 kilos (Anses, 2021). Detzel *et al.* (2021) ou Saget *et al.* (2021) montrent toutefois qu'il est possible de formuler des analogues végétaux, substituts de viande, qui peuvent couvrir les besoins énergétiques ou les besoins protéiques tout en conservant des impacts environnementaux significativement plus faibles que ceux d'une portion de viande couvrant les mêmes besoins.

## 2- Produits laitiers animaux vs boissons végétales

Intéressons-nous dans un second temps à la comparaison de produits laitiers avec leurs substituts végétaux (=boissons végétales). Comme pour la viande, des conversions ont été réalisées pour homogénéiser les résultats et pouvoir les comparer. Pour des raisons de praticité, nous considérons une densité de 1 kg/L pour toutes les boissons et nous avons converti en données par kg les valeurs données par L.



**Tableau 10 :** Empreinte carbone du cycle de vie de produits laitiers animaux en comparaison à des boissons végétales ou des végétaux, en masse équivalence de CO<sub>2</sub> par kg de produit, ou kg CO<sub>2</sub> eq/kg.

<b>EMPREINTE CARBONE / CHANGEMENT CLIMATIQUE</b>			
<b>Auteur(e)s</b>	<b>Résultats (en kg CO<sub>2</sub> eq/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Boisson végétale</i>	<i>Produit laitier animal</i>	
Clune <i>et al.</i> , 2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Légumes de plein champ : <b>0,37 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Fruits et légumes de serre passive : <b>1,10 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Fruits et légumes (serre chauffée) : <b>2,13 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Boisson de soja : <b>0,75 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Boisson d'amande &amp; lait de coco : <b>0,42 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Moyenne mondiale du lait: <b>1,29 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Crème: <b>5,64 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Fromage : <b>8,55 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Yaourt : <b>1,31 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Beurre : <b>9,25 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Différentes limites dans cette étude regroupant d'autres articles</li> <li>- Valeurs converties aux limites du système du centre de distribution régional.</li> <li>- Les valeurs sont des médianes.</li> </ul>
Detzel <i>et al.</i> , 2021	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boisson végétale : <b>0,24 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Boisson végétale optimisée : <b>0,21 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lait de vache "conventionnel" : <b>1,17 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Lait de vache "haute performance" : <b>0,89 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ACV « du berceau à la porte » comprenant toutes les étapes du cycle de vie (approvisionnement matières premières, produits alimentaires finaux, transport, chaînes d'énergie).</li> <li>- Production, élimination et maintenance des infrastructure et matériaux d'emballage exclus.</li> </ul>
Grant et Hicks , 2018	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boisson d'amande : <b>3,85 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Boisson de soja : <b>3,27 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> </ul>	Lait de vache : <b>2,75 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exclusion : utilisation par les consommateurs, élimination des emballages.</li> <li>- Inclusion : production agricole, transport vers une usine de transformation, la transformation du lait, du transport vers le magasin de détail à Chicago et de la vente au détail + emballage en tant que matériel dans la transformation.</li> </ul>
Winans <i>et al.</i> , 2019	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boisson d'amande : <b>0,39 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Boisson de soja : <b>0,42 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Boisson de pois : <b>0,44 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> </ul>	Lait d'animal : <b>1,80 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inclusion : (pour les amandes) Culture, décorticage, épluchage, transformation en farine, production de lait et des autres ingrédients, exploitation des installations.</li> <li>- Exclusion : Impacts de la construction des installations et des biens d'équipement.</li> <li>- Valeurs tirées de d'autres études citées par Winans <i>et al.</i>, 2019.</li> </ul>
Feraldi <i>et al.</i> , 2012	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boisson d'amande : <b>0,058 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Boisson de soja : <b>0,32 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Lait de coco : <b>0,053 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> </ul>	/	Du berceau à la tombe.
Floren <i>et al.</i> , 2013	Boisson d'avoine fraîche : <b>0,49 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	Lait : <b>1,32 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inclusion : Consommation par le consommateur, dont l'élimination des emballages.</li> <li>-Prise en compte de sous étapes du cycle de vie (transport intermédiaire...).</li> <li>- Chaque partie comprend les émissions et la consommation des ressources.</li> </ul>
Agribalyse, ADEME	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boisson de soja : <b>0,42 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Boisson d'amande : <b>1,08 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Lait de coco : <b>0,52 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Boisson d'avoine : <b>0,36 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lait de vache demi-écrémé : <b>1,49 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Lait de chèvre demi-écrémé : <b>1,63 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> </ul>	Agriculture, transformation, emballage, transport, distribution et consommation inclus.
Confidentiel (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- « Yaourt » végétal fraise : <b>0,6 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Crème végétale chocolat : <b>1.3 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Yaourt fraise : <b>0.7 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> <li>- Crème laitière chocolat : <b>1.4 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b></li> </ul>	Frontières : du berceau à la tombe en incluant les emballages, le transport, distribution, consommation et traitement des déchets.

Les cycles de vie des produits laitiers animaux engendrent une empreinte carbone plus forte (au moins deux fois supérieure) que la même masse de boissons végétales ou de végétaux. Concernant les

produits laitiers, c'est le beurre qui semble avoir l'impact le plus important, suivi par le fromage, la crème puis le yaourt et le lait. Les valeurs de l'étude de Grant et Hick (2018) sont supérieures à celles des mêmes produits étudiés dans les autres articles. En effet, ces scientifiques ont exprimé dans leur étude que leurs valeurs étaient en effet plus fortes que celles des autres scientifiques et que cela était sûrement dû aux méthodes utilisées, ainsi qu'aux allocations par exemple. De plus, les amandes utilisées pour la boisson d'amande ont fait le transport de la Californie à Chicago, ce qui engendre un impact environnemental très fort. En effet, même si le transport n'est pas la partie du cycle de vie dominant pour le lait animal, c'est le cas pour les deux boissons végétales dans cette étude. Enfin, on peut voir qu'une boisson d'avoine (par exemple) est environ 3 fois moins impactante en termes d'empreinte carbone que du lait de vache. Or, une boisson d'avoine bio de la marque *Bjorg* contient 0,5g de protéines pour 100 mL contrairement au lait de vache demi-écrémé qui en possède environ 3g, soit 6 fois plus. Il faudrait donc boire en quantité bien plus d'une boisson végétale que du lait animal pour atteindre le même apport en protéines et la boisson végétale deviendrait alors, bien plus impactante sur l'environnement qu'un lait animal, si on se réfère aux apports nutritionnels et non plus à la masse. Dans leur étude comparant le lait de vache à des boissons au soja ou à l'amande, Grant et Hicks (2018) calculent également que les impacts de l'amande sont 2 ou 5 fois plus élevés que le lait ou le soja, respectivement, si on considère comme unité fonctionnelle la fourniture de 1 kg de protéines et non 1 kg de boisson. Concernant les données de l'ADEME sur Agribalyse, elles montrent la même tendance que les articles étudiés.

**Tableau 11 :** Empreinte hydrique du cycle de vie de produits laitiers animaux en comparaison à des boissons végétales, en litres par kg de produit ou L/kg.

<b>EMPREINTE HYDRIQUE / CONSOMMATION D'EAU</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en L/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Boisson végétale</i>	<i>Produit laitier animal</i>	
Ercin <i>et al.</i> , 2012	Boisson de soja : <b>297 L/kg</b>	Lait de vache : <b>1050 L/kg</b>	- Les composants des empreintes eau opérationnelle et de la chaîne d'approvisionnement sont exclus, tout comme l'empreinte eau liée au transport des matières et l'énergie utilisée lors de la production (négligeables). - Empreinte des matériaux d'emballages incluse : ils sont les mêmes pour viande et soja.
Feraldi <i>et al.</i> ,	- Boisson de soja: <b>26,74 L/kg</b>	/	Du berceau à la tombe.

2012	- Boisson d'amande : <b>66 L/kg</b> - Lait de coco : <b>3,58 L/kg</b>		
Floren <i>et al.</i> , 2013	Boisson à l'avoine fraîche : <b>8 L/kg</b>	Lait de vache : <b>0,9 L/kg</b>	- Inclusion : Consommation par le consommateur, dont l'élimination des emballages. -Prise en compte de sous étapes du cycle de vie (transport intermédiaire...) - Chaque partie comprend les émissions et la consommation des ressources.
Agribalyse, ADEME	- Boisson de soja : <b>150 L/kg</b> - Boisson d'amande : <b>1954 L/kg</b> - Lait de coco : <b>790 L/kg</b> - Boisson d'avoine : <b>140 L/kg</b>	- Lait de vache demi-écrémé : <b>470 L/kg</b> - Lait de chèvre demi-écrémé : <b>1130 L/kg</b>	Agriculture, transformation, emballage, transport, distribution et consommation inclus.

Ici, nous pouvons voir des résultats relativement différents concernant les empreintes hydriques des laits animaux face aux boissons végétales. Pour Ercin *et al.* (2012), la consommation d'eau est plus importante pour le lait de vache, tandis que c'est l'inverse dans l'étude de Floren *et al.* (2013) qui présentent également des chiffres plus faibles de 2 à 3 ordres de grandeur que les autres études. L'explication réside dans leur méthodologie, car au contraire des autres travaux, ils n'ont considéré que l'eau bleue (captage, nappe ou surface) et, en particulier, ont exclu l'eau de pluie. Ils ont aussi appliqué un « coefficient de rareté », qui gonfle artificiellement la valeur de la boisson à l'avoine (partiellement fabriquée en Allemagne, où l'eau est plus rare qu'en Suède) en comparaison du lait (produit en Suède). Dans l'article de Feraldi *et al.* (2012), les valeurs d'empreinte hydrique se rapprochent plus de l'ordre de grandeur trouvé dans l'étude confidentielle. Si l'on s'intéresse aux valeurs d'Agribalyse, elles se rapprochent de celles d'Ercin *et al.* (2012), l'empreinte hydrique du lait animal serait alors plus forte que celle des boissons végétales, sauf pour la boisson à base d'amande. La culture de l'amendier, comme toutes les noix, est en effet connue pour son fort besoin en irrigation, qui pose des problèmes considérables notamment en Californie.

**Tableau 12 :** Energie utilisée lors du cycle de vie de produits laitiers animaux en comparaison à des boissons végétales, en mégaJoule par kilogramme ou MJ/kg.

<b>ÉNERGIE UTILISÉE</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en MJ/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Boisson végétale</i>	<i>Produit laitier animal</i>	
Birgersson <i>et al.</i> , 2009	Boisson de soja : <b>3,37 MJ/kg</b>	Lait d'animal : <b>3,9 MJ/kg</b>	- Etude basée sur la consommation régulière de lait (Suède) : impact sur le transport du soja. - Production peut se faire en Belgique : incidence sur le transport. - Exclusion des équipements nécessaires à l'extraction et d'un certain pourcentage de déchets de fibres de haricot provenant de la production du lait de soja - Processus de gestion des déchets incomplet (seulement emballage du lait)

Feraldi <i>et al.</i> , 2012	- Lait de coco : <b>1,005 MJ/kg</b> - Boisson d'amande : <b>0,73 MJ/kg</b> - Boisson de soja : <b>1,90 MJ/kg</b>	/	Du berceau à la tombe.
Floren <i>et al.</i> , 2013	Boisson d'avoine fraîche : <b>9,2 MJ/kg</b>	Lait : <b>19,6 MJ/kg</b>	- Inclusion : Consommation par le consommateur, dont l'élimination des emballages. - Prise en compte de sous étapes du cycle de vie (transport intermédiaire...) - Chaque partie comprend les émissions et la consommation des ressources.
Grant et Hicks, 2018	- Boisson d'amande : <b>40 MJ/kg</b> - Boisson de soja : <b>45 MJ/kg</b>	Lait de vache : <b>35 MJ/kg</b>	- Exclusion : utilisation par les consommateurs, élimination des emballages. - Inclusion : production agricole, transport vers une usine de transformation, la transformation du lait, du transport vers le magasin de détail à Chicago et de la vente au détail + emballage en tant que matériel dans la transformation.
Agribalyse, ADEME	- Boisson de soja : <b>9,07 MJ/kg</b> - Boisson d'amande : <b>18,07 MJ/kg</b> - Lait de coco : <b>10,52 MJ/kg</b> - Boisson d'avoine : <b>8,7 MJ/kg</b>	- Lait de vache demi-écrémé : <b>11,15 MJ/kg</b> - Lait de chèvre demi-écrémé : <b>13,84 MJ/kg</b>	Agriculture, transformation, emballage, transport, distribution et consommation inclus.

Les valeurs concernant l'énergie utilisée par les différents cycles de vie varient selon les études. L'origine de ces variations entre produits et entre études réside dans les dates limites de consommation (DLC) différentes (et donc des durées de réfrigération, pour les produits frais), le transport ou le traitement thermique appliqué ou non. Dans l'étude de Grant et Hicks (2018), la DLC des boissons végétales (réfrigérées) est par exemple 2 à 3 fois plus longue que celle du lait pasteurisé ; et l'amande étant produite plus loin, son transport est plus long que pour les deux autres boissons. En raison de l'impact de l'élevage, le lait animal utilise globalement plus d'énergie que les boissons végétales mais l'écart est assez faible et nous observons une exception : la boisson à base d'amande. Les valeurs de Floren *et al.* (2013) montrent une forte différence entre les produits animaux et végétaux et sont supérieures à celles de l'étude de Birgersson *et al.* (2009) qui, elle, exclut les équipements nécessaires à l'extraction et présente un schéma de gestion des déchets incomplet. On remarque que les données d'Agribalyse sont assez proches, notamment pour les boissons végétales, des valeurs de l'étude de Floren *et al.* (2013). La boisson d'amande est la boisson végétale qui puise le plus d'énergie, et elle apportera moins de protéines qu'une boisson de soja, qui est, elle, deux fois moins impactante en termes d'énergie utilisée.

**Tableau 13 :** Utilisation des terres lors du cycle de vie de produits laitiers animaux en comparaison à des boissons végétales, en  $m^2$  par kg ( $m^2/kg$ ) ou  $m^2 * \text{année}$  par kg ( $m^2a/kg$ ).

<b>UTILISATION DES TERRES</b>			
Auteur(s)	Résultats (en $m^2/kg$ )		Frontières
	<i>Boisson végétale</i>	<i>Produit laitier animal</i>	

Floren <i>et al.</i> , 2013	Boisson d'avoine fraîche : <b>0,6 m<sup>2</sup>/kg</b>	Lait : <b>2,9 m<sup>2</sup>/kg</b>	- Inclusion : Consommation par le consommateur, dont l'élimination des emballages. -Prise en compte de sous étapes du cycle de vie (transport intermédiaire...) - Chaque partie comprend les émissions et la consommation des ressources.
Birgersson <i>et al.</i> , 2009	Boisson de soja : <b>0,59 m<sup>2</sup>/kg</b>	Lait d'animal : <b>1,5 m<sup>2</sup>/kg</b>	- Etude basée sur la consommation régulière de lait (Suède) : impact sur le transport du soja. - Production peut se faire en Belgique : incidence sur le transport. - Exclusion des équipements nécessaires à l'extraction et d'un certain pourcentage de déchets de fibres de haricot provenant de la production du lait de soja - Processus de gestion des déchets incomplet (seulement emballage du lait)
Confidentiel (2016)	- « Yaourt » végétal fraise : <b>0.6 m<sup>2</sup>a/ kg</b> - Crème végétale chocolat : <b>1.4 m<sup>2</sup>a/ kg</b>	- Yaourt fraise : <b>1.6 m<sup>2</sup>a/ kg</b> - Crème laitière chocolat : <b>2.2 m<sup>2</sup>a/ kg</b>	Frontières : du berceau à la tombe en incluant les emballages, le transport, distribution, consommation et traitement des déchets.

Concernant l'utilisation des terres par les cycles de vie des aliments, la tendance montre que le lait animal requiert une utilisation des terres plus importante que les boissons végétales. Floren *et al.* (2013) montre une valeur pour le lait animal plus forte que celle de l'étude de Birgersson *et al.* (2009), ce qui peut être dû à des méthodes de calcul différentes ou bien à des étapes du cycle de vie supplémentaires étudiées qui impactent l'utilisation des terres (gestion des déchets, sous-étapes intermédiaires, émissions et consommations des ressources, etc).

**Tableau 14 :** Eutrophisation marine du cycle de vie de produits laitiers animaux en comparaison à des boissons végétales, en kg d'équivalent azote par kg de produit, ou kg N eq/kg.

<b>EUTROPHISATION MARINE</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en kg N eq/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Boisson végétale</i>	<i>Produit laitier animal</i>	
Floren <i>et al.</i> , 2013	Boisson d'avoine fraîche : <b>2e<sup>-3</sup> kg N eq/kg</b>	Lait : <b>6e<sup>-3</sup> kg N eq/kg</b>	- Inclusion : Consommation par le consommateur, dont l'élimination des emballages. -Prise en compte de sous étapes du cycle de vie (transport intermédiaire...) - Chaque partie comprend les émissions et la consommation des ressources.
McClements <i>et al.</i> , 2019 (tiré de Grant et Hicks, 2018)	- Boisson de soja : <b>6,2e<sup>-3</sup> kg N eq/kg</b> - Boisson d'amande : <b>1,7e<sup>-3</sup> kg N eq/kg</b>	Lait de vache : <b>1e<sup>-3</sup> kg N eq/kg</b>	- Exclusion : utilisation par les consommateurs, élimination des emballages. - Inclusion : production agricole, transport vers une usine de transformation, la transformation du lait, du transport vers le magasin de détail à Chicago et de la vente au détail + emballage en tant que matériel dans la transformation.
Feraldi <i>et al.</i> , 2012	- Lait de coco : <b>3,53 e<sup>-5</sup> kg N eq/kg</b> - Boisson d'amande : <b>2,16 e<sup>-4</sup> kg N eq/kg</b> - Boisson de soja : <b>7,90 e<sup>-5</sup> kg N eq/kg</b>	/	Du berceau à la tombe.
Agribalyse, ADEME	- Boisson de soja : <b>2,1 e<sup>-3</sup> kg N eq/kg</b> - Boisson d'amande : <b>3,91 e<sup>-3</sup> kg N eq/kg</b> - Lait de coco : <b>1,83 e<sup>-3</sup> kg N eq/kg</b> - Boisson d'avoine : <b>0,89 e<sup>-3</sup> kg N eq/kg</b>	- Lait de vache demi-écrémé : <b>4,08 e<sup>-3</sup> kg N eq/kg</b> - Lait de chèvre demi-écrémé : <b>6,06 e<sup>-3</sup> kg N eq/kg</b>	Agriculture, transformation, emballage, transport, distribution et consommation inclus.

L'eutrophisation marine est un phénomène globalement autant impacté par les cycles de vie de produits laitiers animaux que de boissons végétales. Il n'y a pas une grande différence de valeurs entre ces deux types de produits. Dans l'étude de McClements *et al.* (2019), les valeurs sont légèrement

supérieures pour les produits végétaux tandis que c'est l'inverse pour l'étude confidentielle ainsi que pour les valeurs d'Agribalyse. Les données de l'article de Feraldi *et al.* (2012) sont globalement peu plus faibles que celles des autres articles.

**Tableau 15 :** Appauvrissement de l'ozone lors du cycle de vie de produits laitiers animaux en comparaison à des boissons végétales, en équivalent en masse de trifluorochlorométhane, ou kg CFC-11 eq, par kg de produit.

<b>APPAUVRISSEMENT DE L'OZONE</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en kg CF11/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Boisson végétale</i>	<i>Produit laitier animal</i>	
Birgersson <i>et al.</i> , 2009	Boisson de soja : <b>3,2 e<sup>-7</sup> kg CFC11/kg</b>	Lait d'animal : <b>5,12 e<sup>-8</sup> kg CFC11/kg</b>	- Etude basée sur la consommation régulière de lait (Suède) : impact sur le transport du soja. - Production peut se faire en Belgique : incidence sur le transport. - Exclusion des équipements nécessaires à l'extraction et d'un certain pourcentage de déchets de fibres de haricot provenant de la production du lait de soja - Processus de gestion des déchets incomplet (seulement emballage du lait)
Feraldi <i>et al.</i> , 2012	- Lait de coco : <b>1,26 e<sup>-9</sup> kg CFC11/kg</b> - Boisson d'amande : <b>9,47e<sup>-10</sup> kg CFC11/kg</b> - Boisson de soja : <b>1,68e<sup>-9</sup> kg CFC11/kg</b>	/	Du berceau à la tombe.
McClements <i>et al.</i> , 2019 (tiré de Grant et Hicks, 2018)	- Boisson de soja : <b>3,29 e<sup>-7</sup> kg CFC11/kg</b> - Boisson d'amande : <b>3,27 e<sup>-7</sup> kg CFC11/kg</b>	Lait de vache : <b>3,27 e<sup>-7</sup> kg CFC11/kg</b>	- Exclusion : utilisation par les consommateurs, élimination des emballages. - Inclusion : production agricole, transport vers une usine de transformation, la transformation du lait, du transport vers le magasin de détail à Chicago et de la vente au détail + emballage en tant que matériel dans la transformation.
Agribalyse, ADEME	- Boisson de soja : <b>9 e<sup>-8</sup> kg CF11/kg</b> - Boisson d'amande : <b>1,4 e<sup>-7</sup> kg CF11/kg</b> - Lait de coco : <b>1 e<sup>-7</sup> kg CF11/kg</b> - Boisson d'avoine : <b>8 e<sup>-8</sup> kg CF11/kg</b>	- Lait de vache demi-écrémé : <b>7 e<sup>-8</sup> kg CF11/kg</b> - Lait de chèvre demi-écrémé : <b>8 e<sup>-8</sup> kg CF11/Lkg</b>	Agriculture, transformation, emballage, transport, distribution et consommation inclus.

Concernant l'appauvrissement de l'ozone, les cycles de vie des produits laitiers animaux et boissons végétales sont tout autant impactants. Les valeurs des articles de Birgersson *et al.* (2009) et McClements *et al.* (2019) sont très similaires pour les boissons végétales et très proches également pour le lait animal, dans les deux cas ; il n'y a pas ou très peu de différence entre le lait et les boissons végétales. Les données d'Agribalyse suivent la même logique et sont seulement un peu inférieures à celles des articles scientifiques.

**Tableau 16 :** Ecotoxicité aquatique du cycle de vie de produits laitiers animaux en comparaison à des boissons végétales, en unité de toxicité des écosystèmes par kg de produit, ou en anglais « comparative toxic units ecotoxicity » ou CTUe/kg.

<b>ÉCOTOXICITÉ AQUATIQUE</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en CTUe/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Boisson végétale</i>	<i>Produit laitier animal</i>	
McClements <i>et al.</i> , 2019 (tiré de Grant et Hicks, 2018)	- Boisson de soja : <b>9,64 CTUe/kg</b> - Boisson d'amande : <b>31,3 CTUe/kg</b>	Lait de vache : <b>133 CTUe/kg</b>	- Exclusion : utilisation par les consommateurs, élimination des emballages. - Inclusion : production agricole, transport vers une usine de transformation, la transformation du lait, du transport vers le magasin de détail à Chicago et de la vente au détail + emballage en tant que matériel dans la transformation.
Krokida <i>et al.</i> , 2016	/	- Scénario 1 : <b>25,11 CTUe/kg</b> - Scénario 2 : <b>25,12 CTUe/kg</b>	- Energie, eau et transformation conventionnelle du lait évalué dans les limites de l'usine laitière. - Entrées et sorties de matières et d'énergies (agriculture, conditionnement, distribution, vente) sont évalués. - Processus intégrés sur la santé, l'environnement naturel et les ressources naturelles causés par les interventions <i>écosphère/ techno-sphère</i> ont été évalués.
Winans <i>et al.</i> , 2019	Boisson d'amande : - 2016 : <b>3,00 CTUe/kg</b> - 2017 : <b>2,87 CTUe/kg</b>		- Inclusion : (pour les amandes) Culture, décorticage, épluchage, transformation en farine, production de lait et des autres ingrédients, exploitation des installations. - Exclusion : Impacts de la construction des installations et des biens d'équipement.
Confidentiel (2016)	- « Yaourt » végétal fraise : <b>0.7 CTUe/ kg</b> - Crème végétale chocolat : <b>0.8 CTUe/ kg</b>	- Yaourt fraise : <b>0.7 CTUe/ kg</b> - Crème laitière chocolat : <b>0.8 CTUe/ kg</b>	Frontières : du berceau à la tombe en incluant les emballages, le transport, distribution, consommation et traitement des déchets.
Agribalyse, ADEME	- Boisson de soja : <b>22,32 CTUe/kg</b> - Boisson d'amande : <b>53,04 CTUe/kg</b> - Lait de coco : <b>26,17 CTUe/kg</b> - Boisson d'avoine : <b>17,61 CTUe/kg</b>	- Lait de vache demi-écrémé : <b>19,64 CTUe/kg</b> - Lait de chèvre demi-écrémé : <b>26,91 CTUe/kg</b>	Agriculture, transformation, emballage, transport, distribution et consommation inclus.

La dernière catégorie d'impact étudiée dans cette partie est l'écotoxicité aquatique. Globalement, on peut voir que l'écotoxicité est un phénomène plus affecté par le lait animal, mais cette affirmation diffère selon les études et le type de boisson ou de lait. L'étude de McClements *et al.* (2019) montre une forte supériorité des données pour le lait animal par rapport aux boissons végétales, ce qui n'est pas le cas pour les valeurs d'Agribalyse. La valeur de l'écotoxicité du lait de vache de cet article est d'ailleurs largement supérieure à celles des autres articles concernant les produits animaux. Les données d'Agribalyse sont proches de celles de Krokida *et al.* concernant les laits animaux et confirment que la boisson à base d'amande a une écotoxicité aquatique plus forte que les autres boissons végétales.

En conclusion, les produits laitiers sont généralement plus impactants que leurs substituts végétaux sur des catégories d'impacts telles que le changement climatique ou l'usage des terres, mais

les différences sont plus faibles ou plus contrastées pour les autres catégories d'impacts. Ainsi, l'avantage environnemental de la substitution d'un produit animal par un produit végétal est moins net pour le lait que pour la viande. Le fait qu'un seul animal produise une très grande quantité de lait (et donc que l'impact de l'élevage se trouve ainsi « dilué ») contribue probablement à cette atténuation. Enfin, comme pour la viande, il faut être attentif aux informations nutritionnelles en lien avec les boissons végétales, qui sont certes moins impactantes pour l'environnement, mais qui nécessitent d'être bues en plus grande quantité pour obtenir certains bénéfices nutritionnels comme ceux en lien avec les protéines. A contrario, les boissons végétales apportent souvent moins d'acides gras saturés que les laits animaux. Les boissons végétales sont également fréquemment corrigées pour apporter autant de calcium que du lait, pour éviter un déficit chez les consommateurs végétariens voire véganes, notamment les enfants.

### 3- Œufs vs produits végétaux

Dans un dernier temps, comparons les œufs avec leurs substituts végétaux. Comme précédemment, des conversions ont été réalisées pour homogénéiser les résultats et pouvoir les comparer. Pour des raisons de praticité, nous considérons une densité de à 0,95 kg/L pour la mayonnaise étudiée dans l'article de Saget *et al.* (2021), et nous avons converti les valeurs données par L en valeurs par kg.

**Tableau 17 :** Empreinte carbone du cycle de vie d'œufs en comparaison à des analogues végétaux, en masse équivalence de CO<sub>2</sub> par kg de produit, ou kg CO<sub>2</sub> eq/kg.

<b>EMPREINTE CARBONE / CHANGEMENT CLIMATIQUE</b>			
<b>Auteur(e)s</b>	<b>Résultats (en kg CO<sub>2</sub> eq/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Végétal</i>	<i>Œufs</i>	
Saget <i>et al.</i> , 2021	Mayonnaise végétalienne : <b>8 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	Mayonnaise à base d'œuf : <b>4,44 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	- Calcul de l'empreinte environnementale des deux produits du berceau à la sortie de l'usine, en utilisant les bases de données internationales Agri-footprint v3.0 [33] et Ecoinvent v3.6 [34]. - Les données d'inventaire ont été collectées spécifiquement pour cette étude auprès d'une entreprise fabriquant les deux produits.
Nette <i>et al.</i> , 2016	- Farine de protéines de pois : <b>0,94 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b> - Production de pâtes à partir de farine de protéines de pois : <b>1,22 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	- Œuf : <b>3,00 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b> - Production de pâtes à partir d'œufs : <b>1,79 kg CO<sub>2</sub> eq/kg</b>	- Farine de pois : données de la base Ecoinvent. - Processus de moulure du blé, production des pâtes : Ruini et Marino. - Production de pâtes : production matières premières, production d'aliments, conditionnement, distribution et consommateur, sous-processus inclus.



Concernant l’empreinte carbone, celle de la mayonnaise à base d’œuf est supérieure à celle de la moyenne végétalienne dans l’étude de Saget *et al.* (2021). L’article de Nette *et al.* (2016), lui, a étudié l’empreinte carbone de pâtes fabriquées à partir d’œufs ou à partir de protéines de pois : on peut voir qu’il n’y a pas une forte différence entre ces valeurs, les pâtes fabriquées avec de l’œuf ayant une empreinte carbone légèrement supérieure. Enfin, un œuf possède une empreinte carbone plus impactante que celle de la farine de pois.

**Tableau 18 :** Empreinte hydrique du cycle de vie d’œufs en comparaison à des analogues végétaux, en litres par kg de produit ou L/kg.

<b>EMPREINTE HYDRIQUE / CONSOMMATION D’EAU</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en L/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Végétal</i>	<i>Œufs</i>	
Thrane <i>et al.</i> , 2017	- Maïs : <b>1222 L/kg</b> - Soja : <b>2145 L/kg</b> - Pomme de terre : <b>287 L/kg</b>	Oeuf : <b>3265 L/kg</b>	- ACV du berceau à la porte. - Résultats de l’ACV basés sur deux méthodologies différentes : la modélisation conséquentielle et la modélisation attributionnelle (manière différente de traiter les calculs d’impacts environnementaux).

L’étude de Thrane *et al.* (2017) montre que le cycle de vie des œufs a une empreinte hydrique supérieure à celle du soja, plus de deux fois plus importantes que celle du maïs et enfin, plus de 10 fois plus importante que celle des pommes de terre.

**Tableau 19 :** Eutrophisation marine lors du cycle de vie d’œufs en comparaison à des analogues végétaux, en kg d’équivalent azote par kg de produit, ou kg N eq/kg.

<b>EUTROPHISATION MARINE</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en kg N eq/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Végétal</i>	<i>Œufs</i>	
Saget <i>et al.</i> , 2021	Mayonnaise végétalienne : <b>0,024 kg N eq/kg</b>	Mayonnaise à base d’œuf : <b>0,024 kg N eq/kg</b>	- Calcul de l’empreinte environnementale des deux produits du berceau à la sortie de l’usine, en utilisant les bases de données internationales Agri-footprint v3.0 [33] et Ecoinvent v3.6 [34]. - Les données d’inventaire ont été collectées spécifiquement pour cette étude auprès d’une entreprise fabriquant les deux produits.

L’eutrophisation marine a exactement les mêmes valeurs pour les deux mayonnaises étudiées (à base d’œuf ou végétalienne) dans l’étude de Saget *et al.* (2021).

**Tableau 20 :** Appauvrissement de l’ozone lors du cycle de vie d’œufs en comparaison à des analogues végétaux, en équivalent en masse de trifluorochlorométhane, ou kg CFC-11 eq, par L de produit.

<b>APPAUVRISSMENT DE L'OZONE</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en kg CF11/L)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Végétal</i>	<i>Œufs</i>	
Saget <i>et al.</i> , 2021	Mayonnaise végétalienne : <b>6 e<sup>-7</sup> kg CFC11/kg</b>	Mayonnaise à base d'œuf : <b>2,66 e<sup>-7</sup> kg CFC11/kg</b>	- Calcul de l'empreinte environnementale des deux produits du berceau à la sortie de l'usine, en utilisant les bases de données internationales Agri-footprint v3.0 [33] et Ecoinvent v3.6 [34]. - Les données d'inventaire ont été collectées spécifiquement pour cette étude auprès d'une entreprise fabriquant les deux produits.

L'appauvrissement de l'ozone est deux fois plus important pour la mayonnaise végétalienne que pour la mayonnaise réalisée à partir de produits animaux dans l'étude de Saget *et al.* (2021), les valeurs restant tout de même dans le même ordre de grandeur.

**Tableau 21 :** Ecotoxicité aquatique lors du cycle de vie d’œufs en comparaison à des analogues végétaux, en unité de toxicité des écosystèmes par L de produit, ou en anglais « comparative toxic units ecotoxicity » ou CTUe/L.

<b>ÉCOTOXICITÉ AQUATIQUE</b>			
<b>Auteur(s)</b>	<b>Résultats (en CTUe/kg)</b>		<b>Frontières</b>
	<i>Végétal</i>	<i>Œufs</i>	
Saget <i>et al.</i> , 2021	Mayonnaise végétalienne : <b>57,19 CTUe/kg</b>	Mayonnaise à base d'œuf : <b>83,67 CTUe/kg</b>	- Calcul de l'empreinte environnementale des deux produits du berceau à la sortie de l'usine, en utilisant les bases de données internationales Agri-footprint v3.0 [33] et Ecoinvent v3.6 [34]. - Les données d'inventaire ont été collectées spécifiquement pour cette étude auprès d'une entreprise fabriquant les deux produits.

Enfin, la mayonnaise à base d’œuf engendre une écotoxicité aquatique plus importante que la mayonnaise végétalienne, selon l'étude de Saget *et al.* (2021).

Pour finir, il faut savoir que peu d'études sont réalisées sur l'analyse des cycles vie des œufs en comparaison à des analogues végétaux. Les données existantes montrent que les œufs sont parfois plus impactants sur l'environnement que les produits végétaux, et parfois non : cela dépend beaucoup du produit substitué, et notamment de la formulation (impact des ingrédients ajoutés) et des procédés (souvent plus complexes) utilisés pour réaliser le substitut.

## Conclusion

Cette synthèse a mis en évidence les performances environnementales des produits végétaux en comparaison à des produits analogues, à base de viande, de lait ou d'œuf. Elle s'est basée sur l'analyse du cycle de vie de différents aliments. Les nombreuses comparaisons réalisées sous forme de tableaux ont montré qu'il fallait tenir compte des frontières, allocations, méthodes et limites de chaque étude afin de pouvoir les comparer avec le moins de biais possible. Il en ressort que les produits animaux ont en général un impact plus nocif sur l'environnement que les produits végétaux, en particulier les viandes. Les différences d'impact environnemental sont moins flagrantes entre les laits animaux et les boissons végétales que dans le cas de la viande, les résultats sont régulièrement assez proches. Dans certains cas, les boissons végétales telle que la boisson d'amande par exemple, ont un impact fortement supérieur sur l'écotoxicité ou encore l'énergie utilisée par rapport au lait animal. Concernant les œufs, les résultats sont là aussi assez divergents car selon les impacts étudiés, les produits végétaux sont parfois plus impactants que les œufs. Toutefois, il est important de prendre en considération les aspects nutritionnels de certains produits ayant certes un impact moins fort sur la planète, mais devant être ingérés en plus fortes quantités pour couvrir certains besoins nutritionnels, notamment en protéines, calcium et certaines vitamines. Pour cette raison, les études comparent de plus en plus les impacts environnementaux des produits alimentaires non seulement sur la base d'une unité fonctionnelle de masse, mais également de densité nutritionnelle. De nombreuses études pourraient encore être réalisées en comparant séparément les impacts des différentes étapes de cycle de vie des aliments animaux par rapport à leurs analogues végétaux. Même si les précédentes études sont une mine d'informations, il reste un large plan d'exploration concernant l'analyse du cycle de vie de certains produits tels que les œufs et leurs analogues naissant sur le marché de l'agroalimentaire (œufs végans, viande « de culture ») par exemple.

Pour assurer une durabilité du changement alimentaire et d'une consommation plus végétale, il faut effectivement prouver que les substituts à la viande sont moins nocifs pour la planète, mais ce n'est pas tout. Il s'agit de s'assurer que ces produits soient économiquement rentables pour leurs fabricants et qu'ils soient attirants pour la population. Il est alors pertinent de s'intéresser aux motivations et freins faces à ce type d'alimentation. Pour la majorité des consommateurs, il s'agit d'une question d'éthique, d'environnement et de santé. Effectivement, l'alimentation végétale peut être synonyme de forme

physique et psychique mais aussi de protection face à certaines maladies (Mathieu et Dorard, 2021). La population voit tout de même des inconvénients à la consommation de produits d'origine végétale, comme le prix. Effectivement, selon une étude de la Répression des fraudes, il faut compter deux à quatre fois le prix d'un produit animal pour se procurer l'équivalent végétal. De plus, le goût peut être un frein notamment lorsque les produits sont réalisés à base de légumineuses, qui sont certes riches en protéines de bonne qualité mais contiennent des molécules odorantes sources de mauvais goût, comme par exemple l'hexanal qui est dur à éliminer (Les Echos, 2021). Il sera intéressant de suivre l'avenir de l'agroalimentaire végétale dans les années à venir...

Citer comme : *Brumont M. (2022) Performances environnementales de produits alimentaires à base de viande, de lait ou d'œufs comparées à celles de leurs alternatives végétales, par analyse du cycle de vie, Master Biologie et Gestion, Université de Rennes I, Rennes, France. DOI : <https://doi.org/10.15454/SBOKIT>*

## **Bibliographie**

AGENCE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, 2021. Affichage environnemental : contexte et objectifs. Dans : *ADEME* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-l'action/reconnaitre-produit-plus-respectueux-lenvironnement/dossier/laffichage-environnemental/affichage-environnemental-contexte-objectifs>.

AGENCE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, 2021. Qu'est-ce que l'ACV ? Dans : *ADEME* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>.

AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE, 2021. Recherche Agribalyse [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://agribalyse.ademe.fr/app>.

ALCORTA, A., PORTA, A., TARREGA, A., ALVAREZ, M-D., VAQUERO, M-P., 2021. Foods for plant-based diets: challenges and innovations. In : *Foods (Basel, Switzerland)*. 1 Février 2021, Vol. 10, n° 2, p. 293. DOI 10.3390/foods10020293.

ANSES, 2021. Les protéines | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [en ligne]. 29 Septembre 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/content/les-prot%C3%A9ines>.

AQUAPORTAIL, 2021. Écotoxicité : définition et explications. Dans : *AquaPortail* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.aquaportail.com/definition-4162-ecotoxicite.html>.

BARBIER, C., COUTURIER, C., POUROUCHOTTAMIN, P., CAYLA, J-M., SYLVESTRE, M., PHARABOD, I., 2019. L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France. Dans : *Club Ingénierie Prospective Energie et Environnement*. Janvier 2019, Paris, IDDRI, 24p.

BIRGERSSON, S., KARLSSON, B-S., SODERLUND, S., 2009. An attributional life cycle assessment examining the potential environmental impact of soy milk. Mai 2009.

CLUNE, S., CROSSIN, E., VERGHESE, K., 2017 Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. In: *Journal of Cleaner Production*. 1 Janvier 2017, Vol. 140, p. 766-783. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.04.082.

COLLIER, K-J., BALL O-J., GRAESSER A-K., MAIN M-R., WINTERBOURN, M-J., 1990. Do organic and anthropogenic acidity have similar effects on aquatic fauna? In : Nordic Society Oikos, Wiley *Oikos*. 1990. Vol. 59, n° 1, p. 33-38. DOI 10.2307/3545119.

CULTURE NUTRITION, 2021. Les Français et l'alimentation végétale : top ou flop ? Dans : *Culture Nutrition, le média des tendances nutrition* [en ligne]. 1<sup>er</sup> mars 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.culture-nutrition.com/2021/03/01/les-francais-et-lalimentation-vegetale-top-ou-flop/>.

CUSWORTH, G., GARNETT, T. et LORIMER, J., 2021. Legume dreams: The contested futures of sustainable

plant-based food systems in Europe. In : *Global environmental change: human and policy dimensions*. Juillet 2021, Vol. 69, p. 102321. DOI 10.1016/j.gloenvcha.2021.102321.

DELTING, J., TU, Q., FAIST, M., DELDUCE, A., MANDLEBAUM, S., 2016. A comparative life cycle assessment of plant-based foods and meat foods. In : *Quantis*, For : Morning Star Farms. Mars 2016, p.1-154

DETZEL, A., MANNERS, R., GUTIERREZ, I-B., VARELA-ORTEGA, C., 2021. Life cycle assessment of animal-based foods and plant-based protein-rich alternatives: a socio-economic perspective. In : *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 17 Novembre 2021. DOI 10.1002/jsfa.11655.

ERCIN, A-E., ALDAYA, M-M., et HOEKSTRA, A-Y., 2012. The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products. In: *Ecological Indicators*. 1 Juillet 2012, Vol. 18, p. 392-402. DOI 10.1016/j.ecolind.2011.12.009.

FERALDI, R., HUFF, M., MOLEN A-M., NEW, H., 2012. Life cycle assessment of coconut milk and two non-dairy milk beverage alternatives.

FLOREN B., NILSSON K., WALLMAN M., 2013. LCA on fresh and aseptic oat drink, In: Swedish Institute for Food and Biotechnology. Janvier 2018, p.1-73

FRESÁN, U., MARRIN, D., MEJIA, M., SABATE, J., 2019. Water footprint of meat analogs: Selected indicators according to life cycle assessment. In : *Water (Switzerland)*. 2019, Vol. 11, n° 4. DOI 10.3390/w11040728.

GRANT, C-A., HICKS, A-L., 2018. Comparative life cycle assessment of milk and plant-based alternatives. In : *Environmental Engineering Science*. Mary Ann Liebert, Inc., publishers. 1 Novembre 2018, Vol. 35, n° 11, p. 1235-1247. DOI 10.1089/ees.2018.0233.

GUÉGUEN, J., WALRAND, S., et BOURGEOIS, O., 2016. Les protéines végétales : contexte et potentiels en alimentation humaine. Dans : *Cahiers de Nutrition et de Diététique* [en ligne]. 1 Septembre 2016, Vol. 51, n° 4, p.177-185. DOI 10.1016/j.cnd.2016.02.001.

HELLER, M-C., KEOLEIAN G-A., 2018. Beyond Meat's Beyond Burger Life Cycle Assessment: A detailed comparison between a plantbased and an animal-based protein source. 14 Septembre 2018. Report No. CSS18-10, University of Michigan.

INRAE, 2021. Plus de protéines végétales dans l'assiette, pourquoi est-ce si difficile pour le consommateur ? Dans : *INRAE Institutionnel*. 9 Juillet 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.inrae.fr/actualites/proteines-vegetales-assiettes-consommateur>.

KROKIDA, M., TAXIARCHOU, M., POLITIS, A., PEPPAS, A., KYRIAKOPOULOU, K., 2016. Life cycle assessment on European skimmed milk powder processing production plant. In : *Scientific Bulletin. Series F. Biotechnologies*, Vol. XX, Janvier 2016.

LES ECHOS, 2021. L'amélioration du goût des protéines végétales est une affaire de longue haleine. Dans : *Les Echos* [en ligne]. 8 octobre 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.lesechos.fr/industrie-services/consolidation/lamelioration-du-gout-des-proteines-vegetales-est-une-affaire-de-longue-haleine-1353287>.

LSA, 2020. ACTUALITÉS, LSA-Libre Service. L'alimentation végétale se démocratise [Etude Xerfi]. Dans : *lsa-conso.fr* [en ligne]. 15 Mai 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.lsa-conso.fr/l-alimentation-vegetale-se-democratise-etude-xerfi,349454>.

LSA, 2021. ACTUALITÉS, LSA-Libre Service. Etude: 23% Français prêts à tirer un trait sur la viande mais pas convaincus par l'offre veggie. Dans : *lsa-conso.fr* [en ligne]. 29 mars 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.lsa-conso.fr/etude-23-francais-prets-a-tirer-un-trait-sur-la-viande-mais-pas-convaincus-par-l-offre-veggie,377393>.

MANGERBOUGER, 2021. Les recommandations sur l'alimentation, l'activité physique et la sédentarité. Dans : *Manger Bouger, Santé Publique France, site de la République française* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.mangerbouger.fr/l-essentiel/les-recommandations-sur-l-alimentation-l-activite-physique-et-la-sedentarite>.

MATHIEU, S., DORARD, G., 2016. Végétarisme, végétalisme, véganisme : aspects motivationnels et psychologiques associés à l'alimentation sélective. Dans : *La Presse Médicale*. 1 Septembre 2016, Vol. 45, n° 9, p. 726-733. DOI 10.1016/j.lpm.2016.06.031.

MCCLEMENTS, D-J. et GROSSMANN, L., 2021. The science of plant-based foods: Constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs. In : *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Juillet 2021, Vol. 20, n° 4, p.4049-4100. DOI 10.1111/1541-4337.12771.

MCCLEMENTS, D-V., NEWMAN, E., MCCLEMENTS, I-F., 2019. Plant-based Milks: A review of the science underpinning their design, fabrication, and performance. In : *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Novembre 2019, Vol. 18, n° 6, p. 2047-2067. DOI 10.1111/1541-4337.12505.

MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, 2021. Loi climat et résilience : l'écologie dans nos vies. Dans : *Ministère de la Transition écologique* [en ligne]. 20 Juillet 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-climat-resilience>.

MOIGN, A., 2010. Analyse du Cycle de Vie de procédés de traitement de surface des matériaux. In : *Matériaux 2010*. 18-22 octobre 2010.

NETTE, A., WOLF, P., SCHULTER, O., MEYER-AURICH, A., 2016. A Comparison of Carbon Footprint and Production Cost of Different Pasta Products Based on Whole Egg and Pea Flour. In : *Foods*. 4 Mars 2016, Vol. 5, n° 1, p. 17. DOI 10.3390/foods5010017.

OREE, 2013. Principes d'éco-conception [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://ecoconception.oree.org/eco-conception-en-question/qu-est-ce-que-l-eco-conception/principes-d-eco-conception.html>.

PENDRILL, F., PERSSON, M., FODAR, J., KASTNER, T., MORAN, D., SCHMIDT, S., WOOD, R., 2019. Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions – In : *Global Environmental Change*. Vol. 63, July 2020, Pages 102-103. DOI 10.1016/j.gloenvcha.2019.03.002

PENICAUD, C., FONSECA F., 2019. Écoconception des aliments, bioproduits, bioprocédés et procédés alimentaires. Dans : *Techniques de l'Ingénieur* [en ligne]. 10 décembre 2019. F1470 V1. Disponible à l'adresse : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/eco-conception-mise-en-uvre-et-applications-42650210/ecoconception-des-aliments-bioproduits-bioprocemes-et-procemes-alimentaires-f1470/>.

PETERS, G-M., ROWLEY, H-V., WIEDEMANN, S., TUCKER, R., SHORT, M-D., SCHULZ, M., 2010. Red meat production in Australia: life cycle assessment and comparison with overseas studies. In : *Environmental Science & Technology*. 15 Février 2010, Vol. 44, n° 4, p. 1327-1332. DOI 10.1021/es901131e.

POORE, J. et NEMECEK, T, 2018. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. In : *Science (New York, N.Y.)*. 1 Juin 2018, Vol. 360, n° 6392, p. 987-992. DOI 10.1126/science.aaq0216.

REPUBLIQUE FRANCAISE, 2019. Alimentation et environnement : quelle transition ? Dans : *Vie publique.fr* [en ligne]. 25 Novembre 2019. Disponible à l'adresse : <https://www.vie-publique.fr/parole-dexpert/271848-alimentation-et-environnement-quelle-transition>.

REPUBLIQUE FRANCAISE, 2019. Commissariat général au développement durable. Acidification des océans. Dans : *L'environnement en France - Rapport sur l'état de l'environnement par le ministère de la transition écologique et solidaire* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://ree.developpement-durable.gouv.fr//themes/defis-environnementaux/limites-planetaires/les-9-limites-ecologiques-de-la-planete/article/acidification-des-oceans>.

SAERENS, W., SMETANA, S., CAMPENHOUT, S., AMMERS, V., HEINZ, V., 2021. Wiebe et al. Life cycle assessment of burger patties produced with extruded meat substitutes. In: *Journal of Cleaner Production* [en ligne]. 15 Juillet 2021, Vol. 306, p. 127-177. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.127177.

SAGET, S., COSA, M., SANCHOSANTOS, C., WILTONVASCONCELOS, M., GIBBONS, J., STYLES, D., WILLIAMS, M., 2021. Substitution of beef with pea protein reduces the environmental footprint of meat balls whilst supporting health and climate stabilization goals. In: *Journal of Cleaner Production*. 15 Mai 2021, Vol. 297, p. 126-447. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.126447.

SAGET, S., COSTA, M., STYLES, D., WILLIAMS, M., 2021. Does Circular Reuse of Chickpea Cooking Water to Produce Vegan Mayonnaise Reduce Environmental Impact Compared with Egg Mayonnaise? In : *Sustainability* [en ligne]. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Janvier 2021, Vol. 13, n° 9, p. 4726. DOI [10.3390/su13094726](https://doi.org/10.3390/su13094726)

SCHIANO, A-N., HARWOOD, W-S., GERARD P-D., DRAKE M-A., 2020. Consumer perception of the sustainability of dairy products and plant-based dairy alternatives. In : *Journal of Dairy Science*. Décembre 2020, Vol. 103, n° 12, p. 11228-11243. DOI 10.3168/jds.2020-18406.

SMETANA, S., MATHYS, A., KNOCH, A., HEINZ, V., 2015. Meat alternatives: life cycle assessment of most known meat substitutes. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 Septembre 2015, Vol. 20, n° 9, p. 1254-1267. DOI 10.1007/s11367-015-0931-6.

THRANE, M., PAULSEN, P-V., ORCUTT, M-W., KRIEGER, T-M., 2017. Soy Protein: Impacts, Production, and Applications. In : *Sustainable Protein Sources*. San Diego: Academic Press. 1<sup>er</sup> janvier 2017. p. 23-45. DOI 10.1016/B978-0-12-802778-3.00002-0.

TURNER, B-L., MC CANDLESS, S., 2004. How humankind came to rival nature: A brief history of the human-environment condition and the lessons learned, in earth system analysis for sustainability. In : *Dahlem Workshop Report*. 2004. n°91 (227-243), ed. W. C. Clark et al., Cambridge, MA: MIT Press.

WINANS, K-S., MACADAM-SOMER, I., KENDALL, A., GEYER, R., MARVINNEY, E., 2020. Life cycle



assessment of California unsweetened almond milk. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 Mars 2020, Vol. 25, n° 3, p. 577-587. DOI 10.1007/s11367-019-01716-5.

WWF, 2021. Les causes du réchauffement climatique - Urgence climat. Dans : *WWF - Urgence Climat* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://agir.wwf.fr/urgence-climat/causes/>.

YOUMATTER, 2020. Eutrophisation : définition, causes, conséquences et solutions. Dans : *Youmatter* [en ligne]. Disponible à l'adresse : URL : <https://youmatter.world/fr/definition/eutrophisation-definition-causes-consequences-solutions/>.

## Annexes

\* Viandes vs substituts végétaux

Empreinte carbone et/ou changement climatique					
Source	Sujet	Résultats (kg CO2 eq/kg)		Commentaires	Frontières
		<b>Végétal</b>	<b>Viande</b>		
Detzel <i>et al.</i> , 2021	Life cycle assessment of animal-based foods and plant-based protein-rich alternatives: an environmental perspective	* Alternative à base de protéines de lupin et farine de sarrasin : <b>2,40 kg CO2 eq/kg</b> * Alternative à base de protéines de lupin et farine d'aramante : <b>2,35 kg CO2 eq/kg</b> * Variante optimisée : <b>1,32 kg CO2 eq/kg</b>	* Poulet "haute performance" : <b>6,25 kg CO2 eq/kg</b> * Poulet "conventionnel" : <b>9,47 kg CO2 eq/kg</b>	* "Poulet à haute performance" est utilisé dans les élevages de poulets de chair hautement industrialisés * 100g de produit dont 30g de protéines pour les végétaux et 21,4g pour le poulet) * Valeurs initiales : 240 / 235 / 132 / 625 / 947 g CO2 eq pour 100g de produit	* Pour la viande, on considère les émissions de GES causées par le changement d'affectation des sols associé à l'alimentation au soja provenant d'outre mer (Brésil ici) * L'ACV a été conçue comme une ACV « du berceau à la porte » comprenant toutes les étapes du cycle de vie, de l'approvisionnement en matières premières biotiques et abiotiques jusqu'aux produits alimentaires finaux à la sortie de l'usine, y compris tous les transports ainsi que toutes les pré-chaines d'énergie et de matières premières. La production et l'élimination des infrastructures (machines, moyens de transport, routes, etc.) et leur maintenance (pièces de rechange, chauffage des halls de production) ainsi que les matériaux d'emballage liés aux produits finaux ont été exclus sur la base d'AgriFootprint 2.0.3
Peters <i>et al.</i> , 2010	Red Meat Production in Australia: Life Cycle Assessment and Comparison with Overseas Studies	/	* Viande de mouton : <b>12,32 kg CO2 eq/kg</b> * Viande de boeuf : <b>16,04 kg CO2 eq/kg</b>	* Moyenne calculée sur des valeurs de différents lieux de production (5 pour le mouton et 16 pour le boeuf) * Moyennes faites à partir des valeurs initiales : 12,32 kgCO2 pour 1 kg et 16,04 pour 1 kg de boeuf	* Production
Detting <i>et al.</i> , 2016	A comparative Life Cycle Assessment of plant-based foods and meat foods	* Burger végétarien (ail et quinoa) : <b>7,38 kg CO2 eq/kg</b>	* Burger de boeuf : <b>61,6 kg CO2 eq/kg</b>	Valeurs initiales : * Pour le burger végétarien : 0,443 kg CO2 eq pour 60g	* Production d'aliments pour animaux, élevage, fabrication, conditionnement, vente au détail et distribution, consommation
Saerens <i>et al.</i> , 2021	Life cycle assessment of burger patties produced with extruded meat substitutes	Galette de burger de soja avec protéines végétales texturées : <b>0,7 kg CO2 eq/kg</b>	Galette de boeuf pour burger : <b>22,4 kg CO2 eq/kg</b>	1 kg de galettes de hamburger fraîches, prêtes à être emballées	Cette étude impliquait une approche « cradle to gate » à partir de la production de matières premières jusqu'à la production de galettes de burger crues. Par conséquent, l'étude a porté sur la production et l'acquisition des matières premières et s'est terminée « à la porte de l'usine », c'est-à-dire juste avant le transport vers les distributeurs. L'emballage, la distribution au supermarché et au consommateur, la consommation et le traitement des déchets après consommation ne sont donc pas inclus dans le champ de l'étude.
Saget <i>et al.</i> , 2021	Substitution of beef with pea protein reduces the environmental footprint of meat balls whilst supporting health and climate stabilisation goals	Boules de protéines de pois : <b>11 kg CO2 eq/kg</b>	Boulettes de viande de boeuf à la suédoise : <b>147 kg CO2 eq/kg</b>	* La viande provient du Brésil * Valeurs initiales : 1,1 kg CO2 eq pour 100g de produit cuit e 14,7 kg CO2 eq pour 100g de produit	* La méthodologie ACV a suivi les directives de l'empreinte environnementale du produit (PEF) (Commission européenne, 2018) pour les étapes agricoles, distribution (40 % répartis en Allemagne, 40 % en Europe et 20 % hors Europe), stockage et cuisson. La fin de vie (EoL) a été exclue des limites, car elle était considérée comme la même pour tous les produits. * Le coût d'opportunité du carbone est inclus dans les valeurs !
Confidentiel (2016)	Comparaison produits laitiers et alternatives à base de soja.	* Haché végétal : <b>1,4 kg CO2 eq / kg</b> * Boulettes végétales : <b>1,8 kg CO2 eq / kg</b>	* Haché de boeuf : <b>12,8 kg CO2 eq / kg</b> * Boulettes au boeuf : <b>6,4 kg CO2 eq / kg</b>		Frontières : du berceau à la tombe en incluant les emballages, le transport, distribution, consommation et traitement des déchets.
Smetana <i>et al.</i> , 2015	Meat alternatives: life cycle assessment of most known meat substitutes	Repas à base de farine de soja : <b>2,65 - 2,78 kg CO2 eq/kg</b>	Poulet : <b>5,2 - 5,83 kg CO2 eq/kg</b>	* Valeurs par kg * Données tirées de Katajajuri <i>et al.</i> 2008; Pelletier 2008; Cederberg <i>et al.</i> 2009)	Cependant, les matières premières, l'assemblage, les recettes et le traitement sont différents. Le système est envisagé du berceau (production de matières premières) à l'assiette (utilisation par le consommateur). Le recyclage des emballages et le traitement des déchets après consommation humaine n'entrent pas dans le champ de l'étude.

Empreinte hydrique / Consommation d'eau					
Source	Sujet	Résultats (Litres/ kg)		Commentaires	Frontières
		Végétal	Viande		
Ercm <i>et al.</i> , 2012	The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products	Burger de soja produit aux Pays bas : <b>1053,3 L/kg</b>	Burger de bœuf produit aux Pays bas : <b>6666,7 L/kg</b>	* L'empreinte hydrique la plus importante du burger de bœuf provient du Pakistan (3650 l) et la plus faible des Pays-Bas (1000 l), alors que la moyenne mondiale est de 2350 l. * Valeurs initiales : 158 L pour le burger de soja et 1000 L pour 150 g de burger de bœuf	* Les composants généraux des empreintes eau opérationnelles et de la chaîne d'approvisionnement sont exclus de cette étude car ils sont négligeables par rapport à l'empreinte eau totale pour les produits alimentaires. De plus, l'empreinte eau liée au transport des matières et l'énergie utilisée lors de la production sont exclues de cette étude car elles sont négligeables par rapport à l'empreinte eau totale des produits d'origine alimentaire. * L'empreinte eau des matériaux des emballages est ajoutée aux burgers. L'emballage des produits animaux est identique à celui des produits à base de soja.
Fresán <i>et al.</i> , 2019	Water Footprint of Meat Analogs: Selected Indicators according to life cycle assessment	Galette de saucisse de végétarienne : <b>1200 L/kg</b>	Galette de saucisse de porc : <b>2900 L/kg</b>	Valeurs initiales : * Veggie sausage patty pour 1000 g = 1200 L * Pork sausage patty pour 1000 g = 2900 L	*Les limites du système comprenaient les phases de (i) la culture des ingrédients bruts, (ii) le transport des ingrédients bruts des fermes à l'installation de transformation, (iii) la fabrication du matériel d'emballage et, (iv) toutes les activités en usine (c'est-à-dire le stockage des ingrédients, transformation des ingrédients en analogues de viande, conditionnement et stockage des produits finis). Les impacts associés aux différentes phases de génération d'analogues de viande (p. ex., production et transport des ingrédients, transformation des ingrédients en analogues de viande, emballage des produits finis) ont également été calculés indépendamment.
Thrane <i>et al.</i> , 2017	Soy Protein: Impacts, Production, and Applications	* Maïs : <b>1222 L/kg</b> * Soja : <b>2145 L/kg</b> * Pomme de terre : <b>287 L/kg</b>	* Viande de porc : <b>5988 L/kg</b> * Poulet : <b>4325 L/kg</b> * Mouton : <b>10415 L/kg</b> * Bœuf : <b>15415 L/kg/kg</b>	Valeurs initiales : * Viande de porc : 5988 m3/tonne * Viande de mouton : 10415 * Viande de poulet : 4325 * Maïs : 1222 * Soja : 2145 * Pomme de terre : 287	* Evaluation de l'impact du cycle de vie du bœuf à la porte * Les deux méthodes se distinguent principalement par la manière dont elles traitent les calculs d'impacts environnementaux de coproduits individuels issus de procédés à plusieurs sorties, comme une usine de soja qui produit à la fois de la farine de soja et de l'huile de soja, ou une vache qui produit à la fois du lait et de la viande. * Résultats de l'ACV basés sur deux méthodologies différentes : la modélisation conséquentielle et la modélisation attributionnelle.

Energie utilisée					
Source	Sujet	Résultats (MJ/kg)		Commentaires	Frontières
		Plante/Végétal	Viande		
Heller et Keoleian, 2018	Beyond Meat's Beyond Burger Life Cycle Assessment: A detailed comparison between a plantbased and an animal-based protein source	Galette de hamburger végétale (Beyond Meat) : <b>6,1 MJ/kg</b>	Galette de bœuf haché : <b>11,4 MJ/kg</b>	*Beyond Meat est un producteur de substituts de viande à partir de plantes basé à Los Angeles. * Les étapes de vente au détail et de consommation, y compris les pertes potentielles à ces étapes, ont été exclues, car elles ont été considérées comme équivalentes dans les deux systèmes de produits.	L'étude exclut les activités au niveau de la vente au détail et des consommateurs. Ce périmètre de frontière du berceau à la distribution a été choisi principalement parce que, compte tenu notamment des incertitudes présentes dans la modélisation générique de ces étapes en aval, les activités de vente au détail et de consommation sont considérées comme équivalentes entre les systèmes BB et produits de viande bovine. De plus, la frontière du « berceau à la distribution » correspond également à la chaîne d'approvisionnement contrôlée par Beyond Meat. Le tableau 2 fournit des détails supplémentaires sur les éléments inclus et exclus des limites du système.
Peters <i>et al.</i> , 2010	Red Meat Production in Australia: Life Cycle Assessment and Comparison with Overseas Studies	/	* Production de viande de mouton : <b>32,9 MJ/kg (valeur moyenne)</b> * Production de viande de bœuf : <b>20 MJ/kg</b>	* Moyenne calculée sur des valeurs de différents lieux de production (4 pour le mouton et 8 pour le bœuf) * Moyennes faites à partir des valeurs initiales.	* Production

Utilisation des terres					
Source	Sujet	Résultats (m2a / kg)		Commentaires	Frontières
		Végétal	Viande		
Heller et Keoleian, 2018	Beyond Meat's Beyond Burger Life Cycle Assessment: A detailed comparison between a plant-based and an animal-based protein source	Galette de hamburger végétale (Beyond Meat) : <b>0,45 m2a /kg</b>	Galette de bœuf : <b>3,8 m2a/kg</b>	Beyond Meat est un producteur de substituts de viande à partir de plantes basé à Los Angeles.	L'étude exclut les activités au niveau de la vente au détail et des consommateurs. Ce périmètre de frontière du berceau à la distribution a été choisi principalement parce que, compte tenu notamment des incertitudes présentes dans la modélisation générique de ces étapes en aval, les activités de vente au détail et de consommation sont considérées comme équivalentes entre les systèmes BB et produits de viande bovine. De plus, la frontière du « berceau à la distribution » correspond également à la chaîne d'approvisionnement contrôlée par Beyond Meat. Le tableau 2 fournit des détails supplémentaires sur les éléments inclus et exclus des limites du système.
Saerens <i>et al.</i> , 2021	Life cycle assessment of burger patties produced with extruded meat substitutes	Galette de burger de soja avec protéines végétales texturées : <b>1,39 m2a/kg</b>	Galette de bœuf pour burger : <b>5,91 m2a/kg</b>	1 kg de galettes de hamburger fraîches, prêtes à être emballées	Cette étude impliquait une approche « cradle to gate » à partir de la production de matières premières jusqu'à la production de galettes de burger crues. Par conséquent, l'étude a porté sur la production et l'acquisition des matières premières et s'est terminée « à la porte de l'usine », c'est-à-dire juste avant le transport vers les distributeurs. Ainsi, conditionnement, distribution au supermarché et de là au consommateur, consommation et traitement des déchets après.
Confidentiel (2016)	Comparaison produits laitiers et alternatives à base de soja.	* Haché végétal : <b>1.8 m2a / kg</b> * Boulettes végétales : <b>1 m2a / kg</b>	* Haché de bœuf : <b>23 m2a / kg</b> * Boulettes au bœuf : <b>10.9 m2a / kg</b>		Frontières : du berceau à la tombe en incluant les emballages, le transport, distribution, consommation et traitement des déchets
Smetana <i>et al.</i> , 2015	Meat alternatives: life cycle assessment of most known meat substitutes	Repas à base de farine de soja : <b>1,06 - 1,44 m2a/kg</b>	Poulet : <b>3,85 - 3,89 m2a/kg</b>	/	Cependant, les matières premières, l'assemblage, les recettes et le traitement sont différents. Le système est envisagé du berceau (production de matières premières) à l'assiette (utilisation par le consommateur). Le recyclage des emballages et le traitement des déchets après consommation humaine n'entrent pas dans le champ de l'étude

Appauvrissement de l'Ozone					
Source	Sujet	Résultats (kg CFC-11 eq/kg)		Commentaires	Frontières
		Végétal	Viande		
Saget <i>et al.</i> , 2021	Substitution of beef with pea protein reduces the environmental footprint of meat balls whilst supporting health	Boules de protéines de pois : <b>6,5e-7 kg CFC-11 eq/kg</b>	Boulettes de viande de bœuf à la suédoise : <b>1,1 e-6 kg CFC-11 eq/kg</b>	* La viande provient du Brésil * Valeurs initiales : $6,5 \times 10^{-8}$ pour le pois et $1,1 \times 10^{-7}$ pour le bœuf	La méthodologie ACV a suivi les directives de l'empreinte environnementale du produit (PEF) (Commission européenne, 2018) pour les étapes agricoles, distribution (40 % réparti en Allemagne, 40 % en Europe et 20 % hors Europe), stockage et cuisson. La fin de vie (EoL) a été exclue des limites, car elle était considérée comme la même pour tous les produits.
Saerens <i>et al.</i> , 2021	Life cycle assessment of burger patties produced with extruded meat substitutes	Galette de burger de soja avec protéines végétales texturées : <b>4,3e-8 kg CFC-11 eq/kg</b>	Galette de bœuf pour burger : <b>8,8e-8 kg CFC-11 eq/kg</b>	* 1 kg de galettes de hamburger fraîches, prêtes à être emballées * Valeurs initiales : 0,043 mg CFC 11eq pour le soja et 0,088 mg CFC 11 eq pour le bœuf	Cette étude impliquait une approche « cradle to gate » à partir de la production de matières premières jusqu'à la production de galettes de burger crues. Par conséquent, l'étude a porté sur la production et l'acquisition des matières premières et s'est terminée « à la porte de l'usine », c'est-à-dire juste avant le transport vers les distributeurs. Ainsi, conditionnement, distribution au supermarché et de là au consommateur, consommation et traitement des déchets après.

Écotoxicité terrestre					
Source	Sujet	Résultats (kg 1,4-DB eq/kg)		Commentaires	Frontières
		Végétal	Viande		
Confidentiel (2016)	Comparaison produits laitiers et alternatives à base de soja.	* Haché végétal : 0.007 kg 1,4-DB eq / kg * Boulettes végétales : 0.004 kg 1,4-DB eq / kg	* Haché de bœuf : 0.014 kg 1,4-DB eq / kg * Boulettes au bœuf : 0.017 kg 1,4-DB eq / kg		Frontières : du berceau à la tombe en incluant les emballages, le transport, distribution, consommation et traitement des déchets
Saerens <i>et al.</i> , 2021	Life cycle assessment of burger patties produced with extruded meat substitutes	Galette de burger de soja avec protéines végétales texturées : 0,006 kg 1,4-DBeq/kg	Galette de poulet pour burger : 0,14 mg kg 1,4-DBeq/kg	1 kg de galettes de hamburger fraîches, prêtes à être emballées	Cette étude impliquait une approche « cradle to gate » à partir de la production de matières premières jusqu'à la production de galettes de burger crues. Par conséquent, l'étude a porté sur la production et l'acquisition des matières premières et s'est terminée « à la porte de l'usine », c'est-à-dire juste avant le transport vers les distributeurs. Ainsi, conditionnement, distribution au supermarché et de là au consommateur, consommation et traitement des déchets après.
Écotoxicité marine					
Source	Sujet	Résultats (kg 1,4-DB eq/kg)		Commentaires	Frontières
		Végétal	Viande		
Fresán <i>et al.</i> , 2019	Water Footprint of Meat Analogs: Selected Indicators according to life cycle assessment	Analogues de viande : 0,0068 kg 1,4-DBeq/kg	/	/	*Les limites du système comprenaient les phases de (i) la culture des ingrédients bruts, (ii) le transport des ingrédients bruts des fermes à l'installation de transformation, (iii) la fabrication du matériel d'emballage et, (iv) toutes les activités en usine (c'est-à-dire le stockage des ingrédients, transformation des ingrédients en analogues de viande, conditionnement et stockage des produits finis). Les impacts associés aux différentes phases de génération d'analogues de viande (p. ex., production et transport des ingrédients, transformation des ingrédients en analogues de viande, emballage des produits finis) ont également été calculés indépendamment.
Saerens <i>et al.</i> , 2021	Life cycle assessment of burger patties produced with extruded meat substitutes	Galette de burger de soja avec protéines végétales texturées : 0,0008 kg 1,4-DBeq/kg	Galette de bœuf pour burger : 0,006 mg kg 1,4-DBeq/kg	1 kg de galettes de hamburger fraîches, prêtes à être emballées	Cette étude impliquait une approche « cradle to gate » à partir de la production de matières premières jusqu'à la production de galettes de burger crues. Par conséquent, l'étude a porté sur la production et l'acquisition des matières premières et s'est terminée « à la porte de l'usine », c'est-à-dire juste avant le transport vers les distributeurs. Ainsi, conditionnement, distribution au supermarché et de là au consommateur, consommation et traitement des déchets après.

Eutrophication marine					
Source	Sujet	Résultats (kg N eq/kg)		Commentaires	Frontières
		Végétal	Viande		
Fresán <i>et al.</i> , 2019	Water Footprint of Meat Analogs: Selected Indicators according to life cycle assessment	Analogues de viande : 2,2x10e-3 = 0,0022 kg N eq/kg	Viande : 0.02-0.11 kg N eq / kg	/	*Les limites du système comprenaient les phases de (i) la culture des ingrédients bruts, (ii) le transport des ingrédients bruts des fermes à l'installation de transformation, (iii) la fabrication du matériel d'emballage et, (iv) toutes les activités en usine (c'est-à-dire le stockage des ingrédients, transformation des ingrédients en analogues de viande, conditionnement et stockage des produits finis). Les impacts associés aux différentes phases de génération d'analogues de viande (p. ex., production et transport des ingrédients, transformation des ingrédients en analogues de viande, emballage des produits finis) ont également été calculés indépendamment.
Saget <i>et al.</i> , 2021	Substitution of beef with pea protein reduces the environmental footprint of meat balls whilst supporting health and	Boules de protéines de pois : 0,013 kg N eq/kg	Boulettes de viande de bœuf à la suédoise : 0,19 kg N eq/kg	* La viande provient d'Irlande	La méthodologie ACV a suivi les directives de l'empreinte environnementale du produit (PEF) (Commission européenne, 2018) pour les étapes agricoles, distribution (40 % répartis en Allemagne, 40 % en Europe et 20 % hors Europe), stockage et cuisson. La fin de vie (EoL) a été exclue des limites, car elle était considérée comme la même pour tous les produits.

## \* Produits laitiers animaux vs boissons végétales

Empreinte carbone					
Source	Sujet	Résultats (kg CO <sub>2</sub> -eq/kg)		Commentaires	Frontières
		Boisson végétale	Produits laitiers animaux		
Chme <i>et al.</i> , 2017	Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories	* Légumes de plein champ : <b>0,37 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b> * Fruits et légumes de serre passive : <b>1,10 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b> * Serre chauffée fruits et légumes : <b>2,13 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b> * Boisson de soja : <b>0,75 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b> * Boisson d'amande et lait de coco : <b>0,42 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b>	* Moyenne mondiale du lait : <b>1,29 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b> * Crème : <b>5,64 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b> * Fromage : <b>8,55 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b> * Yaourt : <b>1,31 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b> * Beurre : <b>9,25 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b>	* Valeurs pour produit ou viande sans os * Des valeurs plus détaillées sont données pour le lait animal par pays : valeur minimale de 1,14 en NZ et 2,50 en Afrique. * Article comparant des valeurs de différents auteurs * Les valeurs sont des médianes.	* Variation de la limite du système selon les ACV La limite du système utilisée dans les études ACV sur les aliments variait également. * Valeurs GWP convertis aux limites du système du centre de distribution régional * Chiffres médians d'emballage et de transport sont ajoutés quand ça se termine à la sortie de la ferme * Les études ACV ont généralement analysé les intrants agricoles provenant des produits chimiques et des engrais ; les intrants de carburant et d'énergie provenant de l'irrigation et des machines pour la culture, la récolte et la transformation ; et le transport et la réfrigération jusqu'au centre de distribution régional. Les extrants comprennent les émissions rejetées par les sols fertilisés, les plantes et les animaux dans les champs. Les pépinières pour l'horticulture, bien qu'importantes, sont présentées en dehors des limites du système simplifié (3/19 études en tiennent compte). La plupart des ACV alimentaires excluent également les infrastructures et les biens d'équipement. Les infrastructures et les biens d'équipement sont également exclus. La consommation humaine (transport jusqu'au magasin, stockage, cuisine, élimination...) sont exclus. Les fruits et légumes en serre sont analysés distinctement.
Detzel <i>et al.</i> , 2021	Life cycle assessment of animal-based foods and plant-based protein-rich alternatives: an environmental	* Boisson végétale : <b>0,24 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b> * Boisson végétale optimisée : <b>0,21 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b>	* Lait de vache "conventionnel" : <b>1,17 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b> * Lait de vache "haute performance" : <b>0,89 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b>	* Valeurs initiales : Lait végétal : 24 g CO <sub>2</sub> eq pour 100g de produit / Optimisé : 21 g CO <sub>2</sub> eq / Lait de vache conventionnel : 117 g CO <sub>2</sub> eq / Lait de vache haute performance : 89 g CO <sub>2</sub> eq * L'expression "haute performance" désigne ici principalement les variétés animales ayant un taux de conversion alimentaire (TCA) élevé, ce qui se traduit par des animaux produisant beaucoup de viande ou de lait, respectivement, par quantité d'intrants.	* L'ACV a été conçue comme une ACV « du berceau à la porte » comprenant toutes les étapes du cycle de vie, de l'approvisionnement en matières premières biotiques et abiotiques jusqu'aux produits alimentaires finaux à la sortie de l'usine, y compris tous les transports ainsi que toutes les pré-chaines d'énergie et de matières premières. La production et l'élimination des infrastructures (machines, moyens de transport, routes, etc.) et leur maintenance (pièces de rechange, chauffage des halls de production) ainsi que les matériaux d'emballage liés aux produits finaux ont été exclus sur la base d'AgriFootprint 2.0.3
Grant et Hicks, 2018	Comparative Life Cycle Assessment of Milk and Plant-Based Alternatives	* Boisson d'amande : <b>3,85 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b> * Boisson de soja : <b>3,27 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b>	Lait de vache : <b>2,75 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b>	* Ces résultats sont supérieurs à ceux de d'autres études. Il existe des différences de méthodologie et d'hypothèses qui doivent être prises en compte, telles que l'allocation, l'UF et les limites du système. Pour le lait d'amande, la consommation d'énergie pendant l'irrigation et la production d'engrais azotés sont les principaux processus contribuant au PRP et au FFD du berceau à la porte. Le transport de l'usine au magasin de détail crée des impacts supplémentaires, par rapport aux deux autres produits (distance de transport plus longue). Les hypothèses de transport, cependant, sont une source de variabilité au sein de l'analyse. Le transport n'était pas le cycle de vie dominant du lait de vache. Cependant, les amandes, en particulier, ont une grande empreinte de transport de la Californie à un consommateur à Chicago.	* L'utilisation par les consommateurs et l'élimination des emballages de lait sont considérées comme étant en dehors des limites du système. Supposition que la durée de vie dans le ménage est similaire pour chaque type de lait, et que tout est consommé. Il y a eu de nombreuses études d'ACV qui se sont concentrées exclusivement sur les systèmes d'emballage pour les boissons, y compris le lait. L'objectif de cette étude était plus holistique et, par conséquent, n'a pas abordé les spécificités de l'emballage et de l'élimination des déchets. Cependant, l'emballage a été inclus en tant qu'intrant matériel dans l'étape de transformation. * La portée de l'étude prend en compte les étapes du cycle de vie de la production agricole, le transport vers une usine de transformation, la transformation du lait.
Winans <i>et al.</i> , 2019	Life cycle assessment of California unsweetened almond milk	* Boisson d'amande : <b>0,39 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b> * Boisson de soja : <b>0,42 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b> * Boisson de pois : <b>0,44 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b>	Lait d'animal : <b>1,80 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg</b>	* Valeur du lait animal citée par Winans <i>et al.</i> , mais tirée de Thoma <i>et al.</i> (2013). * Valeur des boissons végétales de soja et de pois citées par Winans <i>et al.</i> , mais tirées de Henderson and Unnasch (2017).	Le système de cette étude (pour la boisson d'amande) comprend la culture des amandes, le décorticage et l'épluchage des amandes, la transformation en farine d'amandes, la production d'autres ingrédients du lait d'amande, la production de lait d'amande, l'exploitation des installations (par exemple, l'équipement, l'éclairage, la climatisation, etc. l'emballage primaire. Toutes les installations évaluées dans cette chaîne d'approvisionnement produisent de multiples produits et, dans certains cas, ont été initialement construites et utilisées à d'autres fins. Pour cette raison, les impacts de la construction des installations et des biens d'équipement ne sont pas inclus dans les limites du système.
Feraldi <i>et al.</i> , 2012	Life Cycle Assessment of Coconut Milk and Two Non-Dairy Milk Beverage Alternatives	* Boisson d'amande : <b>0,058 kg CO<sub>2</sub>-eq/L</b> * Boisson de soja : <b>0,32 kg CO<sub>2</sub>-eq/L</b> * Lait de coco : <b>0,053 kg CO<sub>2</sub>-eq/L</b>	/	* Un demi-gallon = 1,9 L * Valeurs initiales -> Coco = 0,10, Amande = 0,11 et soja = 0,61 kgCO <sub>2</sub> par demi gallon	L'unité fonctionnelle de l'ACV du berceau à la tombe de la boisson au lait de coco est définie sur la base du volume : un demi-gallon de boisson au lait de coco non sucré livré au consommateur. L'évaluation de la charge environnementale du berceau à la tombe pour la production du lait de coco de Turtle Mountain par rapport à la production de lait de soja et d'amande est basée sur l'"équivalence d'utilisation" ou sur des volumes équivalents de boisson lactée non lactière à digérer.
Floren <i>et al.</i> , 2013	Mots clés : "LCA, environment, impact on climate, oats, oat drink, fresh, aseptic"	* Boisson d'avoine fraîche : <b>0,49 kg CO<sub>2</sub>-eq/L</b>	* Lait : <b>1,32 kg CO<sub>2</sub>-eq/L</b>	* Lait de vache, (1,5% de matière grasse, demi-écrémé)	* L'étude comprend le cycle de vie des boissons à l'avoine, y compris la consommation par le consommateur (qui inclut l'élimination des emballages par le consommateur). Les figures 2 et 3 donnent un aperçu des sous-étapes d'entrée du cycle de vie, même si les sous-étapes respectives consistent à leur tour en un arbre de traitement et contiennent un transport intermédiaire. Chaque partie de la chaîne comprend les émissions et la consommation de ressources de sa partie respective du système.
Confidentiel (2016)	Comparaison produits laitiers et alternatives à base de soja.	* « Yaourt » végétal fraise : <b>0,6 kg CO<sub>2</sub> eq/L</b> * Crème végétale chocolat : <b>0,7 kg CO<sub>2</sub> eq/L</b>	* Yaourt fraise : <b>1,3 kg CO<sub>2</sub> eq/L</b> * Crème lactière chocolat : <b>1,4 kg CO<sub>2</sub> eq/L</b>		Frontières : du berceau à la tombe en incluant les emballages, le transport, distribution, consommation et traitement des déchets.

Empreinte hydrique / Consommation d'eau					
Source	Sujet	Résultats (L/kg)		Commentaires	Frontières
		Boisson végétale	Produits laitiers animaux		
Ercin <i>et al.</i> , 2012	The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products	* Boisson de soja : <b>297 L/kg</b>	* Lait de vache : <b>1050 L/kg</b>	* La plus petite empreinte hydrique du lait de vache est de 540 l pour le Royaume-Uni et la plus grande est de 1800 l pour l'Espagne, tandis que la moyenne mondiale s'élève à 1050 l. * Pour lait de soja : 99,7 % se réfèrent à la chaîne d'approvisionnement	* Les composants généraux des empreintes en opérationnelles et de la chaîne d'approvisionnement sont exclus de cette étude car ils sont négligeables par rapport à l'empreinte eau totale pour les produits alimentaires. De plus, l'empreinte eau liée au transport des matières et l'énergie utilisée lors de la production sont exclues de cette étude car elles sont négligeables par rapport à l'empreinte eau totale des produits d'origine alimentaire. * L'emballage des produits animaux est identique à celui des produits à base de soja. * L'empreinte eau des matériaux d'emballage est ajoutée à l'empreinte eau du lait de vache
Floren <i>et al.</i> , 2013	Mots clés : "LCA, environment, impact on climate, oats, oat drink, fresh, aseptic"	* Boisson à l'avoine fraîche : <b>8 L/kg</b>	Lait de vache : <b>0,9 L/kg</b>	* Valeurs initiales : 0.0080 m <sup>3</sup> of water eq et 0,009 m <sup>3</sup>	* L'étude comprend le cycle de vie des boissons à l'avoine, y compris la consommation par le consommateur (qui inclut l'élimination des emballages par le consommateur). Les figures 2 et 3 donnent un aperçu des sous-étapes d'entrée du cycle de vie, même si les sous-étapes respectives consistent à leur tour en un arbre de traitement et contiennent un transport intermédiaire. Chaque partie de la chaîne comprend les émissions et la consommation de ressources de sa partie respective du système
Feraldi <i>et al.</i> , 2012	Life Cycle Assessment of Coconut Milk and Two Non-Dairy Milk Beverage	* Lait de coco : <b>3,58 L/kg</b> * Boisson d'amande : <b>66 L/kg</b> * Boisson de soja : <b>26,74 L/kg</b>	/	* Un demi-gallon = 1,9 L * Valeurs initiales -> Coco = 6,81 , Amande : 126 et soja : 50,8 L par demi gallon	L'unité fonctionnelle de TACV du berceau à la tombe de la boisson au lait de coco est définie sur la base du volume : un demi-gallon de boisson au lait de coco non sucré livré au consommateur. L'évaluation de la charge environnementale du berceau à la tombe pour la production du lait de coco de Turtle Mountain par rapport à la production de lait de soja et d'amande est basée sur l'"équivalence d'utilisation" ou sur des volumes équivalents de boisson lactée non laitière à digérer.

Energie utilisée/demandée					
Source	Sujet	Résultats (MJ/kg)		Commentaires	Frontières
		Boisson végétale	Produits laitiers		
Floren <i>et al.</i> , 2013	Mots clés : "LCA, environment, impact on climate, oats, oat drink, fresh, aseptic"	Boisson d'avoine fraîche : <b>9,2 MJ/kg</b>	Lait : <b>19,6 MJ/kg</b>	* Lait de vache, (1,5% de matière grasse, demi-écrémé)	* L'étude comprend le cycle de vie des boissons à l'avoine, y compris la consommation par le consommateur (qui inclut l'élimination des emballages par le consommateur). Les figures 2 et 3 donnent un aperçu des sous-étapes d'entrée du cycle de vie, même si les sous-étapes respectives consistent à leur tour en un arbre de traitement et contiennent un transport intermédiaire. Chaque partie de la chaîne comprend les émissions et la consommation de ressources de sa partie respective du système
Feraldi <i>et al.</i> , 2012	Life Cycle Assessment of Coconut Milk and Two Non-Dairy Milk Beverage Alternatives	* Lait de coco : <b>1,005 MJ/kg</b> * Boisson d'amande : <b>0,73 MJ/kg</b> * Boisson de soja : <b>1,90 MJ/kg</b>	/	* Un demi-gallon = 1,9 L * Valeurs initiales -> Coco = 1,91 , Amande : 1,39 et soja : 3,62 MJ par demi gallon	L'unité fonctionnelle de TACV du berceau à la tombe de la boisson au lait de coco est définie sur la base du volume : un demi-gallon de boisson au lait de coco non sucré livré au consommateur. L'évaluation de la charge environnementale du berceau à la tombe pour la production du lait de coco de Turtle Mountain par rapport à la production de lait de soja et d'amande est basée sur l'"équivalence d'utilisation" ou sur des volumes équivalents de boisson lactée non laitière à digérer.
Birgersson <i>et al.</i> , 2009	An attributional Life Cycle Assessment examining the potential environmental impact of soy milk.	Boisson de soja : <b>3,37 MJ/kg</b>	Lait d'animal : <b>3,9 MJ/kg</b>	* Valeur du lait animal tirée de Mjölakens milköp överkam. * Expériences faites sur du lait de soja, les valeurs animales sont tirées de d'autres ouvrages.	* Etude basée sur la consommation régulière de lait et les habitudes d'achat quotidiennes à Stockholm. Cela a un impact considérable sur l'importance du transport des graines de soja vers les usines de production sur les flux globaux de l'analyse. La production du lait de soja est censée se faire en Belgique : incidence sur le transport. * La production des équipements nécessaires à l'extraction des matières premières et à la production sont exclus. * Un certain pourcentage des déchets de fibres de haricot provenant de la production de lait de soja, appelé okara, est utilisé pour la production d'aliments pour animaux. Ce pourcentage n'est pas pris en compte dans les calculs. * Le processus de gestion des déchets pour le cycle de vie du lait de soja n'est pas complet ; il ne contient que le processus de gestion des déchets pour l'emballage du lait de soja. On suppose que tout le lait est consommé et on n'a pas tenu compte des coûts énergétiques potentiels dus aux restes de liquide (charge des eaux usées).
Grant <i>et Hicks</i> , 2018	Comparative Life Cycle Assessment of Milk and Plant-Based Alternatives	* Boisson d'amande : <b>40 MJ/kg</b> * Boisson de soja : <b>45 MJ/kg</b>	Lait de vache : <b>35 MJ/kg</b>		* Exclusion : utilisation par les consommateurs, élimination des emballages. * Inclusion : production agricole, transport vers une usine de transformation, la transformation du lait, du transport vers le magasin de détail à Chicago et de la vente au détail + emballage en tant que matériel dans la transformation.



Utilisation des terres					
Source	Sujet	Résultats (m <sup>2</sup> / kg)		Commentaires	Frontières
		<b>Boisson végétale</b>	<b>Produits laitiers</b>		
Floren et al., 2013	Mots clés : "LCA, environment, impact on climate, oats, oat drink, fresh, aseptic"	Boisson d'avoine fraîche : <b>0,6 m<sup>2</sup>/kg</b>	Lait : <b>2,9 m<sup>2</sup>/kg</b>	* Lait de vache, (1,5% de matière grasse, demi-écrémé)	* L'étude comprend le cycle de vie des boissons à l'avoine, y compris la consommation par le consommateur (qui inclut l'élimination des emballages par le consommateur). Les figures 2 et 3 donnent un aperçu des sous-étapes d'entrée du cycle de vie, même si les sous-étapes respectives consistent à leur tour en un arbre de traitement et contiennent un transport intermédiaire. Chaque partie de la chaîne comprend les émissions et la consommation de ressources de sa partie respective du système
Birgersson et al., 2009	An attributional Life Cycle Assessment examining the potential environmental impact of soy milk.	Boisson de soja : <b>0,59 m<sup>2</sup>/kg</b>	Lait d'animal : <b>1,5 m<sup>2</sup>/kg</b>	* Valeur du lait animal tirée de Cederberg et Flysjö, 2004. * Expériences faites sur du lait de soja, les valeurs animales sont tirées de d'autres ouvrages.	* Etude basée sur la consommation régulière de lait et les habitudes d'achat quotidiennes à Stockholm. Cela a un impact considérable sur l'importance du transport des graines de soja vers les usines de production sur les flux globaux de l'analyse. La production du lait de soja est censée se faire en Belgique : incidence sur le transport. * La production des équipements nécessaires à l'extraction des matières premières et à la production sont exclus. * Un certain pourcentage des déchets de fibres de haricot provenant de la production de lait de soja, appelé okara, est utilisé pour la production d'aliments pour animaux. Ce pourcentage n'est pas pris en compte dans les calculs. * Le processus de gestion des déchets pour le cycle de vie du lait de soja n'est pas complet ; il ne contient que le processus de gestion des déchets pour l'emballage du lait de soja. On suppose que tout le lait est consommé et on n'a pas tenu compte des coûts énergétiques potentiels dus aux restes de liquide (charge des eaux usées).
Confidentiel (2016)	Comparaison produits laitiers et alternatives à base de soja.	* « Yaourt » végétal fraise : <b>0,6 m<sup>2</sup>/kg</b> * Crème végétale chocolat : <b>1,4 m<sup>2</sup>/kg</b>	* Yaourt fraise : <b>1,6 m<sup>2</sup>/kg</b> * Crème laitière chocolat : <b>2,2 m<sup>2</sup>/kg</b>		Frontières : du berceau à la tombe en incluant les emballages, le transport, distribution, consommation et traitement des déchets.

Entrophisation marine					
Source	Sujet	Résultats (kg N eq/kg)		Commentaires	Frontières
		<b>Boisson végétale</b>	<b>Produits laitiers</b>		
Floren et al., 2013	Mots clés : "LCA, environment, impact on climate, oats, oat drink, fresh, aseptic"	* Boisson d'avoine fraîche : <b>2e-3 kg N eq/kg</b>	* Lait : <b>0,006 kg N eq/kg</b>	* Lait de vache, (1,5% de matière grasse, demi-écrémé)	* L'étude comprend le cycle de vie des boissons à l'avoine, y compris la consommation par le consommateur (qui inclut l'élimination des emballages par le consommateur). Les figures 2 et 3 donnent un aperçu des sous-étapes d'entrée du cycle de vie, même si les sous-étapes respectives consistent à leur tour en un arbre de traitement et contiennent un transport intermédiaire. Chaque partie de la chaîne comprend les émissions et la consommation de ressources de sa partie respective du système
McClements et al., 2019 (tiré de Grant et Hicks, 2018)	Plant-based Milks: A Review of the Science Underpinning Their Design, Fabrication, and Performance	* Boisson de soja : <b>6,2e-3 kg N eq/kg</b> * Boisson d'amande : <b>1,7e-3 kg N eq/kg</b>	Lait de vache : <b>0,0010 kg N eq/kg</b>		Turé de Gant et Hicks : * L'utilisation par les consommateurs et l'élimination des emballages de lait sont considérées comme étant en dehors des limites du système. Supposition que la durée de vie dans le ménage est similaire pour chaque type de lait, et que tout est consommé. Il y a eu de nombreuses études d'ACV qui se sont concentrées exclusivement sur les systèmes d'emballage pour les boissons, y compris le lait. L'objectif de cette étude était plus holistique et, par conséquent, n'a pas abordé les spécificités de l'emballage et de l'élimination des déchets. Cependant, l'emballage a été inclus en tant qu'intrant matériel dans l'étape de transformation. * La portée de l'étude prend en compte les étapes du cycle de vie de la production agricole, le transport vers une usine de transformation, la transformation du lait.
Feraldi et al., 2012	Life Cycle Assessment of Coconut Milk and Two Non-Dairy Milk Beverage Alternatives	* Lait de coco : <b>3,53 e-5 kg N eq/kg</b> * Boisson d'amande : <b>2,16 e-4 kg N eq/kg</b> * Boisson de soja : <b>7,90 e-5 kg N eq/kg</b>	/	* Un demi-gallon = 1,9 L * Valeurs initiales -> Coco = 6,7e-5, Amande : 4,1e-4 et soja : 1,5e-4 gk N eq par demi gallon	L'unité fonctionnelle de l'ACV du berceau à la tombe de la boisson au lait de coco est définie sur la base du volume : un demi-gallon de boisson au lait de coco non sucré livré au consommateur. L'évaluation de la charge environnementale du berceau à la tombe pour la production du lait de coco de Turtle Mountain par rapport à la production de lait de soja et d'amande est basée sur l'"équivalence d'utilisation" ou sur des volumes équivalents de boisson lactée non laitière à digérer.

Appauvrissement de l'Ozone					
Source	Sujet	Résultats (kg CFC11/L)	Commentaires	Frontières	
		<b>Boisson végétale</b>	<b>Produits laitiers</b>		
Bjergsson et al., 2009	An attributional Life Cycle Assessment examining the potential environmental impact of soy milk.	Boisson de soja : <b>3,2 e-7 kg CFC11/kg</b>	Lait d'animal : <b>5,12 e-8 kg CFC11/kg</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Valeur du lait animal tirée de Hospido et al., 2002.</li> <li>* Expériences faites sur du lait de soja, les valeurs animales sont tirées de d'autres ouvrages.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Etude basée sur la consommation régulière de lait et les habitudes d'achat quotidiennes à Stockholm. Cela a un impact considérable sur l'importance du transport des graines de soja vers les usines de production sur les flux globaux de l'analyse. La production du lait de soja est censée se faire en Belgique : incidence sur le transport.</li> <li>* La production des équipements nécessaires à l'extraction des matières premières et à la production sont exclus.</li> <li>* Un certain pourcentage des déchets de fibres de haricot provenant de la production de lait de soja, appelé okara, est utilisé pour la production d'aliments pour animaux. Ce pourcentage n'est pas pris en compte dans les calculs.</li> <li>* Le processus de gestion des déchets pour le cycle de vie du lait de soja n'est pas complet ; il ne couvrait que le processus de gestion des déchets pour l'emballage du lait de soja. On suppose que tout le lait est consommé et on n'a pas tenu compte des coûts énergétiques potentiels dus aux restes de liquide (charge des eaux usées).</li> </ul>
Feraldi et al., 2012	Life Cycle Assessment of Coconut Milk and Two Non-Dairy Milk Beverage Alternatives	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Lait de coco : <b>1,26 e-9 kg CFC11/kg</b></li> <li>* Boisson d'amande : <b>9,47e-10 kg CFC11/kg</b></li> <li>* Boisson de soja : <b>1,68e-9 kg CFC11/kg</b></li> </ul>	/	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Un demi-gallon = 1,9 L</li> <li>* Valeurs initiales</li> <li>-&gt; Coco = 1,4e-9 , Amande : 2,8e-9 et soja : 3,2e-9 kg CFC11 par demi gallon</li> </ul>	L'unité fonctionnelle de l'ACV du berceau à la tombe de la boisson au lait de coco est définie sur la base du volume : un demi-gallon de boisson au lait de coco non sucré livré au consommateur. L'évaluation de la charge environnementale du berceau à la tombe pour la production du lait de coco de Turtle Mountain par rapport à la production de lait de soja et d'amande est basée sur l'équivalence d'utilisation* ou sur des volumes équivalents de boisson lactée non laitière à digérer.
McClements et al., 2019 (tiré de Grant et Hicks, 2018)	Plant-based Milks: A Review of the Science Underpinning Their Design, Fabrication, and Performance	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Boisson de soja : <b>3,29 e-7 kg CFC11/kg</b></li> <li>* Boisson d'amande : <b>3,27 e-7 kg CFC11/kg</b></li> </ul>	Lait de vache : <b>3,27 e-7 kg CFC11/kg</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tiré de Gant et Hicks :</li> <li>* L'utilisation par les consommateurs et l'élimination des emballages de lait sont considérées comme étant en dehors des limites du système. Supposition que la durée de vie dans le ménage est similaire pour chaque type de lait, et que tout est consommé. Il y a eu de nombreuses études d'ACV qui se sont concentrées exclusivement sur les systèmes d'emballage pour les boissons, y compris le lait. L'objectif de cette étude était plus holistique et, par conséquent, n'a pas abordé les spécificités de l'emballage et de l'élimination des déchets. Cependant, l'emballage a été inclus en tant qu'intrant matériel dans l'étape de transformation.</li> <li>* La portée de l'étude prend en compte les étapes du cycle de vie de la production agricole, le transport vers une usine de transformation, la transformation du lait.</li> </ul>	

Écotoxicité				
Source	Sujet	Résultats (CTUe/kg)	Commentaires	Frontières
		<b>Boisson végétale</b>	<b>Produits laitiers animaux</b>	
McClements et al., 2019 (tiré de Grant et Hicks, 2018)	Plant-based Milks: A Review of the Science Underpinning Their Design, Fabrication, and Performance	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Boisson de soja : <b>9,64 CTUe/kg</b></li> <li>* Boisson d'amande : <b>31,3 CTUe/kg</b></li> </ul>	Lait de vache : <b>133 CTUe/kg</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tiré de Gant et Hicks :</li> <li>* L'utilisation par les consommateurs et l'élimination des emballages de lait sont considérées comme étant en dehors des limites du système. Supposition que la durée de vie dans le ménage est similaire pour chaque type de lait, et que tout est consommé. Il y a eu de nombreuses études d'ACV qui se sont concentrées exclusivement sur les systèmes d'emballage pour les boissons, y compris le lait. L'objectif de cette étude était plus holistique et, par conséquent, n'a pas abordé les spécificités de l'emballage et de l'élimination des déchets. Cependant, l'emballage a été inclus en tant qu'intrant matériel dans l'étape de transformation.</li> <li>* La portée de l'étude prend en compte les étapes du cycle de vie de la production agricole, le transport vers une usine de transformation, la transformation du lait.</li> </ul>
Krokida et al., 2016	Life cycle assessment on european skimmed milk powder processing production plant	/	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Scénario 1 : <b>25,11 CTUe/kg</b></li> <li>* Scénario 2 : <b>25,12 CTUe/kg</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dans cette étude, deux lignes de production différentes ont été examinées, la production conventionnelle de lait écrémé en poudre (LEMP) avec l'inclusion de l'osmose inverse (Scénario 1) et la production de LEMP sans osmose inverse (Scénario 2).</li> <li>Dans l'ACV, l'énergie, l'eau et le profil environnemental des scénarios de transformation conventionnelle du lait ont été évalués dans les limites de l'usine laitière, tandis que les entrées et sorties de matières et d'énergie dans les domaines de l'agriculture, du conditionnement, de la distribution et de la vente au détail ont été évaluées. L'agriculture, l'emballage, la distribution et la vente au détail n'ont pas été pris en compte dans l'évaluation. Le site l'impact des processus intégrés sur la santé humaine, l'environnement naturel et les ressources naturelles causés par les interventions entre la Techno-sphère et Ecosphère pendant les opérations a été évalué par rapport à toutes les catégories d'impact pertinentes résultant de l'analyse. Enfin, l'étude avait pour but de fournir des données sur l'évaluation de la durabilité de l'état actuel de la production de lait écrémé.</li> </ul>
Confidentiel (2016)	Comparaison produits laitiers et alternatives à base de soja.	<ul style="list-style-type: none"> <li>* « Yaourt » végétal fraise : <b>0.7 CTUe/ kg</b></li> <li>* Crème végétale chocolat : <b>0.8 CTUe/ kg</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Yaourt fraise : <b>0.7 CTUe/ kg</b></li> <li>* Crème laitière chocolat : <b>0.8 CTUe/ kg</b></li> </ul>	Frontières : du berceau à la tombe en incluant les emballages, le transport, distribution, consommation et traitement des déchets.
Winans et al., 2019	Life cycle assessment of California unsweetened almond milk	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Boisson d'amande : -&gt; 2016 : <b>3,00 CTUe/kg</b></li> <li>-&gt; 2017 : <b>2,87 CTUe/kg</b></li> </ul>	/	Le système de cette étude (pour la boisson d'amande) comprend la culture des amandes, le décorticage et l'épluchage des amandes, la transformation en farine d'amandes, la production d'autres ingrédients du lait d'amande, la production de lait d'amande, l'exploitation des installations (par exemple, l'équipement, l'éclairage, la climatisation, etc. l'emballage primaire. Toutes les installations évaluées dans cette chaîne d'approvisionnement produisent de multiples produits et, dans certains cas, ont été initialement construites et utilisées à d'autres fins. Pour cette raison, les impacts de la construction des installations et des biens d'équipement ne sont pas inclus dans les limites du système.

\*

## Œufs vs analogues végétaux

Empreinte carbone et/ou changement climatique					
Source	Sujet	Résultats (kg CO2 eq/kg)		Commentaires	Frontières
		Végétal	œuf		
Saget <i>et al.</i> , 2021	Does Circular Reuse of Chickpea Cooking Water to Produce Vegan Mayonnaise Reduce Environmental Impact Compared with Egg Mayonnaise?	* Mayonnaise végétalienne : <b>8 kg CO2eq/kg</b>	* Mayonnaise à base d'œuf : <b>4,44 kg CO2eq/kg</b>	* Données initiales : -> 2 kg CO2 eq pour un pot de 473 de ml de mayonnaise pour la mayonnaise à base d'œuf -> 3,6 pour la mayonnaise végétalienne * On considère de 1000 Ml = 1 kg	* Calcul de l'empreinte environnementale des deux produits du berceau à la sortie de l'usine, en utilisant les bases de données internationales Agri-footprint v3.0 [33] et Ecoinvent v3.6 [34]. * Les données d'inventaire ont été collectées spécifiquement pour cette étude auprès d'une entreprise fabriquant les deux produits.
Nette <i>et al.</i> , 2016	A Comparison of Carbon Footprint and Production Cost of Different Pasta Products Based on Whole Egg and Pea Flour	* Farine de protéines de pois : <b>0,94 kg CO2 eq /kg</b> * Production de pâtes à partir de farine de protéines de pois : <b>1,22 kg CO2eq/kg</b>	* Œuf : <b>3,00 kgCO2eq/kg</b> * * Production de pâtes à partir d'œufs : <b>1,79 kg CO2eq/kg</b>		* Pour la production de farine protéinée de pois et l'eau, les données fournies par la base de données Ecoinvent [36] ont été utilisées. Les données relatives au processus de mouture du blé, à la production de pâtes, à leur conditionnement et à leur distribution ont été tirées de Ruini et Marino * Une chaîne de valeur typique de la production de pâtes se compose des principales étapes du processus : " production de matières premières ", " production d'aliments ", " conditionnement ", " distribution " et " consommateur ". Cela inclut les sous-processus correspondants

Empreinte hydrique / Consommation d'eau					
Source	Sujet	Résultats (Litres/ kg)		Commentaires	Frontières
		Végétal	Œuf		
Thrane <i>et al.</i> , 2017	Soy Protein: Impacts, Production, and Applications	* Maïs : <b>1222 L/kg</b> * Soja : <b>2145 L/kg</b> * Pomme de terre : <b>287 L/kg</b>	Oeuf : <b>3265 L/kg</b>	Valeurs initiales : * Œuf : 3265 m3/tonnes * Maïs : 1222 * Soja : 2145 * Pomme de terre : 287	* Évaluation de l'impact du cycle de vie du berceau à la porte * Les deux méthodes se distinguent principalement par la manière dont elles traitent les calculs d'impacts environnementaux de coproduits individuels issus de procédés à plusieurs sorties, comme une usine de soja qui produit à la fois de la farine de soja et de l'huile de soja, ou une vache qui produit à la fois du lait et de la viande. * Résultats de l'ACV basés sur deux méthodologies différentes : la modélisation conséquentielle et la modélisation attributionnelle.

Empreinte hydrique / Consommation d'eau					
Source	Sujet	Résultats (Litres/ kg)		Commentaires	Frontières
		Végétal	Oeuf		
Thrane <i>et al.</i> , 2017	Soy Protein: Impacts, Production, and Applications	* Maïs : 1222 L/kg * Soja : 2145 L/kg * Pomme de terre : 287 L/kg	Oeuf : 3265 L/kg	Valeurs initiales : * Oeuf : 3265 m3/tonnes * Maïs : 1222 * Soja : 2145 * Pomme de terre : 287	* Évaluation de l'impact du cycle de vie du bœuf à la porte * Les deux méthodes se distinguent principalement par la manière dont elles traitent les calculs d'impacts environnementaux de coproduits individuels issus de procédés à plusieurs sorties, comme une usine de soja qui produit à la fois de la farine de soja et de l'huile de soja, ou une vache qui produit à la fois du lait et de la viande. * Résultats de l'ACV basés sur deux méthodologies différentes : la modélisation conséquentielle et la modélisation attributionnelle.

Eutrophisation marine					
Source	Sujet	Résultats (kg N eq/kg)		Commentaires	Frontières
		Végétal	Oeuf		
Saget <i>et al.</i> , 2021	Does Circular Reuse of Chickpea Cooking Water to Produce Vegan Mayonnaise Reduce Environmental Impact Compared with Egg Mayonnaise?	* Mayonnaise végétalienne : 0,024 kg N eq/kg	* Mayonnaise à base d'oeuf : 0,024 kg N eq/kg	* Données initiales : -> 0,011 kg N eq pour un pot de 473 de ml de mayonnaise pour la mayonnaise à base d'oeuf -> 0,011 kg N eq pour la mayonnaise végétalienne * On considère de 1000 mL = 1 kg	Cette étude est une ACV attributionnelle comparative. Le logiciel libre OpenLCA v1.10 [32] a été utilisé pour calculer l'empreinte environnementale des deux produits du bœuf à la sortie de l'usine, en utilisant les bases de données internationales Agri-footprint v3.0 [33] et Ecoinvent v3.6 [34]. Les données d'inventaire sur le VEG et l'EGG ont été collectées spécifiquement pour cette étude auprès d'une entreprise fabriquant les deux produits

Appauvrissement de l'Ozone					
Source	Sujet	Résultats (kg CFC11/kg)		Commentaires	Frontières
		Végétal	Oeuf		
Saget <i>et al.</i> , 2021	Does Circular Reuse of Chickpea Cooking Water to Produce Vegan Mayonnaise Reduce Environmental Impact Compared with Egg Mayonnaise?	* Mayonnaise végétalienne : 6 e-7 kg CFC11/kg	* Mayonnaise à base d'oeuf : 2,66 e-7 kg CFC11/kg	* Données initiales : -> 1,2 e-7 kg CFC11 pour un pot de 473 de ml de mayonnaise pour la mayonnaise à base d'oeuf -> 2,7 e-7 kg CFC11 pour la mayonnaise végétalienne * On considère de 1000 mL = 1 kg	Cette étude est une ACV attributionnelle comparative. Le logiciel libre OpenLCA v1.10 [32] a été utilisé pour calculer l'empreinte environnementale des deux produits du bœuf à la sortie de l'usine, en utilisant les bases de données internationales Agri-footprint v3.0 [33] et Ecoinvent v3.6 [34]. Les données d'inventaire sur le VEG et l'EGG ont été collectées spécifiquement pour cette étude auprès d'une entreprise fabriquant les deux produits

Écotoxicité (eau fraîche)					
Source	Sujet	Résultats (CTUe/kg)		Commentaires	Frontières
		Végétal	Oeuf		
Saget <i>et al.</i> , 2021	Does Circular Reuse of Chickpea Cooking Water to Produce Vegan Mayonnaise Reduce Environmental Impact Compared with Egg Mayonnaise?	* Mayonnaise végétalienne : 57,19 CTUe/kg	* Mayonnaise à base d'oeuf : 83,67 CTUe/kg	* Données initiales : -> 27,6 CTUe/L pour un pot de 473 de ml de mayonnaise pour la mayonnaise à base d'oeuf -> 25,7 CTUe/L pour la mayonnaise végétalienne * On considère de 1000 mL = 1 kg	Cette étude est une ACV attributionnelle comparative. Le logiciel libre OpenLCA v1.10 [32] a été utilisé pour calculer l'empreinte environnementale des deux produits du bœuf à la sortie de l'usine, en utilisant les bases de données internationales Agri-footprint v3.0 [33] et Ecoinvent v3.6 [34]. Les données d'inventaire sur le VEG et l'EGG ont été collectées spécifiquement pour cette étude auprès d'une entreprise fabriquant les deux produits