

Application de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) à un domaine viticole

Application of Life Cycle Assessment (LCA) method to a French winery

Hugo Luzi¹, Emilie Adoir¹ et Sophie Penavayre¹

¹ Institut Français de la Vigne et du Vin (IFV), 69400, Villefranche-sur-Saône, France

Résumé. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode multicritère qui permet de quantifier les impacts environnementaux associés à l'activité d'une entreprise sur l'ensemble de son cycle de vie et de guider les choix en vue de l'écoconception. Elle inclut par exemple des indicateurs liés aux émissions de gaz à effet de serre et à la capture de carbone, aux émissions de particules fines, à la consommation d'énergie ou à la pollution des eaux. Appliquée au domaine viticole du Château de l'Eclair, elle permet de renseigner sur les sources de pollutions les plus importantes de l'entreprise, mais aussi plus généralement de la filière. Les résultats permettent de mettre en évidence le poids important de la fabrication des bouteilles en verre dans le bilan environnemental du vin sur un grand nombre d'indicateurs, dont l'empreinte carbone. Toutefois, la mise en place d'un enherbement de l'inter-rang et le retour au sol des sarments à la vigne, permet d'après la modélisation, de séquestrer environ un quart des émissions de gaz à effet de serre de la production de vin. Les résultats montrent également le gain environnemental du passage en agriculture biologique sur l'indicateur écotoxicité de l'eau douce.

Abstract. Life Cycle Assessment (LCA) is a multi-criteria method for quantifying the environmental impacts associated with a company's activity, and for guiding choices with a view to eco-design. It includes, for example, indicators relating to greenhouse gas emissions and carbon storage, fine particle emissions, energy consumption and water pollution. Applied to a winery, it provides information on the most significant sources of pollution for the company, but also more generally for the industry. The results show that the manufacture of glass bottles contributes significantly to the environmental impact of wine on many indicators, including the carbon footprint. However, the introduction of inter-row grassing and the return to the soil of vine shoots, according to the model, sequesters around a quarter of the greenhouse gas emissions from wine production. The results also show the environmental benefits of switching to organic farming in terms of freshwater ecotoxicity.

1. Matériel et méthodes

1.1. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

L'ACV permet de quantifier les impacts environnementaux d'une activité, d'un produit, d'un service d'une entreprise ou un territoire sur l'ensemble de son cycle de vie. Elle peut s'appliquer à une entreprise. Sont pris en compte les impacts liés à l'amont de l'activité – c'est-à-dire les impacts liés à la fabrication des intrants - les impacts directement liés à l'activité de l'entreprise, ainsi que les impacts liés à l'aval de l'entreprise – c'est-à-dire par exemple les impacts liés à la commercialisation et la fin de vie du produit. Cette approche multicritère et multi-étape permet de guider les choix d'écoconception en

évitant les transferts de pollution en amont ou en aval du cycle de vie ou entre indicateurs d'impacts environnementaux.

Une approche telle que l'ACV paraît pertinente pour couvrir la complexité d'une entreprise vitivinicole, intégrant à la fois des problématiques du monde agricole, de l'industrie agroalimentaire et du commerce international.

1.2. Unité fonctionnelle et périmètre

L'ACV nécessite de définir une unité fonctionnelle qui représente le service réalisé. Dans le cadre de cette étude, on peut définir cette unité fonctionnelle comme :

« produire, conditionner et commercialiser 1L de vin ». De cette façon, l'ensemble de l'activité de l'entreprise est couvert. L'entreprise étudiée est le Château de l'Eclair, le domaine de la SICAREX Beaujolais, organisme de recherche et d'expérimentation à destination du vignoble du Beaujolais. Avec 20,5 hectares de vignes réalisant la vinification et le conditionnement sur site et avec de la vente à la fois en France et à l'export ; le domaine possède, sur sa partie expérimentale, une parcelle conservatoire de cépages, dont des cépages résistants aux maladies. Le domaine pratique l'enherbement des inter-rangs et possède 30% de sa production en agriculture biologique (AB) et tout le reste certifié Haute valeur environnementale (HVE).

Étant donné son lien avec l'expérimentation, le Château de l'Eclair est un bon cas d'exemple d'application et de démonstration de la démarche ACV à des fins d'écoconception pour la filière.

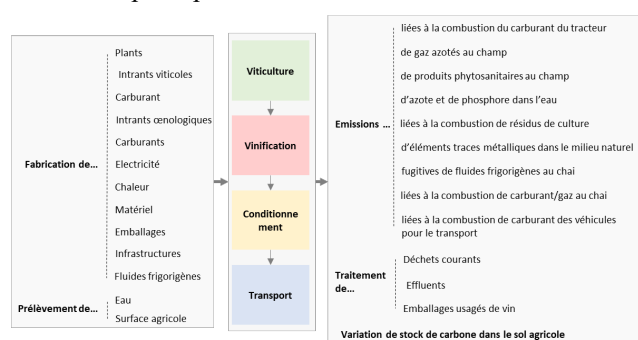


Figure 1. Modèles d'émission utilisés pour le calcul de l'inventaire agricole.

La figure 1 ci-dessus dresse la liste des flux et postes d'impacts pris en compte dans l'ACV de l'entreprise. On retrouve bien à la fois des impacts liés à la fabrication d'intrants, de prélèvements de ressources et des émissions directes de polluants dans l'environnement. L'étude s'intéresse également à la variation de stock de carbone dans le sol du fait des pratiques agricoles.

Il est à noter que les phases de stockage du vin en magasin, de transport du vin entre le lieu d'achat et le domicile du client (dernier kilomètre), de consommation du vin ne sont pas pris en compte. En revanche les impacts et bénéfices liés à la fin de vie des emballages du vin (mise en décharge, incinération et recyclage) sont bien intégrés au périmètre de l'étude car ils sont intimement liés aux choix techniques du vigneron concernant le mode de conditionnement.

1.3. Méthodologie d'établissement de l'inventaire

1.3.1. Données collectées

L'ensemble des données collectées se répartissent sur la même période temporelle : la campagne 2022-2023 courant du 1^{er} septembre 2022 au 31 août 2023.

Du fait de la saisonnalité de l'ensemble des activités vitivinicoles et d'une durée nécessaire à la production de

vin supérieure à 1 an, les données collectées ne recouvrent donc pas le même millésime et donc le même volume traité selon les différentes phases qu'ils concernent. En effet, sur la campagne 2022-2023, la production de raisin concerne la récolte 2023, alors que la vinification et le conditionnement concernent le millésime précédent récolté en septembre 2022. En raison de stocks, le vin commercialisé comprend quant à lui plusieurs millésimes précédant celui de 2023 dont le 2022, 2021, 2020, etc. Ces informations sont résumées dans la figure 2.

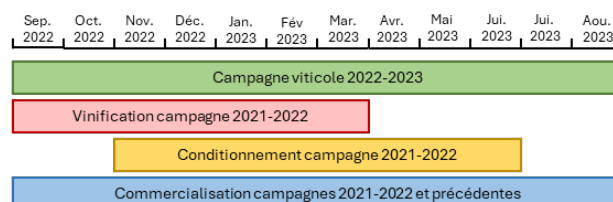


Figure 2. Périodes temporelles considérées pour chaque étape du cycle de vie.

Pour chacune des données collectées, il s'agira alors de définir à quelle phase, et donc à quel volume total traité elle se rapporte.

Pour la collecte des données viticoles hors carburant, une approche par itinéraire technique a été mobilisée. Il a été demandé, par hectare les quantités d'engrais et de produits phytosanitaires appliquées, ainsi que le type de matériel de palissage et le nombre de plants amortis sur 40 ans de durée de vie de la parcelle. L'ensemble de ces données ont ensuite été converties en quantités/ha/an.

Pour les intrants œnologiques, l'énergie, le carburant, et l'eau, il est plus difficile d'avoir une approche itinéraire technique. Pour des raisons pratiques, ce sont donc les consommations annuelles totales sur facture qui ont été collectées. Ces quantités ont ensuite été ramenées au L de vin vinifié (pour les intrants œnologiques, l'eau et l'énergie) ou au L de rendement viticole (pour le carburant du tracteur) sur la campagne considérée.

Le calcul des impacts liés aux infrastructures (gros matériel et cuverie) a été effectué en prenant une durée de vie de 20 ans tandis que les bâtiments ont été amortis sur 40 ans.

Les flux de références pour chaque étape du cycle de vie sont présentés dans le tableau 1. On constate bien que les volumes traités sont différents pour chaque étape de cycle de vie. En particulier, le volume conditionné est particulièrement faible en raison, entre autres d'une quantité importante de vin vendue en vrac.

Tableau 1. Flux de références pour les différentes étapes de cycle de vie de la production de vin

Etape du cycle de vie	Flux de référence
Viticulture	20,5 ha pour 760 hL
Vinification	606 hL
Conditionnement	167 hL
Commercialisation en vrac	259 hL
Commercialisation conditionné	230 hL

1.3.2. Modèles d'émissions de l'inventaire agricole

Afin de modéliser l'inventaire agricole, qui comprend de nombreux flux de polluants émis dans l'air, dans l'eau et dans les sols, à partir de données d'itinéraires techniques (quantités de produits phytosanitaires, d'engrais, données pédoclimatiques), il est nécessaire d'utiliser des modèles d'émission. La liste des modèles d'émission utilisés est présentée dans le tableau 2 ci-dessous. Elle est basée en partie sur la méthodologie Agribalyse [1], base de données référençant les impacts ACV de différents produits agricoles et alimentaires français.

Tableau 2. Modèles d'émission utilisés pour le calcul de l'inventaire agricole.

Type de flux	Modèle associé
Emissions de phosphore et phosphates dans les eaux	SALCA-P [2]
Emissions de métaux lourds dans les eaux et dans les sols	SALCA-ETM [1, 3]
Emissions de substances phytosanitaires dans les eaux et dans les sols	OLCA-Pest default emissions [4]
Emissions de NO ₃ dans l'eau	SQCB [1]
Emissions de NH ₃ dans l'air liées aux engrais	EMEP/EEA Niveau 2 [1]
Emissions de NO _x dans l'air liées aux engrais, résidus et couverts végétaux	IPCC [1]
Emissions de N ₂ O dans l'air liées aux engrais, résidus et couverts végétaux	IPCC [1]
Emissions liées au brûlage des sarments ainsi que des souches lors de l'arrachage	IPCC [5]
Variation du stock de C _{org} du sol	AMG [6]

Le modèle SALCA-P calcule les émissions de phosphore dans les eaux de surface et souterraines issues du ruissellement, de la lixiviation et de l'érosion. Il dépend notamment du niveau de fertilisation et de la quantité de sol érodée, calculée par le modèle RUSLE2 [1] et basée sur la pente, le type de travail du sol et le type de couverture.

Le modèle SALCA-ETM, fait un bilan entre les entrées d'Eléments Trace Métalliques (ETM) par les fertilisants, semences, retombées atmosphériques et les sorties par lixiviation, ruissellement, érosion et récolte du raisin.

En l'absence de modèle plus adapté, les émissions de nitrates dans l'eau ont été modélisées avec le modèle SQCB. Ce modèle est uniquement sensible à la quantité d'azote en entrée et au rendement.

La méthodologie Agribalyse fournit des valeurs par défaut à utiliser pour paramétrer ces modèles dans le cadre d'une utilisation en contexte viticole français.

Le modèle OLCA-Pest fournit, pour chaque catégorie de substance phytosanitaire (herbicide, fongicide, insecticide), des facteurs de répartition par défaut entre les différents compartiments que sont l'air, le sol agricole, le sol naturel, l'eau et la culture. Ces facteurs d'émissions par défaut ont été utilisés dans le cadre de ce calcul. Dans sa

version simplifiée, ce modèle ne tient donc pas compte des différences de répartition liées au matériel de pulvérisation, à la météo et au climat, ni à la nature précise de la molécule.

Les émissions de gaz azotés (NO_x, NH₃ et N₂O) ont été estimées respectivement avec les modèles EMEP/EEA tier 2 et IPCC. Ces modèles sont sensibles à la nature de l'apport azoté (organique ou minéral, taux d'azote ammoniacal).

L'IPCC fournit des facteurs d'émissions de particules fines, N₂O, CH₄ pour le brûlage plein champs des résidus ligneux issus de vergers. Faute de facteurs spécifiques à la vigne, ces facteurs d'émissions ont été utilisés pour modéliser le brûlage des sarments et des souches après arrachage en viticulture.

Enfin, l'étude intègre également une modélisation par le modèle AMG de l'évolution du stock de carbone dans le sol liée aux pratiques agricoles. Le modèle AMG, développée par INRAE, est un modèle de bilan humique faisant la différence entre les entrées de carbone du fait des résidus de culture, de la fertilisation organique ou de l'enherbement, et les sorties associées à la minéralisation annuelle. Cette minéralisation annuelle dépend de facteurs pédoclimatiques comme la température, les précipitations, le taux d'argile ou le pH du sol. Le modèle AMG est également très sensible au stock de carbone organique initial dans le sol. Dans les présentes modélisations, nous prendrons un sol moyen du Beaujolais argilo-calcaire avec un taux de matière organique initial de 2%. La variation de stock de carbone donnée sera une moyenne annuelle de la variation observée pour un maintien des pratiques pendant 20 ans.

Les quantités de carbone humifiable apportées par l'enherbement, les sarments, mais aussi les résidus de culture de la vigne comme les racines ou les rognages ont été paramétrées telles que détaillées dans le tableau 3.

Tableau 3. Paramétrage des entrées de carbone [7].

	Biomasse (tMS/ha)	Corg (%)	ISMO (%)	Chum (kgC/ha)
Enherbement (part. aérienne)	1,5	44	31,5	208
Enherbement (part. racinaire)	1	40	40	64
Racines de vigne	0,2	40	40	32
Sarments	1,2	44	41,4	219
Feuilles et rognages	1,4	44	31,5	194

1.3.3. Gestion des coproduits de la vinification

La question du traitement des marcs en distillerie pose question car il s'agit d'une étape qui produit à la fois des impacts et des coproduits valorisables par l'industrie. Pour cette étape, nous procéderons à l'extension de frontière du système et considérerons les impacts évités liés à la

substitution de produits industriels par les coproduits valorisés.

1.3.4. Fin de vie des emballages du vin

La modélisation de la fin de vie des emballages du vin suit la préconisation du PEF en utilisation la formule de fin de vie (Circular Footprint Formula – CFF) [8]. Cette formule prend en compte à la fois les impacts de la gestion des emballages en fin de vie mais aussi les bénéfices associés au recyclage. Ces impacts et bénéfices sont répartis entre les phases de fabrication des emballages (utilisation de matériaux recyclés) et de fin de vie (recyclage).

La méthode PEF fournit les valeurs par défaut suivantes à appliquer aux paramètres de la CFF en fonction du matériau (tableau 5)

$$(1-R_1) E_v + R_1 (A \times E_{rec} + (1-A) E_v \times Q_{Sin}/Q_p) \quad (1)$$

$$(1-A) R_2 \times (E_{rec} - E_v \times Q_{Sout}/Q_p) \quad (2)$$

$$R_3 \times (E_{ER} - LHV \times X_{ER, heat} \times E_{SE, heat} - LHV \times X_{ER, elec} \times E_{SE, elec}) \quad (3)$$

$$(1 - R_2 - R_3) \times E_D \quad (4)$$

Avec:

- (1) l'équation qui concerne l'étape de fabrication
- (2) l'équation qui concerne l'étape de recyclage
- (3) l'équation qui concerne l'étape d'incinération
- (4) l'équation qui concerne la mise en décharge
- E_{rec} , les impacts liés au recyclage du matériau
- E_v , les impacts liés à la fabrication du matériau à partir du matériau vierge
- E_{ER} , les impacts de l'incinération
- $E_{SE, heat}$, les impacts liés à la production de chaleur
- $E_{SE, elec}$, les impacts liés à la production d'électricité
- E_D , les impacts de la mise en décharge

Tableau 5. Valeurs par défaut des paramètres de la CFF pour les différents matériaux d'emballage (d'après le PEF) [9].

		Verre brun	Verre vert	Carton
A	facteur d'allocation entre utilisateur et producteur de matériau recyclé	0,2	0,2	0,2
Q_{Sin}/Q_p	Facteur de qualité de la matière recyclée par rapport au matériau vierge	1	1	0,85
Q_{Sout}/Q_p	Facteur de qualité de la matière recyclable par rapport au matériau vierge	1	1	0,85
R_1	Taux d'incorporation de matériau recyclé	0,5	0,8	0,88
R_2	Taux de recyclage	0,77	0,77	0,75
R_3	Taux d'incinération	0	0	0,16
LHV	Potentiel calorifique inférieur	-	-	16,75
$X_{ER, heat}$	Facteur d'efficacité de la récupération de chaleur	0,3		
$X_{ER, elec}$	Facteur d'efficacité de la génération d'électricité	0,1		

1.4. Méthode d'impact

La méthode choisie est la méthode Environnemental Footprint 3.1 (EF 3.1) proposée par le Joint Research Center (JRC) de la Commission Européenne [8].

Cette méthode intègre 16 indicateurs d'impact différents et propose une agrégation de ces indicateurs en un score unique basé sur une pondération des indicateurs d'impact en fonction de la robustesse du calcul de l'impact.

Une liberté prise par rapport à la méthode EF 3.1 dans les présents résultats consiste à l'intégration des bénéfices et des impacts liés à la variation de carbone dans les sols agricoles due aux pratiques en utilisant le modèle AMG développé par l'INRAE. Un facteur de caractérisation de - 3.67 kg CO₂ eq/kg C stocké dans le sol a été considéré, basé sur la conversion entre masse molaire du carbone et celle du CO₂.

2. Résultats

2.1. Inventaire de cycle de vie sur le périmètre considéré

Quelques données importantes de l'inventaire sont résumées dans les tableaux 6, 7, 8 et 9 ci-dessous. Le résultat détaillé de la modélisation des inventaires est disponible sur demande auprès des auteurs. Pour chaque étape du cycle de vie, les données d'inventaires sont renseignées dans l'unité la plus évidente pour la collecte.

Ainsi, en moyenne sur les 20,5 ha de l'exploitation, la consommation de carburant est de 194 L GNR/ha pour une production de vin en moyenne de 37 hL/ha. Ramenée au

litre de vin, cette consommation est donc de 0.052 L GNR/L de vin.

Le stockage de carbone moyen estimé par le modèle AMG est de 239 kg C/ha/an, soit un impact sur le changement climatique de -877 kg CO₂eq/ha/an. On peut l'expliquer par le retour au sol des sarments après la taille ainsi que par l'enherbement des inter-rangs.

Tableau 6. Données importantes de l'inventaire de la phase agricole.

Phase viticole	20,5 ha
Rendement viticole	37 hL/ha/an
Acier pour palissage	112 kg/ha/an
Bois pour palissage	11 kg/ha/an
Consommation de carburant du tracteur	194 L/ha/an
Engrais org. du commerce (N>3%)	194 kg/ha/an
N minéral	21 kg/ha/an
P ₂ O ₅ minéral	9 kg/ha/an
K ₂ O minéral	28 kg/ha/an
CaO minéral	113 kg/ha/an
Cu pour traitements phytosanitaires	1,42 kg/ha/an
Soufre pour traitements phytosanitaires	26 kg/ha/an
NO ₃ ⁻ vers l'eau	27 kg/ha/an
P vers l'eau	0,88 kg/ha/an
N ₂ O vers l'air	2,1 kg/ha/an
NO _x vers l'air	1,2 kg/ha/an
NH ₃ vers l'air	2,7 kg/ha/an
Augmentation du stock de Corg	239 kg/ha/an

Sur la partie vinification-élevage, la consommation d'électricité ramenée au L de vin est estimée à 1,37 kWh/ et la consommation d'eau à 7,57 L/L de vin. Les consommations d'intrants de vinification ont été calculées à partir des factures. Les fuites de fluide frigorigènes ont été estimées à partir de la charge réelle en fluide du matériel et à partir des taux de fuite moyens annuel et en fin de vie de 9,5% et de 22% issus de la méthodologie GEST'IM+ [10].

Tableau 7. Données importantes pour l'inventaire de la phase vinification-élevage.

Phase vinification-élevage	60 600 L
Consommation d'électricité	1,37 kWh/L
Consommation d'eau	7,57 L/L
Quantité de marcs traités en distillerie	200 g/L
Terre de diatomée	2,6 g/L
Phosphate diammonique	0,08 g/L
Levures sèches actives	0,2 g/L
SO ₂	15 mg/L
Bitartrate de potassium	0,8 g/L
Bicarbonate de potassium	0,4 g/L
Bentonite	0,08 g/L
Bactéries lactiques	17 mg/L
R407C, vers l'air	12 mg/L

La phase de conditionnement inclut la consommation de matières sèches. La majorité du vin sur le domaine est conditionné en bouteilles en verre (vert ou brun) de 75cL d'un poids de 410 g. Un volume très faible est conditionné en Bag-In-Box (BIB) 5L. Comparativement aux bouteilles en verres, les autres matières sèches représentent une masse relativement faible. Les hypothèses de poids unitaires des matières sèches sont les suivantes : 5g pour les bouchons en lièges, 1g pour les étiquettes et contre-étiquettes, 1g pour les capsules de surbouchage en complexe aluminium, 300g pour les cartons de regroupement de 6 bouteilles avec leur intercalaires, 150 g pour les cartons de BIB et 50 g pour les outres de BIB.

Tableau 8. Données importantes pour l'inventaire de la phase conditionnement.

Phase conditionnement	16 700 L
Bouteilles en verre brun	133 g/L
Bouteilles en verre vert	398 g/L
Capsules en complexe aluminium	1 g/L
Bouchons en liège aggloméré	6 g/L
Étiquettes en papier	3 g/L
Carton	65 g/L
Outres pour BIB	0,3 g/L
Cartons pour BIB	0,9 g/L

La consommation de bouteilles conditionnées produit également des impacts liés au transport réalisé principalement en camionnette, en camion ou en bateau. Les impacts dépendent alors de la distance de transport, de la masse transportée et du moyen de transport. Les masses transportées par pays sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 9. Données importantes pour l'inventaire de la phase commercialisation.

Phase commercialisation conditionné	23 000 L
Masse expédiée en France métropolitaine	48,434 t
Masse expédiée en Allemagne	2,559 t
Masse expédiée au Japon	2,209 t
Masse expédiée au Pays-Bas	2,047 t
Masse expédiée aux USA	1,871 t
Masse expédiée sur l'île de la Réunion	1,462 t

Pour les pays d'export, des hypothèses de distance par moyen de transport ont été appliquées. Pour les exports hors d'Europe, le bateau a été privilégié alors que les trajets européens sont réalisés en poids lourds.

2.2. Résultats d'impact

2.2.1. Résultats d'impacts au litre de vin

Les résultats des impacts ramenés au litre de vin pour chaque étape du cycle de vie (viticulture, vinification, conditionnement et transport) est présenté dans la figure ci-dessous. Le graphique figure 3 montre la part de chaque poste dans le total des impacts pour chaque indicateur. Il s'agit donc des impacts pour 1L de vin produit, vinifié, conditionné et expédié sur le domaine.

Certains indicateurs, comme l'empreinte carbone, ont de nombreux postes contributeurs et d'autres ont un poste contributeur principal qui représente plus de 50% de l'impact. C'est le cas par exemple de l'indicateur écotoxicité de l'eau douce qui est majoritairement représenté par l'étape de pulvérisation de produits phytosanitaires à la vigne.

Cette représentation permet d'identifier les postes du cycle de vie du vin les plus contributeurs aux impacts environnementaux (marqués d'une étoile sur le graphique). Parmi ces postes, on retrouve :

- la fabrication des bouteilles en verre sur le changement climatique
- l'émission de produits phytosanitaires à la vigne sur l'écotoxicité de l'eau douce
- le brûlage des souches après arrachage sur l'émission de particules fines
- le transfert de nitrates et phosphore à la vigne sur les indicateurs d'eutrophisation
- la consommation d'énergie électrique en cave sur l'émission de radiations ionisantes et la consommation de ressources énergétiques non renouvelables
- l'utilisation de sol agricole pour la viticulture sur l'indicateur d'occupation des sols
- la fabrication du matériel sur la consommation de ressources minérales et métalliques
- le prélèvement d'eau en cave sur la consommation d'eau

On remarque d'autres informations intéressantes comme l'impact relativement faible de l'étape de distribution sur le total pour l'ensemble des catégories d'impact. De même, la fabrication des matières sèches autres que la bouteille en verre pèse assez peu sur le total.

Si l'impact de la fabrication des bouteilles de l'empreinte carbone du vin est généralement bien connu et que des alternatives moins émettrices en carbone se développent [11, 12, 13], l'approche ACV multi indicateur permet de mettre en avant d'autres étapes clés au sein du cycle de vie du vin. Cette diversité de sources d'impact se traduit par une dispersion importante sur l'indicateur single score.

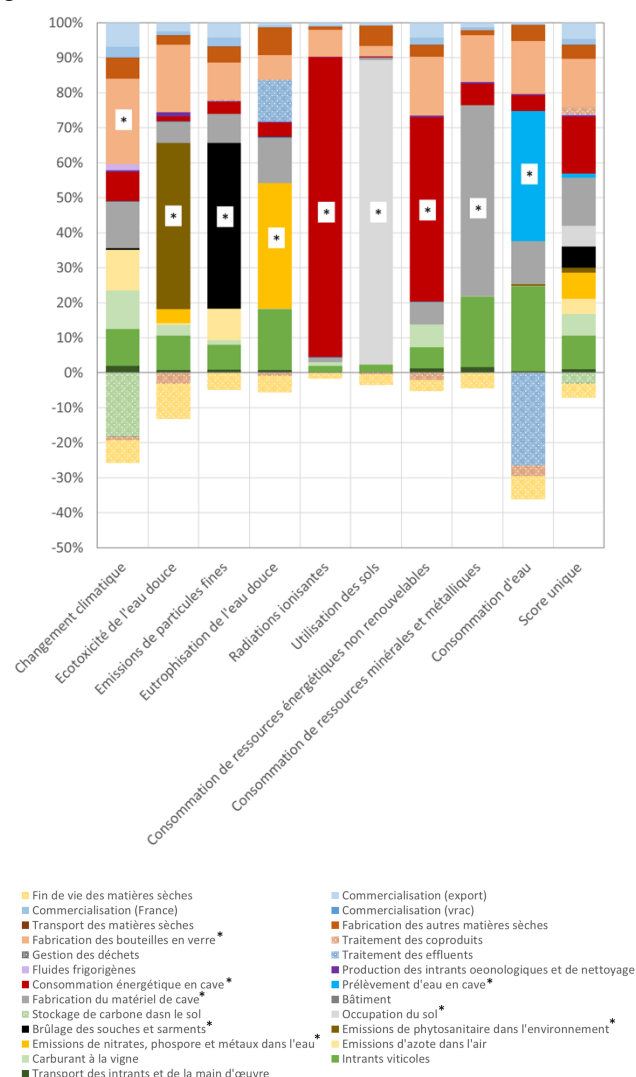


Figure 3. Impacts de la production, vinification, conditionnement et expédition de 1L de vin au Château de l'Eclair (méthode EF 3.1)

Les impacts quantifiés sur chaque indicateur de la production, de la vinification, du conditionnement et du transport de 1L de vin sont présentés dans le tableau 10 ci-après.

En particulier, l'empreinte carbone au litre de vin calculée est de 0,965 kg CO₂ eq/L en prenant en compte la capture de carbone dans le sol. **Sans la capture de carbone dans le sol, l'empreinte carbone est de 1,20 kg CO₂ eq/L.** Le détail de l'empreinte carbone par grande

étape du cycle de vie est présenté dans la figure 4 et le tableau 11 ci-après.

Tableau 10. Impacts environnementaux de la production, vinification, conditionnement et expédition de 1L de vin au Château de l'Eclair (méthode EF 3.1).

Indicateur d'impact	Impact	Unité
Acidification	8,85E-03	mol H ⁺ eq
Changement climatique	9,65E-01	kg CO ₂ eq
Ecotoxicité de l'eau douce	1,57E+01	CTUe
Emissions de particules fines	1,65E-07	disease inc.
Eutrophisation marine	4,55E-03	kg N eq
Eutrophisation de l'eau douce	6,22E-04	kg P eq
Eutrophisation terrestre	3,25E-02	mol N eq
Toxicité humaine, cancérigène	5,17E-09	CTUh
Toxicité humaine, non cancérigène	7,60E-08	CTUh
Radiations ionisantes	8,31E-01	kBq U-235 eq
Utilisation des sols	1,50E+02	Pt
Destruction de la couche d'ozone	1,12E-07	kg CFC11 eq
Pollution à l'ozone photochimique	1,22E-02	kg NMVOC eq
Consommation de ressources énergétiques non renouvelables	2,85E+01	MJ
Consommation de ressources minérales et métalliques	1,70E-05	kg Sb eq
Consommation d'eau	5,23E-01	m3 depriv.
Score unique	2,08E-04	Pt

Tableau 11. Empreinte carbone de la production, vinification, conditionnement et expédition de 1L de vin au Château de l'Eclair (méthode EF 3.1).

Etape du cycle de vie	Empreinte carbone (kg CO ₂ eq/L)
Viticulture (émissions)	0,462
Vinification	0,197
Conditionnement	0,496
Commercialisation	0,130
Fin de vie des emballages	-0,084
Total hors carbone du sol	1,201
Carbone du sol	-0,236
Total avec carbone du sol	0,965

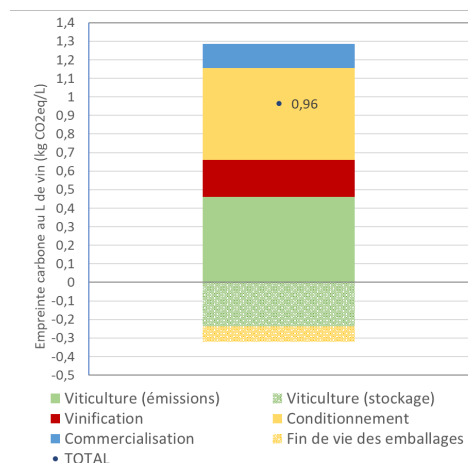


Figure 4. Empreinte carbone de la production, vinification, conditionnement et expédition de 1L de vin au Château de l'Eclair (méthode EF 3.1).

2.2.2. Comparaison des différents modes de conduite de la vigne

L'approche ACV permet également de comparer des modes de production entre eux. Par exemple, sur le périmètre viticole de l'exploitation, il est alors possible de comparer la production en AB avec la production conventionnelle.

La figure 5 présente les résultats de la comparaison de l'empreinte carbone à l'hectare entre l'agriculture biologique et conventionnelle. On remarque un niveau d'émission à peu près égal entre 1600 et 1800 kg CO₂eq/ha/an. Les différences d'émissions se font sur :

- la fabrication des engrais, légèrement plus impactante en agriculture biologique du fait du processus de compostage générateur de N₂O et CH₄ lors de la fabrication des engrais commerciaux
- la consommation de carburant (il s'agit d'une consommation modélisée à partir de la consommation totale annuelle du domaine et du nombre et du type de passages réalisés sur chaque parcelle), légèrement plus faible en agriculture biologique

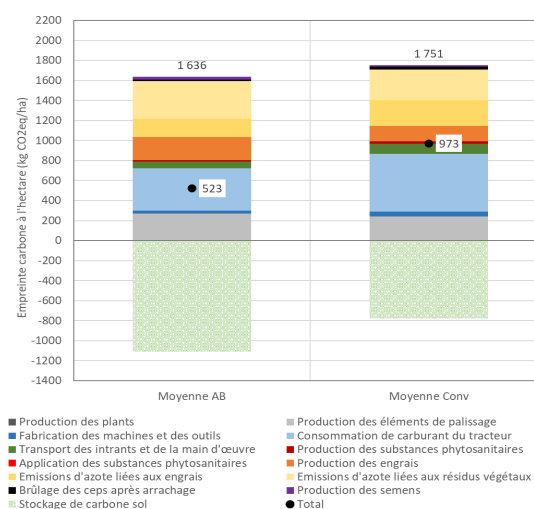


Figure 5. Empreinte carbone de la production, vinification, conditionnement et expédition de 1L de vin au Château de l'Eclair (méthode EF 3.1)

La principale différence sur le domaine porte sur le stockage de carbone. Tout d'abord, les parcelles en AB sur le domaine présentent un niveau d'enherbement supérieur aux parcelles conventionnelles. De plus, l'utilisation d'engrais organique permet une capture supplémentaire de carbone dans le sol. Il en résulte un stockage de carbone plus important sur les parcelles en AB.

On observe en revanche une différence importante sur l'indicateur d'écotoxicité de l'eau douce (figure 6). Du fait de la nature des substances utilisées, l'impact du poste d'utilisation des substances phytosanitaires est considérablement réduit. On observe également une réduction des impacts sur le poste de fabrication des engrais. Ainsi, le passage en AB permet de diviser par 6 les impacts pour 1 ha de vignes.

L'analyse de ces deux indicateurs est intéressante car elle permet de montrer que le passage en AB permet de réduire de façon très importante les impacts sur l'écotoxicité de l'eau douce sans toutefois impacter l'empreinte carbone. Néanmoins, il existe une incertitude sur les consommations de carburant. Une étude plus précise incluant des mesures réelles permettrait de vérifier cette information. **Aussi, les résultats sont spécifiques à l'exploitation étudiée et ne sauraient être nécessairement généralisables.**

Enfin, ces résultats sont présentés à l'hectare. En cas de comparaison au L de vin et d'écart de rendement important entre la modalité AB et la modalité conventionnelle, on pourrait observer une augmentation de l'empreinte carbone lors d'un passage en AB.

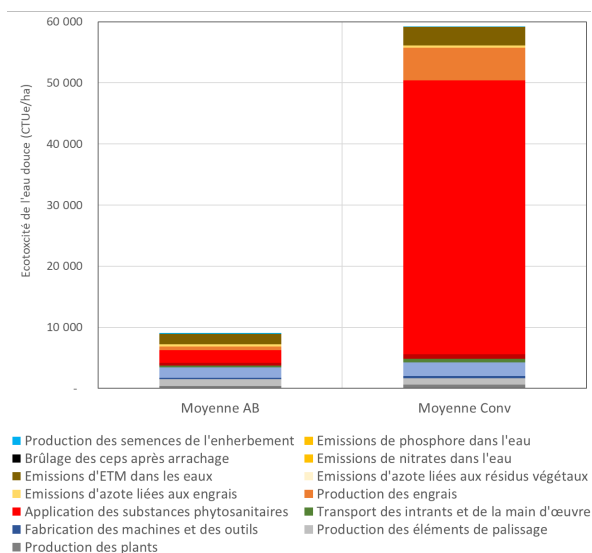


Figure 6. Empreinte carbone de la production, vinification, conditionnement et expédition de 1L de vin au Château de l'Eclair (méthode EF 3.1).

3. Discussion

3.1. Comparaison dans la bibliographie

Les résultats obtenus précédemment peuvent être comparés aux références existantes dans la bibliographie. Les résultats d'ACV complètes multi-indicateurs sont

rares et sont très dépendant de la méthode d'impact utilisée, rendant la comparaison difficile. Il est toutefois possible de comparer les résultats sur l'indicateur d'empreinte carbone, le plus étudié et le plus homogène dans le temps et entre les méthodes d'impacts.

Une revue bibliographique de 2022 [11] fait l'état de l'art des résultats d'empreinte carbone de la filière vin. L'auteur fait état de la diversité des périmètres et des méthodologies prises en compte rendant la comparaison difficile. Sur les études au périmètre égal à la présente étude (viticulture, vinification, conditionnement et distribution), l'empreinte carbone du vin varie entre 0,8 kg CO₂eq/L et 4,7 kg CO₂eq/L. La valeur de 1,2 kg CO₂eq est donc dans la fourchette des résultats existants. Il est toutefois à noter qu'aucune des études incluses dans la revue bibliographie ne concerne un contexte français.

Sur un périmètre strictement français, on peut ainsi comparer la valeur de 1,20 kg CO₂eq/L aux quelques références existantes portant sur l'ensemble du cycle de vie. On peut tout d'abord s'appuyer sur la base de données Agribalyse gérée par l'ADEME, qui fournit des références de résultats d'impacts environnementaux pour de nombreux produits agricoles et alimentaires français, dont le vin. La valeur pour le vin rouge, produite par l'ADEME et l'IFV en 2015 est alors de 1,18 kg CO₂eq/L de vin [14]. Une autre étude menée également par l'IFV en 2015 portant sur les vignobles Beaujolais et Bourgogne obtenait une valeur d'empreinte carbone au L de vin de 1,44 kg CO₂eq/L de vin [15] (figure 7).

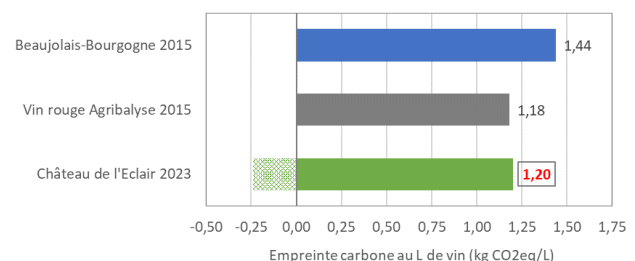


Figure 7. Comparaison de l'empreinte carbone du Château de l'Eclair avec d'autres résultats français à périmètre égal.

La valeur de 1,20 kg CO₂eq/L de vin issue de la présente étude est donc dans l'ordre de grandeur des résultats de précédentes études menées en France par l'IFV. Ces derniers résultats sont toutefois les seuls à intégrer une quantification de la variation du stock de carbone dans le sol.

On peut expliquer le positionnement du Château de l'Eclair dans la fourchette basse des résultats d'empreinte carbone de la bibliographie par plusieurs raisons :

- Le contexte français implique l'utilisation d'électricité très peu carbonée en cave, ce qui n'est pas forcément le cas d'autres pays producteurs de vin européens
- L'utilisation de bouteilles légères (410g) en verre coloré limite l'impact de la fabrication des bouteilles, poste principal d'impact du cycle de vie du vin

- La faible part d'exportation limite les impacts du transport

3.2. Leviers de réduction

L'ACV met en évidence l'importance d'axer l'écoconception sur une diversité de postes du cycle de vie. Il est alors possible de lister les actions à mettre en place pour réduire les impacts sur l'ensemble des postes et indicateurs identifiés. Certains de ces leviers sont listés dans le tableau 12 ci-dessous.

Parmi ces leviers, on retrouve le travail sur le mode de conditionnement. On peut en effet réduire son impact sur une diversité d'indicateurs, notamment l'empreinte carbone, en travaillant prioritairement sur la bouteille en verre. Parmi les solutions d'écoconception, on peut citer, **la réduction de la masse de la bouteille en verre, l'augmentation du taux de calcin dans la bouteille** (notamment par changement de teinte), mais aussi **le passage à des modes de conditionnement à plus faible impact** comme le BIB, la canette en aluminium [13], ou par **la mise en place de la consigne** [12, 13, 16].

Ce travail sur le mode de conditionnement permet de réduire les impacts à la fois de la fabrication et de la fin de vie des emballages mais aussi les impacts du transport, principalement sur le changement climatique. Les impacts du transport seront alors minimisés dans le cas d'une expédition en vrac et embouteillage sur le territoire ou le site de consommation.

A la vigne, les principaux postes d'impacts concernent les transferts dans l'environnement de polluants agricoles. **La mise en place de couverts végétaux durant la période hivernale permettant de capter les nitrates** et de réduire l'érosion des sols constitue un levier intéressant. De même, **la mise en place de bandes enherbées ou de haies tampons réduit les transferts de phosphore par ruissellement érosif de 40% à 99% [17]. Les bandes enherbées et haies tampon permettent également de réduire les transferts par ruissellement diffus de produits phytosanitaires de 50% à 90% dans les fossés ou les cours d'eau à proximité [17].**

Le choix du matériel de pulvérisation ainsi que son réglage approprié constituent un levier important pour réduire la dérive de produits phytosanitaires dans l'environnement. Ainsi, le passage d'une pulvérisation par route pneumatique à une pulvérisation face par face permet généralement de réduire la dérive de 66% [18].

Toujours sur le volet phytosanitaire, **le passage en AB permet de réduire significativement l'écotoxicité** en substituant les substances utilisées (figure 6).

Enfin, **l'implantation de variétés résistantes** permet théoriquement de réduire à deux le nombre de traitements fongicides, impliquant une réduction significative de la quantité de substances phytosanitaires appliquée sur la parcelle.

Les consommations d'énergie et d'eau au chai sont généralement plus difficiles à tracer. Une première étape en vue de la réduction consisterait à diagnostiquer

précisément les postes consommateurs. Pour la consommation d'énergie on retrouvera généralement par exemple la régulation thermique comme principale contributrice [19]. On pourra alors envisager des **travaux d'isolation**. Pour la consommation d'eau, le lavage des cuves et du matériel arrive généralement en tête des consommations.

La limitation de la consommation de carburant à la vigne peut passer par plusieurs leviers : **écoconduite, limitation du nombre de passages au strict minimum, adaptation de la nature des outils et de la profondeur de travail du sol, augmentation de la vitesse de travail, couplage d'outils, optimisation des manœuvres en bouts de rang avec introduction du travail en bandes**, etc. Des mesures de l'IFV ont permis de chiffrer une réduction de 20% à 30% de la consommation de carburant lors de la mise en place de ces pratiques [20]. La consommation de carburant peut également être réduite considérablement en passant à l'énergie électrique (tracteur électrique, robot autonome), mais l'impact de ces pratiques sur les autres indicateurs d'impact est mal connu donc il est difficile de les mentionner comme leviers d'écoconception.

Tableau 12. Leviers de réduction de l'impact de la production de vin.

Poste	Levier	Réduction attendue
Fabrication des matières sèches	Choix du mode de conditionnement : BIB/PET/Brique cartonnée > Canette > Bouteille en verre légère > Bouteille en verre lourde	<u>Changement climatique :</u> Bouteille en verre vert de 450g vers BIB → -550 g CO ₂ eq/L
	Réduction du poids de la bouteille	<u>Changement climatique :</u> Allègement de 100g de la bouteille → -134 à -148 g CO ₂ eq/L
	Réemploi	<u>Changement climatique :</u> Bouteille de 400g à usage unique vers bouteille de 450g réemployée → -280 g CO ₂ eq/L (estimation d'après [16])
Expédition du vin	Expédition en vrac	<u>Changement climatique :</u> -5g CO ₂ eq/L pour une expédition en camion sur 100km par rapport à une expédition en bouteille de 600g
	Choix du mode de transport : Bateau > Train > Camion	<u>Changement climatique :</u> Bateau (transocéanique) : 11gCO ₂ eq/tkm Train : 48gCO ₂ eq/tkm Camion : 133gCO ₂ eq/tkm
Emissions de nitrates et de phosphore dans les eaux	Bandes enherbées et haies tampon limitent les pertes par ruissellement et érosion, ainsi que le transfert dans les eaux de surface.	<u>Eutrophisation des eaux :</u> Réduction du transfert des phosphore par ruissellement érosif de 40% à 99% [17] Réduction du transfert par écoulement de subsurface de 20% à 100% [17]
Emissions de phytosanitaires dans les eaux	Bandes enherbées et haies tampon limitent les transferts dans les eaux de surface	<u>Ecotoxicité de l'eau douce :</u> Réduction du transfert par ruissellement de 50% à 90% [17]
	Régulation du matériel de pulvérisation et choix de matériel avec faible dérive.	<u>Ecotoxicité de l'eau douce :</u> Passage d'une voute pneumatique vers de la pulvérisation face par face avec buses réductrices de dérive → -66% de dérive [18]
	Intégration de variétés résistantes aux mildiou et oïdium dans l'encépagement	<u>Ecotoxicité de l'eau douce :</u> Réduction du nombre de traitements à 2 maximum pour assurer une protection minimale (au black rot notamment)
Fabrication du matériel	Optimisation de la durée de vie du matériel	Variable A estimer
	Mutualisation	
Consommation d'eau au chai	Suivi précis des consommations	
Consommation d'énergie au chai	Isolation des cuves et bâtiments	-20 à 30% sur la consommation totale de carburant [20]
Consommation de carburant à la vigne	Eco conduite, couplage d'outils, augmentation de la vitesse, optimisation des manœuvres de bout de rang, etc.	

3.3. Limites de l'approche

Ce travail présente un certain nombre de limites méthodologiques, tant sur les données collectées que sur les modèles d'émissions et la méthode d'impact utilisée.

Tout d'abord, pour les intrants dont les consommations ont été collectées sur la durée totale de la campagne (carburant du tracteur, intrants œnologiques, eau, électricité), il n'est pas possible de connaître précisément la répartition des consommations par parcelle/mode de

conduite/cuvée. Par conséquent les leviers d'écoconception sont limités et généralistes, ils ne s'axent pas sur une pratique particulière.

De plus, pour l'électricité consommées pour la vinification, il est difficile de distinguer la partie domaine de la partie expérimentation qui utilise deux chambres froides. Par conséquent, la consommation électrique est surestimée.

La fabrication du matériel de cave a été intégrée à l'étude alors qu'elle n'est généralement pas prise en compte en

raison de la difficulté d'estimer la masse de matériaux et la durée d'amortissement. Avec les hypothèses de masse considérées, et une durée d'amortissement de 20 ans, cette étape ressort comme n'étant pas négligeable. Néanmoins, ces hypothèses sont discutables. Une collecte de données plus précise associée à une étude de sensibilité sur la durée de vie du matériel pourrait être menée pour vérifier le poids de ce poste du cycle de vie dans le total des impacts de la production du vin. Aussi, en raison d'un manque d'information, la fin de vie du matériel n'a pas été considérée dans l'étude.

Concernant l'étape de distribution uniquement le transport jusqu'au client identifié a été pris en compte. Les transport ayant lieu après réception par le client du domaine (ex : jusqu'à un second site de distribution) n'ont pas été pris en compte. De plus, le déplacement du consommateur jusqu'au lien d'achat n'a pas non plus été intégré du fait de la difficulté d'allouer la part du déplacement consacré à l'achat du vin. Pourtant, il est nécessaire de rappeler que ce déplacement peut peser significativement dans le bilan, notamment sur l'indicateur changement climatique. En effet, on rappelle que l'empreinte carbone d'un déplacement en voiture personnelle varie entre 0,150 et 0,300 kg CO₂eq/km. Cette valeur est à mettre en regard avec l'empreinte carbone du vin qui varie entre 1 et 3 kg CO₂eq/L.

Concernant le modèle AMG utilisé pour modéliser la variation du stock de carbone dans les sols viticoles, il est nécessaire de préciser plusieurs points. Tout d'abord, l'attribution du même sol avec le même stock de carbone initial pour l'ensemble des parcelles de l'exploitation rend la collecte de données et les calculs plus aisés mais est source d'une incertitude importante. En effet, ce modèle est très sensible au stock de carbone initial. Pour des mêmes pratiques sur des sols différents, il est possible d'observer des dynamiques très différentes. Toutefois, la valeur de 2% de matière organique initiale sélectionnée pour l'étude est relativement élevée, dans la moyenne haute des sols viticoles français. Cela permet ainsi d'éviter de surestimer le stockage de carbone.

Il convient également de rester prudent sur la méthode de comptabilisation du stockage de carbone dans le sol appliquée dans cette étude. L'utilisation d'un facteur de caractérisation de -3.67 kg CO₂eq/kg C n'est pas consensuelle en raison du caractère non pérenne du stockage de carbone dans le sol. En effet, en cas d'arrêt de pratiques stockantes, le stock de carbone du sol retourne à l'équilibre. C'est pourquoi, les deux valeurs avec et sans prises en compte du stockage, sont présentées dans ce travail. C'est également pour cela que ne sont citées, parmi les leviers d'écoconception (3.2), que des leviers de réduction des émissions et non des leviers associé au stockage de carbone.

Enfin, toujours concernant la prise en compte du stock de carbone du sol, il est à noter que les pertes de carbone par érosion du sol n'ont pas été modélisées. Elles pourraient l'être avec le modèle RUSLE2 par exemple.

La méthode d'impact utilisée (EF 3.1) montre une nette amélioration de l'écotoxicité de l'eau douce lors d'un

passage en AB (figure 6). Toutefois, il convient de rappeler que cet indicateur mesure l'écotoxicité associée aux transferts de produits phytosanitaires dans l'eau douce. Il ne mesure pas l'impact sur la biodiversité du sol. Par conséquent, dans le cas d'une substance rémanente et très peu mobile dans l'eau comme le cuivre, une grande partie des impacts sont ignorés. L'utilisation d'une autre méthode d'impact intégrant un indicateur d'écotoxicité terrestre comme LC-IMPACT [21].

Enfin, si ce travail de diagnostic d'une entreprise nous permet de tirer des généralités sur l'impact de la filière, notamment dans l'identification des postes les plus impactants sur chacun des indicateurs. Il s'agit toutefois d'être vigilant car certaines pratiques comme la lutte antigel ou l'irrigation ne sont pas pratiquées sur le domaine étudié. Les résultats seraient alors différents.

Enfin, il est à noter que l'ACV ne couvre pas toutes les dimensions du bilan environnemental. La question de la biodiversité au champs n'est par exemple traitée directement mais seulement au travers des indicateurs de pollution (eutrophisation, acidification, écotoxicité, etc.) et d'occupation des sols. Par ailleurs, la question de la santé du consommateur en lien avec les résidus de phytosanitaires par exemple n'est pas encore traitée de façon opérationnelle en ACV. C'est pourquoi la réalisation d'une ACV ne remplace pas les autres types d'études environnementales ni les mesures agronomiques.

4. Conclusion

En permettant de mettre en évidence de façon quantitative les postes du cycle de vie du vin les plus impactants, l'ACV permet de guider les choix d'écoconception à l'échelle d'une entreprise viti-vinicole mais aussi à l'échelle de l'ensemble de la filière.

L'ACV permet de mettre en évidence le poids important bien connu de la fabrication des bouteilles en verre dans le bilan environnemental. Mais elle permet également, par son approche multi-critère, de mettre en évidence d'autres étapes du cycle de vie en lien avec d'autres indicateurs. Ressortent par exemple l'importance de la gestion des fuites de nitrates et de phosphore, la question de la dérive phytosanitaire, les consommations d'eau et d'énergie au chai ou la gestion des souches après arrachage. De ce fait, le décideur peut choisir d'axer l'écoconception vers les actions ou les indicateurs qui lui semblent prioritaires et quantifier le gain ou le coût environnemental associés à ses choix techniques.

Les leviers les plus pertinents sont généralement les leviers de réduction des consommations car ils n'engendrent pas de déplacement de pollution contrairement aux leviers de substitution. En revanche, ils peuvent induire une réduction du volume de production ou de la rentabilité. Il s'agit alors d'arbitrer et moduler les choix techniques pour concilier qualité du produit, rentabilité économique et réduction de l'impact environnemental.

5. Références

1. 1. P. Koch, T. Salou, AGRIBALYSE Rapport méthodologique, volet agriculture - Version 3.1 (2022).
2. 2. V. Prahsun, Erfassung der PO4-Austräge für die Ökobilanzierung (2006).
3. 3. R. Freiermuth, Modell zur Berechnung der Schwermetallflüsse in der Landwirtschaftlichen Ökobilanz (2006).
4. 4. T. Nemecek, A. Antón, C. Basset-Mens, C. Gentil-Sergent, C. Renaud-Gentié, C. Melero, P. Naviaux, N. Peña, P. Roux, P. Fantke, *Int J Life Cycle Assess* 27, 527 (2022).
5. 5. CITEPA, Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France: OMINEA - 19e édition (2022).
6. 6. A. Andriulo, B. Mary, J. Guerif, Model description and environmental functions and parameters used in AMGv2 (2019).
7. 7. J.-Y. Cahurel, A. Deligey, J.-C. Mouny, A. Duparque, *Projet OAD MO - Compte rendu technique du projet: 2- La modélisation et ses développements* (2020).
8. 8. R. Pant, L. Zampori, European Commission, Joint Research Centre, Suggestions for updating the product environmental footprint (PEF) method (2019).
9. 9. European Commission, Product environmental footprint category rules (PEFCR) for still and sparkling wine (2020).
10. 10. ARVALIS, GESTIM+: la référence méthodologique pour l'évaluation de l'impact des activités agricoles sur l'effet de serre, la préservation des ressources énergétiques et la qualité de l'air (2020).
11. 11. L. Pinto Da Silva, J. Esteves Da Silva, *Cleaner and Circular Bioeconomy* 2, 100021, (2022).
12. 12. J. Cleary, *J. Clean. Prod.* 44, 143 (2013).
13. 13. C. Ferrara, G. de Feo, *J. Clean. Prod.* 259, 120888 (2020).
14. 14. ADEME, données AGRIBALYSE v3.1.1, (2023).
15. 15. A. Besnier, S. Penavayre, *Méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie environnementale de filières de transformation agro-alimentaire ; application aux filières vin AOP de Beaujolais et Bourgogne et IGP foie gras du Sud-Ouest* (2016).
16. 16. J. Lhotellier, R. Jeuniaux, M. Le Bihan, B. de Caevel, RDC Environnement, E. Jemet, ADEME, *Evaluation environnementale de la consigne pour réemploi d'emballages en verre – Volet A* (2023).
17. 17. C. Catalogne, G. Le Hénaff, *Guide d'aide à l'implantation des zones tampons pour l'atténuation des transferts de contaminants d'origine agricole* (2016).
18. 18. Ministère de l'Agriculture et de la souveraineté alimentaire, *Inscription au Bulletin officiel du ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire des moyens permettant de diminuer la dérive de pulvérisation des produits phytopharmaceutiques*, (2023).
19. 19. J. Fuentes-Pila, J.L. Garcia, *Manuel d'efficacité énergétique de la filière vinicole* (2014).
20. 20. SudVinBio, IFV, *L'entretien du sol: Réduire les coûts de production et la consommation en énergies fossiles* (2019).
21. 21. F. Verones, S. Hellweg, A. Anton et al., *J. Ind. Ecol.* 24, (2020)