



Analyse du Cycle de Vie des pratiques de désherbage intra-rang et inter-rang avec des systèmes robotisés autonomes dans trois vignobles français

Marilys Pradel, Mikaël de Fays, Cédric Seguneau

► To cite this version:

Marilys Pradel, Mikaël de Fays, Cédric Seguneau. Analyse du Cycle de Vie des pratiques de désherbage intra-rang et inter-rang avec des systèmes robotisés autonomes dans trois vignobles français. [Rapport de recherche] TSCF; INRAE. 2022, pp.1-90. hal-03583404v2

HAL Id: hal-03583404

<https://hal.inrae.fr/hal-03583404v2>

Submitted on 7 Mar 2022 (v2), last revised 14 Apr 2022 (v3)

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.



**I-SITE
CLERMONT**
Clermont Auvergne Project

Analyse du Cycle de Vie des pratiques de désherbage intra-rang et inter-rang avec des systèmes robotisés autonomes dans trois vignobles français

Marilys PRADEL, Mikaël de FAYS – INRAE – UR TSCF

Cédric SEGUINEAU – NAÏO Technologies

Action ROAD – Challenge 2 CAP2025 – Thème AgroTechnologies

Février 2022



Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement l'ensemble des personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette étude, que ce soit pour la conception des scénarios de désherbage mécanique, la fourniture de données d'ICV ou pour avoir apporté un regard critique sur les résultats obtenus :

- Philippe Heritier, INRAE – UR TSCF
- Benoit Chaillan, NAïO Technologies
- Laurent Duquesne, Chambre d'Agriculture de Charentes
- Nicolas Sourd, Chambre d'Agriculture de l'Aude
- Anne Sandre, Chambre d'Agriculture du Gard
- Cyril Cassarini, Chambre d'Agriculture du Gard
- Mélissa Merdyn, Chambre d'Agriculture d'Indre et Loire
- Romain Malidain, Domaine viticole Malidain
- Margaux Sahuc, Domaine viticole Mas Belles Eaux
- Baptiste Guicheteau, Maison Hennessy
- Christel Renaud-Gentié, ESA Angers

Les auteurs remercient le soutien financier reçu pour cette étude de l'Agence Nationale de la Recherche à travers le programme « Investissements d'Avenir » (16-IDEX-0001 CAP2025).

Sommaire

Remerciements.....	3
Sommaire.....	4
Table des figures et des tableaux	7
Sigles et abréviations	9
1. Introduction.....	11
1.1. Contexte de l'étude.....	11
1.2. Méthodologie utilisée	12
1.2.1. Définition de l'objectif et du champ de l'étude	13
1.2.2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie	13
1.2.3. Evaluation des impacts environnementaux.....	13
1.2.4. Interprétation des résultats	14
2. Définition des objectifs et du champ de l'étude.....	15
2.1. Objectifs de l'étude	15
2.2. Application et public visé	15
2.3. Revue Critique.....	15
2.4. Fonction du système et unité fonctionnelle	15
2.4.1. Fonction du système.....	15
2.4.2. Unité fonctionnelle	16
2.5. Champ de l'étude.....	17
2.5.1. Systèmes étudiés	17
2.5.2. Scénarios étudiés	18
2.5.3. Modélisation des scénarios	21
2.5.4. Frontières du système étudié	24
2.6. Hypothèses et limites de l'étude.....	25
2.6.1. Pratiques de désherbage évaluées	25
2.6.2. Solutions robotisées de désherbage mécanique	26
2.6.3. Modélisation des herbicides.....	26
2.7. Impacts pris en considération dans l'analyse des résultats	27
2.7.1. Choix de la méthode de caractérisation	27
2.7.2. Impacts non modélisés	27
3. Inventaire des données	31
3.1. Hypothèses relatives à la collecte des données d'inventaires	31
3.2. Données relatives à l'usage des herbicides.....	31
3.2.1. Scénarios mobilisant des herbicides.....	31
3.2.2. Quantité de matière active d'herbicide appliquée	32
3.2.3. Volume d'eau utilisé pour la bouillie	32

3.2.4.	Emissions des herbicides dans l'environnement	33
3.2.5.	Synthèse des données par scénarios	34
3.3.	Données relatives aux opérations de désherbage (hors herbicides)	35
3.3.1.	Données relatives aux machines agricoles (tracteur et robot)	35
3.3.2.	Données relatives aux outils de désherbage intra-rang et inter-rang	37
3.3.3.	Données relatives à la consommation d'énergie	39
3.3.4.	Émissions de substances dans l'air par la combustion de GNR	42
3.3.5.	Émissions de métaux lourds par abrasion des pneus	44
3.3.6.	Synthèse des données relatives aux opérations techniques par scénario	45
3.4.	Données relatives au transport	46
3.5.	Logiciel ACV utilisé pour la modélisation	46
4.	Evaluation des impacts environnementaux des scénarios	47
4.1.	Analyse des impacts environnementaux des scénarios Charentes	48
4.1.1.	Généralités	48
4.1.2.	Analyse des impacts avec la méthode CML	48
4.1.3.	Analyse des impacts avec la méthode ReCiPe	51
4.2.	Languedoc-Roussillon	54
4.2.1.	Généralités	54
4.2.2.	Analyse des impacts avec la méthode CML	56
4.2.3.	Analyse des impacts avec la méthode ReCiPe	57
4.3.	Val de Loire	59
4.3.1.	Généralités	59
4.3.1.	Analyse des impacts avec la méthode CML	61
4.3.2.	Analyse des impacts avec la méthode ReCiPe	62
5.	Éléments de discussion et recommandations	64
5.1.	Analyse des grandes tendances observées par bassin viticole	64
5.2.	Influence de l'impact d'un passage d'opération de désherbage sur les résultats obtenus	65
5.2.1.	Généralités	66
5.2.2.	Impacts sur le changement climatique	66
5.2.3.	Impacts sur l'épuisement des ressources minérales	68
5.3.	Discussion au regard des résultats obtenus de l'impact de la robotique sur les pratiques de désherbage des vignobles	70
5.3.1.	Distance de transport des robots	70
5.3.2.	Ecoconception des robots (usage de Cu recyclé)	72
5.3.3.	Modélisation des robots et des tracteurs dans les scénarios étudiés	73
5.3.4.	Durée de vie de la solution robotique étudiée	76
5.4.	Recommandations à destination des utilisateurs de robots agricoles	81
5.4.1.	Durée de vie des machines robotisées	81

5.4.2.	Versatilité des opérations culturales	82
5.4.3.	Allongement de la disponibilité des machines	82
6.	Conclusion générale	83
7.	Bibliographie.....	85
8.	Annexes	89
8.1.	Annexe 1 : Valeurs des paramètres utilisés dans OLCA-Pest	89
8.1.	Annexe 2 : Sensibilité des impact écotoxicité des milieux aquatiques et toxicité humaine au regard des méthodes de caractérisation utilisées	90

Table des figures et des tableaux

Table des Figures

Figure 1 : Enherbement tous les inter-rangs (Source : www.lesechos.fr)	16
Figure 2 : Enherbement un inter-rang sur deux (Source : www.secretsdevignesetdechais.fr)	16
Figure 3 : Aucun inter-rang enherbé (Source : www.secretsdevignesetdechais.fr)	16
Figure 4 : Système conventionnel.....	17
Figure 5 : Système robotisé - TED.....	18
Figure 6 : Robot TED en action dans un vignoble (source : www.naio-technologies.com)	18
Figure 7 : Périmètre d'étude.....	24
Figure 8 : Résultats globaux obtenus pour les scénarios Charentes avec la méthode CML	49
Figure 9 : Analyse de contribution des opérations des scénarios Charentes avec la méthode CML	49
Figure 10 : Résultats globaux obtenus pour les scénarios Charentes avec la méthode ReCiPe	52
Figure 11 : Analyse de contribution des opérations des scénarios Charentes avec la méthode ReCiPe	52
Figure 12 : Résultats globaux obtenus pour les scénarios Languedoc Roussillon avec la méthode CML.....	55
Figure 13 : Analyse de contribution des opérations des scénarios Languedoc Roussillon avec la méthode CML.....	55
Figure 14 : Résultats globaux obtenus pour les scénarios Languedoc Roussillon avec la méthode ReCiPe.....	58
Figure 15 : Analyse de contribution des opérations des scénarios Languedoc Roussillon avec la méthode ReCiPe	58
Figure 16 : Résultats globaux obtenus pour les scénarios Val de Loire avec la méthode CML	60
Figure 17 : Analyse de contribution des opérations des scénarios Val de Loire avec la méthode CML	60
Figure 18 : Résultats globaux obtenus pour les scénarios Val de Loire avec la méthode ReCiPe	63
Figure 19 : Analyse de contribution des opérations des scénarios Val de Loire avec la méthode ReCiPe	63
Figure 20 : Impact sur le changement climatique des opérations de désherbage utilisant des robots	67
Figure 21 : Impact sur le changement climatique des opérations de désherbage conventionnelles	67
Figure 22 : Comparaison des opérations de désherbage mécanique de l'intra rang selon les scénarios (conventionnel et robot) et les outils de désherbage utilisés	68
Figure 23 : Impact sur l'épuisement des ressources minérales des opérations de désherbage utilisant des robots	69
Figure 24 : Impact sur l'épuisement des ressources minérales des opérations de désherbage conventionnelles	69
Figure 25 : Comparaison des opérations de désherbage mécanique de l'intra rang selon les scénarios (conventionnel et robot) et les outils de désherbage utilisés	70
Figure 26 : Analyse de la sensibilité de la distance sur le GWP pour une opération de désherbage de l'intra-rang avec des interceps utilisant une solution robotisée ou conventionnelle	72
Figure 27 : Comparaison des ICV pour la production d'un robot, d'un tracteur de la BDD ecoinvent et d'un tracteur actualisée pour 1 kg et une durée de vie de 7 200 heures.....	76
Figure 28. Analyse de sensibilité de la durée de vie des robots sur les impacts de la méthode CML pour le désherbage intra-rang avec une bineuse Kress en Charentes.....	78
Figure 29. Analyse de sensibilité de la durée de vie des robots sur les impacts de la méthode Recipe pour le désherbage intra-rang avec une bineuse Kress en Charentes.....	78
Figure 30. Analyse de sensibilité de la durée de vie des robots sur les impacts de la méthode CML pour le désherbage intra-rang avec des disques en Languedoc-Roussillon	79
Figure 31. Analyse de sensibilité de la durée de vie des robots sur les impacts de la méthode ReCiPe pour le désherbage intra-rang avec des disques en Languedoc-Roussillon	79
Figure 32. Analyse de sensibilité de la durée de vie des robots sur les impacts de la méthode CML pour le désherbage intra-rang avec des interceps en Val de Loire.....	80
Figure 33. Analyse de sensibilité de la durée de vie des robots sur les impacts de la méthode ReCiPe pour le désherbage intra-rang avec des interceps en Val de Loire.....	80
Figure 34. Sensibilité des résultats pour l'écotoxicité des milieux aquatiques selon les méthodes de caractérisation utilisées – cas des scénarios Charentes	90

Figure 35. Sensibilité des résultats pour la toxicité humaine selon les méthodes de caractérisation utilisées – cas des scénarios Charentes	90
---	----

Table des Tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des bassins viticoles étudiés	18
Tableau 2 : Scénarios étudiés	20
Tableau 3 : Nombre d'opérations réalisées pour chaque scénario	21
Tableau 4 : Description des opérations utilisées pour modéliser les scénarios	22
Tableau 5 : Eléments pris en compte pour chaque intrant du système	25
Tableau 6 : Indicateurs de la méthode ReCiPe2016 utilisés dans l'étude	28
Tableau 7 : Indicateurs de la méthode CML utilisés dans l'étude	30
Tableau 8 : Détail de la modélisation des herbicides dans les scénarios	31
Tableau 9 : Correspondance entre les compartiments d'OLCA-Pest et ceux de GaBi.....	33
Tableau 10 : Synthèse des données utilisées pour la modélisation des herbicides	34
Tableau 11 : Flux entrants et sortants pour une opération de désherbage (hors herbicides)	35
Tableau 12 : Masse et durée de vie des machines agricoles.....	36
Tableau 13 : Masse et durée de vie des outils de désherbage	38
Tableau 14 : Valeurs et sources des données de vitesse d'avancement des opérations pour les tracteurs et le robot TED.....	40
Tableau 15 : Valeurs et source des données de la consommation de GNR par heure d'opération	41
Tableau 16 : Emissions par kg de GNR consommé.....	42
Tableau 17 : Facteur d'émission PM2.5 en fonction du modèle des tracteurs	43
Tableau 18 : Emissions variables liées à la combustion du GNR en fonction des tracteurs	43
Tableau 19 : Synthèse des émissions liées à la combustion du GNR.....	44
Tableau 20 : Caractéristiques des pneus en fonction du type de machine	44
Tableau 21 : Synthèse des émissions liées à la combustion du GNR.....	45
Tableau 22 : Synthèse des données d'entrée pour les opérations de désherbage	45
Tableau 23. Descriptif des légendes pour les analyses de contributions	47
Tableau 24 : Taux de réduction (en%) des impacts des scénarios « Robots » sans prendre en compte le transport des robots jusqu'à la parcelle	71
Tableau 25 : Taux de réduction (en %) des impacts des scénarios « Robots » en remplaçant le cuivre primaire par du cuivre recyclé dans la fabrication des robots	73
Tableau 26 : Composition en pourcentage des éléments constituant les robots et les tracteurs modélisés dans les scénarios	74
Tableau 27. Modélisation de la composition actualisée d'un tracteur (en %)	75
Tableau 28. Taux d'augmentation des masses des composants du robot du fait de l'allongement de la durée de vie	77
Tableau 29 : Valeurs des paramètres utilisés dans OLCA-Pest.....	89

Sigles et abréviations

Plusieurs sigles et abréviations sont utilisées (hors tableaux et figures) dans ce rapport. Leur signification est présentée ci-après.

ACV : Analyse du Cycle de Vie

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation

BK : Bineuse à doigt Kress

CA : Chambre d'Agriculture

CD : Cadre équipé de disques

CDS : Cadre équipé de dents ou de socs

CH : Charentes

CMB : Désherbage combiné

CML : Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden = Institut des sciences environnementales / Leiden

DALY : Disability Adjusted Life Years (années de vie perdues)

DC : Désherbage chimique

DCR : Disques crénelés

DCV : Destruction du couvert végétal

DE : Disques émotteurs

DM : Désherbage mécanique

DV : Durée de Vie

GB : Gyrobroyeur

GLY : Glyphosate

GNR : Gazole non routier

GPS : Global Positioning System (en français : Géo-positionnement par satellite)

GSM : Global System for Mobile Communications

IA : Impact Assessment

IC : Intercepts

ICV : Inventaire du cycle de vie

ILCD : International Reference Life Cycle Data System

IMH: Interface Homme Machine

ISO : International Standard Organisation

ITA : Intra-rang

ITA + ITE : Opération combinée de l'intra rang et de l'inter rang

ITE : Inter rang

LR : Languedoc Roussillon

MJ : Méga Joules

Naprop : Napropamide

NRTK : Network Real Time Kinematic (en français : Cinématique temps réel réseau)

PDF : percentage disappeared fraction of species

TE : Tracteur Enjambeur

TI : Tracteur interligne

UF : Unité fonctionnelle

VL : Val de Loire

1. Introduction

1.1. Contexte de l'étude

Le secteur agricole est confronté au double défi de nourrir une population croissante tout en réduisant son impact sur l'environnement naturel et la santé humaine. Les rendements des cultures doivent être maintenus à un niveau élevé afin de garantir l'approvisionnement alimentaire. Les pertes de rendement associées aux ennemis des cultures peuvent atteindre 40% de la production alimentaire mondiale. Aussi, les moyens de lutte contre les ennemis des cultures ont essentiellement consisté jusqu'à présent en l'usage de pesticides et herbicides de synthèse (Cho et Ki 1999, Oerke et Dehne 2004).

Les herbicides ont été introduits pour la première fois dans les années 1940 et 1950 en raison de la perte de main-d'œuvre agricole pour le désherbage manuel ainsi que de la réduction des coûts de production agricole (Gianessi et Reigner 2007, Fennimore, Slaughter et al. 2016). Ils ont permis ainsi d'augmenter drastiquement les rendements des cultures. En effet, il a été rapporté par plusieurs auteurs que la concurrence des adventices pouvait réduire les rendements des cultures de 48 % à 71 % pour les tomates (Monaco, Grayson et al. 1981), 50 à 100 % pour les laitues (Roberts, Hewson et al. 1977, Lanini et Le Strange 1991, Shrefler, Stall et al. 1996), 15 % pour le blé (Hodgson 1968), 60 à 69 % pour le coton (Keeley et Thullen 1989, Keeley et Thullen 1991). De grandes quantités d'herbicides ont donc été utilisées pendant un demi-siècle, suivies de l'introduction de cultures résistantes au glyphosate dans les années 1990 et au début des années 2000 (Shaner 2000, Duke 2012). Cependant, même si les herbicides sont à la fois biologiquement efficaces et économiquement efficaces pour le contrôle des mauvaises herbes, leur utilisation a eu un impact sévère sur l'environnement (Pimentel et Lehman 1993, Reus, Leendertse et al. 2002) et la santé humaine (World Health Organization 1990, Aktar, Sengupta et al. 2009, Alewu et Nosiri 2011, Nicolopoulou-Stamati, Maipas et al. 2016).

Pour faire face à ce problème, le nombre de substances chimiques a diminué en raison des réglementations sur l'utilisation des pesticides ou interdits de marché, en particulier dans l'Union européenne. De plus, les inquiétudes croissantes des consommateurs, l'émergence d'une résistance aux herbicides chez les mauvaises herbes les rendant plus difficiles à éradiquer et un intérêt croissant pour les aliments issus de l'agriculture biologique limitent l'acceptabilité à long terme de l'application d'herbicides (Slaughter, Giles et al. 2008, Fennimore, Slaughter et al. 2016).

En France, le programme Ecophyto II+ vise à réduire de 50 % l'utilisation des pesticides en agriculture à l'horizon 2025 et à supprimer progressivement le glyphosate d'ici fin 2020 pour les principaux usages et au plus tard en 2022 pour tous les usages. Le programme Ecophyto II+ répond à une obligation européenne fixée par la directive 2009/128/CE établissant un cadre d'action communautaire pour parvenir à un usage de pesticides compatible avec le développement durable. Une des actions principales est de développer des solutions alternatives au désherbage chimique (Ministère de l'Agriculture 2020). Les alternatives à l'utilisation d'herbicides chimiques pour les cultures en rangs les plus étudiées sont la pulvérisation chimique sélective (c'est-à-dire les technologies Drop-on-Demand où seule la mauvaise herbe est stérilisée et non la totalité du champ) et le désherbage mécanique. Le travail du sol, souvent appelé travail du sol tertiaire, est la méthode la plus rencontrée pour le désherbage mécanique dans les cultures agricoles. Elle est effectuée après le semis de la culture et consiste en un travail du sol superficiel avec une variété d'équipements souvent classés comme bineuses ou herse (Rueda-Ayala, Rasmussen et al. 2010).

Pour les cultures pérennes, comme les vignes, les alternatives les plus rencontrées aux herbicides chimiques sont le désherbage mécanique inter-rang et intra-rang et l'enherbement des vignobles. L'enherbement empêche l'infestation par les mauvaises herbes en agissant comme un concurrent pour la lumière, l'eau et les nutriments. De nombreux vignobles dans le monde utilisent l'enherbement de l'inter-rang comme stratégie de gestion des sols (Abad, Diana et al. 2020). L'enherbement peut être temporaire ou pérenne sur tous les rangs ou un rang sur deux. Il peut être géré en tondant l'herbe ou en laissant l'herbe libre de se développer pendant la période végétative du vignoble.

Le désherbage mécanique de l'inter-rang est réalisé à l'aide d'outils standards de travail du sol tels que les herse à disques, la charrue vigneronne ou les vibroculteurs tandis que des outils spécifiques tels que les bineuses à

doigts, à torsion ou à ressort sont utilisées pour le désherbage mécanique intra-rang (Cloutier, van der Weide et al. 2007).

Le désherbage intra-rang est très exigeant car les outils nécessitent un pilotage très précis pour ne pas endommager les troncs de vigne. Un système de guidage précis est alors requis (Reiser, Sehsah et al. 2019, Manzone, Demeneghi et al. 2020). L'amélioration du système de navigation, des capteurs de distance et des caméras a créé de nombreuses opportunités pour la gestion des adventices (Bajwa, Mahajan et al. 2015, Reiser, Sehsah et al. 2019). Les technologies d'agriculture de précision ont progressé dans deux voies principales : les gros tracteurs automatisés avec des systèmes d'aide à la conduite tels que l'affichage GPS RTK et les plates-formes robotiques entièrement autonomes et automatisées capables d'effectuer des tâches agricoles sans intervention humaine (Pedersen, Fountas et al. 2006, Basu, Omotubora et al. 2020).

Le développement des plates-formes robotiques a été permis par le développement des technologies mécatroniques aujourd'hui matures, qui rendent l'automatisation techniquement réalisable (Lowenberg-DeBoer, Huang et al. 2020). L'automatisation pour le contrôle des adventices a été l'un des principaux domaines de recherche en robotique agricole au cours des dernières décennies. La recherche s'est particulièrement concentrée sur les quatre technologies suivantes : capteurs de guidage et de perception, niveau de détection et d'identification des adventices, désherbage de précision intra-rang et cartographie (Slaughter, Giles et al. 2008, Bechar et Vigneault 2016, Fennimore, Slaughter et al. 2016, Bechar et Vigneault 2017, Utstumo, Urdal et al. 2018, Steward, Gai et al. 2019, Fountas, Mylonas et al. 2020).

Les robots agricoles commerciaux sont rares (Shamshiri, Weltzien et al. 2018, Fountas, Mylonas et al. 2020). Une étude récente réalisée par Koerhuis (2020) montre que seuls 35 robots agricoles sont disponibles dans le commerce en 2021. La plupart de ces robots ont pour objectif d'éliminer les adventices dans les cultures en rangs. La France est le pays ayant le plus de robots agricoles vendus et en activité avec au moins 100 robots pour la gestion des adventices et 10 robots utilisés par les entrepreneurs viticoles.

La plupart de ces robots reposent sur le désherbage mécanique (75 %) ou sur la pulvérisation locale réduisant l'utilisation d'herbicides jusqu'à 95 %. Ces robots agricoles commercialisés ont le potentiel de réduire la quantité de pesticides appliqués (Slaughter et al., 2008), de réduire la consommation de GNR et la pollution de l'air (Gonzalez-de-Soto, Emmi et al. 2015, Gonzalez-de-Soto, Emmi et al. 2016), et réduisent le compactage du sol en raison de leur poids plus léger (Bak et Jakobsen 2004, Fountas, Gemtos et al. 2010, Maurel et Huyghe 2017, Utstumo, Urdal et al. 2018, Vougioukas 2019). Cependant, très peu d'études permettent une quantification de ces réductions et à notre connaissance ; aucune étude publiée n'évalue les conséquences de ces réductions sur les impacts environnementaux tels que le changement climatique, la toxicité humaine, l'acidification terrestre et l'eutrophisation des eaux douces (Lowenberg-DeBoer, Huang et al. 2020, FarmBot 2021).

Il n'est donc pas possible d'argumenter à l'heure actuelle sur l'impact environnemental positif de la robotique en agriculture. Cette étude a pour ambition de combler en partie ces manques en réalisant une évaluation quantitative de l'impact environnemental à l'aide de l'Analyse du Cycle de Vie des pratiques de désherbage intra-rang et inter-rang à l'aide de systèmes robotisés autonomes dans les vignobles français.

1.2. Méthodologie utilisée

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux d'un système. Elle est basée sur un bilan comptable (input/output) des flux physiques du système étudié, traduits ensuite en impacts environnementaux potentiels. Elle repose sur deux principes fondamentaux : (i) une approche « multicritère » qui permet l'évaluation simultanée de plusieurs impacts environnementaux potentiels, (ii) une approche « cycle de vie » qui permet la prise en compte de l'ensemble des étapes du cycle de vie des procédés utilisés par le système étudié (extraction des matières premières, fabrication, usage et fin de vie).

L'ACV est définie par les normes ISO 14040 et 14044 et l'ILCD Handbook, guidant le praticien ACV à travers les différents aspects méthodologiques de l'ACV (ILCD Handbook, 2010; ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). L'ACV est une procédure itérative constituée de quatre étapes à savoir : la définition des objectifs et du champ de l'étude, l'analyse de l'inventaire du cycle de vie, l'évaluation des impacts environnementaux et l'interprétation.

1.2.1. Définition de l'objectif et du champ de l'étude

La définition de l'objectif à atteindre doit permettre de définir et identifier les applications envisagées, les limites de la méthode et les hypothèses utilisées, les raisons qui ont poussé à conduire l'ACV et les destinataires de l'étude. La définition des objectifs doit également préciser si une analyse comparative est réalisée, notamment si les résultats sont diffusés au grand public.

La définition du champ de l'étude permettra quant à elle de définir précisément l'objet de l'ACV. Ainsi, au cours de cette étape sont définis le système étudié et sa (ou ses) fonction(s), l'unité fonctionnelle et le périmètre. La modélisation de l'inventaire du cycle de vie (ICV), la vérification de la qualité des données utilisées au cours de l'ICV et la méthode utilisée pour résoudre la multifonctionnalité du système sont également abordées. Enfin, une revue critique peut être réalisée par un organisme tiers, notamment dans le cadre de la diffusion publique des résultats d'ACV comparatives. La revue critique visera notamment à valider les choix méthodologiques, les données utilisées et l'interprétation des résultats obtenus.

1.2.2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie

Chaque étape du cycle de vie consomme de l'énergie et des ressources non renouvelables et génère des émissions vers l'air, l'eau et le sol à un niveau local, régional ou global. L'étape d'inventaire de cycle de vie consiste en la réalisation d'une collecte de données permettant de réaliser le bilan de l'ensemble des flux du système étudié.

Le recueil des données est un processus itératif. Au fur et à mesure de l'inventaire, des données peuvent ne pas être disponibles, nécessitant de mettre en place des hypothèses de calcul ou de redéfinir les frontières du système si l'inventaire devient incohérent avec l'objectif et le périmètre affiché du système.

Un diagramme de flux ou arbre des procédés est construit, d'une part, de manière qualitative à partir de la détermination des frontières de l'étude et, d'autre part, de manière quantitative avec les données d'inventaire. Ces données d'inventaire sont ensuite rapportées à l'unité fonctionnelle établie précédemment.

Les flux comptabilisés au cours de l'étape d'inventaire du cycle de vie pour chacun des processus élémentaires du système sont :

- Les flux entrants : intrants énergétiques et de matières premières provenant d'autres systèmes et les flux élémentaires puisés dans l'environnement sans transformation humaine préalable ;
- Les flux sortants : les flux élémentaires rejetés dans l'environnement tels que les émissions vers l'eau, l'air, le sol et les extrants qui ne sont pas réutilisés dans le processus élémentaire suivant tels que les déchets.

Les flux intermédiaires permettent de relier chacun des processus élémentaires entre eux afin de constituer un arbre des procédés complet.

Les exigences de qualité des données doivent également être définies au cours de cette étape afin que les objectifs et le champ de l'étude soient satisfaits. Les exigences relatives à la qualité des données couvrent les facteurs temporels, la géographie, la technologie, la fidélité, la complétude, la représentativité, la cohérence, la reproductibilité, les sources des données et l'incertitude des informations.

Enfin, bien que définies au cours de l'étape de définition du champ de l'étude, le traitement de la multifonctionnalité s'opère concrètement lors de l'étape d'inventaire du cycle de vie.

1.2.3. Evaluation des impacts environnementaux

Cette troisième étape consiste à traduire les flux inventoriés lors de l'étape du cycle de vie en impacts potentiels. Les flux d'inventaire font en premier lieu l'objet d'une classification, c'est-à-dire qu'ils sont identifiés comme étant contributeurs à une ou plusieurs catégories d'impacts environnementaux. A titre d'exemple, le protoxyde d'azote (N₂O) contribue à l'impact de changement climatique et à l'impact d'eutrophisation.

Les flux référencés lors de l'analyse de l'inventaire sont ensuite convertis, le plus souvent, en quantité de substance « équivalente » par un *facteur de caractérisation* (on parle alors de « caractérisation des impacts ») pour chaque impact étudié selon la formule suivante (Guinée et al., 2002) :

$$I_c = \sum_i^n (m_i \cdot CF_{c,i})$$

Où I_c est l'impact relatif à la catégorie d'impact c issu de l'émission de n substances pour un cycle de vie donné (mesuré en kg), m_i la masse de substance i inventoriée dans le processus (mesurée en kg) et $CF_{c,i}$ le facteur de caractérisation de l'impact c relatif à la substance i , (exprimée en quantité de substance équivalente par kg de substance i).

Les facteurs de caractérisation sont construits sur la base de modèles appelés modèles de caractérisation. Ces modèles visent à représenter quantitativement la contribution de chacune des substances émises tout au long de la chaîne de cause à effet pour chacun des impacts. Deux approches existent : l'approche midpoint (ou intermédiaire) décrite ci-dessus et l'approche endpoint (ou dommage).

Les indicateurs de dommages (ou impacts finaux) ont pour principale vocation de regrouper les impacts intermédiaires en fonction de leurs contributions respectives à la détérioration des aires de protection que sont la santé humaine, les ressources naturelles et les écosystèmes (ILCD Handbook, 2010). Ils sont calculés par la formule suivante (Guinée et al., 2002) :

$$I_c = \sum_i^n (m_i \cdot \text{dommage}_{c,i})$$

Où I_c est l'impact relatif à la catégorie de dommage c issu de l'émission de n substances (mesuré en DALY ou PDF.m².an ou MJ), m_i la masse de substance i inventoriée dans le processus du cycle de vie du scénario considéré (mesurée en kg) et $\text{dommage}_{c,i}$ le résultat de l'indicateur de catégorie de dommage c relatif à la substance i (mesuré en DALY.kg⁻¹ ou PDF.m².an.kg⁻¹ ou MJ.kg⁻¹ selon l'aire de protection et la méthode de caractérisation).

Leur principal avantage réside dans la capacité de présenter des résultats d'impact plus facilement appropriables. Toutefois, une incertitude importante réside dans la construction de la chaîne de cause à effet des impacts jusqu'à leur dommage sur les aires de protection en raison de la complexité, de la temporalité et du manque de connaissance des phénomènes mis en œuvre.

Il existe enfin des méthodes de compilation des résultats de caractérisation des impacts finaux (normalisation, agrégation, pondération, monétarisation) permettant d'obtenir un score unique. Ces méthodes sont facultatives d'après la norme et font l'objet de discussion quant à leur objectivisme.

1.2.4. Interprétation des résultats

Cette dernière phase de l'ACV permet d'analyser les résultats obtenus lors de l'analyse de l'inventaire et de l'évaluation des impacts. L'interprétation peut être réalisée sous la forme de conclusions et/ou de préconisations. Elle se doit d'être cohérente avec les objectifs et le champ de l'étude, claire et utilisable par le décideur. Si les résultats ne sont pas cohérents, il est alors possible de mettre en place un processus itératif qui permet de revoir le champ de l'étude, la qualité des données et les objectifs fixés (ISO 14044, 2006).

Les résultats de l'ACV pointent les étapes du cycle de vie où il est nécessaire de mettre en place des actions d'amélioration. Ces dernières sont choisies en fonction de différents facteurs tels que le facteur économique (coût et de rentabilité des améliorations), le facteur social, le facteur technique en termes de faisabilité et le facteur réglementaire (Aissani, 2008).

Cette dernière étape permet également d'analyser de manière critique l'ACV réalisée en ce qui concerne les hypothèses posées, les choix méthodologiques et les limites de l'étude et de mettre en perspective les résultats.

2. Définition des objectifs et du champ de l'étude

2.1. Objectifs de l'étude

Cette étude a été conduite dans le cadre du projet ROAD (RObotique Agricole Durable) financé par l'Université Clermont Auvergne dans le cadre du Challenge 2 de CAP 2025, thématique AgroTechnologies (programme « Investissements d'Avenir » 16-IDEX-0001 CAP2025). Ce projet vise à évaluer la durabilité environnementale des technologies de robotique agricole dans une visée d'écoconception¹.

Les pratiques agricoles et les technologies de désherbage robotique étant très variées, il a été décidé dans un premier temps de limiter l'étude ACV aux pratiques de désherbage intra-rang et inter-rang à l'aide de systèmes robotisés autonomes dans les vignobles français, et de comparer leurs impacts à celui causé par les méthodes de désherbage majoritairement utilisées aujourd'hui dans les vignobles.

Pour modéliser des scénarios d'étude au plus proche de la réalité, l'ACV est réalisée avec la collaboration de NAÏO Technologies, qui nous a fourni des données pour modéliser les impacts de leur solution robotique de désherbage/entretien des vignobles.

2.2. Application et public visé

Cette ACV a été avant tout réalisée dans le cadre d'un projet de recherche. Elle est destinée à apporter des premiers éléments quantifiés sur l'impact environnemental des robots agricoles. Elle s'adresse donc plus particulièrement aux travailleurs du secteur agricole souhaitant s'informer sur le sujet, ainsi qu'aux fabricants de robots agricoles pour leur permettre d'identifier des leviers d'écoconception.

2.3. Revue Critique

Cette étude n'a pas fait l'objet d'une revue critique.

2.4. Fonction du système et unité fonctionnelle

2.4.1. Fonction du système

Pour être en accord avec les objectifs de l'étude, la fonction générale des systèmes à étudier est de maîtriser le développement des adventices d'une parcelle agricole. Le sujet de l'étude étant centrée sur la gestion des adventices dans un vignoble, il convient de préciser la fonction pour l'adapter à la viticulture. Un vignoble est constitué de plusieurs parties, globalement, des rangs de vignes, des inter-rangs (espace entre les rangs), et des tournières (surface bordant la parcelle où les machines agricoles « tournent » pour traiter un nouveau rang ou nouvel inter-rang). La gestion des adventices a pour but de contrôler la concurrence en eau et en azote entre les vignes et les adventices. Cette concurrence a lieu à proximité des vignes, c'est-à-dire dans les rangs et les inter-rangs. C'est donc dans les rangs et inter-rangs que le développement des adventices doit être contrôlé.

La vigne est une culture pérenne qui peut supporter un certain niveau de concurrence avec les adventices. Cette concurrence peut même être souhaitable en fonction des parcelles pour maîtriser la vigueur de la vigne, et de fait des rendements, dans un objectif d'amélioration qualitative des vins². Ainsi, une partie ou la totalité de la surface d'un vignoble peut être recouverte par un couvert végétal, spontané ou semé, permanent ou temporaire, généralement composé d'herbe.

L'enherbement a plusieurs effets bénéfiques pour le sol : il limite son érosion, ainsi que son tassement lors des passages de machines agricoles et permet également de maintenir son activité biologique^{3,4}. Enfin, le couvert

¹ <https://cap2025.fr/recherche/challenges-scientifiques/systemes-et-services-innovants-pour-les-transports-et-la-production>

² <https://osez-agroecologie.org/enherbement-vigne-definition>

³ <https://osez-agroecologie.org/enherbement-vigne-definition>

⁴ <https://www.secretsdevignesetdechais.fr/details-a+quoi+sert+l+enherbement+entre+les+rangs+de+vignes+de+bordeaux+c+est+pour+faire+joli-106.html>

végétal concurrence les adventices poussant sur les surfaces à désherber, limitant leur développement. Dans le cas d'un couvert semé, il est possible d'implanter des espèces végétales moins concurrentielles que les espèces locales, limitant ainsi la concurrence hydro-azotée.

La gestion de l'enherbement dans les inter-rangs varie en fonction des régions. Tous les inter-rangs d'une parcelle peuvent être désherbés, ou au contraire enherbés. Il est aussi possible de maintenir seulement une partie des inter-rangs enherbés. Dans ce cas-là, les vignerons enherbent un inter-rang sur deux, voire plus rarement un inter-rang sur trois (Agreste, 2020). La gestion des adventices dans ces zones enherbées ne consiste pas à « désherber » mais plutôt à maîtriser la vigueur du couvert végétal, notamment au moyen de la tonte (Figure 1 à Figure 3).

En considérant cette notion d'enherbement du sol, la fonction étudiée est la suivante : « **maîtriser les adventices sous les rangs et dans les inter-rangs d'une parcelle de vigne au moyen d'actions d'enherbement et/ou de désherbage** ».



FIGURE 1 : ENHERBEMENT TOUS LES INTER-RANGS (SOURCE : WWW.LESECHOS.FR)



FIGURE 2 : ENHERBEMENT UN INTER-RANG SUR DEUX (SOURCE : WWW.SECRETSDEVIGNESETDECHAIS.FR)



FIGURE 3 : AUCUN INTER-RANG ENHERBE (SOURCE : WWW.SECRETSDEVIGNESETDECHAIS.FR)

2.4.2. Unité fonctionnelle

Les pratiques de maîtrise des adventices sont très variées. Elles dépendent des conditions pédoclimatiques du bassin viticole, des cahiers des charges des appellations auxquels les vignobles sont soumis, des variations météorologiques annuelles.

Elles dépendent également des pratiques individuelles des vignerons qui n'ont pas le même seuil de tolérance au salissement de la parcelle par les adventices. Dans la pratique, une année aux conditions météorologiques particulièrement peu propices au désherbage chimique ou au travail du sol compromettent l'atteinte de ce seuil de tolérance idéal. Par ailleurs, le seuil de tolérance de la présence d'adventices sur une parcelle est rarement quantifié. La connaissance de la concurrence idéale pour les vignes d'une parcelle, et par conséquent la construction des itinéraires de désherbage repose principalement sur l'expérience et une base de connaissances empiriques.

En prenant en compte ces différents aspects, l'unité fonctionnelle suivante a été définie : « **Maîtriser de manière optimale les adventices sous le rang et dans l'inter-rang pour 1 hectare de vigne de 100 mètres de côté pendant 1 an** ».

Le terme « de manière optimale » est utilisé pour rendre compte de l'hétérogénéité dans la tolérance au salissement des parcelles par les adventices, de la variété des pratiques de désherbage et d'enherbement, ainsi que la variabilité observée dans les pratiques de désherbage. Les dimensions de l'hectare sont définies pour être représentatives de la longueur des rangs dans une parcelle viticole. Après plusieurs entretiens avec les conseillers viticulture des Chambres d'Agriculture, il ressort que la longueur des rangs peut être extrêmement variable selon les parcelles (de 50 mètres à 800 mètres de long environ). Etant donc difficile de donner une valeur moyenne pour cette longueur, une valeur de 100 m a été définie. Cette longueur de rang est cohérente avec les valeurs de longueur de rangs des domaines utilisant la solution robotique de NAÏO Technologies, ainsi qu'avec les dimensions des parcelles prises en compte dans d'autres études sur les itinéraires techniques en viticulture (Renaud-Gentié, 2015).

2.5. Champ de l'étude

2.5.1. Systèmes étudiés

Deux systèmes seront comparés dans l'étude : un système conventionnel basé sur l'usage d'un tracteur et un système robotisé basé sur l'usage d'un robot spécialisé dans le désherbage des vignes (robot TED).

Chaque système mobilise donc un type spécifique de machine (tracteur et robot TED), mais également d'autres ressources matérielles, énergétiques et humaines pour maîtriser les adventices d'une parcelle. Les ressources humaines n'étant pas prises en compte dans une ACV, elles sont indiquées ici uniquement dans un but de compréhension du fonctionnement des systèmes.

Système conventionnel :

Pour réaliser la tâche de désherbage, le système conventionnel mobilise un tracteur, des outils de désherbage mécanique et éventuellement du matériel de désherbage chimique et des herbicides. Il consomme du gazole non routier (GNR), et est stocké dans un hangar. Ce système prend également en compte les déplacements jusqu'à la parcelle et la recharge de la cuve à herbicides et le réservoir de GNR (Figure 4).

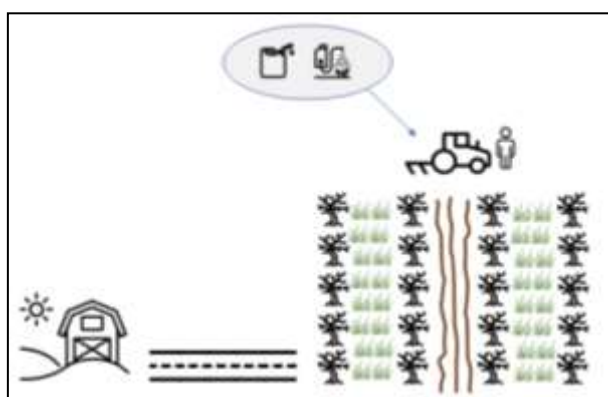


FIGURE 4 : SYSTEME CONVENTIONNEL

Système robotisé – TED :

Ce système robotisé mobilise un robot TED (NAÏO Technologies) équipé d'outils de désherbage mécanique pour travailler le cavaillon, et éventuellement d'outils de tonte déportés pour contrôler la croissance de l'herbe de l'inter-rang. Il fonctionne avec de l'énergie électrique stockée dans une batterie. Le robot TED se guide dans la parcelle par GPS NRTK (avec correction GSM), il a donc besoin de satellites GPS, d'une balise de référence et d'antennes relais pour connaître sa position dans la parcelle. Celle-ci est cartographiée par une mesure par prise de points grâce à l'antenne du TED démontée et manipulée par la personne chargée de la cartographie.

Lorsqu'il est inutilisé, le robot TED est stocké dans un hangar. Les robots n'étant pas autorisés à être opérés sur les voies publiques et assimilées, lorsque la parcelle est éloignée du hangar, il y est transporté à l'aide d'une camionnette équipée d'une remorque. Si la parcelle est située à côté du hangar, TED peut y être guidé via une télécommande. Lors de son travail dans les vignes, le robot TED doit être surveillé par un opérateur qui s'assure qu'aucun obstacle (humain ou objet) qui puisse générer des dommages ne soit présent dans la parcelle. Le montage et le démontage des outils du robot, la recharge de sa batterie et les opérations de maintenance doivent être effectuées manuellement (Figure 5 et Figure 6).

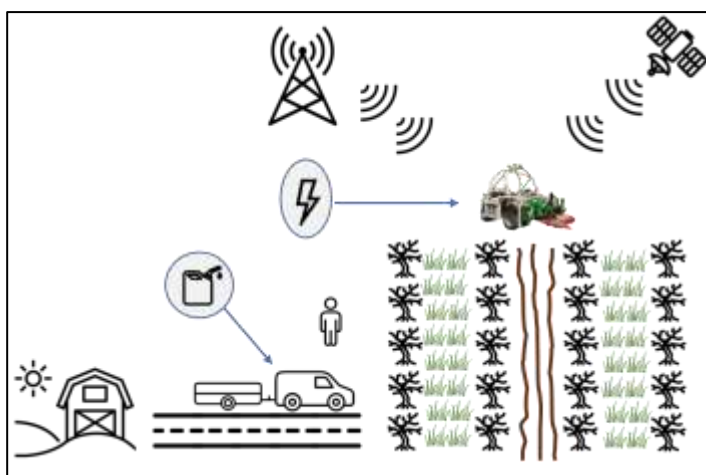


FIGURE 5 : SYSTEME ROBOTISE - TED



FIGURE 6 : ROBOT TED EN ACTION DANS UN VIGNOBLE (SOURCE : WWW.NAIO-TECHNOLOGIES.COM)

2.5.2. Scénarios étudiés

Le but de l'étude est de comparer un désherbage robotisé aux pratiques actuellement utilisées en viticulture. Les modes de gestion du sol et des adventices étant variés sur le territoire français et fonction des conditions pédoclimatiques du bassin viticole, de la topographie de la parcelle, ainsi que des pratiques des vignerons, plusieurs scénarios ont été étudiés pour prendre en compte cette diversité des pratiques.

Il a été décidé de centrer l'étude sur les bassins viticoles les plus importants en termes de surface cultivée et de litres de vin produits, en France métropolitaine, afin de rendre l'étude la plus représentative possible des pratiques viticoles françaises.

Des bassins viticoles représentatifs avec des pratiques d'enherbement et de gestion des adventices différentes ont été étudiés afin de rendre compte au mieux de la variété des pratiques en viticulture sur le territoire français. Les tendances des pratiques d'enherbement et de gestion des adventices sont tirées des données de 2016 publiées en 2019 par l'Agreste. Les trois bassins viticoles étudiés et leurs caractéristiques d'enherbement sont présentés dans le Tableau 1.

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES DES BASSINS VITICOLES ETUDIES

Bassin Viticole	Densité de plantation		Pratiques d'enherbement des vignobles						Pratiques de gestion des adventices	
			Inter-rang				Intra-rang			
	Densité (nb pied/ha)	Largeur inter-rang (m)	Type		Méthode		Type			
Languedoc-Roussillon	4 000	2.50 (2.00)*	Aucun	70%	Tous rangs	61%	Aucun	90%	Chimique	24%
			Pérenne	19%	1 rang sur 2	26%	Pérenne	1%	Mécanique	19%
			Temporaire	11%	Autre	13%	Temporaire	9%	Mixte	57%
Val de Loire (Muscadet)	6 500	1.50 (1.20)*	Aucun	37%	Tous rangs	63%	Aucun	98%	Chimique	43%
			Pérenne	56%	1 rang sur 2	36%			Mécanique	55%
			Temporaire	7%	Autre	1%			Mixte	22%
Charente	2 200	3.00 (2.50)*	Aucun	22%	Tous rangs	29%	Pérenne	1%	Chimique	24%
			Pérenne	68%	1 rang sur 2	69%			Mécanique	4%
			Temporaire	10%	Autre	2%			Mixte	72%

* Les valeurs entre parenthèses indiquent la largeur de travail dans l'inter rang (m).

Pour chaque bassin viticole, sont étudiées les pratiques de désherbage chimique et les pratiques de désherbage mécanique dans les inter-rangs et intra-rangs. Pour chaque pratique de désherbage, deux moyens de désherbage sont comparés : le désherbage réalisé par un tracteur et le désherbage réalisé avec un robot désherbeur autonome (pour le désherbage mécanique et la tonte uniquement).

Pour chaque bassin viticole, les scénarios ont été établis sur la base des données du rapport « Enquête pratiques phytosanitaires en 2016 » publiée par l'Agreste (2019), des cahiers des charges des différentes appellations des bassins viticoles étudiés, d'entretiens avec les conseillers viticulture de différentes chambres d'agriculture (CA de la Charente, CA de l'Aude, CA du Gard, CA d'Indre et Loire) et d'entretiens avec des viticulteurs utilisant le robot TED (Domaine Hennessy, domaine Mas Belles Eaux, vignoble Malidain). Pour le Languedoc-Roussillon, la définition des scénarios est également basée sur le mémoire « Analyse des pratiques d'enherbement des viticulteurs et formalisation des règles de décision utilisées pour le pilotage » (Frey, 2016).

Les scénarios étudiés sont décrits dans le Tableau 2. Les abréviations suivantes sont utilisées : LR : Languedoc-Roussillon, CH : Charente, VL : Val de Loire, T : Tracteur, E : Enjambeur, R : Robot, P : Pulvérisateur, TS : Outil de travail du sol, G : Outil de tonte type gyrobroyeur, 1/2 : 1 rang sur 2.

TABLEAU 2 : SCENARIOS ETUDIES

Pratique d'enherbement	Scénarios	Gestion de l'intra-rang		Gestion de l'inter-rang		Gestion combinée inter et intra-rangs	
		Type	Outils	Type	Outils	Type	Outils
1 inter-rang sur 2 enherbé (période végétative) Tous les rangs enherbés (période repos) Intra-rangs non enherbés	CH1	Chimique	T+P	Mécanique	T+G (1/2) T+TS (1/2)	-	-
	CH2	Mixte	T+P T+TS	Mécanique	T+G (1/2) T+TS (1/2)	-	-
	CH3	Mixte	T+P R+TS	Mécanique	T+G (1/2) T+TS (1/2)	-	-
	CH4	Mixte	T+P	Mécanique	R+G (1/2) T+TS (1/2)	Mécanique	R+G+TS (1/2)
	CH5	Mécanique	T+TS	Mécanique	T+G (1/2) T+TS (1/2)	-	-
	CH6	Mécanique	R+TS	Mécanique	T+G (1/2) T+TS (1/2)	-	-
	CH7	Mécanique	R+TS	Mécanique	T+TS (1/2)	Mécanique	R+G+TS (1/2)
Inter-rangs enherbés (période végétative), non enherbés (période repos) Intra-rangs non enherbés	L1	Chimique	T+P	Mécanique	T+TS	-	-
	L2	Mixte	T+P	Mécanique	T+TS	Mécanique	T+TS
	L3	Mixte	T+P R+TS	Mécanique	T+TS	-	-
	L4	-	-	Mécanique	T+TS	Mécanique	T+TS
	L5	Mécanique	R+TS	Mécanique	T+TS	-	-
Inter-rangs non enherbés (période végétative et repos) Intra-rangs non enherbés	L6	Chimique	T+P	Mécanique	T+TS	-	-
	L7	Mixte	T+P	Mécanique	T+TS	Mécanique	T+TS
	L8	Mixte	T+P R+TS	Mécanique	T+TS	-	-
	L9	-	-	Mécanique	T+TS	Mécanique	T+TS
	L10	Mécanique	T+TS R+TS	Mécanique	T+TS	Mécanique	T+TS
	L11	Mécanique	R+TS	Mécanique	T+TS	-	-
Inter-rangs enherbés (période végétative et repos) Intra-rangs non enherbés	VL1	Chimique	E+P	Mécanique	E+G	-	-
	VL2	Mixte	E+P E+TS	-	-	Mécanique	E+TS+G
	VL3	Mixte	E+P R+TS	Mécanique	E+G	-	-
	VL4	Mixte	E+P R+TS	-	-	Mécanique	R+TS+G
	VL5	Mécanique	E+TS	-	-	Mécanique	E+TS+G
	VL6	Mécanique	E+TS R+TS	-	-	Mécanique	E+TS+G
	VL7	Mécanique	E+TS	-	-	Mécanique	R+TS+G
	VL8	Mécanique	R+TS	Mécanique	E+G		
	VL9	Mécanique	R+TS	-	-	Mécanique	R+TS+G

2.5.3. Modélisation des scénarios

Pour chaque scénario étudié, un ensemble d'opérations de désherbage utilisant un ou plusieurs outils est donc modélisé. Le nombre de passages pour chacune de ces opérations est variable selon les scénarios et les territoires viticoles. Le nombre de passages et le type (n°) d'opérations modélisées pour chaque scénario sont présentés dans le Tableau 3. Les nombres entre parenthèse indique le nombre de passage pour chaque opération lorsque plusieurs opérations sont concernées.

TABLEAU 3 : NOMBRE D'OPÉRATIONS RÉALISÉES POUR CHAQUE SCÉNARIO

Scéna- rios	Chimique (intra-rang seulement)		Mécanique (travail du sol)				Mécanique (tonte)		Gestion combine de l'intra-rang et de l'inter- rang	
			Intra-rang		Inter-rang		Inter-rang			
	Nb	N°	Nb	N°	Nb	N°	Nb	N°	Nb	N°
CH1	3	23 (1), 24 (2)	-	-	T: 5	5	T: 4	6	-	
CH2	1	23	T: 3	8	T: 5	5	T: 4	6	-	
CH3	1	23	R: 3	13	T: 5	5	T: 4	6	-	
CH4	1	23	-	-	T: 5	5	R: 1	7	R: 3	21
CH5	-	-	T: 4	8 (3), 9 (1)	T: 5	5	T: 4	6	-	
CH6	-	-	R: 9	13 (4), 14 (4), 16 (1)	T: 5	5	T: 4	6	-	
CH7	-	-	R: 5	14 (4), 16 (1)	T: 5	5	-	-	R: 4	21
LR1	2	23 (1), 24 (1)	-	-	T: 5	2 (4), 3 (1)	-	-	-	-
LR2	1	23	-	-	T: 2	2 (1), 3 (1)	-	-	T: 3	17
LR3	1	23	R: 3	13	T: 5	2 (4), 3 (1)	-	-	-	-
LR4	-	-	-	-	T: 1	2	-	-	T: 4	17 (3), 19 (1)
LR5	-	-	R: 4	13 (3), 15 (1)	T: 5	2 (4), 3 (1)	-	-	-	-
LR6	2	23 (1), 24 (1)	-	-	T: 6	2	-		-	-
LR7	1	23	-	-	T: 2	2	-		T: 4	17
LR8	1	23	R: 4	13	T: 6	2	-		-	-
LR9	-	-	-	-	T: 1	2	-		T: 5	17 (4), 18 (1)
LR10	-	-	T: 1 R: 4	10 13	T: 5	2	-	-	T: 1	18
LR11	-	-	R: 5	13 (4), 15 (1)	T: 6	2	-	-	-	-
VL1	2	25 (1), 26 (1)	-	-	-	-	E: 2	4	-	-
VL2	1	25	E: 2	11	-	-	-	-	E: 2	20
VL3	1	25	R: 4	13	-	-	E: 2	4	-	-
VL4	1	25	R: 2	13	-	-	-	-	R: 2	21
VL5	-	-	E: 5	11	-	-	-	-	E: 2	20
VL6	-	-	E: 3 R: 2	11 (1), 12 (2) 13 (1), 16 (1)	-	-	-	-	E: 2	20
VL7	-	-	E: 5	11 (3), 12 (2)	-	-	-	-	R: 2	21 (1), 22 (1)
VL8	-	-	R: 7	13	-	-	E: 2	4	-	-
VL9	-	-	R: 5	13	-	-	-	-	R: 2	21

Les codes opérations utilisées pour chaque scénario sont récapitulées dans le Tableau 4.

TABEAU 4 : DESCRIPTION DES OPERATIONS UTILISEES POUR MODELISER LES SCENARIOS

N° Opération	Code opération	Descriptif opération
2	ITE_TOUS_TI_DM_CDS	Désherbage mécanique de tous les inter rangs avec un tracteur de 50-60 kW et un cadre équipé de dents ou de socs – scénarios LR
3	ITE_TOUS_TI_DM_CD	Désherbage mécanique de tous les inter rangs avec un tracteur de 50-60 kW et un cadre équipé de disques – scénarios LR
4	ITE_TOUS_TE_TONTE_GB	Tonte de tous les inter rangs avec un tracteur enjambeur et un gyrobroyeur – scénarios VL
5	ITE_12_TI_DM_CDS	Désherbage mécanique d'un inter rang sur 2 avec un tracteur de 50-60 kW et un cadre équipé de dents ou de socs – scénarios CH
6	ITE_12_TI_TONTE_GB	Tonte d'un inter rang sur 2 avec un tracteur de 50-60 kW et un gyrobroyeur – scénarios CH
7	ITE_12_TED_TONTE_GB	Tonte d'un inter rang sur 2 avec un robot TED et un gyrobroyeur – scénarios CH
8	ITA_TI_DM_IC	Désherbage mécanique de tous les intra rangs avec un tracteur de 50-60 kW et des interceps
9	ITA_TI_DM_BK	Désherbage mécanique de tous les intra rangs avec un tracteur de 50-60 kW et une bineuse à doigts Kress
10	ITA_TI_DM_DCR	Désherbage mécanique de tous les intra rangs avec un tracteur de 50-60 kW et des disques crénelés
11	ITA_TE_DM_IC	Désherbage mécanique de tous les intra rangs avec un tracteur enjambeur et des interceps
12	ITA_TE_DM_DE	Désherbage mécanique de tous les intra rangs avec un tracteur enjambeur et des disques émotteurs
13	ITA_TED_DM_IC	Désherbage mécanique de tous les intra rangs avec un robot TED et des interceps
14	ITA_TED_DM_BK	Désherbage mécanique de tous les intra rangs avec un robot TED et une bineuse à doigts Kress
15	ITA_TED_DM_DCR	Désherbage mécanique de tous les intra rangs avec un robot TED et des disques crénelés
16	ITA_TED_DM_DCV	Désherbage mécanique de tous les intra rangs avec un robot TED et une décavailleuse
17	CMB_TI_DM_DM_CDS_IC	Désherbage mécanique combiné avec un tracteur de 50-60 kW de l'intra rang avec des interceps et de l'inter rang avec un cadre équipé de dents ou de socs – Scénarios LR
18	CMB_TI_DM_DM_CDS_DCR	Désherbage mécanique combiné avec un tracteur de 50-60 kW de l'intra rang avec des disques crénelés et de l'inter rang avec un cadre équipé de dents ou de socs – Scénarios LR
19	CMB_TI_DM_DM_CD_DCR	Désherbage mécanique combiné avec un tracteur de 50-60 kW de l'intra rang avec des disques crénelés et de l'inter rang avec un cadre équipé de disques – Scénarios LR

Tableau 4 (Suite)

N° Opération	Code opération	Descriptif opération
20	CMB_TE_TONTE_DM_GB_IC	Opération combinée avec un tracteur enjambeur de désherbage mécanique de l'intra rang avec des interceps et de tonte de l'inter rang avec un gyrobroyeur – Scénarios VL
21	CMB_TED_TONTE_DM_GB_IC	Opération combinée avec un robot TED de désherbage mécanique de l'intra rang avec des interceps et de tonte de l'inter rang avec un gyrobroyeur – Scénarios VL
22	CMB_TED_TONTE_DM_GB_DCV	Opération combinée avec un robot TED de désherbage mécanique de l'intra rang avec une décavaillonneuse et de tonte de l'inter rang avec un gyrobroyeur – Scénarios VL
23	ITA_TOUS_TI_DC_GLY_NAPROP	Désherbage chimique combiné avec du napropamide et du glyphosate de tous les intra rangs avec un tracteur de 30 kW et un pulvérisateur porté de 400 L
24	ITA_TOUS_TI_DC_GLY	Désherbage chimique avec du glyphosate de tous les intra rangs avec un tracteur de 30 kW et un pulvérisateur porté de 400 L
25	ITA_TE_DC_GLY_NAPROP	Désherbage chimique combiné avec du napropamide et du glyphosate de tous les intra rangs avec un tracteur enjambeur et un pulvérisateur porté de 400 L
26	ITA_TE_DC_GLY	Désherbage chimique avec du glyphosate de tous les intra rangs avec un tracteur enjambeur et un pulvérisateur porté de 400 L

Les impacts environnementaux des scénarios correspondront donc à la somme des impacts de chaque opération mobilisée multipliée par le nombre de passages, à laquelle s'ajouteront les impacts causés par les herbicides mobilisés dans le scénario selon la formule suivante.

$$Impact\ Scénario = \sum_i (Impact\ opération\ i * nombre\ de\ passages\ opération\ i) + Impact\ herbicides$$

Les impacts des opérations prennent ainsi en compte les impacts liés à la fabrication du matériel (tracteur, robot, matériel de désherbage), à la consommation d'énergie (GNR, électricité) et aux émissions liées à la combustion de GNR dans le moteur du tracteur ou des véhicules de transport pour amener les machines sur la parcelle. Les impacts herbicides sont spécifiques à chaque scénario et à ce titre, ne sont pas inclus dans les impacts des opérations de désherbage chimiques (opérations 23 à 26). Ils prennent en compte la fabrication des herbicides et les émissions d'herbicides vers l'eau, l'air et les sols agricoles, spécifiques à chaque scénario car dépendant des conditions et périodes d'application.

2.5.4. Frontières du système étudié

Cette étude est réalisée suivant une approche « du berceau à la tombe », ou « cradle to grave ». Elle prend en compte les étapes suivantes du cycle de vie (lorsqu'applicable) des tracteurs, des outils agricoles, de l'électricité, et du GNR :

- Extraction des matières premières
- Fabrication
- Distribution
- Utilisation et maintenance
- Fin de vie

Les intrants et sortants considérés dans le périmètre sont présentés en Figure 7.

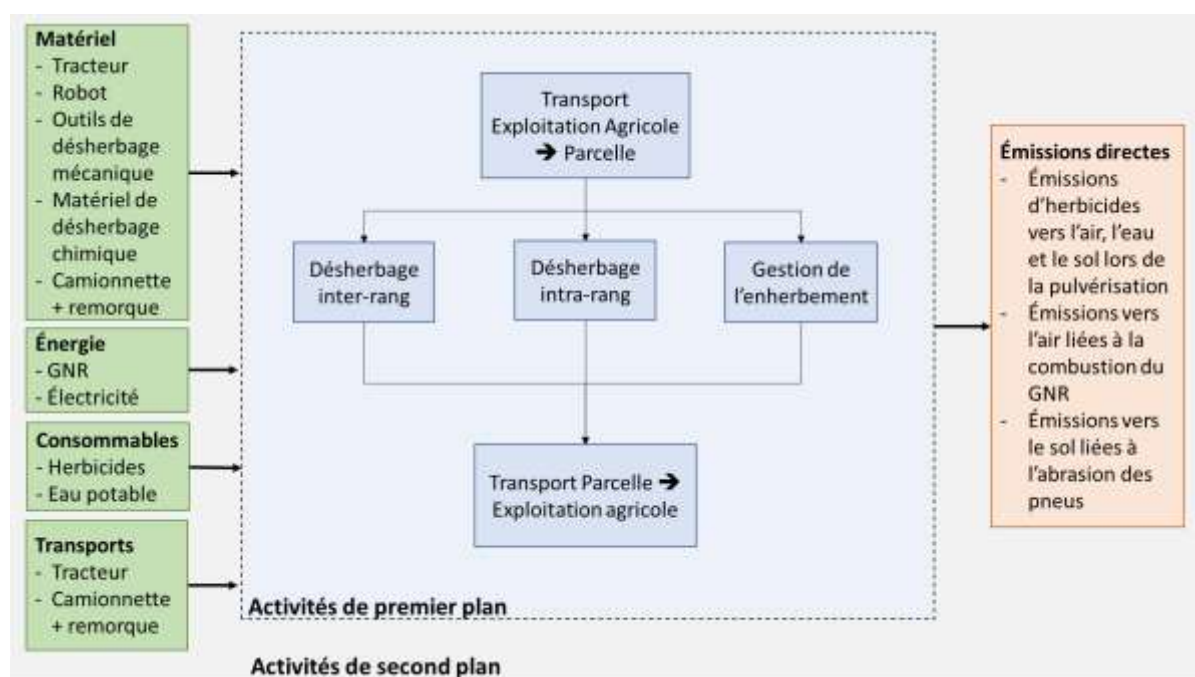


FIGURE 7 : PERIMETRE D'ETUDE

Pour tous les systèmes, les éléments suivants ne sont pas pris en compte :

- Les impacts liés à la production des outils et des infrastructures nécessaires à la fabrication des machines, robots et outils agricoles.
- Les infrastructures et processus liés aux besoins du personnel, tels que le transport des employés, le service de restauration, etc.
- L'entretien, le chauffage et l'éclairage des sites de production.
- Les infrastructures associées à l'utilisation des GPS et réseau GSM (satellite, antennes relais...).

Le Tableau 5 présente les éléments pris en compte pour chaque intrant du système.

TABEAU 5 : ELEMENTS PRIS EN COMPTE POUR CHAQUE INTRANT DU SYSTEME

Intrants	Prise en compte	Commentaires
Robot	Partielle	Ne sont pas pris en compte les infrastructures de production du robot, la distribution, la logistique de la fin de vie, incluant les opérations de séparation des matériaux, en raison du manque de données
Drone	Non	Manque de données Utilisation de moins en moins fréquente, au profit de l'utilisation de la cartographie de la parcelle réalisée lors du semis des vignes
Outils de désherbage	Oui	
Transport robot (incluant camionnette + remorque)	Oui	
Satellite GPS	Non	Non pris en compte dans les études de véhicules autonomes guidés par GPS (Gawron et al., 2018 ; Gawron et al., 2019 ; Pathak et al., 2020) Manque de données
Antenne-relais	Non	Ces antennes assurent le fonctionnement du réseau téléphonique. La quantité de données transmises par ces antennes pour les corrections de position du RTK GPS de ces robots est négligeable devant la quantité de données transmises et reçues pour les appareils de communication. Les impacts de ces antennes alloués aux robots de désherbage seraient négligeables.
Balise de référence RTK réseau Orphéon	Non	Manque de données
Hangar	Non	Ces impacts sont négligeables comparés à ceux des opérations agricoles (Pradel, 2010)
Tracteur	Oui	
Herbicides	Oui	
Eau potable (pour application herbicides)	Oui	
Gazole Non Routier	Oui	
Électricité fonctionnement robots	Oui	

2.6. Hypothèses et limites de l'étude

2.6.1. Pratiques de désherbage évaluées

Cette étude se veut représentative des pratiques de désherbage en viticulture en France métropolitaine, mais n'est en aucun cas exhaustive. Les résultats de cette étude ne peuvent être extrapolés sans précautions à d'autres pratiques d'enherbement et de gestion des adventices, ainsi qu'à d'autres types de culture.

Plusieurs itinéraires de désherbage ont été étudiés au sein de plusieurs bassins viticoles pour rendre compte de la diversité des conditions pédoclimatiques et des pratiques culturales, les résultats de l'étude se veulent le plus représentatif possible des pratiques majoritaires mais ne sont pas exhaustifs.

Les itinéraires de désherbage de chaque bassin viticole sont des itinéraires « moyens » de ces bassins mais sont soumis à une forte variabilité pour chaque parcelle en raison de nombreux paramètres.

Les itinéraires de désherbage dépendent des espèces d'adventices présentes sur les parcelles, des conditions climatiques, du type de sol et de son activité biologique, de la topographie du terrain, de la longueur et de l'écartement des rangs de vigne, de la distance entre les différentes parcelles, de la distance entre les parcelles et le « siège de l'exploitation » (lieu où est rechargé le robot et où sont stockés les machines agricoles, les outils,

le GNR et les herbicides), des méthodes de production (conventionnelle, biologique, raisonnée etc.) ainsi que des préférences individuelles des viticulteurs en termes de gestion de l'enherbement, de méthodes de désherbage, et de tolérance au salissement de la parcelle (taux de présence d'adventices sur la parcelle). Enfin, les conditions météorologiques spécifiques à chaque année conditionnent également les itinéraires de désherbage.

Des précautions doivent alors être prises pour appliquer les résultats de l'étude à une parcelle en particulier.

Les itinéraires de gestion des adventices étudiés sont ceux pratiqués au moment de l'étude (2021), et sont susceptibles de changer dans les années à venir en fonction des changements de restrictions d'utilisation des herbicides, des évolutions technologiques, des connaissances théoriques fournies par la recherche et l'expérimentation de nouvelles pratiques, et de l'évolution du climat.

Les facteurs les plus susceptibles d'affecter les modes de gestion des adventices à court terme sont les changements d'usage et l'évolution technique des robots de désherbage, ainsi que l'évolution des restrictions d'utilisation des herbicides.

2.6.2. Solutions robotisées de désherbage mécanique

Les technologies de désherbage robotisées étant relativement récentes, elles sont susceptibles d'évoluer rapidement. Pour beaucoup de viticulteurs, ces robots sont encore en phase d'intégration dans leurs itinéraires techniques, et leur usage est donc susceptible de changer pour correspondre au mieux aux besoins des viticulteurs.

De plus, certaines solutions robotiques sont encore en phase d'évaluation et les données relatives à la consommation énergétique nécessaire pour le passage des outils (intercep, décavaillonneuse...) ne sont pas forcément connues, y compris par les industriels. Des hypothèses ont donc été faites sur ces données à dire d'expert. De même, il n'existe pas de données à l'heure actuelle sur les impacts associés à la production, à la distribution et à la fin de vie des solutions robotiques modélisées. L'impact de la fabrication des robots est donc uniquement limité aux éléments les constituant (acier...).

2.6.3. Modélisation des herbicides

L'étude est réalisée dans une période de transition des pratiques de désherbage liées aux dernières restrictions d'utilisation du glyphosate, herbicide non-sélectif très couramment utilisé dans de nombreuses cultures, dont la viticulture.

Pour la viticulture, ces restrictions de l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire et de l'alimentation) interdisent l'utilisation du glyphosate entre les rangs de vigne, sauf dans les vignobles où un désherbage mécanique n'est pas réalisable (fortes pentes, sol caillouteux etc.), et réduit la dose maximale autorisée à 450g de glyphosate par hectare traité⁵. Ces restrictions prévoyaient initialement de restreindre l'utilisation du glyphosate à 20% de la surface de la parcelle mais cette restriction a été levée⁶.

Ainsi, pour les scénarios de désherbage chimique de l'intra-rang modélisé dans cette étude (CH1, LR1, LR6 et VL1), nous avons appliqué les dernières restrictions de l'ANSES et limité la dose de glyphosate appliquée à 450 g/ha.

Les scénarios de désherbage « mixte » (désherbage mécanique ou tonte des inter-rangs, désherbage chimique + désherbage mécanique du cavaillon) (CH2, CH3, CH4, LR2, LR3, LR7, LR8, VL2, VL3, VL4) correspondent à des itinéraires de désherbage également compatibles avec les dernières restrictions de l'ANSES.

Les herbicides ont été modélisés par leur molécule active, sans prendre en compte les adjuvants. Les possibles effets « cocktail » dus aux interactions entre substances n'ont pas été considérés par manque de connaissances scientifiques.

⁵ <https://www.anses.fr/fr/content/glyphosate-l%E2%80%99anses-publie-les-r%C3%A9sultats-de-son-%C3%A9valuation-comparative-avec-les-alternatives>

⁶ <https://www.reussir.fr/vigne/glyphosate-la-regle-des-20-de-la-surface-supprimee-en-vigne>

Sur la base des informations obtenues auprès des conseillers viticulture des Chambres d'Agriculture, les deux herbicides les plus couramment utilisés sont le glyphosate et le flazasulfuron. Néanmoins, il était impossible d'évaluer les impacts du flazasulfuron en raison de l'absence de données sur cette substance dans la base de données ecoinvent v3.7.1 utilisée pour l'étude. Du napropamide a été modélisé à la place du flazasulfuron (le napropamide et le flazasulfuron sont deux herbicides de prélevée autorisés en viticulture).

2.7. Impacts pris en considération dans l'analyse des résultats

2.7.1. Choix de la méthode de caractérisation

Deux méthodes classiquement utilisées en ACV ont été choisies pour l'analyse des résultats : la méthode ReCiPe2016⁷ et la méthode CML-IA⁸.

La méthode ReCiPe2016 a été conçue par le RIVM, l'Université de Radboud, l'Université Norvégienne des Sciences et Technologies et PRé Sustainability (Huijbregts et al., 2017). Elle propose 18 indicateurs « midpoint » et 3 indicateurs « endpoint ». Seuls les résultats des indicateurs midpoint seront présentés dans cette étude. Le Tableau 6 présente l'ensemble des indicateurs midpoint de la méthode ReCiPe et le choix des indicateurs présentés dans cette étude.

La méthode CML-IA a été développée par le Center of Environmental Science (CML) de l'Université de Leiden aux Pays Bas (Guinee et al., 2001). La méthode CML-IA propose 11 indicateurs dans la version Baseline. La version « Non Baseline » de la méthode propose également des indicateurs complémentaires. Dans l'étude, seul l'indicateur Abiotic Depletion Potential basé sur les bases de réserves issu de la version « Non Baseline » sera présenté. L'usage de deux indicateurs Abiotic Depletion Potential, l'un basé sur les réserves ultimes et le second sur les bases de réserves, permettra ainsi d'évaluer la sensibilité des scénarios au regard de l'usage des ressources minérales abiotiques. Le Tableau 7 présente l'ensemble des indicateurs de la méthode CML-IA et le choix des indicateurs présentés dans cette étude.

2.7.2. Impacts non modélisés

Les impacts sur la vie du sol générés par le travail du sol et le passage d'engins agricoles, l'érosion des sols, la compaction des sols et les émissions de protoxyde d'azote associées n'ont pas été pris en compte faute de données.

7

http://www.rivm.nl/en/Topics/L/Life_Cycle_Assessment_LCA/Downloads/Documents_ReCiPe2017/Report_ReCiPe_Update_2017

⁸ <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>

TABEAU 6 : INDICATEURS DE LA METHODE ReCiPe2016 UTILISES DANS L'ETUDE

Nom de l'indicateur ACV		Unité	Signification	Choix pour des indicateurs pour la présentation des résultats ACV
CC	Climate Change	kg CO2 eq.	Impact des émissions anthropiques sur le forçage radiatif de l'atmosphère contribuant à augmenter l'effet de serre.	Non : Résultats de même ordre de grandeur que l'indicateur GWP de la méthode CML-IA
FPMF	Fine Particule Matter Formation	kg PM2.5 eq.	Impact des émissions anthropiques sur la formation de particules en suspension dans l'air ambiant qui peuvent, à terme, affecter la santé des êtres vivants.	Oui
FD	Fossil Depletion	kg oil eq.	Impact des activités anthropiques sur les volumes d'extraction des énergies fossiles.	Non : Résultats de même ordre de grandeur que l'indicateur ADP Fossil de la méthode CML-IA
FC	Freshwater consumption	m3	Impact des activités anthropiques sur la consommation en eau douce.	Oui
Feutro	Freshwater Eutrophication	kg P eq.	Impact des émissions contribuant à l'enrichissement des milieux aquatiques (eaux douces) en éléments nutritifs entraînant à terme une dégradation du milieu et une perte de biodiversité.	Non : Résultats de même ordre de grandeur que l'indicateur Feco
Feco	Freshwater ecotoxicity	kg 1.4 DB eq.	Impact des molécules et substances chimiques émises (métaux lourds, polluants organiques, pesticides...) sur les milieux aquatiques (eaux douces)	Oui
Meutro	Marine Eutrophication	kg N eq.	Impact des émissions contribuant à l'enrichissement des milieux aquatiques (eaux marines) en éléments nutritifs entraînant à terme une dégradation du milieu et une perte de biodiversité.	Oui
Meco	Marine ecotoxicity	kg 1.4-DB eq.	Impact des molécules et substances chimiques émises (métaux lourds, polluants organiques, pesticides...) sur les milieux aquatiques (eaux marines)	Non : Résultats de même ordre de grandeur que l'indicateur Feco
HTcancer	Human toxicity, cancer	kg 1.4-DB eq.	Impact des molécules et substances chimiques cancérigènes émises (métaux lourds, polluants organiques, pesticides...) sur la santé de l'homme.	Oui
HTnon cancer	Human toxicity, non cancer	kg 1.4-DB eq.	Impact des molécules et substances chimiques non cancérigènes émises (métaux lourds, polluants organiques, pesticides...) sur la santé de l'homme.	Non Résultats de même ordre de grandeur que l'indicateur Feco
IR	Ionizing radiation	kBq Co-60 eq. to air	Impact des émissions anthropiques sur la présence de radiations ionisantes, elles-mêmes dues à la présence de composés radioactifs.	Oui
LU	Land Use	Annual crop eq.·y	Impact des activités anthropiques sur l'occupation des territoires agricoles et urbains.	Oui

Tableau 6 (suite)

Nom de l'indicateur ACV		Unité	Signification	Choix pour des indicateurs pour la présentation des résultats ACV
MD	Metal Depletion	kg Cu eq.	Impact des activités anthropiques sur l'épuisement des ressources fossiles (Cd, Cr, Ni, Pb, Hg...).	Oui
POF eco	Photochemical Ozone Formation. Ecosystems	kg NOx eq.	Impact des émissions anthropiques sur la création d'ozone troposphérique. Sous l'influence des rayonnements solaires, les polluants atmosphériques (COV, NOx, CO...) vont se transformer en ozone troposphérique (aussi appelé « mauvais ozone ») et autres composés oxydants qui auront des effets néfastes sur les êtres vivants.	Non : Résultats de même ordre de grandeur que l'indicateur SOD
POF HH	Photochemical Ozone Formation. Human Health	kg NOx eq.		Non : Résultats de même ordre de grandeur que l'indicateur SOD
SOD	Stratospheric Ozone Depletion	kg CFC-11 eq.	Impact des émissions anthropiques sur la destruction de la couche d'ozone (ozone stratosphérique)	Oui
TA	Terrestrial Acidification	kg SO2 eq.	Impact des émissions anthropiques sur la destruction de la couche d'ozone (ozone stratosphérique)	Non : Résultats de même ordre de grandeur que l'indicateur Acid de la méthode CML-IA
TE	Terrestrial ecotoxicity	kg 1.4-DB eq.	Impact des molécules et substances chimiques émises (métaux lourds, polluants organiques, pesticides...) sur les milieux terrestres	Non : Résultats de même ordre de grandeur que l'indicateur Eutro de la méthode CML-IA

TABEAU 7 : INDICATEURS DE LA METHODE CML UTILISES DANS L'ETUDE

Nom de l'indicateur ACV		Unité	Signification	Choix pour des indicateurs pour la présentation des résultats ACV
ADP (ER)	Abiotic Depletion Potential (economic reserve)	kg Sb eq.	Quantité totale de ressources minérales consommées basée sur les réserves économiques	Non : Résultats du même ordre de grandeur que ADP (RB)
ADP (RB)	Abiotic Depletion Potential (reserve base)	kg Sb eq.	Quantité totale de ressources minérales consommées basée sur les bases de réserves	Oui
ADP (UR)	Abiotic Depletion Potential (ultimate reserve)	kg Sb eq.	Quantité totale de ressources minérales consommées basée sur les réserves ultimes	Oui
ADP Fossil	Abiotic Depletion Potential fossil resources	MJ	Quantité totale d'énergie non renouvelable consommée	Oui
Acid	Acidification	kg SO2 eq.	Potentiel d'acidification des milieux (sols et eaux de surface) induit par les émissions de substances acidifiantes principalement dans l'air	Oui
Eutro	Eutrophication	kg Phosphate eq.	Potentiel de pollution organique de l'eau induit par l'introduction de nutriments azotés et phosphatés dans les milieux aquatiques, et qui conduit notamment à la prolifération d'algues et à la dégradation de la qualité du milieu aquatique (voire son asphyxie).	Oui
FAETP	Fresh Aquatic Ecotoxicity Potential	kg DCB eq.	Potentiel de toxicité apporté aux milieux aquatiques (eaux douces de surface) par l'émission dans l'environnement de substances toxiques.	Non : Résultats de même ordre de grandeur que l'indicateur HT
MAETP	Marine Aquatic Ecotoxicity Potential	kg DCB eq.	Potentiel de toxicité apporté aux milieux aquatiques (eaux marines) par l'émission dans l'environnement de substances toxiques.	Non : Résultats de même ordre de grandeur que l'indicateur HT
GWP	Global Warming 100 years	kg CO2 eq.	Potentiel de changement climatique induit par les émissions de gaz à effet de serre (GES) sur un horizon temporel de 100 ans.	Oui
HT	Human toxicity	kg DCB eq.	Potentiel de toxicité sur l'homme induit par l'émission dans l'environnement de substances susceptibles de créer des dommages sur la santé. Les effets cancérigènes sont distingués des effets non cancérigènes.	Oui
ODP	Ozone Depletion Potential	kg R11 eq.	Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone dans la stratosphère (> 11 km alt.)	Non : Résultats de même ordre de grandeur que l'indicateur ADP Fossil
TETP	Terrestrial Ecotoxicity Potential	kg DCB eq.	Potentiel de toxicité apporté aux milieux terrestres par l'émission dans l'environnement de substances toxiques.	Oui
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential	kg Ethene eq.	Potentiel de création d'ozone photochimique dans la troposphère (< 11 km alt.) induit par les émissions de substances (COV et NOx) générant ce phénomène.	Oui

3. Inventaire des données

3.1. Hypothèses relatives à la collecte des données d'inventaires

La collecte des données d'inventaire est l'étape la plus importante dans une ACV car elle permet d'alimenter l'inventaire du cycle de vie, de quantifier les flux entrants et sortants du système et de préparer l'étape de caractérisation des impacts. Dans le cadre de notre étude, trois grands types de données ont été collectées :

- Des données issues de la littérature et des bases de données ecoinvent,
- Des données fournies par les industriels développant les solutions robotiques évaluées (composition robot, consommation énergétique),
- Des données fournies par les conseillers des Chambres d'agriculture (type de matériel, consommations énergétiques).

Les données relatives à l'usage des herbicides sont présentées dans le paragraphe 3.2. Les données relatives aux opérations de désherbage et au transport sont présentées respectivement dans les paragraphes 3.3 et 3.4.

3.2. Données relatives à l'usage des herbicides

D'après les entretiens avec les conseillers viticulture des Chambres d'Agriculture, les deux herbicides les plus couramment utilisés en viticulture sont le glyphosate et le flazasulfuron. Le glyphosate est un herbicide de post levée, il élimine les adventices sorties de terre présentes sur la parcelle. Le flazasulfuron est un herbicide de prélevée qui agit sur les adventices encore enfouies sous le sol, empêchant leur levée.

La base de données ecoinvent ne dispose d'aucune donnée concernant le flazasulfuron, il est donc impossible de modéliser cette substance. Le napropamide est un autre herbicide de prélevée autorisé en viticulture. Ecoinvent disposant de données sur le napropamide, cette substance est modélisée à la place du flazasulfuron.

3.2.1. Scénarios mobilisant des herbicides

Seuls 14 scénarios appliquent des herbicides dans l'intra-rang. Le détail de la modélisation des herbicides dans ces scénarios est présenté dans le Tableau 8.

TABEAU 8 : DETAIL DE LA MODELISATION DES HERBICIDES DANS LES SCENARIOS

Scenario	Herbicide pulvérisé	Nombre de passage
CH1	Glyphosate	2
	Glyphosate + napropamide	1
CH2	Glyphosate + napropamide	1
CH3	Glyphosate + napropamide	1
CH4	Glyphosate + napropamide	1
LR1	Glyphosate	1
	Glyphosate + napropamide	1
LR2	Glyphosate + napropamide	1
LR3	Glyphosate + napropamide	1
LR6	Glyphosate	1
	Glyphosate + napropamide	1
LR7	Glyphosate + napropamide	1
LR8	Glyphosate + napropamide	1
VL1	Glyphosate	1
	Glyphosate + napropamide	1
VL2	Glyphosate	1
	Glyphosate + napropamide	1
VL3	Glyphosate + napropamide	1
VL4	Glyphosate + napropamide	1

3.2.2. Quantité de matière active d'herbicide appliquée

La quantité d'herbicide appliquée par hectare (en grammes de matière active) pour chaque opération de désherbage chimique dépend de l'herbicide utilisé. Pour le glyphosate, il est fait l'hypothèse d'une application de 450 grammes de matière active par hectare de surface traitée par opération de désherbage chimique au glyphosate. Cette dose correspond au seuil en dessous duquel le glyphosate n'est plus efficace⁹.

Depuis fin 2020, la dose maximale annuelle par hectare de surface traitée est de 450 g de glyphosate, ce qui n'autorise par conséquent qu'une seule application de glyphosate par an. La concentration de glyphosate étant de 450 g/L, le volume de glyphosate utilisé est donc de 1 L/ha.

Pour le napropamide, la dose maximale autorisée est de 4 050 g de matière active par hectare de surface traitée par an¹⁰. Étant donné qu'une seule application annuelle est autorisée, il a été fait l'hypothèse que la dose maximale annuelle autorisée est appliquée en un passage. La concentration de napropamide étant de 450 g/L, le volume de napropamide utilisé est donc de 9 L/ha.

La quantité de matière active d'herbicide pulvérisée dépend également de la surface traitée. Dans le cas de notre étude, seul le cavaillon (intra rang) est traité. On considère que le cavaillon représente 1/3 de la surface de l'hectare (Agriculture innovante ; 2019). La quantité de matière active pouvant être appliquée correspond à la quantité maximale de matière active homologuée multipliée par la part de surface traitée¹¹.

Ainsi le calcul de la quantité d'herbicide appliquée est le suivant.

$$\begin{aligned} \text{Quantité de matière active d'herbicide appliquée}[g] \\ &= \text{Quantité de matière active par hectare de surface traitée}[g] \\ &\quad * \text{Part surface traitée}[1/3] \end{aligned}$$

3.2.3. Volume d'eau utilisé pour la bouillie

Le volume de bouillie pulvérisé par hectare dépend du type d'herbicide utilisé. Pour les herbicides de prélevée (napropamide), il est recommandé d'appliquer l'herbicide avec un volume de bouillie de 300 à 400 L/ha¹⁰. Pour un herbicide de post levée systémique (glyphosate), le volume recommandé est de 100 à 200 L/ha^{10,12}. Pour appliquer simultanément un herbicide de prélevée et un herbicide de post levée, une valeur moyenne a été utilisée.

Dans la pratique, le volume de bouillie dépend de beaucoup de paramètres, tel que la vitesse du tracteur, le débit d'application, la pression des buses, l'écartement des rangs, l'herbicide utilisé etc. Par souci de simplification, les volumes de bouillie moyens ont été définis en fonction des herbicides appliqués.

Pour les opérations d'application de glyphosate, un volume de bouillie de 150 L/ha est considéré. Pour les opérations d'application simultanée de glyphosate et de napropamide, un volume de bouillie de 250 L/ha est considéré.

Ainsi le calcul du volume d'eau utilisée pour la bouillie est le suivant.

$$\begin{aligned} \text{Volume d'eau utilisée pour la bouillie}[L] \\ &= (\text{Volume de bouillie par hectare de surface traitée}[L/ha] \\ &\quad - \text{Volume d'herbicide}[L/ha]) * \text{Part surface traitée}[1/3] \end{aligned}$$

⁹ <https://www.bayer-agri.fr/produits/fiche/1325/>

¹⁰ <https://ephy.anses.fr/ppp/devrinol-f>

¹¹ https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Pays_de_la_Loire/022_Inst-Pays-de-la-loire/RUBR-RD-innovation/Productions-vegetales/2021_ATV49_TECH_SOL_desherbage_chimique.pdf

¹² <https://www.bayer-agri.fr/produits/fiche/1325/>

3.2.4. Emissions des herbicides dans l'environnement

Les émissions d'herbicides dans l'environnement ont été calculées à l'aide de l'outil en ligne OLCA-Pest¹³. OLCA-Pest permet d'évaluer les quantités de matières actives d'herbicides émises dans l'air (« Air »), le sol de la parcelle (« Field soil »), la surface des feuilles des cultures (« Field crop leaf surface »), les feuilles des cultures (« Field crop leaf (via leaf uptake) »), l'eau souterraine (« Groundwater »), les surfaces en dehors de la parcelle traitée (« Off-field surfaces »), ainsi que le sol de la parcelle et les cultures (« Field soil and crop (via degradation) »).

L'outil ACV GaBi ne permettant de modéliser uniquement les compartiments d'émissions dans les sols agricoles (« Agricultural soil »), les sols industriels (« Industrial soil »), l'eau douce (« Fresh water »), l'eau de mer (« Sea Water ») et l'air (« Air »), les résultats d'inventaires d'émissions OLCA-Pest ont dû être adaptés pour pouvoir être modélisés dans GaBi (Tableau 9).

TABEAU 9 : CORRESPONDANCE ENTRE LES COMPARTIMENTS D'OLCA-PEST ET CEUX DE GABI

Compartiment émissions OLCA-Pest	Compartiment émissions GaBi
Air	Air
Field soil	Agricultural soil
Field soil and crop (via degradation)	
Off-field surface*0,99	
Groundwater	Fresh water
Off-field surface*0,01	
/	Sea Water

Les surfaces en dehors de la parcelle traitée sont réparties entre sol agricole et eau douce. Les rivières et les lacs représentent 1% de la surface de la France métropolitaine¹⁴, c'est pourquoi il a été décidé que 1% des herbicides présents en dehors de la parcelle traitée se retrouvent dans l'eau douce. Les parcelles agricoles étant souvent entourées d'autres parcelles agricoles, il a été décidé de considérer les surfaces en dehors de la parcelle traitée, non recouvertes d'eau douce, comme du sol agricole. Par manque de données et de méthodes de calcul permettant de quantifier les émissions vers les eaux marines, les impacts des herbicides directement émis vers l'eau de mer (sans passer par les cours d'eau douce ou les eaux souterraines) ne sont pas pris en compte.

Les paramètres utilisés pour la modélisation des émissions avec OLCA-Pest sont présentées en Annexe 1. La plupart de ces paramètres sont fixes pour toutes les applications d'herbicides considérés dans les différents scénarios, mais la substance appliquée, le climat, le mois d'application et le travail du sol varient en fonction de l'opération de désherbage chimique considérée et du scénario qui la mobilise.

¹³ <https://pestlciweb.man.dtu.dk/>

¹⁴ <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/lucas>

3.2.5. Synthèse des données par scénarios

Le Tableau 10 récapitule l'ensemble des données utilisées pour la modélisation des scénarios.

TABLEAU 10 : SYNTHÈSE DES DONNÉES UTILISÉES POUR LA MODÉLISATION DES HERBICIDES

Scénarios	Herbicide	Quantité de matière active (g)	Volume d'eau (L)	Emissions (g)		
				Air	Agricultural soil	Freshwater
CH1	Glyphosate	450	179,34	6,75	443,26	0,071
	Napropamide	1350		20,25	1327,94	1,739
CH2	Glyphosate	150	80	2,25	147,75	0,019
	Napropamide	1350		20,25	1329,29	0,886
CH3	Glyphosate	150	80	2,25	147,75	0,019
	Napropamide	1350		20,25	1329,29	0,886
CH4	Glyphosate	150	80	2,25	147,75	0,019
	Napropamide	1350		20,25	1329,29	0,886
LR1	Glyphosate	300	129,67	4,50	295,56	0,042
	Napropamide	1350		20,25	1328,12	1,806
LR2	Glyphosate	150	80	2,25	147,70	0,019
	Napropamide	1350		20,25	1329,47	0,919
LR3	Glyphosate	150	80	2,25	147,70	0,019
	Napropamide	1350		20,25	1329,47	0,919
LR6	Glyphosate	300	129,67	4,50	295,56	0,042
	Napropamide	1350		20,25	1328,12	1,806
LR7	Glyphosate	150	80	2,25	147,70	0,019
	Napropamide	1350		20,25	1329,47	0,919
LR8	Glyphosate	150	80	2,25	147,70	0,019
	Napropamide	1350		20,25	1329,47	0,919
VL1	Glyphosate	300	129,67	4,50	295,50	0,046
	Napropamide	1350		20,25	1327,58	1,766
VL2	Glyphosate	300	129,67	2,25	147,79	0,019
	Napropamide	1350		20,25	1328,93	0,905
VL3	Glyphosate	150	80	2,25	147,79	0,019
	Napropamide	1350		20,25	1328,93	0,905
VL4	Glyphosate	150	80	2,25	147,79	0,019
	Napropamide	1350		20,25	1328,93	0,905

3.3. Données relatives aux opérations de désherbage (hors herbicides)

Les opérations de désherbage sont modélisées à partir des données relatives aux tracteurs (classique ou enjambeur), aux robots agricoles, aux outils de travail du sol ou de tonte, ainsi qu'aux consommations énergétiques nécessaires pour leur fonctionnement (GNR pour les tracteurs, électricité pour les robots). Les flux entrants et sortants sont présentés dans le Tableau 11.

TABEAU 11 : FLUX ENTRANTS ET SORTANTS POUR UNE OPERATION DE DESHERBAGE (HORS HERBICIDES)

Élément mobilisé	Machine agricole	Outil de désherbage	Énergie	
Flux entrants	Quantité de machine (kg)	Quantité d'outil (kg)	GNR (L)	Electricité (kWh)
Flux sortants	Émissions de métaux lourds associés à l'abrasion des pneus (g)		Émissions associées à la combustion du GNR (g)	

3.3.1. Données relatives aux machines agricoles (tracteur et robot)

Le terme « machine agricole » est utilisé ici pour désigner un robot ou un tracteur. Lorsque les outils sont intégrés à la machine et non dissociables, ils sont considérés comme faisant partie intégrante de la machine. Les outils attelés ne sont pas considérés comme faisant partie de la machine et sont présentés dans le paragraphe 3.3.2.

3.3.1.1. Composition des machines

Les données sur la composition des tracteurs sont issues de la base de données ecoinvent v3.7.1, seule base de données que nous avons de disponible dans le logiciel ACV GaBi utilisé pour modéliser les scénarios. Les données sur la composition détaillée du robot TED nous a été fournie par NAïO Technologies. Pour des raisons de confidentialité des données, nous ne les présenterons pas dans ce rapport.

3.3.1.2. Quantité de machines utilisée pour les opérations de désherbage

La machine agricole n'étant pas utilisée uniquement pour l'opération étudiée (le désherbage dans notre cas), une allocation est effectuée sur la base de son poids, de sa durée de vie et de son utilisation pour l'opération considérée. Les modalités de calcul des allocations du matériel agricole sont basées sur le rapport Ecoinvent n°15 (Nemecek and Kägi, 2007). La quantité de machine agricole utilisée pour le procédé étudié est donc calculée selon la formule suivante :

$$\text{Quantité de machine}[kg/UF] = \text{Masse machine}[kg] * \frac{\text{Durée d'utilisation pour l'opération}[h]}{\text{Durée de vie de la machine}[h/UF]}$$

La durée de vie de la machine est exprimée en heures de fonctionnement. Les durées de stockage et leur impact éventuel sur la durée de vie des machines ne sont pas pris en compte.

Masse et durée de vie des machines :

Une machine agricole nécessitant d'être entretenue et réparée régulièrement sur son cycle de vie, un facteur de "réparation" est utilisé pour prendre en compte le remplacement des pièces usagées. Ces facteurs sont issus du rapport Ecoinvent n°15 (2007) pour le tracteur et fournies par NAïO Technologies pour le robot TED.

Un facteur de 0.20 est utilisé pour le tracteur, ce qui signifie que 20% des pièces initiales sont remplacés sur l'ensemble de la durée de vie du matériel. La masse totale de machine considérée comprend la masse initiale multipliée par son facteur de réparation selon la formule suivante :

$$\text{Masse machine}[kg] = \text{Masse nominale machine}[kg] * (1 + \text{Facteur de réparation}[-])$$

La masse et la durée de vie des machines agricoles sont synthétisées dans le Tableau 12.

TABEAU 12 : MASSE ET DUREE DE VIE DES MACHINES AGRICOLES

Matériel agricole modélisé	Caractéristiques	Masse (kg)	Facteur de réparation	Masse incluant le facteur de réparation (kg)	Durée de vie (h)
Tracteur 30 kW	BCS Valiant 500 AR	1375	0,2	1650	7200
Tracteur 50 kW	Kubota M7040 DTHQ	3000	0,2	3600	7200
Tracteur enjambeur		2300	0,2	2760	7200
Robot TED ¹⁵	-	-	-	2069	2400 - 7200

La durée de vie des solutions robotisées est sujette à évolution. Les technologies étant encore émergentes, ces durées de vie sont des projections basées sur différentes hypothèses comme le temps de cycle moyen de développement de nouvelles solutions robotiques. Elle devrait évoluer avec la maturité des produits. Pour cette étude, nous avons adopté une démarche conservatrice en choisissant la borne basse de l'estimation actuelle de la durée de vie du robot TED (2 400 heures). Une analyse de sensibilité a été conduite pour évaluer les impacts environnementaux en considérant des durées de vie moyennes, équivalentes aux tracteurs ou supérieure aux tracteurs. La composition du robot TED a été évaluée à partir des données constructeurs en incluant un facteur de réparation compris entre 0.02 et 0.25 selon les composants. L'ensemble des composants est alloué à 100% au robot hormis la batterie Li-ion qui est allouée au prorata de sa durée de vie par rapport à celle du robot (50% pour une durée de vie du robot de 2 400 heures, 100% pour une durée de vie de 4 800 heures). Cette attribution proratisée est réalisée car Naïo dispose d'un programme de gestion des batteries de seconde main et exploite les batteries sur l'ensemble de leur durée de vie.

Durée d'utilisation pour l'opération de désherbage :

La durée d'utilisation pour l'opération prend en compte la durée du travail de désherbage dans la parcelle pour le tracteur et le robot. Les parcelles ne sont pas toujours à proximité immédiate du siège de l'exploitation où sont stationnés les tracteurs et les robots, et où sont stockés le GNR et les herbicides. Un certain temps de trajet est donc nécessaire pour acheminer le tracteur ou le robot de son hangar à la parcelle à désherber, ainsi que pour recharger la batterie ou faire le plein de GNR ou d'herbicide.

Lorsque la parcelle n'est pas à proximité immédiate du hangar, le robot est transporté dans une remorque tractée par une voiture ou une camionnette. Le robot n'étant pas utilisé pendant ces temps de trajet, sa durée d'utilisation prend uniquement en compte la durée du travail dans la parcelle pour effectuer l'opération.

$$Durée\ d'utilisation\ robot\ pour\ l'opération[h] = Durée\ de\ travail[h]$$

Le tracteur roule lui-même pour assurer les trajets entre le hangar et la parcelle. La durée de ces trajets est prise en compte dans sa durée d'utilisation.

$$Durée\ d'utilisation\ tracteur\ pour\ l'opération[h] = Durée\ de\ travail[h] + Durée\ trajets[h]$$

La durée des trajets est définie de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 &Durée\ trajets[h] \\
 &= Nombre\ de\ recharges[-] * Distance\ au\ siège\ de\ l'exploitation[km] * 2 \\
 & * Vitesse\ sur\ route[km/h]
 \end{aligned}$$

¹⁵ Pour des raisons de confidentialité, seules la masse avec le facteur de réparation et la plage de durée de vie possibles pour le robot sont données. La masse présentée dans ce tableau correspond à la durée de vie minimale de 2 400 heures.

La distance entre la parcelle agricole et le siège de l'exploitation est fixée à 4 km et la vitesse de tracteurs sur route à 40 km/h pour tous les scénarios. Suivant la machine utilisée et l'opération effectuée, ce ne sont pas les mêmes paramètres qui vont définir la nécessité de retourner au siège de l'exploitation agricole pour recharger un consommable. Pour un robot effectuant un désherbage mécanique, c'est la nécessité de recharger la batterie qui détermine le nombre de retours au siège de l'exploitation. Pour un tracteur effectuant un désherbage mécanique, c'est la nécessité de faire un plein de GNR. Pour un tracteur réalisant un désherbage chimique, le tracteur pourrait être amené à retourner à l'exploitation soit pour faire le plein de GNR, soit pour remplir la cuve d'herbicides. Dans la pratique, la cuve d'herbicides se vide bien plus vite que la réserve de GNR, c'est donc la nécessité de recharger la cuve d'herbicide qui détermine le nombre de retours nécessaires.

Le nombre de recharge a été calculé à partir des formules suivantes :

$$\text{Nombre de recharges robot}[-] = \frac{\text{Consommation électricité par hectare} \left[\frac{kWh}{ha} \right]}{\text{Capacité batterie} [kWh]} \cdot \text{Surface traitée} [ha]$$

Les valeurs de la capacité de stockage de la batterie des robots ont été fournies par le constructeur. Elles ne sont pas mentionnées ici pour des raisons de confidentialité.

$$\begin{aligned} \text{Nombre de recharges tracteur désherbage mécanique}[-] \\ = \frac{\text{Consommation carburant par hectare} \left[\frac{L}{ha} \right]}{\text{Volume réservoir carburant} [L]} \cdot \text{Surface traitée} [ha] \end{aligned}$$

Les valeurs de volume des réservoirs à GNR des tracteurs sont celles mentionnées dans les fiches de test tracteur d'Agroscope (centre de compétences de la Confédération [suisse] dans le domaine de la recherche agronomique et agroalimentaire) des modèles de tracteurs dont la puissance est la plus proche des tracteurs modélisés¹⁶. Elles sont de 41 litres pour le tracteur 30 kW et de 90 litres pour les tracteurs 50 kW et l'enjambeur.

$$\begin{aligned} \text{Nombre de recharges tracteur désherbage chimique}[-] \\ = \frac{\text{Volume de bouillie pulvérisée par hectare} [L]}{\text{Volume cuve herbicide} [L]} \end{aligned}$$

Le volume de la cuve à herbicide est fixé à 400 L pour toutes les opérations de désherbage chimique. Cette valeur a été choisie pour être cohérente avec la donnée « pulvérisateur porté, 400 L » du rapport méthodologique Agribalyse®. Cette valeur est également cohérente avec les informations fournies par les différents viticulteurs et conseillers viticulture des Chambres d'Agriculture contactés.

3.3.2. Données relatives aux outils de désherbage intra-rang et inter-rang

La même méthode d'allocation que pour les machines agricoles est utilisée pour les outils de désherbage de l'intra-rang et de l'inter-rang. La composition des outils de désherbage est issue des données ecoinvent v3.7.1. Un facteur de réparation de 0,45 est utilisé pour les outils de travail du sol (cf. rapport ecoinvent n°15) tandis qu'un facteur de réparation de 0,32 est utilisé pour le pulvérisateur porté.

A la différence des tracteurs, l'outil de désherbage n'est utilisé que lors des passages dans les rangs, la durée d'utilisation totale est donc équivalente à celle de l'usage dans la parcelle, aucune durée liée au transport n'est considérée.

Masse et durée de vie des outils de désherbage :

Les masses des cadres de désherbage sont adaptées aux largeurs de travail considérées, en divisant la valeur de masse donnée dans le rapport méthodologique Agribalyse® par la largeur de travail de l'outil spécifié dans le

¹⁶ <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/publications/recherche-publications/test-tracteurs.html>

rapport méthodologique Agribalyse® (Asselin-Balençon et al., 2021). Est ainsi obtenue une valeur correspondant à la masse de l'outil par mètre de largeur de travail, multipliée par les largeurs de travail spécifiques à nos scénarios pour obtenir la masse de l'outil.

Le Tableau 13 reprend les valeurs de masse et de durée de vie définies pour les différents outils. Lorsqu'applicable, la masse indiquée correspond à la paire d'outils.

TABLEAU 13 : MASSE ET DUREE DE VIE DES OUTILS DE DESHERBAGE

Outil modélisé	Masse (kg)	Facteur de réparation	Masse incluant le facteur de réparation (kg)	Durée de vie (h)	Source des données
Pulvérisateur porté 400L	200	0,32	264	3000	Agribalyse v3
Bineuse à doigts Kress	106	0,45	153,7	1500	Masse : données constructeurs ¹⁷ DV : même valeur que les lames intercep
Décavailleuse	44	0,45	63,8	2300	Masse : Catalogue produits Braun 2019 ¹⁸ DV : Agribalyse v3
Disques crénelés	20	0,45	29	1500	Masse : Chambre d'Agriculture de Champagne, Fiche outil de travail du sol Boisselet – Disque crénelé ¹⁹ DV : même valeur que les lames intercep
Disques émotteurs	60	0,45	87	1500	Masse : Chambre d'Agriculture de Champagne, Fiche outil de travail du sol ALM – Disques émotteurs ²⁰ DV : même valeur que les lames intercep
Lames intercep	80	0,45	116	1500	Agribalyse v3
Cadre de désherbage inter-rang avec dents ou socs Charente	550	0,45	797,5	1500	Agribalyse v3
Cadre de désherbage inter-rang avec dents ou socs Languedoc-Roussillon	440	0,45	638	1500	Agribalyse v3
Cadre de désherbage inter-rang avec disques Languedoc-Roussillon	440	0,45	638	1500	Agribalyse v3
Gyrobroyeur Charente (tracteur)	368	0,45	533,6	700	Agribalyse v3
Gyrobroyeur Charente (TED), Val de Loire	177	0,45	256,7	700	Agribalyse v3

¹⁷ <https://www.kult-kress.de/fr/produkte/fingerhacke-weinbau.php>

¹⁸ <https://braun-maschinenbau.info/wp-content/uploads/PK-2019-frz-WEB.pdf>

¹⁹ <https://vignoble-champenois.chambres-agriculture.fr/ameliorer-ses-performances/entretien-du-sol/outils-de-travail-du-sol/intercep-a-disque-a-doigts/disque-crenele-boisselet/>

²⁰ <https://vignoble-champenois.chambres-agriculture.fr/ameliorer-ses-performances/entretien-du-sol/outils-de-travail-du-sol/intercep-a-disque-a-doigts/disques-emoisseurs-alm/>

3.3.3. Données relatives à la consommation d'énergie

Les quantités de GNR et d'électricité consommées permettent de calculer les impacts engendrés par la production du GNR ou de l'électricité nécessaires à la réalisation de l'opération. La quantité de GNR consommée permet également de déterminer les quantités d'éléments émis dans l'air lors de sa combustion.

3.3.3.1. Données nécessaires aux calculs des consommations d'énergie

Méthode de calcul de la durée d'une opération de désherbage :

Afin de calculer les consommations de GNR et d'électricité, il est nécessaire de calculer la durée de chaque opération de désherbage. Cette durée peut être découpée entre la durée de l'opération dans le rang et dans les virages.

$$\text{Durée de travail}[h] = \text{Durée rangs}[h] + \text{Durée virages}[h]$$

La durée d'une opération dans le rang est fonction de la vitesse d'avancement des machines agricoles et de la longueur des rangs.

$$\text{Durée rangs}[h] = \frac{\text{Longueur de rang par hectare}[km]}{\text{Vitesse d'avancement}[km/h]}$$

La longueur des rangs est calculée de la manière suivante :

$$\text{Longueur de rang par hectare}[m] = \text{Nombre de rangs par hectare}[-] * \text{Longueur des rangs}[m]$$

(Passage tous les rangs)

$$\text{Longueur de rang par hectare}[m] = \frac{\text{Nombre de rangs par hectare}[-]}{2} * \text{Longueur des rangs}[m]$$

(Passage un rang sur deux)

Le nombre de rang par hectare est lui dépendant de la largeur de la parcelle, fixée à 100 m et de la largeur entre les rangs (cf. Tableau 1).

$$\text{Nombre de rangs par hectare}[-] = \frac{\text{Largeur parcelle}[m]}{\text{Ecartement entre les rangs}[m]}$$

La durée des opérations dans les zones de virage est fonction du nombre de virages, elle-même dépendante du nombre de rangs :

$$\text{Durée virages}[h] = \frac{\text{Nombre de virages par hectare}[-] * \text{Durée d'un virage}[s]}{3600}$$

$$\text{Nombre de virages par hectare}[-] = \text{Nombre de rangs par hectare}[-] - 1$$

Données sur les vitesses d'avancement des tracteurs et des robots :

Le Tableau 14 présente les vitesses d'avancement considérées pour un tracteur et le robot TED en fonction des outils utilisés.

TABEAU 14 : VALEURS ET SOURCES DES DONNEES DE VITESSE D'AVANCEMENT DES OPERATIONS POUR LES TRACTEURS ET LE ROBOT TED

Opération	Vitesse d'avancement (km/h)	Source de la donnée ou justification de l'hypothèse
Tracteurs		
Désherbage chimique	5,25	Valeur moyenne basée sur les recommandations de : https://www.vignevin-occitanie.com/outils-en-ligne/reglages-du-pulverisateur/
Bineuse à doigts Kress	7	L'entretien du sol IFV Occitanie
Décavaillonneuse	2,5	L'entretien du sol IFV Occitanie
Disques crénelés	6	"Désherbage mécanique de la vigne Choisir ses outils intercep" - Cuma Occitanie
Disques émotteurs	6	"Désherbage mécanique de la vigne Choisir ses outils intercep" - Cuma Occitanie
Lames intercep	4,5	L'entretien du sol IFV Occitanie
Cadre de désherbage inter-rang avec dents, disques ou socs	5,5	L'entretien du sol IFV Occitanie
Gyrobroyeur	5,5	L'entretien du sol IFV Occitanie
Passage combiné (travail de l'inter-rang et de l'intra-rang dans un même passage)	3,5	L'entretien du sol IFV Occitanie
Robot TED		
Bineuse à doigts Kress	5	Naïo Technologies
Décavaillonneuse	2	Estimée inférieure à la vitesse d'avancement d'un passage d'intercep
Disques crénelés	5	Naïo Technologies
Disques émotteurs	5	Même vitesse d'avancement que les disques émotteurs en raison de la similitude des outils.
Lames intercep	2,5	Naïo Technologies
Gyrobroyeur	5	D'après L'entretien du sol IFV Occitanie, la vitesse de travail idéale pour un passage de gyrobroyeur est comprise entre 5 et 6 km/h. La vitesse d'avancement maximale de TED étant de 5 km/h, cette valeur maximale de vitesse d'avancement est prise en compte.
Passage combiné (travail de l'inter-rang et de l'intra-rang dans un même passage)	3,5	Estimée égale la vitesse d'avancement d'un passage combiné avec un tracteur

3.3.3.2. Données relatives à la consommation de GNR

Méthode de calcul :

Les consommations de GNR pour une opération sur un hectare sont calculées de la manière suivante pour les tracteurs :

$$\text{Consommation GNR}[L] = \text{Consommation GNR par heure}[L/h] * \text{Durée de travail}[h] + \text{Consommation GNR à vide}[L/km] * \text{Distance au siège de l'exploitation}[km]^2$$

Données de consommation de GNR :

Le Tableau 15 présente les valeurs de consommation horaire de GNR pour le passage des différents outils de désherbage étudiés avec un tracteur.

TABEAU 15 : VALEURS ET SOURCE DES DONNEES DE LA CONSOMMATION DE GNR PAR HEURE D'OPERATION

Opération	Consommation de GNR (L/h)	Source de la donnée ou justification de l'hypothèse
Désherbage chimique	3,91	Agribalyse v3
Bineuse à doigts Kress	8	Aucune donnée de consommation de GNR liée à l'utilisation de l'outil n'a pu être trouvée. D'après les informations fournies par NAÏO Technologie, pour un robot TED la consommation électrique d'un passage de bineuse à doigts Kress est légèrement plus élevée que la consommation d'un passage de disques crénelés. La consommation de GNR d'une bineuse à doigts Kress avec un tracteur a donc été estimée légèrement à la hausse par rapport à la consommation de GNR d'un passage de disques crénelés
Décavaillonneuse	15	Agribalyse v3
Disques crénelés	7,27	Calculé à partir de la consommation par hectare fournie par le domaine Hennessy, et de la durée de travail de l'opération (voir formules)
Disques émotteurs	7,27	Même valeur que les disques crénelés de par la similitude des deux outils.
Lames intercep	13,94	Agribalyse v3
Cadre de désherbage inter-rang avec dents ou socs Charente	11,275	Largeur de travail adaptée d'Agribalyse v3
Cadre de désherbage inter-rang avec dents, disques ou socs Languedoc-Roussillon	9,02	Largeur de travail adaptée d'Agribalyse v3
Gyrobroyeur Charente	5,78	Largeur de travail adaptée d'Agribalyse v3
Gyrobroyeur Val de Loire	2,77	Largeur de travail adaptée d'Agribalyse v3
Passage combiné (travail de l'inter-rang et de l'intra-rang dans un même passage)	Valeur maximale entre la consommation de GNR du passage de l'outil inter-rang et du passage de l'outil intra-rang	L'entretien du sol IFV Occitanie

Pour estimer la consommation de GNR liée aux trajets de recharge de GNR ou d'herbicide, la consommation à vide d'un tracteur est estimée à 0,45 L/km d'après Vigier et al. (2012).

3.3.3.3. Données relatives à la consommation d'électricité

Méthode de calcul :

Les consommations d'électricité pour une opération sur un hectare sont calculées de la manière suivante pour le robot TED :

$$\text{Consommation électricité}[kWh] = \text{Consommation électricité par heure}[kW] * \text{Durée de travail}[h]$$

Les valeurs de consommation d'électricité par heure sont propres à l'outil utilisé par le robot. Pour les passages combinés du robot TED (gyrobroyeur dans l'inter-rang + désherbage mécanique dans l'intra-rang), la consommation électrique par heure correspond à la somme de la consommation électrique engendrée par le passage de l'outil de désherbage du cavaillon et de la consommation électrique du moteur du gyrobroyeur.

$$\begin{aligned} & \text{Consommation électricité par heure opération combinée}[kW] \\ &= \text{Consommation électricité par heure passage outil intrarang}[kW] \\ &+ \text{Consommation électrique par heure moteur gyrobroyeur}[kW] \end{aligned}$$

Données de consommation d'électricité par le robot TED :

Les valeurs de consommation électrique pour les opérations du robot TED ne sont pas présentées dans ce rapport pour des raisons de confidentialité des données. Les données ont été fournies par NAÏO technologies.

La valeur de la consommation électrique horaire d'un passage de lames intercep avec TED a été obtenue en divisant la capacité de stockage de la batterie par l'autonomie du robot TED réalisant une opération de désherbage de lame intercep. Les valeurs de consommation électrique des passages de disques émotteurs, disques crénelés, décavillonneuse et bineuse à doigts Kress par un robot TED sont moins précises que celle des lames intercep. Il a été observé par le constructeur une autonomie moins importante du robot TED utilisant ces outils par rapport à un passage avec des lames intercep. Il nous a donc été fourni un ordre de grandeur de l'augmentation de consommation électrique par rapport à un passage de lames intercep sur la base de ces observations.

Les valeurs de consommation électrique horaire d'un passage de tonte réalisé par TED ont été calculées en additionnant la puissance hypothétique des moteurs qui seront utilisés pour faire tourner le(s) gyrobroyeur(s) à la puissance nécessaire pour faire rouler le robot TED, en prenant comme hypothèse que cette puissance électrique est égale à la moitié de la puissance nécessaire pour réaliser un passage de lames intercep.

3.3.4. Émissions de substances dans l'air par la combustion de GNR

La combustion de GNR émet des substances dans l'air. Les substances émises sont données dans le rapport ecoinvent n°15. Pour la plupart de ces substances, la quantité émise est directement proportionnelle à la quantité de GNR consommée. Les quantités émises pour ces substances sont calculées de la manière suivante :

Quantité de substance émise[g]

$$= \text{Consommation GNR}[L] * \text{Masse volumique GNR}[kg/L] * \text{Facteur d'émission}[g/kg]$$

La masse volumique du GNR est fixée à 0,84 kg/L. Les valeurs des facteurs d'émission pour le GNR sont adaptées des émissions pour le diesel du rapport ecoinvent n°15 car similaires à celles du GNR utilisé par les tracteurs²¹. Elles sont présentées dans le Tableau 16.

TABLEAU 16 : EMISSIONS PAR KG DE GNR CONSOMME

Tab. 7.1 Emission factors for air emissions from fuel combustion (SAEFL 2000).

Substance	Formula	Emission factor [g / kg fuel consumption]		Significance / remarks
		Diesel	Petrol	
Carbon dioxide	CO ₂	3.12E+03	3.00E+03	Global warming
Sulphur dioxide	SO ₂	1.01E+00	7.20E-02	Photochemical oxidation, acidification
Lead	Pb	0	1.46E-01	Terrestrial ecotoxicity
Methane	CH ₄	1.29E-01	2.92E+00	Global warming
Benzene	C ₆ H ₆	7.30E-03	9.48E+00	Human toxicity
Particulate Matter	PM _{2.5}	EF _{PM2.5}	EF _{PM2.5}	See formula 7.8
Cadmium	Cd	1.00E-05	1.00E-05	Terrestrial ecotoxicity
Chromium	Cr	5.00E-05	5.00E-05	Terrestrial ecotoxicity
Copper	Cu	1.70E-03	1.70E-03	Human toxicity, freshwater aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity
Dinitrogen monoxide	N ₂ O	1.20E-01	1.30E-01	Global warming
Nickel	Ni	7.00E-05	7.00E-05	Human toxicity, freshwater aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity
Zinc	Zn	1.00E-03	1.00E-03	Terrestrial ecotoxicity
Benzo(a)pyrene	C ₂₀ H ₁₂	3.00E-05	4.00E-05	ecoinvent quality guidelines requires to separate B(a)p from other PAHs
Ammonia	NH ₃	2.00E-02	4.00E-02	Acidification, eutrophication
Selenium	Se	1.00E-05	1.00E-05	Human toxicity, freshwater aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity
Polycyclic aromatic hydrocarbons		Sum of different PAHs listed below		Human toxicity, freshwater aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity
Benz(a)-Anthracene		8.00E-05	7.50E-05	
Benzo(b)-Fluoranthene		5.00E-05	4.00E-05	
Chrysene		2.00E-04	1.00E-05	
Dibenzo(a,h)-Anthracene		1.00E-05	1.50E-04	
Fluoranthene		4.50E-04	4.50E-04	
Phenanthrene		2.50E-03	1.20E-03	

²¹ <https://www.total-proxi-energies.fr/agriculteurs/actualites/quelle-difference-entre-gasoil-et-gnr>

Emissions de particules fines :

Les facteurs d'émissions des particules fines (PM 2.5) dépendent de la puissance nominale du véhicule et sont calculés par la formule suivante provenant du rapport ecoinvent n°15.

$$\text{Facteur d'émission PM2.5 [g/kg GNR]} \\ = A[\text{g PM2.5/kg GNR}] * B[\text{g PM2.5/(kg GNR * kW)}] * \text{Puissance nominale}^{0,1}[\text{kW}]$$

Avec A=7,25 [g PM2.5/kg GNR] et B=3,62 [g PM2.5/(kg GNR * kW)].

Les valeurs des facteurs d'émission de particules fines prises en compte et les valeurs de puissances nominales utilisées pour le calcul sont présentées dans le Tableau 17.

TABLEAU 17 : FACTEUR D'EMISSION PM2.5 EN FONCTION DU MODELE DES TRACTEURS

	Tracteur 30 kW	Tracteur 50 kW Enjambeur vigne
Tracteur testé (-)	BCS Valiant 500 AR	Kubota M7040 DTHQ
Puissance nominale (kW)	35	55
Facteur d'émission PM2.5 (g/kg GNR)	2,084	1,846

Emissions de CO, HC et NOx :

Les émissions de trois autres substances, le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures (HC), et les oxydes d'azote (NO_x), dépendent de la puissance du tracteur et sont proportionnelles à la quantité d'énergie utilisée. Les quantités émises sont données par le calcul suivant.

$$\text{Quantité de substance émise [g]} \\ = \frac{\text{Quantité libérée par kWh} \left[\frac{\text{g}}{\text{kWh}} \right]}{\text{Consommation GNR par kWh} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right]} * \text{Masse volumique GNR [kg/L]} \\ * \text{Consommation GNR [L]}$$

Le Tableau 18 présente les valeurs prises en compte pour les tracteurs modélisés. Ces données proviennent de test sur banc d'essai réalisés par Agroscope²². Les modèles de tracteurs ont été choisis de manière à ce que la puissance de leurs moteurs corresponde à la puissance des tracteurs de la base de données Agribalyse.

TABLEAU 18 : EMISSIONS VARIABLES LIEES A LA COMBUSTION DU GNR EN FONCTION DES TRACTEURS

Type de tracteur	Tracteur 30 kW	Tracteur 50 kW Tracteur enjambeur
Tracteur testé	BCS Valiant 500 AR	Kubota M7040 DTHQ
Date du test	2002	2010
Consommation GNR en kg/kWh	0,435	0,307
Quantité de HC libéré (g/kWh)	0,29	0,36
Quantité de NOx libéré (g/kWh)	7,9	4,58
Quantité de CO libéré (g/kWh)	1,16	0,81

Synthèse des données d'émissions liées à la combustion de GNR :

Le Tableau 19 présente une synthèse des émissions liées à la combustion du GNR en fonction des types de tracteurs modélisés.

²² <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/publications/recherche-publications/test-tracteurs.html>

TABEAU 19 : SYNTHÈSE DES ÉMISSIONS LIÉES À LA COMBUSTION DU GNR

Émissions en g/L de GNR consommé	Tracteur 30 kW	Tracteur 50 kW Enjambeur_vigne
Dioxyde de carbone CO ₂	2620,8	2620,8
Dioxyde de soufre SO ₂	0,8484	0,8484
Méthane CH ₄	0,10836	0,10836
Benzène C ₆ H ₆	0,006132	0,006132
Cadmium Cd	0,0000084	0,0000084
Chrome Cr	0,000042	0,000042
Cuivre Cu	0,001428	0,001428
Protoxyde d'azote N ₂ O	0,1008	0,1008
Nickel Ni	0,0000588	0,0000588
Zinc Zn	0,00084	0,00084
Benzo[a]pyrène	0,0000252	0,0000252
Ammoniac NH ₃	0,0168	0,0168
Sélénium Se	0,0000084	0,0000084
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH)	0,0027636	0,0027636
PM2.5	2,481505012	2,197182053
HC	0,56	0,985016287
NO _x	15,25517241	12,53159609
CO	2,24	2,216286645

3.3.5. Émissions de métaux lourds par abrasion des pneus

Lors du roulage des machines agricoles, l'abrasion des pneus génère des émissions de métaux lourds (également appelés ETM, Éléments Traces Métalliques) vers les sols agricoles, principalement du zinc, du plomb et du cadmium (Rapport ecoinvent n°15). L'abrasion des pneus de la remorque permettant de transporter le robot TED génère également des émissions.

Le rapport ecoinvent n°15 donne l'équation et les données suivantes pour calculer les quantités de métaux lourds émises.

$$\begin{aligned}
 \text{Masse ETM} = & \frac{\text{Durée de vie machine [h]}}{\text{Durée de vie des pneus [h]}} * \text{Quantité de pneu par machine [kg}_{\text{Pneu}}/\text{kg}_{\text{Machine}}] \\
 & * \text{Quantité de caoutchouc synthétique par pneu [kg}_{\text{Caoutchouc synthétique}}/\text{kg}_{\text{Pneu}}] \\
 & * \text{Contenu en métaux lourds [g}_{\text{ETM}}/\text{kg}_{\text{Caoutchouc synthétique}}]
 \end{aligned}$$

Les contenus en métaux lourds du caoutchouc synthétique sont fixes et correspondent à du zinc, du plomb et du cadmium. Les valeurs par g_{ETM}/kg_{caoutchouc synthétique} sont respectivement de 16, 2,6 et 0,6. Le Tableau 20 présente les valeurs utilisés pour calculer les émissions de métaux lourds liées à l'abrasion des pneus.

TABEAU 20 : CARACTÉRISTIQUES DES PNEUS EN FONCTION DU TYPE DE MACHINE

	Tracteurs	Moissonneuse	Remorque	Citerne à lisier	Machine agricole général
Durée de vie (h)	2 500	1 080	750	2 500	2 500
Quantité de pneu par machine (kg _{pneus} /kg _{machine})	0,0975	0,0675	0,475	0,0475	0,0275
Quantité de Caoutchouc synthétique (kg _{Caoutchouc synthétique} /kg _{Pneu})	0,29	0,29	0,56	0,56	0,56

Les pneus des tracteurs et du robot TED sont modélisés par les données correspondant au pneu tracteur. Certains modèles de charrue vigneronne sont équipés de pneus, les données correspondant aux pneus « machine agricole général » sont utilisées. Les pneus de la remorque de transport sont modélisés par les données « Remorque ».

Synthèse des émissions de métaux lourds liées à l'abrasion des pneus :

Le Tableau 21 présente une synthèse des émissions de métaux lourds liées à l'abrasion des pneus en fonction des types de tracteurs, de robots et d'outils modélisés.

TABLEAU 21 : SYNTHESE DES EMISSIONS LIEES A LA COMBUSTION DU GNR

Émissions en g/kg engin	Tracteur 30 kW	Tracteur 50 kW Enjambeur vigne	TED	Cadre travail du sol inter-rang	Remorque
Zinc (Zn)	1,3029E-03	1,3029E-03	4,3430E-04	1,4784E-04	3,4048E-03
Plomb (Pb)	2,1172E-04	2,1172E-04	7,0574E-05	2,4024E-05	5,5328E-04
Cadmium (Cd)	4,8859E-05	4,8859E-05	1,6286E-05	5,5440E-06	1,2768E-04

3.3.6. Synthèse des données relatives aux opérations techniques par scénario

Le Tableau 22 récapitule les données d'entrée nécessaires au calcul des impacts des opérations à partir des équations précédemment détaillées.

TABLEAU 22 : SYNTHESE DES DONNEES D'ENTREE POUR LES OPERATIONS DE DESHERBAGE

Scénarios	TED	Tracteur	Outil intra- rang	Outil inter- rang	GNR	Electricité
	kg				L	kWh
CH1	-	2,73	0,17	1,73	49,89	-
CH2	-	3,87	0,23	1,73	85,86	-
CH3	4,61	2,31	0,37	1,73	41,92	13,72
CH4	5,82	1,38	0,37	2,62	30,98	37,41
CH5	-	4,03	0,22	1,73	87,78	-
CH6	11,53	2,09	0,72	1,73	37,64	37,08
CH7	11,53	1,17	0,72	2,76	26,70	60,25
LR1	-	3,20	0,14	1,55	59,06	-
LR2	-	3,60	0,33	2,08	88,58	-
LR3	5,54	2,94	0,44	1,55	54,36	16,49
LR4	-	3,56	0,29	2,25	87,48	-
LR5	6,69	2,68	0,39	1,55	49,36	20,28
LR6	-	3,73	0,14	1,86	68,93	-
LR7	-	4,36	0,42	2,56	109,86	-
LR8	7,38	3,48	0,56	1,86	64,23	21,99
LR9	-	4,31	0,38	2,74	108,76	-
LR 10	7,38	3,94	0,53	2,03	70,62	21,99
LR11	8,54	3,22	0,51	1,86	59,23	25,78
VL1	-	2,78	0,23	0,89	25,55	-
VL2	-	4,25	0,64	1,39	137,77	-
VL3	12,34	2,07	0,94	0,89	18,00	36,74

Tableau 22 (suite)

Scénarios	TED	Tracteur	Outil intra-rang	Outil inter-rang	GNR	Electricité
	kg				L	kWh
VL4	12,34	0,71	0,94	1,95	7,85	60,00
VL5	-	5,95	0,87	1,39	218,15	-
VL6	6,17	4,03	0,82	1,39	125,58	21,13
VL7	6,17	3,70	0,75	1,95	113,31	44,39
VL8	21,59	1,36	1,44	0,89	10,14	64,30
VL9	21,59	-	1,44	1,95	-	87,56

3.4. Données relatives au transport

Il est considéré que le robot TED est transporté du siège de l'exploitation à la parcelle avec un véhicule utilitaire et une remorque. Le transport modélisé en t*km est calculé de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{Transport TED [t * km]} &= \text{Distance au siège de l'exploitation[km]} * 2 * \text{Nombre de recharges robot[-]} \\
 &* (\text{Masse nominale TED[t]} + \text{Masse outils[t]} + \text{Masse remorque[t]})
 \end{aligned}$$

La masse considérée pour le transport est la masse nominale de TED chargé avec ses outils à laquelle s'ajoute la masse de la remorque tractée.

Le transport est modélisé par le process « Europe without Switzerland : transport, freight, light commercial vehicle » de la base de donnée ecoinvent v3.7.1 auquel ont été soustraits les impacts liés à la fabrication et l'entretien de la route (car non pris en compte dans le transport du tracteur, et cet élément est commun aux deux systèmes).

L'allocation des impacts engendrés par la fabrication de la remorque est calculée de manière analogue à l'allocation des impacts liés à la fabrication des tracteurs, des robots, et des outils.

$$\text{Utilisation remorque[kg]} = \text{Masse remorque[kg]} * \frac{\text{Durée du trajet[h]}}{\text{Durée de vie remorque[h]}}$$

Un poids de 755 kg est considéré pour la remorque²³. Sa durée de vie est définie par celle de la donnée « Remorque 8t » du rapport Agribalyse V.3 à 6 000 h.

La durée du trajet est calculée à partir de la formule que celle utilisée pour le tracteur (cf. page 36).

3.5. Logiciel ACV utilisé pour la modélisation

Les scénarios ont été modélisés à l'aide du logiciel ACV GaBi version 10.5.1.124 développé et distribué par la société Sphera Solutions GmbH. Les procédés ecoinvent v3.7.1 ont été utilisés pour modéliser les scénarios, la base de données Agribalyse n'étant pas encore disponible dans le logiciel GaBi.

²³ <http://remorquedistrib.com/team/porte-engin/porte-engin>

4. Evaluation des impacts environnementaux des scénarios

L'évaluation des impacts environnementaux des scénarios est faite selon les méthodes de calcul présentées au paragraphe 2.7.1. Les résultats sont présentés par bassin viticole et de la manière suivante :

- Résultats globaux de la comparaison des scénarios de désherbage
- Analyse de contribution des opérations et des différents procédés pour chaque scénario par type d'impact

Pour rappel, les résultats sont relatifs au désherbage de l'intra rang et de l'inter rang d'une parcelle viticole d'une surface de 1 hectare pendant 1 an. Les caractéristiques des bassins viticoles étant différentes, les résultats entre bassins viticoles ne peuvent pas être comparés entre eux. Ainsi, seuls les résultats des scénarios au sein d'un même bassin viticole sont comparés entre eux dans les paragraphes suivants.

Les résultats comparatifs sont présentés sur des graphiques en base 100. La lecture doit se faire de la façon suivante : pour un indicateur donné, le scénario le plus impactant représente 100% et le résultat des autres scénarios est exprimé relativement à cet impact maximal. Ce mode de présentation des résultats permet une comparaison rapide des scénarios entre eux.

Les graphiques d'analyse des contributions regroupent différents procédés agrégés. Le détail de ce qui est agrégé dans les analyses de contributions est précisé dans le Tableau 23

TABLEAU 23. DESCRIPTIF DES LEGENDES POUR LES ANALYSES DE CONTRIBUTIONS

Intitulé de la légende	Regroupe
Production Matériel agricole	Fabrication du tracteur Fabrication du matériel de désherbage
Production GNR	Fabrication du GNR
Production Electricité	Fabrication de l'électricité utilisé par les robots lors de l'opération de désherbage
Production Robot	Fabrication du robot
Production Herbicides	Fabrication du glyphosate Fabrication du napropamide
Production Eau	Fabrication de l'eau potable utilisée pour la préparation de la bouillie
Transport Robot	Transport du robot avec une camionnette (inclus fabrication du van et énergie lors de l'usage) Fabrication de la remorque de transport Emissions liées à l'abrasion des pneus de la remorque lors du transport
Emissions GNR	Emissions liées à la combustion de GNR dans le moteur du tracteur
Emissions abrasion des pneus	Emissions liées à l'abrasion des pneumatiques (Robot, tracteur, matériel de désherbage roulant si présent)
Emissions Herbicides	Emissions d'herbicides dans l'air, l'eau et le sol

4.1. Analyse des impacts environnementaux des scénarios Charentes

4.1.1. Généralités

Sept scénarios ont été évalués pour le bassin viticole Charentais. Les vignobles étudiés présentent un enherbement 1 inter-rang sur deux en période végétative et un enherbement total spontané en période de repos. Les spécificités des scénarios CH sont présentées ci-après :

	Intra-rang	Usage robot	Inter-rang	Usage robot
CH1	Désherbage chimique	Non	Tonte et désherbage mécanique	Non
CH2 à CH4	Désherbage mixte	Oui (CH3 et CH4)	Tonte et désherbage mécanique	Oui (CH4)
CH5 à CH7	Désherbage mécanique	Oui (CH6 et CH7)	Tonte et désherbage mécanique	Oui (CH7)

4.1.2. Analyse des impacts avec la méthode CML

Les résultats obtenus avec la méthode CML sont présentés Figure 8 et Figure 9.

4.1.2.1. Impacts sur l'épuisement des ressources minérales et fossiles

Les impacts sur la consommation des ressources minérales (ADR (RB) et ADP (UR)) sont beaucoup plus importants pour les scénarios « Robots » (CH3, CH4, CH6 et CH7) que pour les scénarios « Conventionnels » (CH1, CH2 et CH5). Parmi les scénarios « Robots », les scénarios CH6 et CH7 présentent les impacts les plus importants, essentiellement dus à un nombre de passages de robots plus important (9 passages dans l'intra rang pour CH6 et 5 passages dans l'intra rang + 4 passages combinés dans l'inter rang pour CH7) que pour les scénarios CH3 et CH4 (3 passages dans l'intra rang pour CH3 et 3 passages combinés dans l'inter rang pour CH4).

Pour les scénarios « Robots », la production du robot est le principal contributeur à l'impact sur l'épuisement des ressources minérales, avec respectivement 76%, 72%, 86% et 82% pour les scénarios CH3, CH4, CH6 et CH7 pour l'impact ADP (RB) et 55%, 56%, 88% et 83% pour les scénarios CH3, CH4, CH6 et CH7 pour l'impact ADP (UR).

En regardant de plus près, quatre éléments composant le robot contribuent majoritairement à l'impact sur les ressources minérales ADP (RB, UR), à savoir la fabrication des composants électronique actifs (26%, 36%) et passifs (20%, 4%), la fabrication des moteurs électriques (16%, 22%) et la fabrication des câbles électriques (11%, 15%). L'autre contributeur à l'impact ADP (UR) pour les scénarios CH3 et CH4 est la production du napropamide, représentant respectivement 32% et 26% des contributions, qui utilise de la bromine (i.e. 95% de la contribution à l'impact ADP (UR) de la production de napropamide).

Les impacts sur l'épuisement des ressources fossiles (ADP Fossil) sont moins différenciés. Le principal contributeur à cet impact pour les scénarios « Conventionnels » est la production du GNR (entre 74 et 86% de l'impact). Le scénario le moins impactant est le scénario CH1 caractérisé par un désherbage chimique de l'intra rang et un désherbage mécanique et la tonte des inter rangs (enherbement un rang sur deux). La consommation de GNR nécessaire pour le désherbage chimique de l'intra rang (CH1, 3 passages) est moins importante que celle utilisé pour le désherbage mixte (CH2, 1 passage chimique + 3 passage mécanique) ou mécanique (CH5, 4 passages) de l'intra rang pour le même nombre d'opération de désherbage et de tonte de l'inter rang.

Les robots ne pouvant se déplacer sur route, il est nécessaire de les transporter pour attendre les parcelles à travailler. Ainsi, pour les scénarios « Robots », outre la production du GNR, le principal autre contributeur est le transport des robots depuis le siège de l'exploitation jusqu'à la parcelle à désherber (14 à 47% de l'impact).

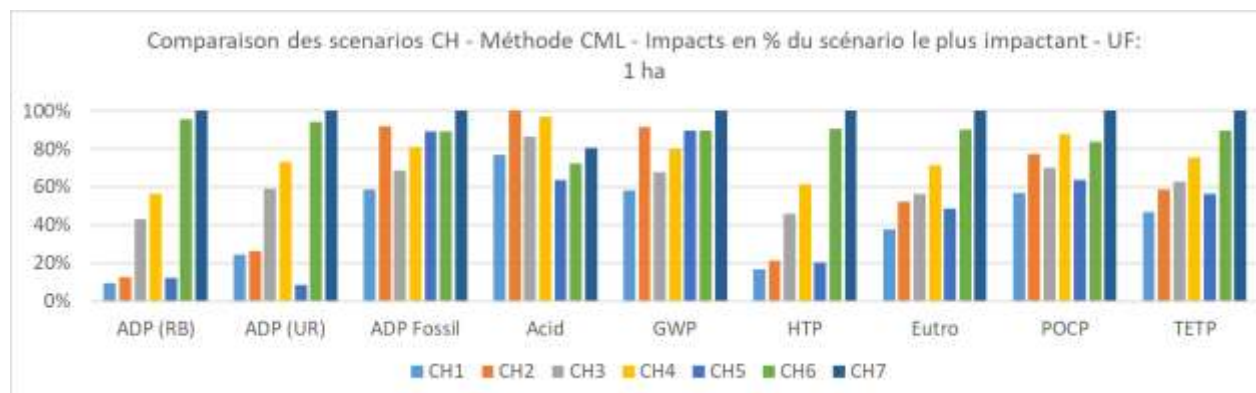


FIGURE 8 : RESULTATS GLOBAUX OBTENUS POUR LES SCENARIOS CHARENTES AVEC LA METHODE CML

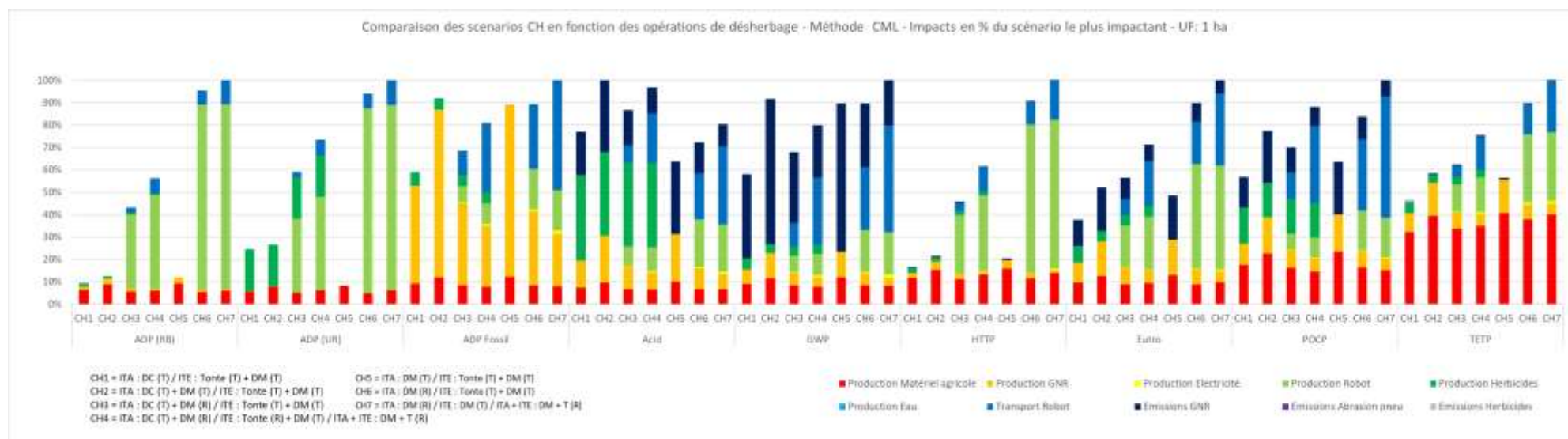


FIGURE 9 : ANALYSE DE CONTRIBUTION DES OPERATIONS DES SCENARIOS CHARENTES AVEC LA METHODE CML

4.1.2.2. Impacts sur le changement climatique et le potentiel d'oxydation photochimique

L'impact sur le changement climatique suit la même tendance que ceux sur l'épuisement des ressources fossiles. Ceci est essentiellement dû aux émissions de CO₂ fossile issues de la combustion du GNR dans le moteur des tracteurs (environ 99% des émissions GES) et au transport des robots sur la parcelle par un véhicule utilitaire (environ 97% des émissions de GES). Les émissions dues à la combustion du GNR représentent entre 21 et 48% pour les scénarios « Robots » et entre 65 et 74% pour les scénarios « Conventionnels ». Les scénarios « Robots » présentent 14 à 46% d'impact supplémentaire par rapport aux scénarios « Conventionnels » dû au fait qu'ils doivent être amenés sur la parcelle à l'aide d'un véhicule utilitaire.

L'impact sur le potentiel d'oxydation photochimique est pour partie dû aux émissions liées à la combustion du GNR dans le moteur des tracteurs dans les scénarios « Conventionnels ». Ces émissions représentent environ 24 et 37% de l'impact, essentiellement dû des émissions de NO_x (62% des émissions contributrices). Le transport des robots sur les parcelles est quant à lui responsable pour environ 16 à 52% de l'impact des scénarios « Robots ». Les impacts du transport sont essentiellement dus aux émissions de composés organiques volatiles non méthaniques (41%), de monoxyde de carbone (28%) et de NO_x (15%). L'impact de la production de napropamide utilisé pour le désherbage chimique ou mixte de l'intra rang représente quant à lui 18 à 28% de l'impact selon les scénarios.

4.1.2.3. Impacts sur la toxicité humaine (et par extension écotoxicité des milieux aquatiques terrestres et marins)

Les impacts sur la toxicité humaine suivent la même tendance que ceux des impacts sur l'épuisement des ressources minérales. Les scénarios « Robots » présentent des impacts plus importants que les scénarios « Conventionnels ». La production du robot est le principal contributeur à l'impact sur la toxicité humaine et représente entre 54 et 73% de l'impact. En regardant de plus près, trois éléments composant le robot contribuent majoritairement à cet impact, à savoir la fabrication des moteurs électriques (33%), la fabrication des câbles électriques (19%) et la fabrication des composants électroniques actifs (17%).

4.1.2.4. Impacts sur l'écotoxicité terrestre

A la différence des autres impacts ci-dessus, la production du matériel agricole est le principal contributeur à l'impact sur l'écotoxicité terrestre. Elle représente entre 67 et 72% pour les scénarios « Conventionnels » et entre 28 et 55% pour les scénarios « Robots ». Les impacts sur l'écotoxicité terrestre sont principalement dus au chrome émis lors de la fabrication des tracteurs (73% des émissions contributrices) et lors de la fabrication des outils de désherbage (92% des émissions contributrices).

L'impact sur l'écotoxicité terrestre s'explique aussi par la production du robot, représentant entre 19 et 33% de l'impact pour les scénarios concernés. Trois éléments composant le robot contribuent majoritairement à cet impact, à savoir la fabrication du cuivre (33%), la fabrication des moteurs électriques (23%) et la fabrication de l'aluminium composant la structure du robot (19%).

4.1.2.5. Impacts sur l'acidification et l'eutrophisation des milieux aquatiques terrestres

Au regard de l'impact Acidification, les 4 scénarios utilisant les herbicides pour le désherbage chimique et mixte sont plus impactants que les 3 autres. La production des herbicides dans ces scénarios représente des contributions allant de 37 à 49% de l'impact. Les autres contributeurs sont les émissions de substances acidifiantes lors de la combustion du GNR dans le moteur de tracteur (essentiellement sous forme de NO_x, 85% des émissions contributrices) pour les scénarios « Conventionnels » et le transport des robots pour les scénarios « Robots » (essentiellement sous forme de SO₂ et NO_x, respectivement 41 et 53% des émissions contributrices).

Pour l'impact eutrophisation, les scénarios « Robots » sont plus impactants que les scénarios « Conventionnels » avec pour principaux contributeurs la production des robots (32 à 51% de l'impact) et leur transport jusqu'au champ (12 à 31% de l'impact). Trois éléments composant le robot contribuent majoritairement à l'impact sur l'eutrophisation, à savoir la fabrication des moteurs électriques (30%), la fabrication des composants électroniques actifs (28%) et la fabrication des câbles électriques (10%).

4.1.3. Analyse des impacts avec la méthode ReCiPe

Les résultats obtenus avec la méthode ReCiPe sont présentés Figure 10 et Figure 11.

4.1.3.1. Impacts sur la formation de particules fines

Pour les scénarios « Conventionnels », les principaux contributeurs à la formation de particules fines sont les émissions dues à la combustion du GNR dans les moteurs du tracteur (38 à 63% de l'impact). Les émissions les plus contributrices sont les particules fines (58%) et les NOx (36%). Pour les scénarios concernés (CH1 et CH2), l'autre contributeur à l'impact est la fabrication des herbicides (26 à 38% de l'impact) essentiellement due à la production de napropamide.

Les principaux contributeurs pour les scénarios « Robots » sont la fabrication des herbicides (30 à 33% de l'impact), les émissions liées à la combustion du GNR (20 à 29% de l'impact) et le transport du robot sur la parcelle (8 à 22% de l'impact) pour CH3 et CH4. Les autres scénarios CH6 et CH7 sont quant à eux impactés par la production du robot (26 à 28% de l'impact) et son transport (24 à 39% de l'impact), les émissions liées à la combustion du GNR étant un peu moins importantes pour ces scénarios (18 à 27%). Pour les scénarios « Robot », l'impact de la production du robot s'explique par les impacts des composants électroniques actifs (27% de la contribution), la fabrication des moteurs électriques (25% de la contribution) et la fabrication de l'acier servant à la structure du robot (16% de la contribution).

4.1.3.2. Impacts sur l'écotoxicité des milieux aquatiques terrestres et l'eutrophisation des milieux marins

Les impacts sur l'écotoxicité des milieux aquatiques terrestres et l'eutrophisation des milieux marins sont essentiellement dus à la production du robot, avec respectivement des contributions aux impacts de 62 à 86% et de 59 à 89%.

Ces impacts s'expliquent par la fabrication des moteurs électriques (32%), la fabrication des composants électroniques actifs (23%) et la fabrication des câbles électriques (18%) pour l'impact Feco et à 88% par la fabrication des moteurs électriques pour l'impact Meutro.

4.1.3.3. Impacts sur les radiations ionisantes

Les impacts sur les radiations ionisantes sont principalement causés par la production du GNR pour les scénarios « Conventionnels » (72 à 86% de l'impact) et par la production d'électricité (28 à 51% de l'impact) et le transport des robots (13 à 25% de l'impact) pour les scénarios « Robots », la production du GNR pour ces scénarios étant moins importantes (9 à 34% de l'impact).

Les contributions sur cet impact s'expliquent par l'émission dans l'air de substances radioactives, essentiellement sous forme de Carbone 14 (C^{14}), i.e. 97% des émissions contributrices pour la production de GNR et 71% pour le transport des robots. Les impacts de la production d'électricité s'expliquent quant à elles à 22% par l'émission de C^{14} et à 78% par l'émission de Radon 222.

4.1.3.4. Impacts sur l'occupation des terres

Les impacts sur l'occupation des terres sont essentiellement dus à la production du robot et au transport du robot, avec respectivement des contributions aux impacts de 24 à 42% et de 28 à 54%.

Les impacts associés à la production du robot s'expliquent par la fabrication des moteurs électriques (36%), la fabrication des composants électroniques actifs (21%) et la fabrication de l'acier utilisé pour la structure du robot (13%). 39% des contribution à la fabrication des composants électroniques actifs sont associés à l'occupation des terres par les sites miniers et à 36% par les sites d'enfouissement des déchets. L'occupation des terres par les sites d'enfouissement des déchets contribue également à 73% de l'impact de la fabrication des moteurs électriques et à 46% de la fabrication de l'acier. La fabrication d'acier s'explique aussi par l'occupation des terres par le réseau routier (11%) et les sites d'extraction miniers de la bauxite (11%).

Les impacts liés au transport des robots s'expliquent quant à eux par l'occupation des terres par le réseau routier (64%) et les talus routiers et ferroviaires (14%).

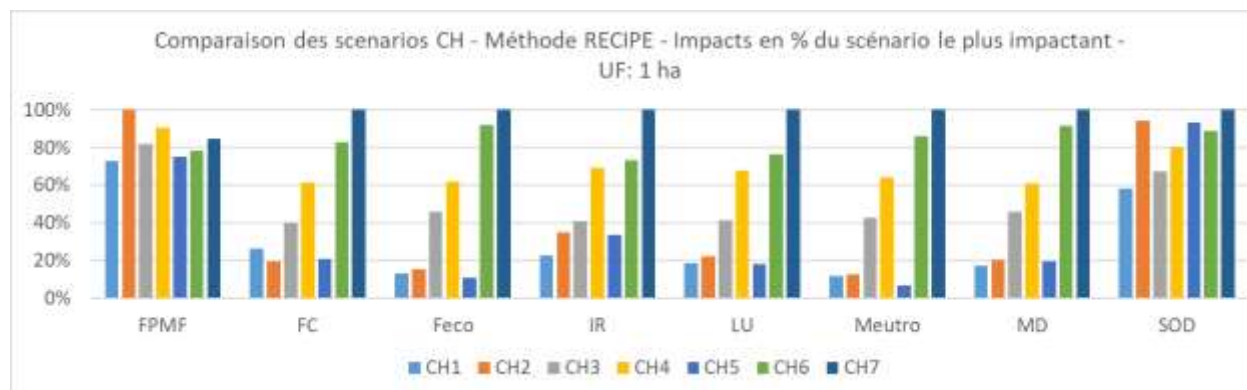


FIGURE 10 : RESULTATS GLOBAUX OBTENUS POUR LES SCENARIOS CHARENTES AVEC LA METHODE RECIPE

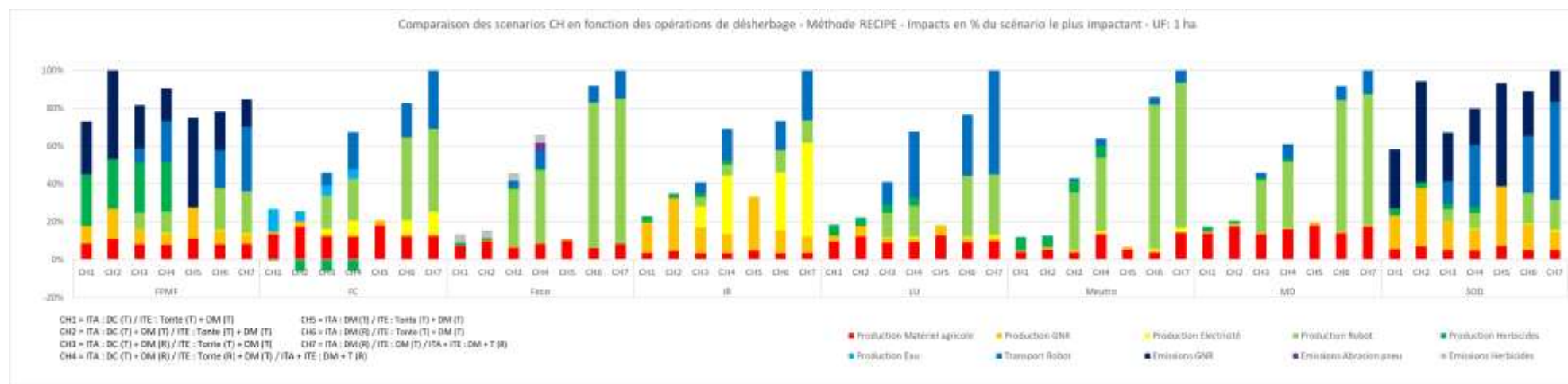


FIGURE 11 : ANALYSE DE CONTRIBUTION DES OPERATIONS DES SCENARIOS CHARENTES AVEC LA METHODE RECIPE

4.1.3.5. Impacts sur la consommation en eau

Pour les scénarios « Conventionnels », les impacts sur la consommation en eau sont dus à la fabrication du matériel agricole (36 à 70 % de l'impact pour la fabrication du tracteur et 14 à 20% pour la fabrication des outils de désherbage) et à l'usage de l'eau pour la préparation des bouillies de pulvérisation pour les scénarios avec désherbage chimique (27 à 45% de l'impact).

Pour les scénarios « Robots », les impacts sont dus en grande partie à la production et au transport du robot sur la parcelle (respectivement 36 à 53% et 16 à 30% de l'impact). Les impacts associés à la production du robot s'expliquent par la fabrication des moteurs électriques (30%), la fabrication des composants électroniques actifs (26%), la fabrication de l'acier utilisé pour la structure du robot (11%) et dans une moindre mesure la fabrication du GPS (8%).

4.1.3.6. Impacts sur le surcoût lié à l'exploitation des métaux dans le futur

Pour les scénarios « Robots », les impacts sont dus en grande partie à la production du robot (57 à 75% de l'impact). En regardant de plus près, quatre éléments composant le robot contribuent majoritairement à l'impact sur l'exploitation des ressources minérales, à savoir la fabrication des moteurs électriques (37%), la fabrication des composants électronique actifs (17%), la fabrication de l'acier servant à la structure du robot (18%) et la fabrication des câbles électriques (11%).

Pour les scénarios « Conventionnels », les impacts sont essentiellement dus à la fabrication du matériel agricole soit 81 à 92% des contributions à l'impact (48 à 61 % pour la fabrication du tracteur et 29 à 33% pour la fabrication des outils de désherbage). Les 20% restant sont dus à la fabrication des herbicides pour les scénarios concernés (CH1 et CH2).

4.1.3.7. Impacts sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique

Les impacts sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique sont essentiellement dus à la production du GNR (31 à 34% de l'impact) et aux émissions liées à la combustion du GNR (53 à 59% de l'impact) pour les scénarios « Conventionnels ». Ces impacts s'expliquent par les émissions de N₂O (23%) et d'Halon 1301 (77%), pour la production de GNR et par le N₂O émis lors de la combustion du GNR (100% des émissions contributrices).

Pour les scénarios « Robots », les impacts sont dus essentiellement au transport des robots (16 à 50% de l'impact) et aux émissions lors de la combustion de GNR (18 à 40% de l'impact) et dans une moindre mesure à la production de GNR (10 à 23% de l'impact) et des robots (9 à 18% de l'impact). Ces impacts s'expliquent par les émissions de N₂O (87%) et d'Halon 1301 (25%) pour le transport des robots et par le N₂O émis lors de la combustion du GNR (100% des émissions contributrices).

4.2. Languedoc-Roussillon

4.2.1. Généralités

Onze scénarios ont été évalués pour le bassin viticole Languedoc Roussillon. Les vignobles étudiés présentent soit un enherbement temporaire pendant la période repos et aucun enherbement pendant la période végétative, soit aucun enherbement toute l'année. Les spécificités des scénarios LR sont présentées ci-après.

Vignobles en enherbement temporaire pendant la période repos et sans enherbement pendant la période végétative (LR 1 à LR5) :

	Intra-rang	Usage robot	Inter-rang	Usage robot
LR1	Désherbage chimique	Non	Destruction couvert hivernal et désherbage mécanique	Non
LR2 et LR3	Désherbage mixte	Oui (LR3)	Destruction couvert hivernal et désherbage mécanique	Non
LR4 et LR5	Désherbage mécanique	Oui (LR5)	Destruction couvert hivernal et désherbage mécanique	Non

Vignobles sans enherbement toute l'année (LR 6 à LR11) :

	Intra-rang	Usage robot	Inter-rang	Usage robot
LR6	Désherbage chimique	Non	Désherbage mécanique	Non
LR7 et LR8	Désherbage mixte	Oui (LR8)	Désherbage mécanique	Non
LR9 à LR11	Désherbage mécanique	Oui (LR10 et LR11)	Désherbage mécanique	Non

Les résultats LR1 à LR5 sont présentés par rapport aux scénarios les plus impactants. La même chose est faite pour les scénarios LR6 à LR 11. Les graphiques ci-après présentent donc 2 scénarios à 100%.

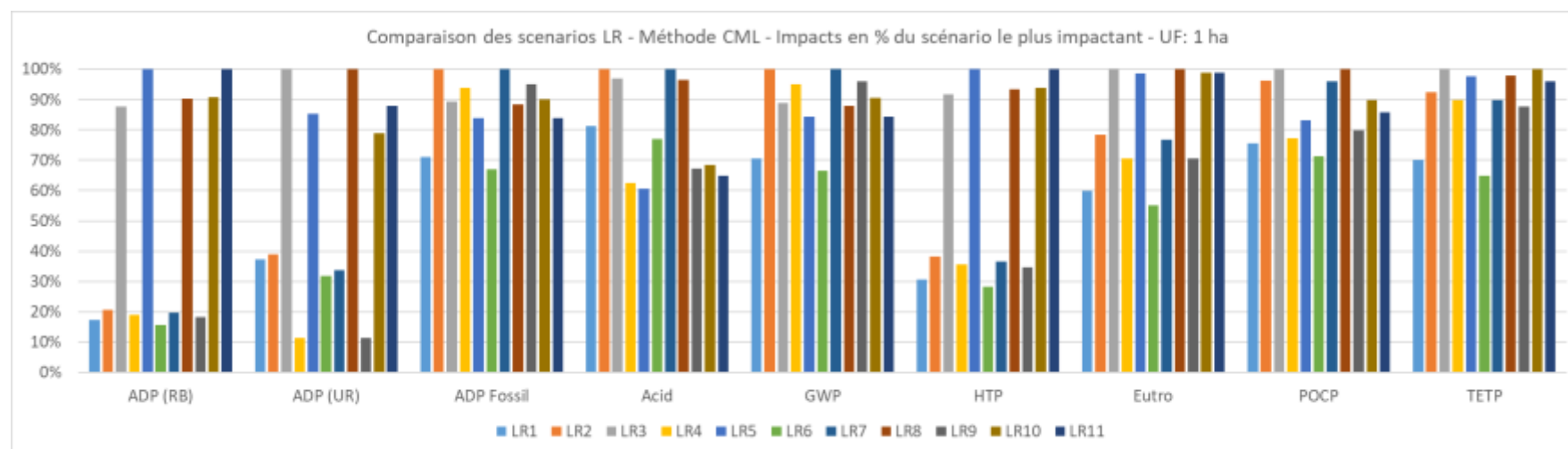


FIGURE 12 : RESULTATS GLOBAUX OBTENUS POUR LES SCENARIOS LANGUEDOC ROUSSILLON AVEC LA METHODE CML

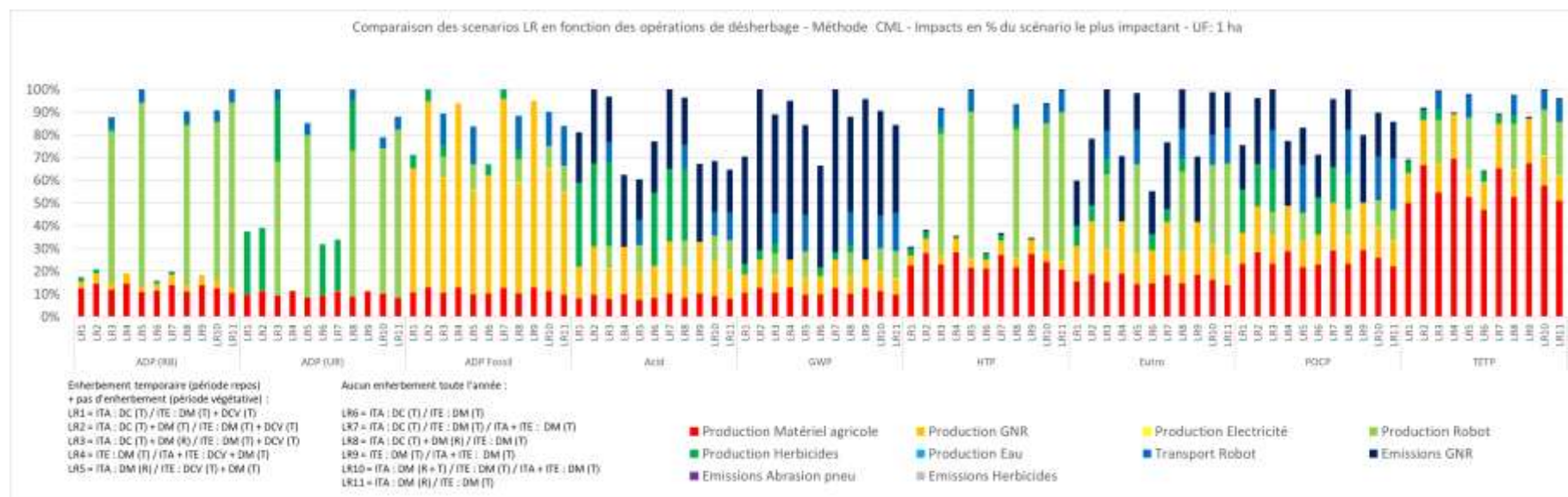


FIGURE 13 : ANALYSE DE CONTRIBUTION DES OPERATIONS DES SCENARIOS LANGUEDOC ROUSSILLON AVEC LA METHODE CML

4.2.2. Analyse des impacts avec la méthode CML

Les résultats obtenus avec la méthode CML sont présentés Figure 12 et Figure 13.

De manière générale, les émissions/procédés contributeurs(trices) pour chaque procédé impactant (exemple éléments composant le robot contribuant à l'impact APR (RB)) sont identiques aux scénarios CH. Ainsi, seuls les pourcentages des procédés contribuant aux impacts sont présentés pour les scénarios LR, sauf en cas de nouveaux contributeurs identifiés.

4.2.2.1. Impacts sur l'épuisement des ressources minérales et fossiles

On retrouve pour ces indicateurs les mêmes tendances que pour les scénarios CH. Les impacts sur la consommation des ressources minérales (ADR (RB) et ADP (UR)) sont beaucoup plus importants pour les scénarios « Robots » que pour les scénarios « Conventionnels ». Pour les scénarios « Robots », la production du robot est le principal contributeur à l'impact sur l'épuisement des ressources minérales ADP (RB) avec 77 à 81% de contribution à l'impact et 58 à 84% pour l'impact ADP (UR). L'autre contributeur à l'impact ADP (UR) pour le scénario LR3 est la production du napropamide, représentant 23 à 28% des contributions. La production des herbicides est par contre le principal contributeur à l'impact ADP (UR) pour les scénarios « Conventionnels » avec des valeurs allant de 66 à 73%.

Les impacts sur l'épuisement des ressources fossiles (ADP Fossil) sont moins différenciés. Le principal contributeur à cet impact pour l'ensemble des scénarios est la production du GNR (77 à 87% de l'impact pour les scénarios « Conventionnels » et 55 à 61% pour les scénarios « Robots »). Le scénario le moins impactant est le scénario LR1 caractérisé par un désherbage chimique de l'intra rang. Les robots ne pouvant se déplacer sur route, il est nécessaire de les transporter pour attendre les parcelles à travailler. Ainsi, pour les scénarios « Robots », outre la production du GNR, un autre contributeur est le transport des robots depuis le siège de l'exploitation jusqu'à la parcelle à désherber (14 à 19% de l'impact).

4.2.2.2. Impacts sur la toxicité humaine (et par extension l'écotoxicité des milieux aquatiques terrestres et marins)

Les impacts sur la toxicité humaine suivent la même tendance que ceux des impacts sur l'épuisement des ressources minérales. Les scénarios « Robots » présentent des impacts plus importants que les scénarios « Conventionnels ». La production du robot est le principal contributeur à l'impact sur la toxicité humaine et représente 57 à 64% de l'impact pour les scénarios LR1 à LR5 et 60 à 65% de l'impact pour les scénarios LR6 à LR11.

Les impacts de l'ensemble des scénarios « Conventionnels » sont quant à eux expliqués par la contribution de l'impact de la fabrication du matériel agricole avec des valeurs allant de 45 à 50% pour la fabrication des tracteurs et 24 à 32% pour la fabrication des outils de désherbage.

4.2.2.3. Impacts sur le changement climatique et le potentiel d'oxydation photochimique

Les impacts sur le changement climatique suivent la même tendance que ceux sur l'épuisement des ressources fossiles. Ceci est essentiellement dû aux émissions de CO₂ fossile issues de la combustion du GNR dans le moteur des tracteurs et au transport des robots sur la parcelle par un véhicule utilitaire. Les émissions dues à la combustion du GNR représentent 47 à 52% pour les scénarios « Robots » et 67 à 74% pour les scénarios « Conventionnels ». Les scénarios « Robots » présentent 14 à 18% d'impact supplémentaire par rapport aux scénarios conventionnels dû au fait qu'ils doivent être amenés sur la parcelle à l'aide d'un véhicule utilitaire.

Contrairement aux scénarios CH, les contributions au potentiel d'oxydation photochimique pour les scénarios LR sont équitablement réparties dans la plupart des scénarios entre la production du matériel agricole, la production de GNR, d'herbicides (pour les scénarios concernés), les émissions liées à la combustion du GNR et au transport (pour les scénarios concernés). Le tableau ci-dessous récapitule les % de contributions pour chaque scénario à cet impact.

	Émissions GNR	Production GNR	Matériel agricole	Production herbicides	Production robot	Transport robot
LR1	26%	18%	31%	25%		
LR2	30%	21%	30%	19%		
LR3	18%	13%	24%	19%	10%	16%
LR4	37%	26%	37%			
LR5	20%	14%	27%		15%	24%
LR6	27%	19%	32%	23%		
LR7	31%	22%	30%	16%		
LR8	18%	13%	24%	16%		
LR9	37%	26%	37%			
LR10	22%	16%	30%		12%	20%
LR11	20%	14%	27%		15%	25%

4.2.2.4. Impacts sur l'écotoxicité terrestre

Comme pour les scénarios CH, la production du matériel agricole est le principal contributeur à l'impact sur l'écotoxicité terrestre. Pour les scénarios « Conventionnels », les principaux contributeurs sont la production des tracteurs (25 à 30% de l'impact) et la production des outils de désherbage (43 à 52% de l'impact) tandis que pour les scénarios « Robots », les principaux contributeurs sont la production des tracteurs (18 à 21% de l'impact), la production des outils de désherbage (36 à 38% de l'impact) et la production du robot (18 à 24% de l'impact).

4.2.2.5. Impacts sur l'acidification et l'eutrophisation des milieux aquatiques terrestres

Au regard de l'impact Acidification, comme pour les scénarios CH, les scénarios utilisant les herbicides pour le désherbage chimique et mixte sont plus impactants que les autres. La production des herbicides dans ces scénarios représente des contributions allant de 32 à 46% de l'impact. Les autres contributeurs sont les émissions de substances acidifiantes lors de la combustion du GNR dans le moteur de tracteur pour les scénarios et le transport des robots pour les scénarios « Robots ».

Pour l'impact eutrophisation, les scénarios « Robots » sont plus impactants que les scénarios « Conventionnels » avec pour principaux contributeurs la production des robots (32 à 40% de l'impact) et leur transport jusqu'au champ (12 à 15% de l'impact). Ces contributions s'ajoutent aux impacts de la production de GNR et les émissions liées à la combustion qui contribuent pour l'ensemble des scénarios.

4.2.3. Analyse des impacts avec la méthode ReCiPe

Les résultats obtenus avec la méthode ReCiPe sont présentés Figure 14 et Figure 15.

4.2.3.1. Impacts sur la formation de particules fines

Quel que soit le scénario, un des principaux contributeurs à l'indicateur est l'émission de particules fines liée à la combustion du GNR dans les moteurs du tracteur (41 à 63% de l'impact pour les scénarios « Conventionnels » et 32 à 43% pour les scénarios « Robots »). Pour les scénarios concernés (LR1 LR2, LR3, LR6, LR7 et LR8), l'autre contributeur à l'impact est la fabrication des herbicides (21 à 33% de l'impact) essentiellement dus à la production de napropamide.

Les scénarios « Robots » sont plus impactants que les scénarios conventionnels car, en plus des contributions précédentes, la production du robot et son transport sur la parcelle viennent alourdir le bilan (respectivement 11 à 19% et 9 à 15% de l'impact).

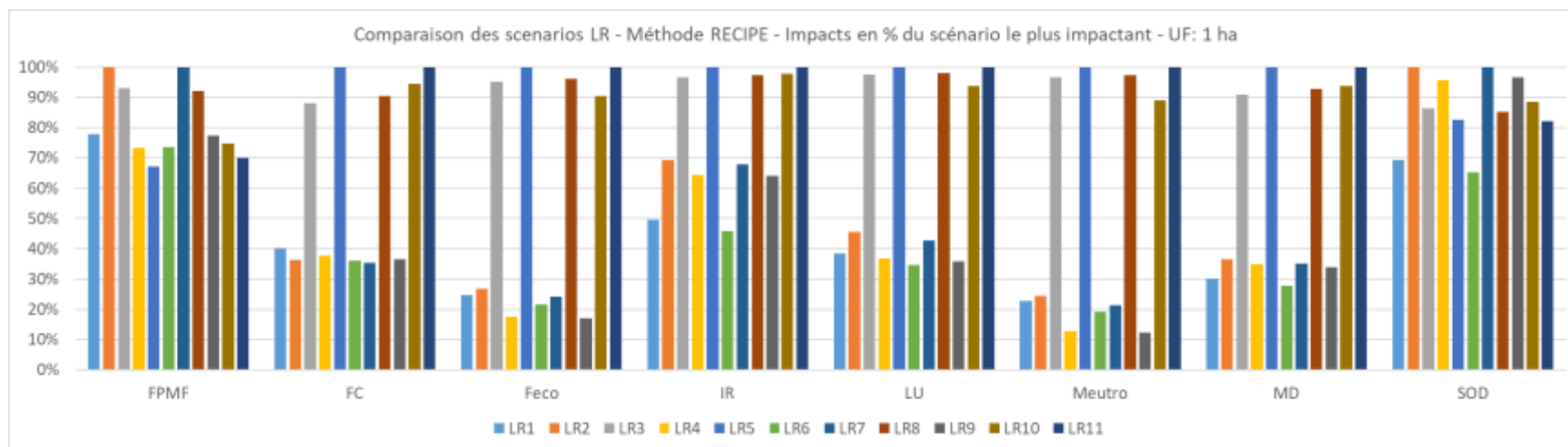


FIGURE 14 : RESULTATS GLOBAUX OBTENUS POUR LES SCENARIOS LANGUEDOC ROUSSILLON AVEC LA METHODE RECIPE

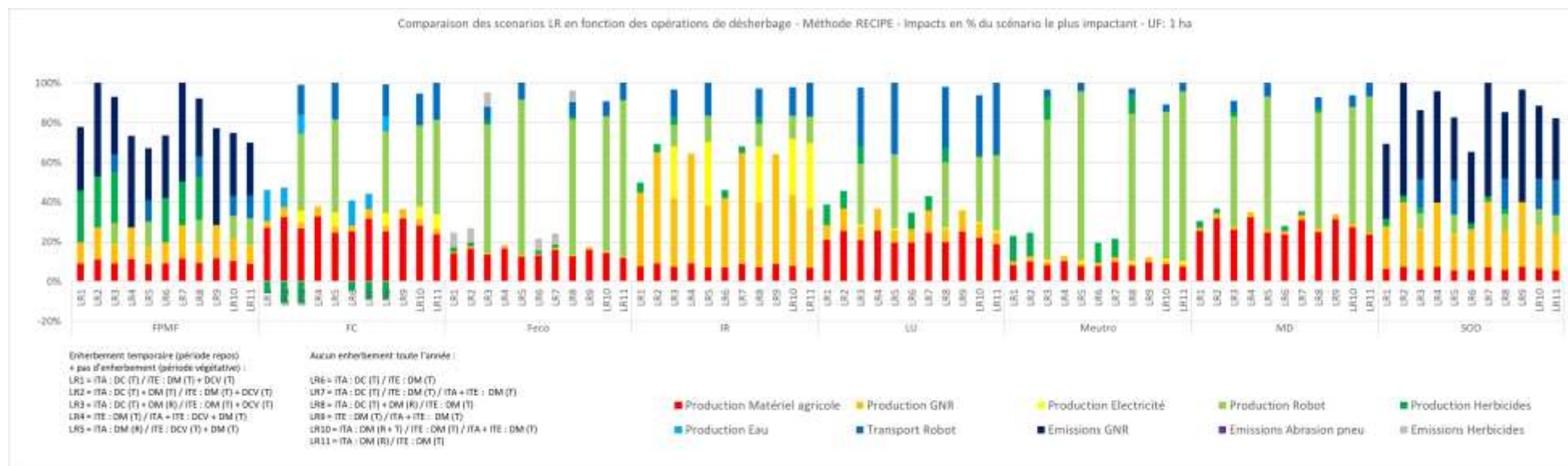


FIGURE 15 : ANALYSE DE CONTRIBUTION DES OPERATIONS DES SCENARIOS LANGUEDOC ROUSSILLON AVEC LA METHODE RECIPE

4.2.3.2. Impacts sur l'écotoxicité des milieux aquatiques terrestres et l'eutrophisation des milieux marins

Les impacts sur l'écotoxicité des milieux aquatiques terrestres et l'eutrophisation des milieux marins sont essentiellement dus à la production du robot, avec respectivement des contributions aux impacts de 67 à 79% et de 72 à 85%. Les éléments contributeurs sont les mêmes que pour les scénarios CH.

4.2.3.3. Impacts sur les radiations ionisantes et l'occupation des terres

Les impacts sur les radiations ionisantes sont principalement causés par la production du GNR pour les scénarios « Conventionnels » (75 à 86% de l'impact) et par la production de GNR et la production d'électricité (respectivement 31 à 37% et 28 à 34% de l'impact) et dans une moindre mesure le transport des robots (13 à 16% de l'impact) pour les scénarios « Robots ».

Les impacts sur l'occupation des terres sont essentiellement dus à la production du robot et au transport du robot, avec respectivement des contributions aux impacts de 31 à 38% et de 15 à 35%.

4.2.3.4. Impacts sur la consommation en eau

Pour les scénarios « Conventionnels », les impacts sur la consommation en eau sont dus à la fabrication du matériel agricole (51 à 64 % de l'impact pour la fabrication du tracteur et 16 à 27% pour la fabrication des outils de désherbage) et à l'usage de l'eau pour la préparation des bouillies de pulvérisation pour les scénarios avec désherbage chimique (22 à 39% de l'impact).

Pour les scénarios « Robots », les impacts sont dus en grande partie à la production et à la fabrication du matériel agricole (respectivement 43 à 47% et 25 à 31% de l'impact)). Les scénarios « Robots » sont également impactés dans une moindre mesure par le transport du robot sur la parcelle (16 à 17% de l'impact).

4.2.3.5. Impacts sur le surcoût lié à l'exploitation des métaux dans le futur et à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique

Pour les scénarios « Robots », les impacts sont dus en grande partie à la production du robot (60 à 67% de l'impact). Pour les scénarios « Conventionnels », les impacts sont essentiellement dus à la fabrication du matériel agricole soit 84 à 92% des contributions à l'impact (49 à 53 % pour la fabrication du tracteur et 32 à 42% pour la fabrication des outils de désherbage).

Les impacts sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique sont essentiellement dus à la production du GNR (22 à 34% de l'impact) et aux émissions liées à la combustion du GNR (39 à 59% de l'impact) que ce soit pour les scénarios « Robots » ou pour les scénarios « Conventionnels ».

4.3. Val de Loire

4.3.1. Généralités

Neuf scénarios ont été évalués pour le bassin viticole du Val de Loire (Muscadet). Les vignobles étudiés présentent un enherbement permanent sur tous les rangs quel que soit la période (de repos ou végétative), les intra rangs ne sont pas enherbés. Les spécificités des scénarios VL sont présentées ci-après :

	Intra-rang	Usage robot	Inter-rang	Usage robot
VL1	Désherbage chimique	Non	Tonte	Non
VL2 à VL4	Désherbage mixte	Oui (VL3 et VL4)	Tonte	Oui (VL4)
VL5 à VL9	Désherbage mécanique	Oui (VL6, VL8 et VL9)	Tonte	Oui (VL7 et VL9)

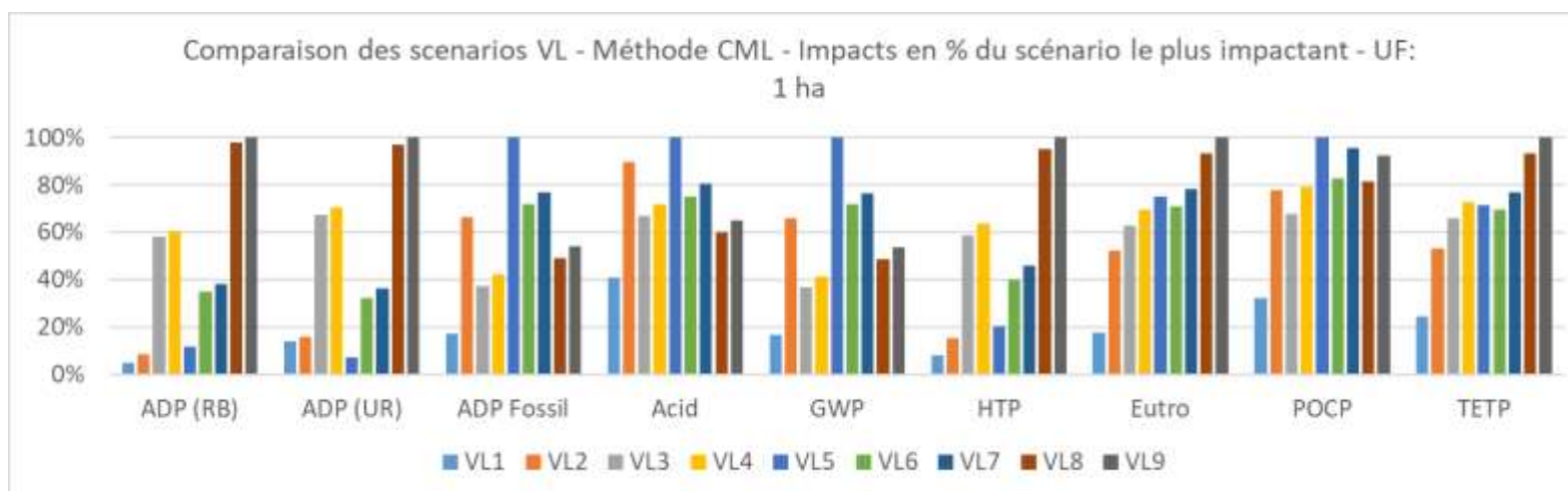


FIGURE 16 : RESULTATS GLOBAUX OBTENUS POUR LES SCENARIOS VAL DE LOIRE AVEC LA METHODE CML

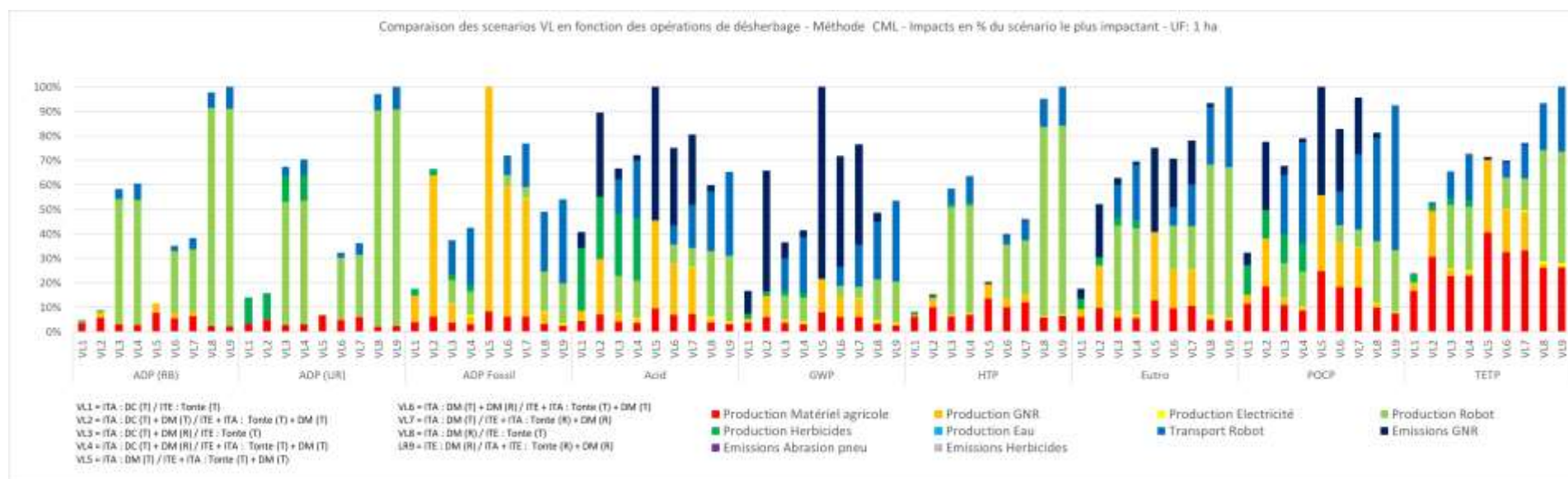


FIGURE 17 : ANALYSE DE CONTRIBUTION DES OPERATIONS DES SCENARIOS VAL DE LOIRE AVEC LA METHODE CML

4.3.1. Analyse des impacts avec la méthode CML

Les résultats obtenus avec la méthode CML sont présentés Figure 16 et Figure 17.

De manière générale, les émissions/procédés contributeurs(trices) pour chaque procédé impactant (exemple éléments composant le robot contribuant à l'impact APR (RB)) sont identiques aux scénarios CH et LR. Ainsi, seuls les pourcentages des procédés contribuant aux impacts sont présentés pour les scénarios VL, sauf en cas de nouveau contributeurs identifiés.

4.3.1.1. Impacts sur l'épuisement des ressources minérales et fossiles

On retrouve pour ces indicateurs les mêmes tendances que pour les scénarios CH et LR. Les impacts sur la consommation des ressources minérales (ADR (RB) et ADP (UR)) sont beaucoup plus importants pour les scénarios « Robots » que pour les scénarios « Conventionnels ». Pour les scénarios « Robots », la production du robot est le principal contributeur à l'impact sur l'épuisement des ressources minérales ADP (RB) avec 66 à 91% de contribution à l'impact et 70 à 91% pour l'impact ADP (UR). L'autre contributeur à l'impact ADP (UR) pour ces scénarios est la production du napropamide, représentant 16% des contributions. La production des herbicides est par contre le principal contributeur à l'impact ADP (UR) pour les scénarios « Conventionnels » avec des valeurs allant de 67 à 77%.

A la différence des autres bassins viticoles, on observe que les scénarios intégralement robotisés (intra + inter rang) ont des impacts beaucoup moins importants que les scénarios « Conventionnels » ou couplant des pratiques de désherbage conventionnelles et robotisées. Le principal contributeur à l'impact sur l'épuisement des ressources fossiles pour l'ensemble des scénarios « Conventionnels » est la production du GNR (32 à 92% de l'impact). Les deux principaux contributeurs pour les scénarios « Robots » sont la production et le transport des robots sur la parcelle (respectivement 6 à 34% et 10 à 62%). Le scénario le moins impactant est le scénario VL1 caractérisé par un désherbage chimique de l'intra rang.

4.3.1.2. Impacts sur la toxicité humaine (et par extension l'écotoxicité des milieux aquatiques terrestres et marins)

Les impacts sur la toxicité humaine suivent la même tendance que ceux des impacts sur l'épuisement des ressources minérales. Les scénarios « Robots » présentent des impacts plus importants que les scénarios « Conventionnels ». La production du robot est le principal contributeur à l'impact sur la toxicité humaine et représente entre 48 et 81% de l'impact.

Les impacts de l'ensemble des scénarios « Conventionnels » sont quant à eux expliqués par la contribution de l'impact de la fabrication du matériel agricole avec des valeurs allant de 49 à 61% pour la fabrication des tracteurs et 15 à 17% pour la fabrication des outils de désherbage.

4.3.1.3. Impacts sur le changement climatique et le potentiel d'oxydation photochimique

Les impacts sur le changement climatique suivent la même tendance que ceux sur l'épuisement des ressources fossiles. Ceci est essentiellement dû aux émissions de CO₂ fossile issues de la combustion du GNR dans le moteur des tracteurs et au transport des robots sur la parcelle par un véhicule utilitaire. Les émissions dues à la combustion du GNR représentent entre 7 et 19% pour les scénarios « Robots » et entre 55 et 78% pour les scénarios « Conventionnels ». Les scénarios « Robots » présentent 10 à 60% d'impact supplémentaire par rapport aux scénarios conventionnels dû au fait qu'ils doivent être amenés sur la parcelle à l'aide d'un véhicule utilitaire.

L'impact sur le potentiel d'oxydation photochimique est pour partie dû aux émissions liées à la combustion du GNR dans le moteur des tracteurs dans les scénarios « Conventionnels ». Ces émissions représentent environ 16 et 44% de l'impact. Le transport des robots sur les parcelles est quant à lui responsable pour environ 15 à 62% de l'impact des scénarios « Robots ». L'impact de la production de napropamide utilisé pour le désherbage chimique ou mixte de l'intra rang représente quant à lui 15 à 37% de l'impact selon les scénarios.

4.3.1.4. Impacts sur l'écotoxicité terrestre

Comme pour les scénarios CH et LR, la production du matériel agricole est le principal contributeur à l'impact sur l'écotoxicité terrestre. Pour les scénarios « Conventionnels », les principaux contributeurs sont la production des tracteurs (31 à 45% de l'impact) et la production des outils de désherbage (24 à 26% de l'impact) tandis que pour les scénarios « Robots », les principaux contributeurs sont la production des tracteurs (4 à 23% de l'impact), la production des outils de désherbage (23 à 29% de l'impact) et la production du robot (16 à 48% de l'impact).

4.3.1.5. Impacts sur l'acidification et l'eutrophisation des milieux aquatiques terrestres

Au regard de l'impact Acidification, à la différence des scénarios CH et LR, les scénarios utilisant les herbicides pour le désherbage chimique et mixte ont des impacts équivalents ou moins importants que les autres scénarios. La production des herbicides dans ces scénarios représente des contributions allant de 28 à 63% de l'impact. Les autres contributeurs sont les émissions de substances acidifiantes lors de la combustion du GNR dans le moteur de tracteur pour les scénarios « Conventionnels » et le transport des robots pour les scénarios « Robots », respectivement 16 à 55% et 10 à 51% de l'impact.

Pour l'impact eutrophisation, les scénarios « Robots » sont plus impactants que les scénarios « Conventionnels » hormis pour VL5 avec pour principaux contributeurs la production des robots (entre 22 et 62%) et leur transport jusqu'au champ (entre 10 et 32%). Ces contributions s'ajoutent aux impacts de la production de GNR et les émissions liées à la combustion qui contribuent pour les scénarios non entièrement robotisés.

4.3.2. Analyse des impacts avec la méthode ReCiPe

Les résultats obtenus avec la méthode ReCiPe sont présentés Figure 18 et Figure 19.

4.3.2.1. Impacts sur la formation de particules fines

Quel que soit le scénario, un des principaux contributeurs à cet impact est l'émission de particules fines liée à la combustion du GNR dans les moteurs du tracteur (26 à 68% de l'impact pour les scénarios « Conventionnels » et 6 à 54% pour les scénarios « Robots »). Pour les scénarios concernés (VL1 à VL4), l'autre contributeur à l'impact est la fabrication des herbicides (19 à 51% de l'impact) essentiellement dus à la production de napropamide.

Les scénarios « Robots » sont plus impactants que les scénarios conventionnels car, en plus des contributions précédentes, la production du robot et son transport sur la parcelle viennent alourdir le bilan (respectivement 9 à 46% et 8 à 49% de l'impact).

4.3.2.2. Impacts sur l'écotoxicité des milieux aquatiques terrestres et l'eutrophisation des milieux marins

Les impacts sur l'écotoxicité des milieux aquatiques terrestres et l'eutrophisation des milieux marins sont essentiellement dus à la production du robot, avec respectivement des contributions aux impacts de 61 à 88% et de 61 à 92%. Les éléments contributeurs sont les mêmes que pour les scénarios CH et LR.

4.3.2.3. Impacts sur les radiations ionisantes et l'occupation des terres

Les impacts sur les radiations ionisantes sont principalement causés par la production du GNR pour les scénarios « Conventionnels » (60 à 91% de l'impact) et par la production de GNR et la production d'électricité (respectivement 3 à 56% et 23 à 56% de l'impact) et dans une moindre mesure le transport des robots (10 à 27% de l'impact) pour les scénarios « Robots ».

Les impacts sur l'occupation des terres sont essentiellement dus à la production du robot et au transport du robot, avec respectivement des contributions aux impacts de 21 à 48% et de 31 à 52%.

4.3.2.4. Impacts sur la consommation en eau

Pour les scénarios « Conventionnels », les impacts sur la consommation en eau sont dus à la fabrication du matériel agricole (54 à 66 % de l'impact pour la fabrication du tracteur et 11 à 18% pour la fabrication des outils de désherbage) et à l'usage de l'eau pour la préparation des bouillies de pulvérisation pour les scénarios avec désherbage chimique (24 à 48% de l'impact).

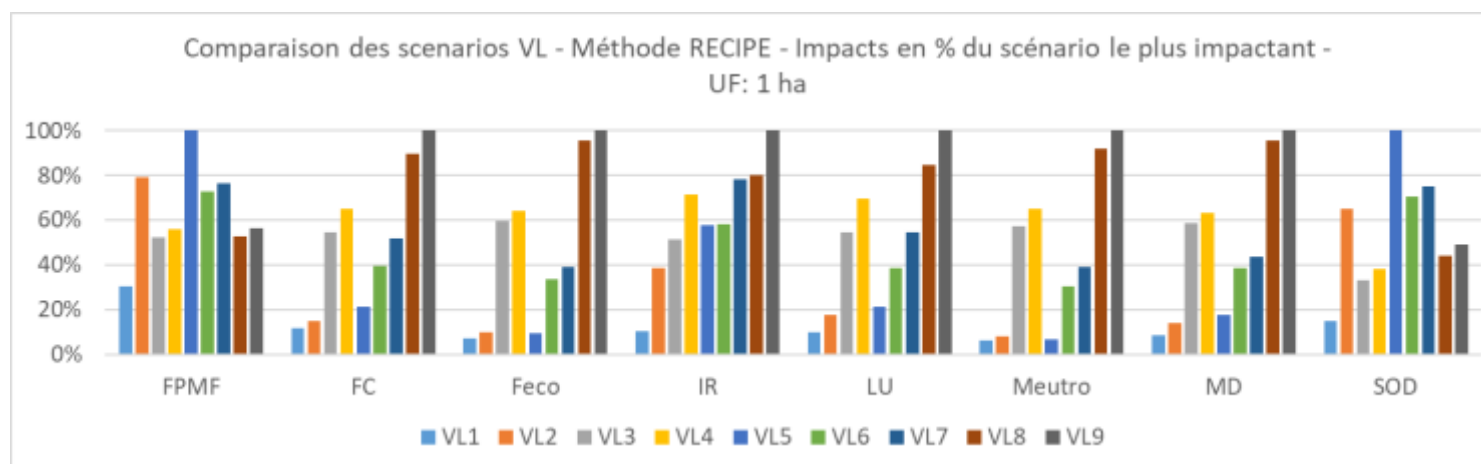


FIGURE 18 : RESULTATS GLOBAUX OBTENUS POUR LES SCENARIOS VAL DE LOIRE AVEC LA METHODE RECIPE

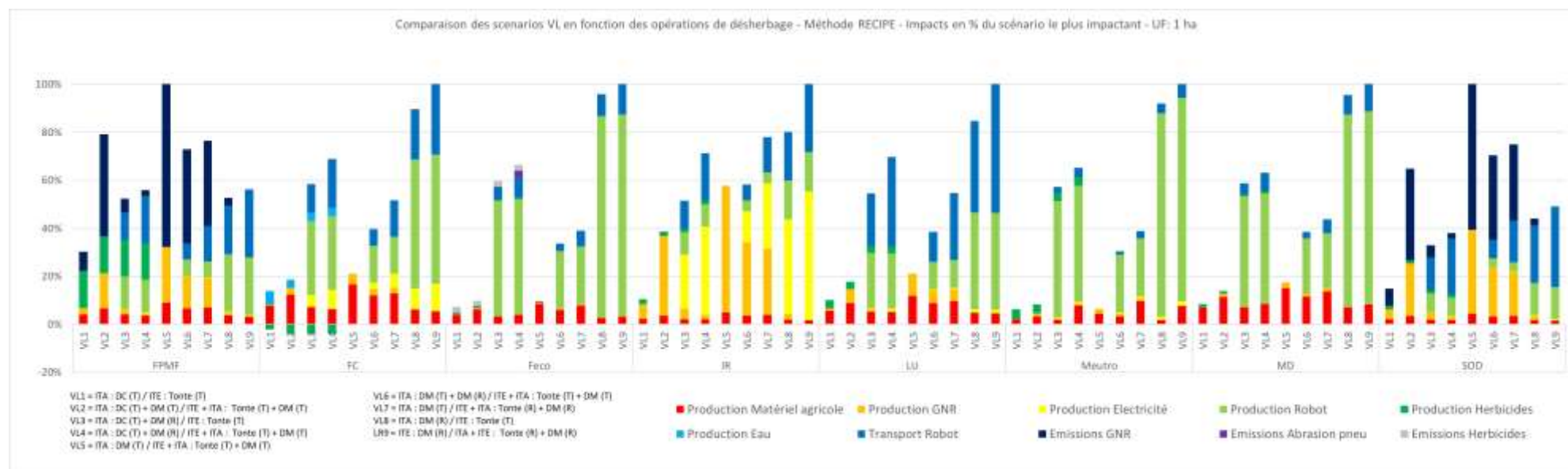


FIGURE 19 : ANALYSE DE CONTRIBUTION DES OPERATIONS DES SCENARIOS VAL DE LOIRE AVEC LA METHODE RECIPE

Pour les scénarios « Robots », les impacts sont dus en grande partie à la production et le transport du robot sur la parcelle (respectivement 29 à 60% et 16 à 30% de l'impact).

4.3.2.5. Impacts sur le surcoût lié à l'exploitation des métaux dans le futur et à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique

Pour les scénarios « Robots », les impacts sont dus en grande partie à la production du robot (52 à 84% de l'impact). Pour les scénarios « Conventionnels », les impacts sont essentiellement dus à la fabrication du matériel agricole soit 83 à 86% des contributions à l'impact (57 à 62 % pour la fabrication du tracteur et 22 à 26% pour la fabrication des outils de désherbage).

Les impacts sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique sont essentiellement dus à la production du GNR (28 à 35% de l'impact) et aux émissions liées à la combustion du GNR (348 à 61% de l'impact) pour les scénarios « Conventionnels », ainsi qu'au transport des robots pour les scénarios « Robots » (39 à 67% de l'impact).

5. Eléments de discussion et recommandations

5.1. Analyse des grandes tendances observées par bassin viticole

L'analyse des résultats montre que les scénarios les moins impactants sont les scénarios conventionnels de désherbage chimique de l'intra-rang avec une gestion mécanisée (travail du sol ou tonte) de l'inter-rang. Ainsi, ce type de scénario a les plus faibles impacts quel que soit les catégories d'impact :

- Pour les scénarios VL (Val de Loire – Muscadet) hormis pour ADP (UR) du fait de la production d'herbicide, contributeur important à cette catégorie d'impact. Pour cette catégorie, le scénario le moins impactant est un scénario conventionnel de désherbage mécanique de l'intra rang et une gestion combinée du désherbage mécanique de l'intra rang et la tonte de l'inter rang.
- Pour les scénarios CH (Charentes) hormis pour ADP (UR), Acid, FC, Feco, LU, Meutro du fait de l'impact des herbicides pour ces catégories, comme pour les scénarios VL. Pour ces catégories, le scénario le moins impactant est un scénario conventionnel de désherbage mécanique de l'intra rang et de l'inter rang travaillé et de la tonte de l'inter rang non travaillé.
- Pour les scénarios LR (Languedoc Roussillon) hormis pour les catégories ADP (UR), FC, Feco, LU, Meutro pour lesquelles le scénario le moins impactant est un scénario conventionnel de désherbage mécanique de l'intra rang et une gestion combinée de désherbage de l'intra rang et de l'inter rang et pour les catégories Acid, FPMF pour lesquelles le scénario le moins impactant est un scénario présentant un désherbage mécanique de l'intra rang avec un robot et un désherbage mécanique de l'inter rang par un tracteur.

A contrario les scénarios les plus impactants sont les scénarios de désherbage mécanique robotisé de l'intra rang et de l'inter rang (CH, VL) et de désherbage mixte ou mécanique robotisé de l'intra rang (LR). Ceci est valable quel que soit les catégories d'impact sauf pour :

- Acid, FPMF, SOD pour les scénarios CH pour lesquelles le scénario le plus impactant est un scénario conventionnel de désherbage mixte de l'intra rang et la tonte et le désherbage mécanique de l'inter rang. Ceci est dû aux impacts de la production des herbicides utilisés dans le désherbage mixte.
- ADP Fossil, Acid, GWP, FPMF, SOD pour LR pour lesquelles le scénario le plus impactant est un scénario conventionnel de désherbage mixte de l'intra rang et un désherbage mécanique combiné de l'intra rang et de l'inter rang. Ceci est dû à une plus grande consommation de GNR et aux émissions associées induites par un nombre de passages sur la parcelle plus important pour gérer l'enherbement.
- ADP Fossil, Acid, GWP, POCP, FPMF, SOD pour VL pour lesquelles le scénario le plus impactant est un scénario conventionnel de désherbage mécanique de l'intra rang et une gestion combinée tonte / désherbage mécanique de l'inter rang. Ceci est également dû à une plus grande consommation de GNR et aux émissions associées comme pour les scénarios LR.

Les scénarios conventionnels présentant un désherbage chimique de l'intra rang ont de manière générale des impacts plus faibles que les scénarios avec désherbage mixte ou intégralement mécanique. Ces éléments s'expliquent par une consommation de GNR moins importante pour ces opérations de désherbage (3,91 l/h) comparée au désherbage mécanique (7,27 à 15 l/h). De plus, seule la production des herbicides apparaît comme plus ou moins contributrice à certains impacts (ADP (UR), Acid, POCP, FPMP). Les impacts de la production de napropamide représentent plus de 95% des contributions, ceux du glyphosate sont très faibles en comparaison. Les émissions des herbicides dans l'eau, l'air et le sol n'ont qu'une très faible contribution aux impacts sur l'écotoxicité terrestre (TETP) et des milieux aquatiques terrestres (Feco). Ceci s'explique principalement par le fait que le glyphosate a une durée de vie très courte dans le sol et une forte dégradabilité. Le principal métabolite issu de la dégradation du glyphosate dans le sol est l'acide aminométhylphosphonique (AMPA) (INERIS, 2020). L'AMPA est une substance qui n'est pas référencée dans les bases de données ACV et ne présente pas de facteur de caractérisation quel que soit la méthode utilisée. Il est donc impossible de retranscrire dans les impacts toxicité et écotoxicité l'effet de la dégradation du glyphosate dans les sols. Le napropamide présente quant à lui un niveau de toxicité faible à modérée chez l'homme et les espèces non cibles (oiseaux, abeilles, poissons) mais un niveau élevée de persistance dans l'environnement²⁴. Par ailleurs, une analyse de sensibilité sur le mode de pulvérisation des herbicides (canon « spider vault » – résultats présentés – ou sol incorporation) a montré que les variations de résultats étaient minimales et uniquement observées pour les indicateurs FAETP de CML (diminution en faveur de l'incorporation < 1%) et TE de ReCiPe (diminution en faveur de l'incorporation d'environ 6,6%). Une autre analyse de sensibilité sur le choix des méthodes de caractérisation a été réalisée en comparant les résultats de CML et ReCiPe2016 avec une autre méthode, Usetox 2.12 (Rosenbaum et al., 2008). Cette analyse n'a pas montré de grandes modifications dans la hiérarchie des scénarios (cf. Annexe 2).

Au final, les impacts de chaque scénario sont conditionnés par :

- le nombre d'opérations composant le scénario qui conditionne le nombre total de passage des outils de désherbage (10 à 18 pour CH, 5 à 11 pour LR, 4 à 9 pour VL)
- le fait que ces passages soient réalisés soit avec un tracteur, soit avec un robot (cf. Tableau 3)
- le type d'outil de désherbage utilisé, plus ou moins consommateur de GNR ou d'électricité, selon l'opération considérée (cf. Tableau 15)
- la configuration des vignobles (tonte tous les rangs, tonte un rang sur deux, désherbage mécanique un rang sur deux, désherbage mécanique tous les rangs)
- la quantité d'herbicide utilisé, en particulier le napropamide utilisé en pré-levée, dont l'élaboration présente un fort impact sur plusieurs indicateurs

La section suivante présente des éléments complémentaires pour comprendre les impacts environnementaux associés aux opérations de désherbage composant les scénarios en prenant exemple sur deux catégories d'impact : le changement climatique et l'épuisement des ressources minérales.

5.2. Influence de l'impact d'un passage d'opération de désherbage sur les résultats obtenus

Les scénarios sont composés d'un ou plusieurs passages d'opérations de désherbage de l'intra rang et de l'inter rang. En comparant les types d'opérations de désherbage entre elles, nous pouvons avoir une indication des impacts de ces dernières et donc permettre d'orienter la conception d'itinéraire de désherbage moins impactants. Nous avons fait le choix de ne présenter que deux catégories d'impact dans cette section, une pour laquelle les scénarios « Robots » ont tendance à être moins impactants (changement climatique) et une pour laquelle les scénarios « Robots » ont tendance à être plus impactants (épuisement des ressources minérales).

²⁴ <https://www.sagepesticides.qc.ca/Recherche/RechercheMatiere/DisplayMatiere?MatiereActiveID=78>

5.2.1. Généralités

Les robots mobilisés dans le cadre de cette étude ne sont utilisés que pour des opérations de désherbage mécanique de l'intra rang, de désherbage combiné de l'intra rang et de tonte de l'inter rang et de tonte de l'inter rang (Figure 20, Figure 23). Des différences sont observées quel que soit le type de désherbage entre les différents bassins viticoles. Cette différence est essentiellement due à la différence d'écartement entre les rangs qui conditionne le rendement de chantier (temps passé pour l'opération de désherbage ramené à l'hectare). Les vignobles ayant un faible écartement (VL, 1,5 m) auront des impacts plus élevés que les vignobles à fort écartement (CH, 3 m).

Le codage des légendes des Figures 20 à 25 est le suivant : les deux premières lettres correspondent au bassin viticole et le chiffre à l'opération de désherbage. A titre d'exemple, le code CH_13 correspond à l'opération 13 mise en œuvre en Charentes. Pour rappel, le détail des opérations est présenté dans le Tableau 4.

5.2.2. Impacts sur le changement climatique

Le désherbage mécanique de l'intra rang par les robots (Figure 20) est effectué avec des interceps (opération 13, tous bassins viticoles), une bineuse à doigt Kress (opération 14, uniquement en CH), des disques crénelés (opération 15, uniquement en LR), ou une décavaillonneuse (opération 16, uniquement en CH et VL). L'usage de la bineuse à doigt Kress génère moins d'impact sur le changement climatique que l'usage des interceps (scénarios CH), eux-mêmes moins importants que l'usage de la décavaillonneuse (scénarios CH et VL). De même, l'usage de disques crénelés impacte moins le changement climatique que l'usage d'interceps (scénarios LR).

La tonte de l'inter rang présente des impacts équivalents à ceux de l'usage de la décavaillonneuse (scénarios CH). A contrario, la tonte de l'inter rang couplée au désherbage mécanique de l'intra rang avec interceps présente des impacts 2 fois plus importants que l'usage seul d'interceps pour le désherbage mécanique de l'intra rang dans les scénarios CH et VL. Dans les scénarios VL, l'usage d'une décavaillonneuse combinée à la tonte génère légèrement plus d'impact que l'usage d'interceps.

Les opérations de désherbage conventionnelles sont plus variées (Figure 21). De manière générale, les opérations de désherbage d'un rang sur deux sont 2 fois moins impactantes que les opérations de désherbage de l'ensemble des rangs (scénarios CH). Les opérations les moins impactantes dans les scénarios CH sont les opérations de tonte de l'inter rang suivies par les opérations de désherbage chimique de l'intra rang, de désherbage mécanique de l'intra rang avec une bineuse à doigt Kress et les opérations de désherbage mécanique de l'intra rang avec des interceps.

Pour les scénarios LR, les opérations de désherbage chimique de l'intra rang sont les opérations présentant les impacts les plus faibles suivies par les opérations combinées de désherbage mécanique de l'intra rang et de l'inter rang, et le désherbage mécanique de l'inter rang seul. Les opérations de désherbage mécanique de l'inter rang avec un cadre équipé de dents ou un cadre équipé de socs présentent les mêmes valeurs et sont les plus impactantes.

Pour les scénarios VL, les opérations les moins impactantes sont les opérations de désherbage chimique de l'intra rang suivies par les opérations de désherbage mécanique de l'intra rang avec disques émotteurs, les opérations de désherbage mécanique de l'intra rang avec interceps. Les opérations les plus impactantes sont les opérations combinant le désherbage mécanique de l'intra rang avec des interceps et la tonte de l'inter rang.

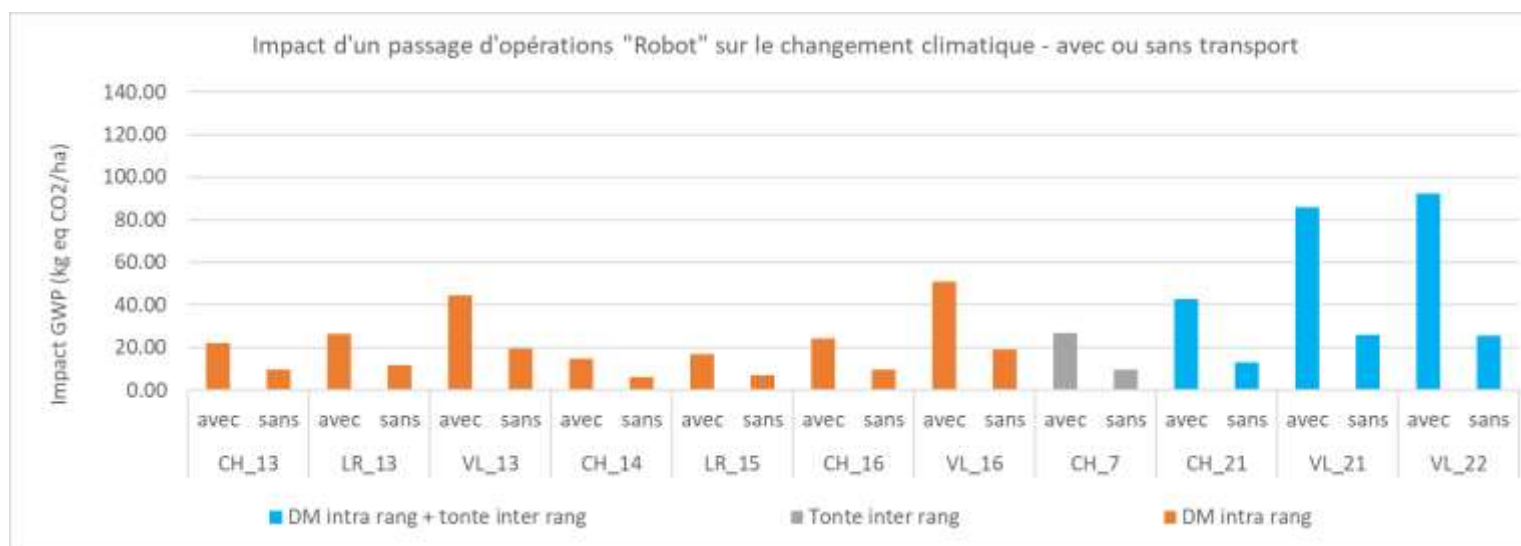


FIGURE 20 : IMPACT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DES OPERATIONS DE DESHERBAGE UTILISANT DES ROBOTS

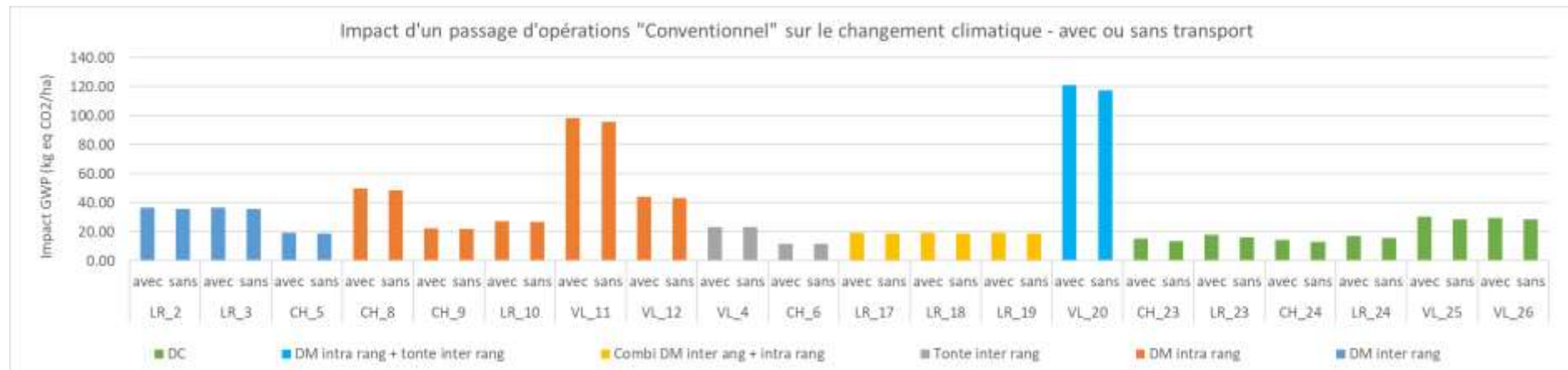


FIGURE 21 : IMPACT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DES OPERATIONS DE DESHERBAGE CONVENTIONNELLES

Si on compare à opérations équivalentes les opérations de désherbage mécanique de l'intra rang avec des robots ou des tracteurs, on se rend compte que les opérations avec robots sont moins impactantes que les opérations avec tracteur. Cette diminution est d'autant plus importante si on ne considère que l'opération au champ et non pas le transport du robot sur la parcelle (cf. opérations avec et sans transport sur la Figure 22).

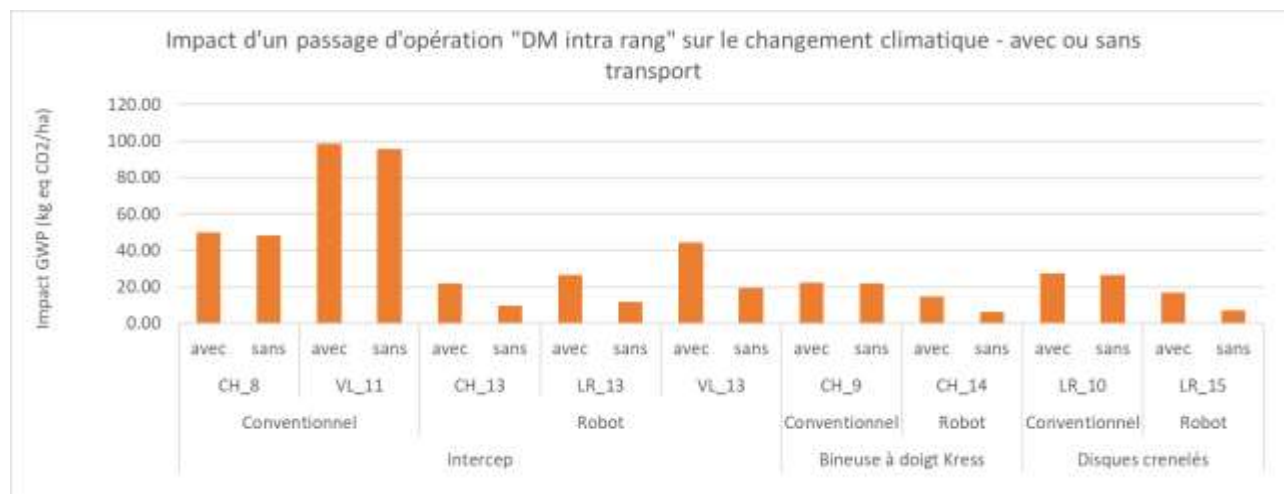


FIGURE 22 : COMPARAISON DES OPERATIONS DE DESHERBAGE MECANIQUE DE L'INTRA RANG SELON LES SCENARIOS (CONVENTIONNEL ET ROBOT) ET LES OUTILS DE DESHERBAGE UTILISES

5.2.3. Impacts sur l'épuisement des ressources minérales

Comme pour le changement climatique, l'usage de la bineuse à doigt Kress dans les opérations de désherbage robotisées (Figure 23) génère moins d'impact sur l'indicateur d'épuisement des ressources minérales que l'usage des interceps (scénarios CH). Par contre, contrairement au changement climatique, les impacts de l'usage des interceps ou de la décavaillonneuse sont identiques (scénarios CH et VL). De même, comme pour le changement climatique, l'usage de disques crénelés impacte moins l'épuisement des ressources minérales que l'usage d'interceps (scénarios LR).

La tonte de l'inter rang présente des impacts équivalents à ceux de l'usage de la décavaillonneuse (scénarios CH). A contrario, la tonte de l'inter rang couplée au désherbage mécanique de l'intra rang avec interceps présente des impacts légèrement plus importants que l'usage seul d'interceps pour le désherbage mécanique de l'intra rang dans les scénarios CH et VL. Dans les scénarios VL, l'usage d'une décavaillonneuse combinée à la tonte génère le même niveau d'impact que l'usage d'interceps.

Les opérations de désherbage conventionnelles présentent des impacts environ 10 à 15 fois plus faibles que les opérations de désherbage robotisées (Figure 24). De manière générale, les opérations de désherbage d'un rang sur deux sont 2 fois moins impactantes que les opérations de désherbage de l'ensemble des rangs comme pour le changement climatique (scénarios CH). Les opérations de tonte de l'inter rang, de désherbage chimique de l'intra rang et de désherbage mécanique de l'intra rang avec cadre ont des impacts équivalents et sont plus faibles que les opérations de désherbage de l'intra rang avec une bineuse à doigt Kress. Les opérations les plus impactantes pour les scénarios CH sont les opérations de désherbage mécanique de l'intra rang avec des interceps.

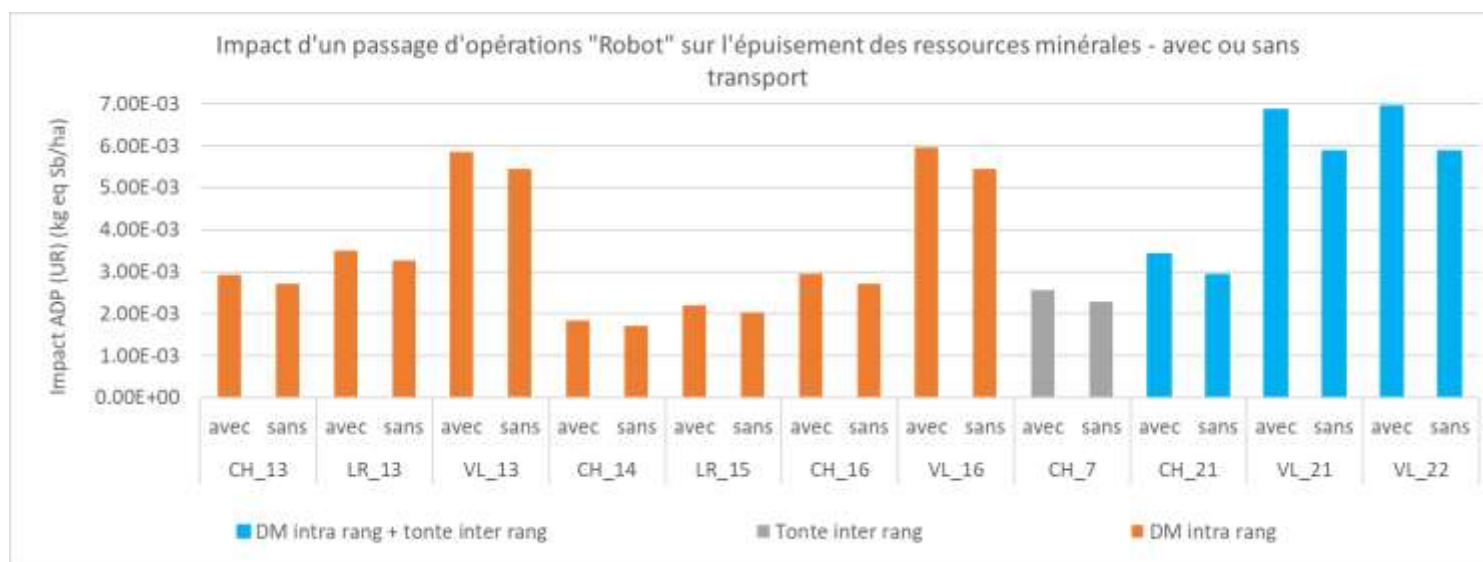


FIGURE 23 : IMPACT SUR L'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES MINÉRALES DES OPÉRATIONS DE DESHERBAGE UTILISANT DES ROBOTS

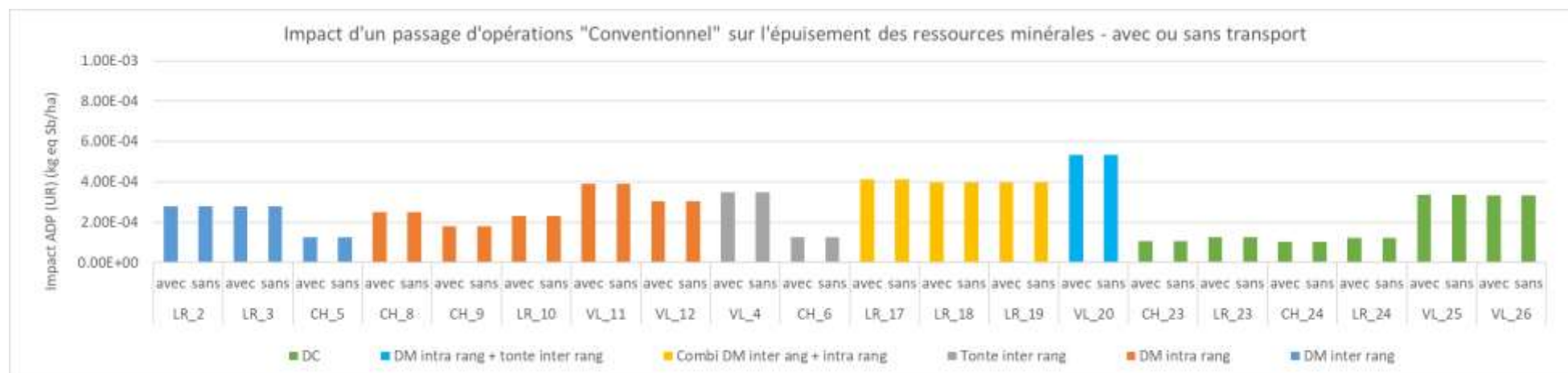


FIGURE 24 : IMPACT SUR L'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES MINÉRALES DES OPÉRATIONS DE DESHERBAGE CONVENTIONNELLES

Pour les scénarios LR, les opérations de désherbage chimique de l'intra rang sont les opérations présentant les impacts les plus faibles suivies par les opérations de désherbage mécanique de l'intra rang avec des disques crénelés et de désherbage mécanique de l'inter rang. Les opérations de désherbage mécanique combinées de l'intra rang et de l'inter rang représentent les opérations les plus impactantes.

Pour les scénarios VL, les opérations les moins impactantes sont les opérations de désherbage mécanique de l'intra rang avec disques émotteurs suivies par les opérations de tonte de l'inter rang et de désherbage chimique de l'intra rang (mêmes valeurs d'impacts) et de désherbage mécanique de l'intra rang avec interceps. Les opérations les plus impactantes sont les opérations combinant le désherbage mécanique de l'intra rang avec des interceps et la tonte de l'inter rang.

Si on compare à opérations équivalentes les opérations de désherbage mécanique de l'intra rang avec des robots ou des tracteurs, on se rend compte que les opérations avec robots sont beaucoup plus impactantes que les opérations avec tracteur. Cette augmentation est essentiellement due aux ressources minérales utilisées pour la fabrication des robots et référencées dans l'ICV des robots (Figure 25).

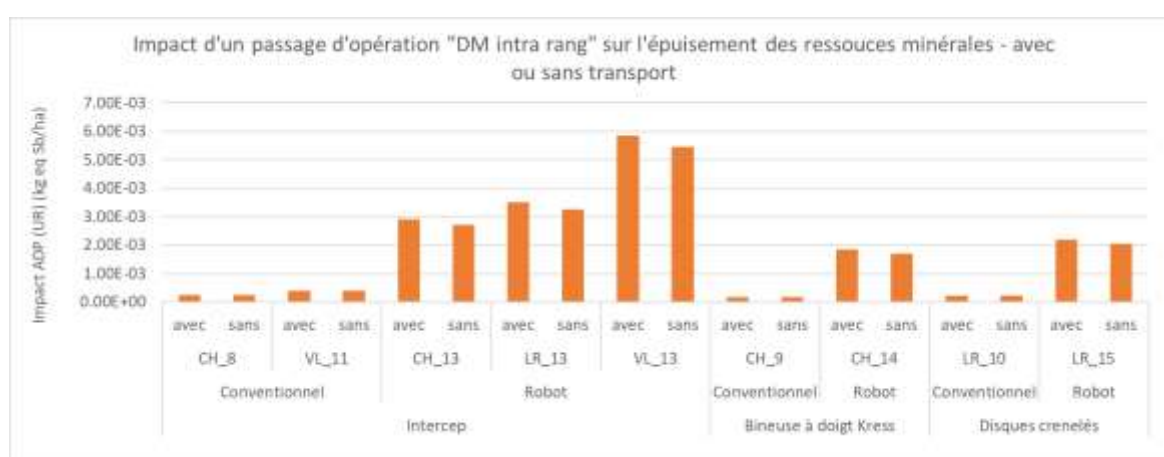


FIGURE 25 : COMPARAISON DES OPERATIONS DE DESHERBAGE MECANIQUE DE L'INTRA RANG SELON LES SCENARIOS (CONVENTIONNEL ET ROBOT) ET LES OUTILS DE DESHERBAGE UTILISES

5.3. Discussion au regard des résultats obtenus de l'impact de la robotique sur les pratiques de désherbage des vignobles

Des analyses de sensibilité ont été réalisées pour évaluer l'impact du transport des robots, de la durée de vie ainsi que l'usage de cuivre recyclé en remplacement du cuivre primaire dans le cadre de l'écoconception des robots. Une discussion est également présentée sur les ICV utilisés pour modéliser la fabrication des robots et des tracteurs.

5.3.1. Distance de transport des robots

Nous avons fait l'hypothèse dans les scénarios que le robot était déplacé sur une parcelle située à 4 km de l'exploitation agricole à l'aide d'un utilitaire équipé d'une remorque. Le transport étant très impactant sur les scénarios « Robot », une analyse de sensibilité a été réalisée en évaluant le potentiel de réduction des impacts en considérant un usage du robot sur les parcelles attenantes à l'exploitation agricole. Ceci revient à ne pas prendre en compte le transport du robot dans les scénarios.

Le taux de réduction des impacts liés à la non prise en compte du transport a été calculé selon la formule suivante :

$$\text{Taux de réduction (transport)} = \frac{(\text{Valeur sans transport} - \text{Valeur avec transport})}{(\text{Valeur avec transport})} \times 100$$

Les résultats de cette analyse de sensibilité sont présentés dans le Tableau 24. Les valeurs présentées sont positives mais indiquent bien un taux de réduction (en %) des impacts. Les résultats sont présentés à l'aide de code couleur pour une plus grande visibilité des résultats :

- Orange foncé : réduction comprise entre 0 et 10% inclus
- Jaune : réduction comprise entre 11% et 25% inclus
- Vert clair : réduction comprise entre 26 et 50% inclus
- Vert foncé : réduction supérieure à 50%

TABLEAU 24 : TAUX DE REDUCTION (EN%) DES IMPACTS DES SCENARIOS « ROBOTS » SANS PRENDRE EN COMPTE LE TRANSPORT DES ROBOTS JUSQU'A LA PARCELLE

	Scénarios "Robots" CH				Scénarios "Robot" LR					Scénarios "Robot" VL					
	CH3	CH4	CH6	CH7	LR3	LR5	LR8	LR10	LR11	VL3	VL4	VL6	VL7	VL8	VL9
Indicateurs de la méthode CML															
ADP (RB)	5%	12%	7%	11%	5%	6%	6%	6%	6%	6%	10%	6%	12%	6%	9%
ADP (UR)	4%	10%	7%	11%	4%	6%	5%	6%	6%	6%	9%	7%	13%	7%	9%
ADP Fossil	16%	38%	32%	49%	15%	20%	17%	17%	21%	37%	56%	11%	23%	50%	63%
Acid	9%	23%	28%	43%	9%	18%	11%	15%	19%	21%	33%	11%	22%	41%	52%
GWP	15%	38%	31%	48%	15%	19%	16%	16%	20%	37%	55%	11%	22%	48%	62%
HTTP	8%	18%	11%	17%	8%	9%	9%	9%	10%	11%	17%	9%	18%	12%	16%
Eutro	12%	29%	21%	32%	12%	15%	13%	13%	16%	21%	33%	11%	22%	25%	33%
POCP	17%	39%	38%	54%	17%	26%	19%	22%	26%	36%	52%	17%	32%	52%	64%
TETP	8%	19%	15%	23%	8%	10%	9%	8%	10%	16%	25%	9%	18%	20%	26%
Indicateurs de la méthode ReCiPe															
FPMF	9%	24%	26%	40%	9%	16%	11%	13%	17%	22%	35%	9%	19%	39%	51%
FC	17%	32%	22%	31%	17%	18%	18%	17%	19%	22%	31%	17%	29%	23%	29%
Feco	7%	14%	10%	15%	7%	8%	8%	8%	9%	9%	13%	9%	17%	9%	13%
IR	14%	24%	21%	26%	14%	17%	15%	15%	17%	22%	28%	11%	19%	25%	28%
LU	29%	52%	42%	55%	30%	36%	32%	33%	36%	40%	53%	32%	51%	45%	54%
Meutro	3%	7%	5%	7%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	6%	4%	8%	4%	6%
MD	6%	13%	8%	13%	6%	7%	6%	6%	7%	8%	12%	7%	13%	8%	11%
SOD	17%	41%	34%	52%	16%	21%	18%	17%	22%	41%	61%	11%	23%	54%	68%

Il ressort de l'analyse que pour les scénarios présentant un nombre important de passage d'opérations de désherbage robotisées (CH4 : 4 passages, CH6 : 9 passages, CH7 : 9 passages, VL3 : 4 passages, VL4 : 4 passages, VL8 : 7 passages, VL9 : 7 passages) la diminution des impacts (supérieure à 25%) associées au transport des robots atteint :

- 32 à 63% pour l'indicateurs ADP Fossil,
- 28 à 52% pour l'indicateur Acid,
- 31 à 62% pour l'indicateur GWP,
- 26 à 64% pour l'indicateur POCP,
- 34 à 68% pour l'indicateur SOD.

L'indicateur LU, qui est impacté par l'occupation des sols par les routes, peut diminuer quant à lui de 29 à 55% selon les scénarios.

Cette sensibilité montre que la distance entre les parcelles et le lieu de stockage et de recharge des robots est un élément déterminant pour évaluer l'impact de l'implémentation d'un itinéraire robotisé dans les exploitations agricoles. Le gain maximal étant obtenu lorsque les robots peuvent atteindre les parcelles sans

utilisation d'un véhicule et d'une remorque, toute utilisation de ce type de transport vient ensuite atténuer les gains possibles.

A titre d'exemple, si l'on considère l'opération de désherbage de l'intra-rang par des interceps dans le Val de Loire, les impacts sur le changement climatique avec transport pour VL_13 pour les opérations robotisées et VL_11 pour les opérations conventionnelles sont respectivement de 44,36 kg eq. CO₂ et 98,44 kg eq. CO₂ alors qu'elles ne sont respectivement que de 19,71 kg eq. CO₂ et 95,44 kg eq. CO₂ sans transport. Une analyse des courbes de tendances observées montre que les systèmes robotisés deviennent équivalents aux solutions conventionnelles en termes d'impact sur le changement climatique pour des distances de l'ordre de 14 km (Figure 26). Au-delà de cette distance, les solutions conventionnelles (ici enjambeur 50kW avec moteur thermique) sont moins impactantes. Cette distance seuil est à affiner en fonction du matériel effectivement utilisé sur l'exploitation.

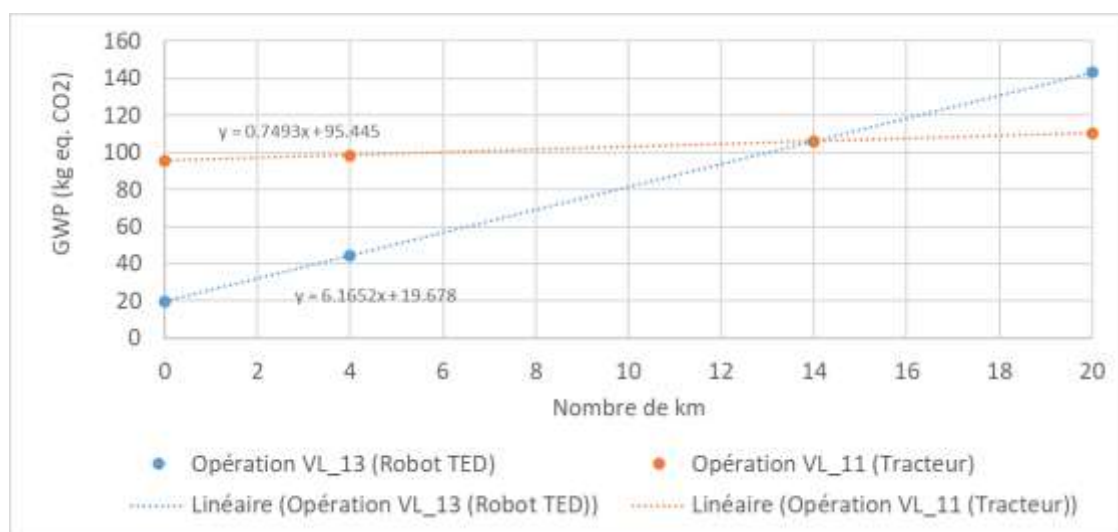


FIGURE 26 : ANALYSE DE LA SENSIBILITE DE LA DISTANCE SUR LE GWP POUR UNE OPERATION DE DESHERBAGE DE L'INTRA-RANG AVEC DES INTERCEPS UTILISANT UNE SOLUTION ROBOTISEE OU CONVENTIONNELLE

5.3.2. Ecoconception des robots (usage de Cu recyclé)

La production du robot est un contributeur important à l'épuisement des ressources minérales (ADP (RB), ADP (UR), MD), à la toxicité humaine (HTP), à l'écotoxicité des milieux naturels (Feco, TETP), à la consommation d'eau (FC) et à l'eutrophisation des milieux aquatiques (Meutro, Eutro). Une première analyse de contribution avait montré la sensibilité des résultats au regard de l'usage du cuivre (Cu) dans la fabrication des câbles utilisé par le robot. Nous avons ainsi réalisé une analyse de sensibilité pour connaître les gains environnementaux potentiels en remplaçant le Cu primaire utilisé dans ces câbles par du Cu recyclé.

Le taux de réduction des impacts liés à l'utilisation de Cu recyclé a été calculé selon la formule suivante :

$$\text{Taux de réduction (Cu)} = \frac{(\text{Valeur Cu recyclé} - \text{Valeur Cu primaire})}{(\text{Valeur Cu primaire})} \times 100$$

Les résultats de cette analyse de sensibilité sont présentés dans le Tableau 25. Les valeurs présentées sont positives mais indiquent bien un taux de réduction (en %) des impacts. Les résultats sont présentés à l'aide de code couleur pour une plus grande visibilité des résultats :

- Orange foncé : réduction comprise entre 0 et 10% inclus
- Jaune : réduction comprise entre 11% et 25% inclus
- Vert clair : réduction comprise entre 26 et 50% inclus
- Vert foncé : réduction supérieure à 50%

TABLEAU 25 : TAUX DE REDUCTION (EN %) DES IMPACTS DES SCENARIOS « ROBOTS » EN REMPLAÇANT LE CUIVRE PRIMAIRE PAR DU CUIVRE RECYCLE DANS LA FABRICATION DES ROBOTS

	Scénarios "Robots" CH				Scénarios "Robot" LR					Scénarios "Robot" VL					
	CH3	CH4	CH6	CH7	LR3	LR5	LR8	LR10	LR11	VL3	VL4	VL6	VL7	VL8	VL9
Indicateurs de la méthode CML															
ADP (RB)	12%	14%	13%	11%	12%	13%	12%	12%	13%	14%	13%	11%	11%	14%	14%
ADP (UR)	11%	11%	17%	16%	11%	16%	12%	15%	16%	14%	14%	15%	14%	17%	17%
ADP Fossil	2%	4%	4%	6%	2%	3%	2%	2%	3%	5%	7%	2%	3%	7%	8%
Acid	2%	4%	6%	7%	2%	4%	3%	4%	4%	5%	6%	2%	3%	10%	10%
GWP	2%	4%	4%	6%	2%	3%	2%	2%	3%	6%	7%	2%	3%	7%	8%
HTP	15%	15%	19%	18%	15%	17%	16%	16%	17%	20%	19%	15%	14%	21%	21%
Eutro	6%	8%	9%	10%	6%	7%	6%	6%	8%	10%	11%	5%	5%	12%	12%
POCP	3%	5%	5%	7%	3%	4%	3%	3%	4%	6%	7%	2%	4%	8%	9%
TETP	5%	6%	9%	8%	5%	6%	5%	5%	6%	10%	10%	5%	5%	12%	12%
Indicateurs de la méthode ReCiPe															
FPMF	2%	4%	5%	6%	2%	4%	2%	3%	4%	5%	6%	2%	3%	9%	10%
FC	7%	7%	8%	8%	7%	7%	7%	6%	7%	8%	8%	6%	6%	9%	9%
Feco	16%	15%	20%	19%	16%	18%	17%	18%	18%	19%	17%	17%	15%	21%	20%
IR	2%	3%	3%	3%	2%	3%	2%	2%	3%	3%	3%	2%	2%	4%	4%
LU	7%	8%	9%	9%	7%	8%	7%	8%	8%	9%	9%	7%	8%	11%	10%
Meutro	5%	4%	6%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	4%	6%	6%
MD	10%	10%	12%	12%	10%	11%	10%	10%	11%	12%	12%	10%	9%	13%	13%
SOD	3%	5%	5%	6%	3%	3%	3%	3%	3%	7%	8%	2%	3%	9%	10%

Les résultats obtenus indiquent que les réductions potentielles d'impact sont moins importantes sur la fabrication du robot que sur la logistique des chantiers de désherbage robotisés. Les plus fortes réductions d'impact sont obtenues pour les indicateurs de toxicité humaine (14 à 21% de réduction), d'écotoxicité des milieux aquatiques terrestres (15 à 21% de réduction) et pour l'épuisement des ressources minérales (11 à 17%).

5.3.3. Modélisation des robots et des tracteurs dans les scénarios étudiés

5.3.3.1. Impact des données d'inventaire tracteur et robot sur les résultats obtenus

L'impact sur l'épuisement des ressources minérales des itinéraires robotisés est plus important (d'un ordre de grandeur) que celui des itinéraires utilisant des machines conventionnelles (cf. Figure 23 et Figure 24). La contribution la plus importante sur cette catégorie d'impact provient de la fabrication des robots.

Dans le cadre de cette étude, la fabrication du robot a été modélisée à partir des matériaux le composant sur la base des données fournies par son constructeur, NAÏO Technologies. Les infrastructures et l'énergie nécessaires à leur fabrication, comme le recyclage des robots, n'ont pas été pris en compte dans l'évaluation car aucune donnée n'est actuellement disponible. La modélisation des tracteurs, quant à elle, est basée sur le procédé « market for tractor, 4-wheel, agricultural » disponible dans la base de données ecoinvent v3.7.1. Ce procédé ecoinvent inclut l'énergie nécessaire à leur fabrication, ainsi que des données relatives à leur recyclage. Les compositions des robots et des tracteurs sont présentées dans le Tableau 26.

**TABEAU 26 : COMPOSITION EN POURCENTAGE DES ELEMENTS CONSTITUANT LES ROBOTS ET LES TRACTEURS MODELISES
DANS LES SCENARIOS**

Données constructeur	Production Robot pour une durée de vie de 2 400 heures (%)	Données ecoinvent	Production tracteur pour une durée de vie de 7 200 heures (%)
Acier	68,97%	Acier	76,50%
Moteur électrique	13,88%	Caoutchouc synthétique	9,93%
Aluminium	5,74%	Aluminium	4,47%
Caoutchouc synthétique	3,55%	Polypropylène	2,98%
Batterie Li-ion	3,41%	Cuivre	1,99%
Câbles électriques	2,56%	Plomb	0,99%
Cuivre	0,39%	Zinc	0,99%
Polycarbonate	0,30%	Verre	0,99%
Ordinateur	0,29%	Huile lubrifiante	0,66%
Vérins électriques	0,29%	Peinture	0,50%
Transformateur	0,19%	Energie pour la fabrication	Inclus
GPS	0,15%	Données sur recyclage	Inclus
Composants électroniques actifs	0,14%	Infrastructures de production	Exclus
Composants électriques passif	0,14%		
Energie pour la fabrication	Exclus		
Données sur recyclage	Exclus		
Infrastructures de production	Exclus		

Le procédé de production du tracteur est basé sur des données anciennes datant de 2002 et n'ayant pas été actualisées depuis. N'ayant pas disposé de données constructeurs ou de données bibliographiques sur la composition des tracteurs, ecoinvent a utilisé les données sur la fabrication des camions (« lorry ») comme proxy pour la fabrication des tracteurs (Nemecek et Kägi, 2007).

Les différences de modélisation entre le robot et le tracteur utilisés dans les scénarios entraînent certainement un biais dans les résultats. En effet, on constate notamment l'absence de composants électroniques ou de câbles électriques associés dans cette modélisation où les tracteurs sont essentiellement assimilés à des modules constitués d'acier et de pneumatiques. Or, une analyse comparative des fonctions proposées par un tracteur 50kW avec un robot met en évidence des similarités sur les équipements (GPS, centrale inertielle...). Les postes de pilotage des tracteurs sont équipés d'écrans et de diverses Interfaces Homme-Machine (IHM) constitués de composants électroniques. Les principales différences peuvent résider dans la motorisation (électrique pour les robots, thermique pour les tracteurs dans le cas d'usage étudié ici).

Sur cette base, l'écart d'un ordre de grandeur observé entre les itinéraires robotisés et les itinéraires conventionnels mène à la principale conclusion qu'il est nécessaire de procéder à un ICV plus détaillé des tracteurs utilisés comme référence avant de pouvoir comparer les impacts des filières robotiques et conventionnelles sur l'ensemble des impacts où la fabrication des robots contribue de manière significative dans les écarts entre les deux types d'itinéraires.

Outre les conclusions sur l'épuisement des ressources minérales, les impacts suivants sont également à consolider avec un ICV plus détaillé des tracteurs :

- La toxicité humaine
- L'eutrophisation des milieux aquatiques
- L'occupation des sols

On note également un impact à consolider sur l'écotoxicité terrestre, où des données plus récentes sur les tracteurs sont à prendre en compte pour intégrer les contraintes réglementaires REACH et RoHS sur la composition des tracteurs (limitation de l'usage du chrome hexavalent notamment).

5.3.3.2. Actualisation des données d'inventaire sur les tracteurs agricoles et impact sur les résultats produits

Nous avons donc procédé à une réactualisation des données d'inventaire tracteur à partir d'hypothèses afin d'évaluer la sensibilité sur les résultats obtenus. Le détail de la composition et les hypothèses utilisées pour le calcul sont présentées dans le Tableau 27. Afin de rendre le comparatif le plus équitable possible, les procédés ecoinvent utilisés pour modéliser le nouveau procédé Tracteur sont les mêmes que ceux utilisés pour modéliser les robots.

TABLEAU 27. MODELISATION DE LA COMPOSITION ACTUALISEE D'UN TRACTEUR (EN %)

Composition tracteur actualisée		Production tracteur pour une durée de vie de 7 200 heures (%)	Hypothèses pour le calcul des masses
Structure de base	Acier	73,12%	Identique au procédé d'origine. Calculs basés sur les % de composition de la base de données ecoinvent pour un tracteur de 3 000 kg hors batterie et composants électroniques
	Caoutchouc synthétique	9,50%	
	Aluminium	4,27%	
	Polypropylène	2,85%	
	Cuivre	1,90%	
	Plomb	0,95%	
	Zinc	0,95%	
	Verre	0,95%	
	Huile lubrifiante	0,63%	
	Peinture	0,47%	
Composants électroniques	Ordinateur	0,38%	Masses GPS et Câbles équivalent aux robots. Masse pour les composants électroniques et ordinateur accrue de respectivement 30 et 50% par rapport aux robots
	GPS	0,10%	
	Composants électroniques actifs	0,12%	
	Composants électriques passif	0,12%	
	Câbles	1,69%	
Batterie	Batterie NaCl	2,01%	Ajout car absent du procédé originel. Basée sur 2 batteries de 31.5 kg utilisée sur l'ensemble du cycle de vie du tracteur
Energie pour la fabrication		Exclus	Absence de données
Données sur recyclage		Exclus	
Infrastructures de production		Exclus	

Les résultats comparatifs de l'usage d'un tracteur actualisé par rapport au tracteur de la base ecoinvent sont présentés à la section suivante (§5.3.4). En complément de ces résultats, la Figure 27 présente les résultats d'impacts obtenus pour la production d'un tracteur issu de la base de données ecoinvent, d'un tracteur modélisé à partir des données du Tableau 27 et d'un robot modélisé. Ce comparatif est fait à masse équivalente (1 kg) et pour une durée de vie identique (7 200 heures).

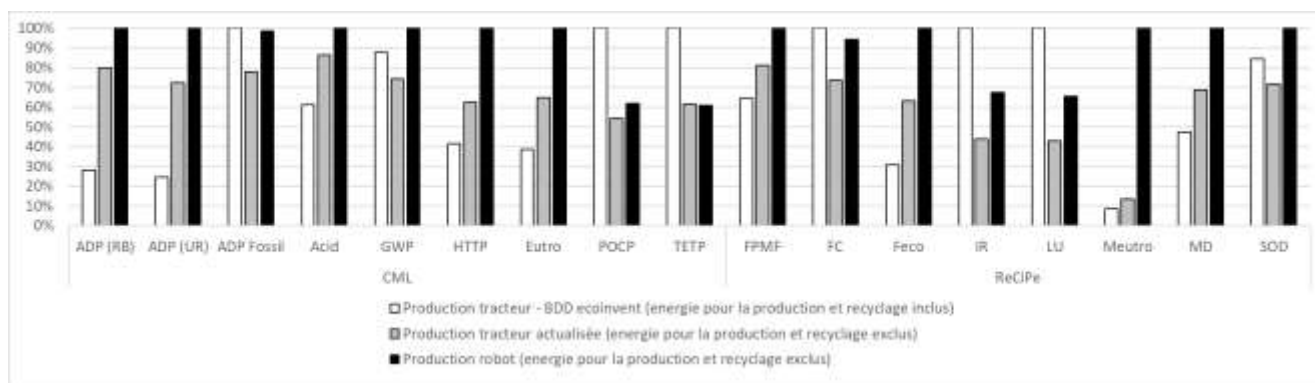


FIGURE 27 : COMPARAISON DES ICV POUR LA PRODUCTION D'UN ROBOT, D'UN TRACTEUR DE LA BDD ECOINVENT ET D'UN TRACTEUR ACTUALISEE POUR 1 KG ET UNE DUREE DE VIE DE 7 200 HEURES

Ramenée à masse équivalente, la production du robot est plus impactante que pour les tracteurs hormis pour les impacts sur l'épuisement des ressources fossiles, le potentiel d'oxydation photochimique, l'écotoxicité terrestre, la consommation d'eau douce, les radiations ionisantes et l'occupation des terres.

L'actualisation des données d'inventaire pour les tracteurs a montré une augmentation des impacts par rapport au procédé tracteur issu de la BDD ecoinvent hormis pour les impacts sur l'épuisement des ressources fossiles, le changement climatique, le potentiel d'oxydation photochimique, l'écotoxicité terrestre, la consommation d'eau douce, les radiations ionisantes, l'occupation des terres et la destruction de la couche d'ozone stratosphérique.

Ces différences s'expliquent principalement par le fait que dans un but de comparaison du tracteur actualisé avec les robots, les données relatives à l'énergie utilisée pour la fabrication des tracteurs et les données sur le recyclage ne sont pas incluses dans le procédé actualisé alors qu'elles le sont dans le procédé de la BDD ecoinvent.

5.3.4. Durée de vie de la solution robotique étudiée

Les résultats ACV pour le robot TED ont été obtenus pour la durée de vie minimale du robot, soit 2 400 heures. Avec les gains de maturité des technologies associés à une production en plus grand volume, il sera possible à court terme d'atteindre une durée de vie moyenne, voire de disposer de durées de vie à terme équivalentes ou supérieures à celle des tracteurs (mêmes conditions environnementales, efforts mécaniques plus faibles, motorisation électrique). Nous avons donc réalisé une analyse de sensibilité pour trois durées de vie différentes :

- une durée de vie de 4 800 heures (maturité technologique),
- une durée de vie de 7 200 heures (comme pour les tracteurs),
- une durée de vie de 10 000 heures (développement à moyen terme en supposant des machines électriques plus légères avec moins de contraintes statiques et dynamiques pouvant avoir un plus grand potentiel de fiabilité que les tracteurs).

L'allongement de la durée de vie des robots a eu pour conséquence une adaptation de la modélisation des facteurs de réparation et de l'allocation des batteries Li-ion.

Pour les facteurs de réparations, nous avons fait l'hypothèse que ceux utilisés pour une durée de vie de 2 400 heures étaient extrapolables aux durées de vie plus longues. Cette hypothèse a des limites car les technologies robotisées étant encore sujettes à des pannes de jeunesse et autres défauts de design, les facteurs de réparations pourront être sujets à évolution avec la maturation des technologies robotiques.

Dans notre hypothèse de départ, la durée de vie des batteries a été estimée à 4 800 heures. L'allongement de la durée de vie du robot implique donc des modifications pour l'allocation massive de la batterie. Cette

allocation, initialement de 50% pour une durée de vie de 2 400 heures, passe à 100% pour 4 800 heures, 150% pour 7 200 heures et environ 200% pour 10 000 heures.

Le Tableau 28 récapitule les augmentations de masse du robot par rapport à une durée de vie de 2 400 heures.

TABLEAU 28. TAUX D'AUGMENTATION DES MASSES DES COMPOSANTS DU ROBOT DU FAIT DE L'ALLONGEMENT DE LA DUREE DE VIE

Données constructeur	Taux d'augmentation du poids du robot pour une DV de 4 800 heures (%)	Taux d'augmentation du poids du robot pour une DV de 7 200 heures (%)	Taux d'augmentation du poids du robot pour une DV de 10 000 heures (%)
Acier	1,7%	4,3%	8,2%
Moteur électrique	1,9%	5,7%	7,7%
Aluminium	1,0%	2,9%	4,8%
Caoutchouc synthétique	0,0%	2,9%	5,9%
Batterie Li-ion	100,0%	200,0%	300,0%
Câbles électriques	0,0%	0,0%	5,0%
Cuivre	0,0%	0,0%	5,0%
Polycarbonate	4,0%	12,0%	20,0%
Ordinateur	0,0%	0,0%	8,3%
Vérins électriques	0,0%	4,2%	8,3%
Transformateur	1,8%	3,6%	5,5%
GPS	0,0%	0,0%	0,0%
Composants électroniques actifs	2,0%	5,0%	7,0%
Composants électriques passif	2,0%	5,0%	7,0%
Energie pour la fabrication	Exclus		
Données sur recyclage	Exclus		
Infrastructures de production	Exclus		

L'influence de la durée de vie sur les résultats a été évaluée pour des opérations de désherbage comparables entre scénarios « Conventionnels » et scénarios « Robots ». Les opérations qui s'y prêtent sont le désherbage mécanique de l'intra-rang avec :

- des interceps en Val de Loire (opération VL_11 (tracteur) et VL_13 (robot)),
- une bineuse Kress en Charentes (opération CH_9 (tracteur) et CH_14 (robot)),
- des disques en Languedoc-Roussillon (opération LR_10 (tracteur) et LR_15 (robot)).

Les résultats sont présentés de la Figure 28 à la Figure 33. Outre les différentes durées de vie des robots, ils présentent les résultats pour les scénarios conventionnels avec une actualisation de l'inventaire du cycle de vie de la fabrication du tracteur (cf. §5.3.3).

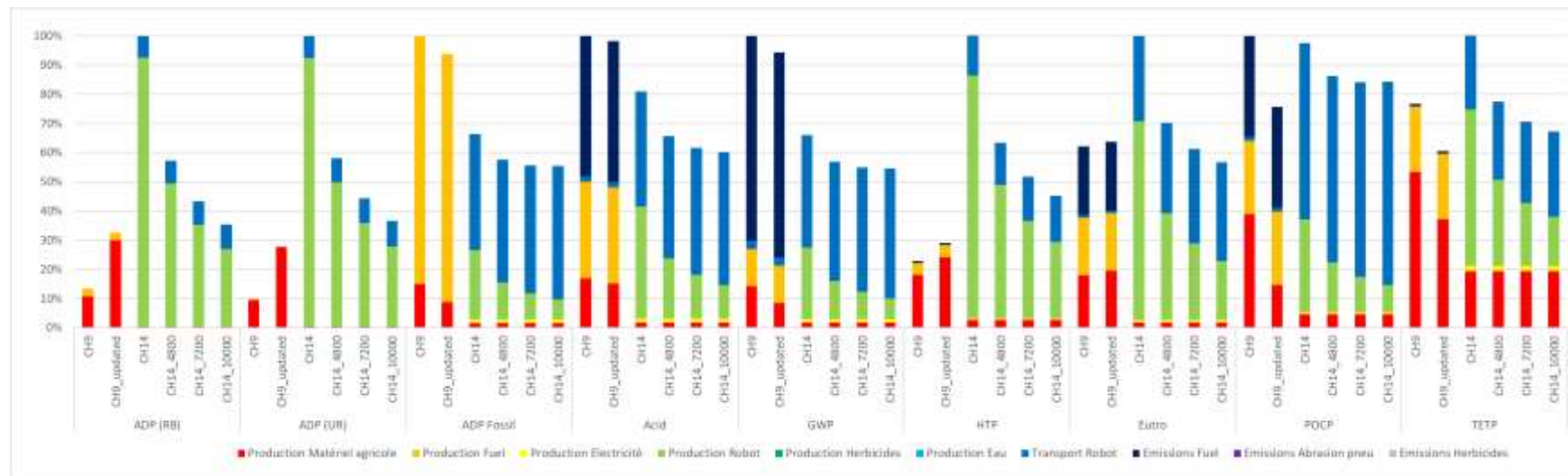


FIGURE 28. ANALYSE DE SENSIBILITE DE LA DUREE DE VIE DES ROBOTS SUR LES IMPACTS DE LA METHODE CML POUR LE DESHERBAGE INTRA-RANG AVEC UNE BINEUSE KRESS EN CHARENTES

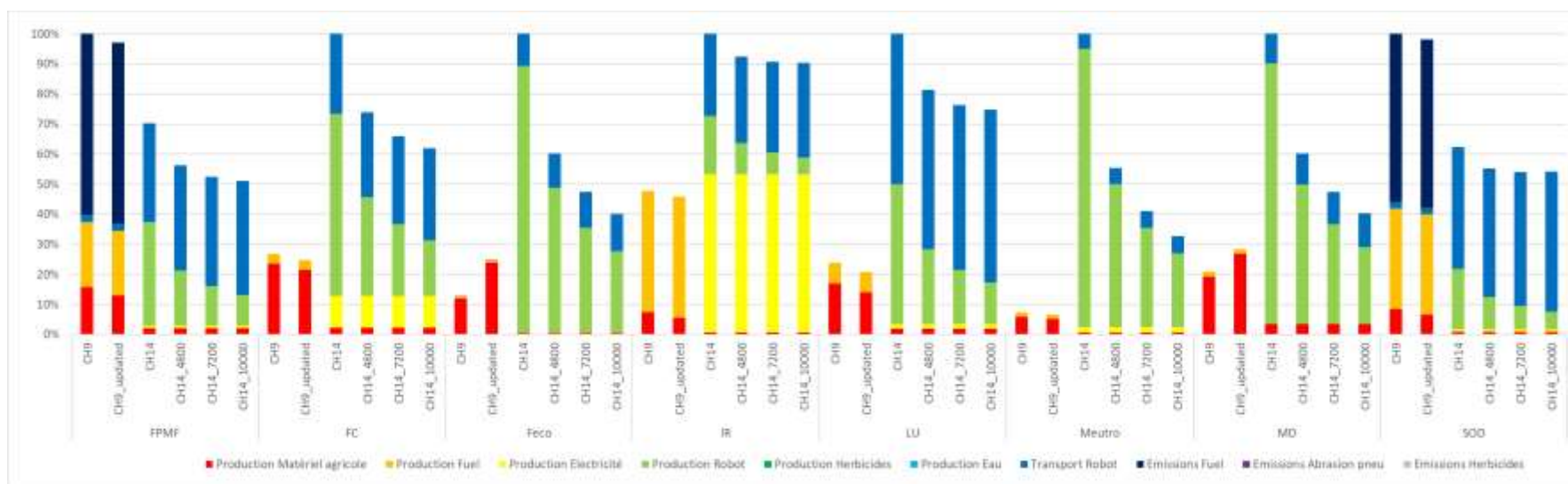


FIGURE 29. ANALYSE DE SENSIBILITE DE LA DUREE DE VIE DES ROBOTS SUR LES IMPACTS DE LA METHODE RECIPE POUR LE DESHERBAGE INTRA-RANG AVEC UNE BINEUSE KRESS EN CHARENTES

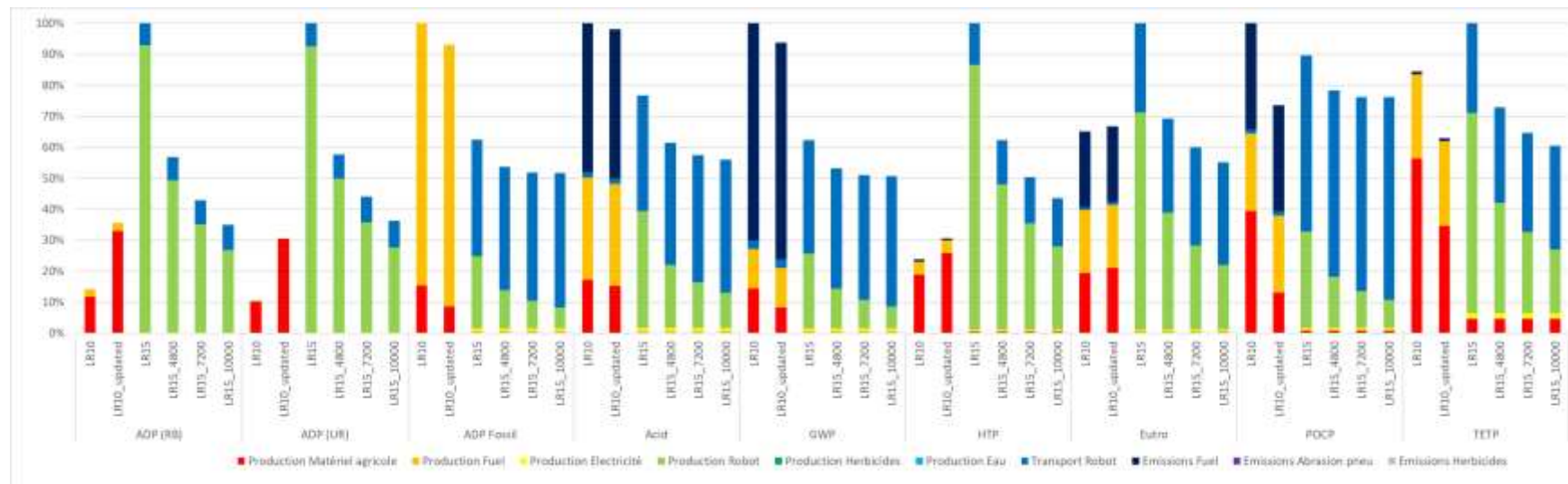


FIGURE 30. ANALYSE DE SENSIBILITE DE LA DUREE DE VIE DES ROBOTS SUR LES IMPACTS DE LA METHODE CML POUR LE DESHERBAGE INTRA-RANG AVEC DES DISQUES EN LANGUEDOC-ROUSSILLON

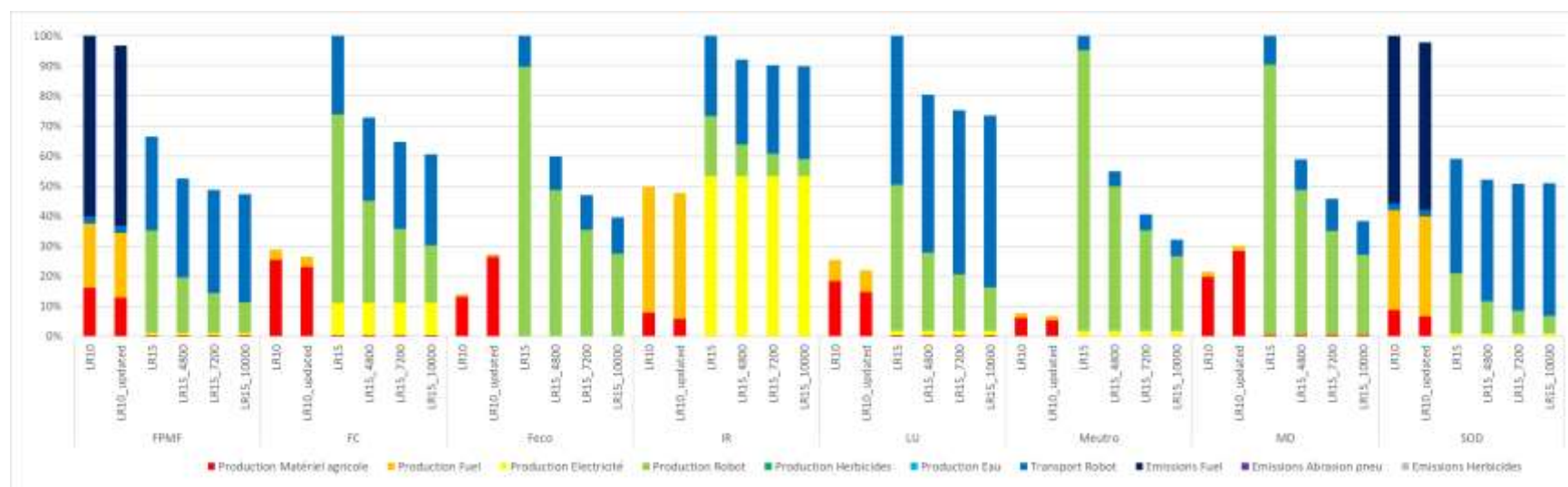


FIGURE 31. ANALYSE DE SENSIBILITE DE LA DUREE DE VIE DES ROBOTS SUR LES IMPACTS DE LA METHODE ReCiPe POUR LE DESHERBAGE INTRA-RANG AVEC DES DISQUES EN LANGUEDOC-ROUSSILLON

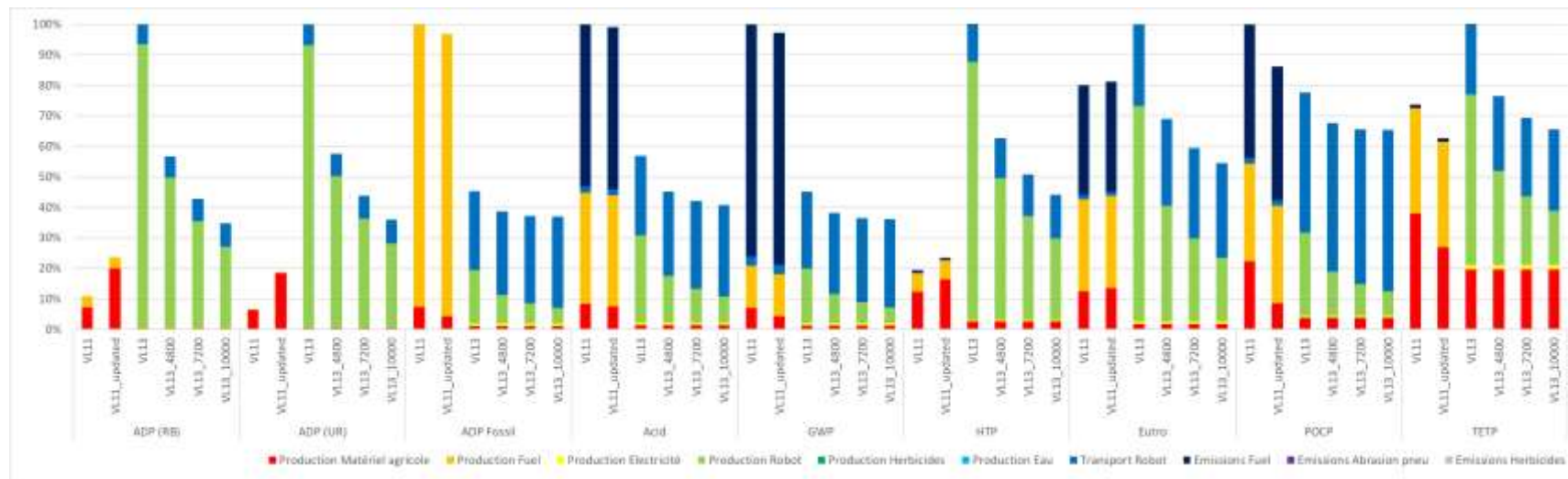


FIGURE 32. ANALYSE DE SENSIBILITE DE LA DUREE DE VIE DES ROBOTS SUR LES IMPACTS DE LA METHODE CML POUR LE DESHERBAGE INTRA-RANG AVEC DES INTERCEPS EN VAL DE LOIRE

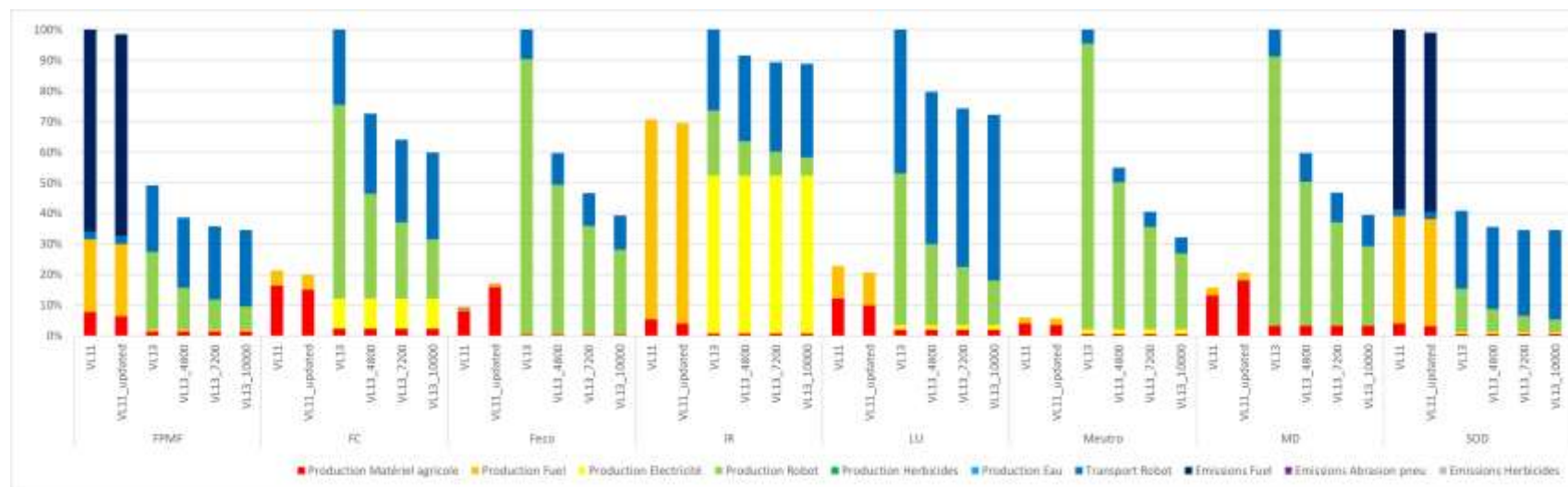


FIGURE 33. ANALYSE DE SENSIBILITE DE LA DUREE DE VIE DES ROBOTS SUR LES IMPACTS DE LA METHODE ReCiPe POUR LE DESHERBAGE INTRA-RANG AVEC DES INTERCEPS EN VAL DE LOIRE

Les résultats de l'analyse de sensibilité au regard de la durée de vie des robots montrent cinq grandes tendances pour les opérations de désherbage de l'intra rang :

- L'allongement de la durée de vie des solutions robotisées ne modifie pas les catégories d'impacts où le robot est déjà le plus impactant. Toutefois, des réductions significatives sont observées sur les impacts suivants :
 - Pour Charentes et Languedoc-Roussillon, eutrophication des milieux aquatiques marins et consommation d'eau douce,
 - Pour Val de Loire, en plus des deux impacts précédents, toxicité humaine, épuisement des ressources minérales et écotoxicité des milieux aquatiques terrestres.
- L'allongement de la durée de vie n'a pas une grande influence sur les résultats pour les impacts pour lesquels les opérations robotisées ont déjà un impact plus faible que les opérations conventionnelles, à savoir le changement climatique, l'épuisement des ressources fossiles, la formation de particules fines, l'acidification et la destruction de la couche d'ozone stratosphérique.
- L'allongement de la durée de vie n'a pas non plus une grande influence sur les radiations ionisantes. Cet impact, pour lequel les opérations robotisées sont plus impactantes que les opérations conventionnelles, reste majoritairement dépendant de la consommation d'électricité des robots, paramètre qui ne change pas dans l'analyse de sensibilité.
- Seule l'allongement de la durée de vie à 10 000 heures permet d'avoir des résultats équivalents ou légèrement inférieurs aux opérations conventionnelles (avec données actualisées pour les tracteurs et sans prise en compte du transport du robot) pour les impacts suivants :
 - Pour Charentes et Languedoc-Roussillon, toxicité humaine, épuisement des ressources minérales, écotoxicité des milieux aquatiques terrestres, occupation des terres,
 - Pour Val de Loire, occupation des terres seulement.
- L'allongement de la durée de vie dès 4 800 heures permet de réduire les impacts sur l'eutrophisation des milieux aquatiques terrestres (y compris en considérant le transport du robot) et le potentiel d'oxydation photochimique (hors transport du robot).

Les différences de résultats entre les vignobles proviennent essentiellement de la différence dans l'écartement entre les rangs. Des vignobles à faible écartement (Val de Loire) nécessitent une mobilisation en temps plus importantes des robots que les vignobles à plus large écartement (Charentes et Languedoc-Roussillon).

5.4. Recommandations à destination des utilisateurs de robots agricoles

5.4.1. Durée de vie des machines robotisées

Plusieurs dimensions sont plus impactées par l'utilisation du robot que par l'utilisation d'un tracteur. Outre les ICV qui nécessitent une analyse plus détaillée, un deuxième facteur est déterminant dans ces résultats : la durée de vie et le nombre d'opérations culturales qui peuvent être adressées avec un robot. En effet, les hypothèses prises sur les durées de vie sont pour le tracteur une durée de vie de 7 200 heures de fonctionnement et pour le robot TED une durée de vie de 2 400 heures de fonctionnement.

Cet écart s'explique principalement par la relative jeunesse des machines robotisées. Les machines sont actuellement produites en petite quantité, soumises à évolution. Les développements se sont en priorité portés sur les développements des fonctionnalités, pour proposer des solutions robotiques en adéquation avec les besoins des itinéraires. La robustesse des plateformes roulantes n'a pas encore été optimisée.

L'analyse de sensibilité sur l'allongement de la durée de vie des solutions robotisées met en évidence plusieurs impacts qui sont significativement réduits, comme l'eutrophisation des milieux aquatiques. Les impacts dont le contributeur le plus important est la fabrication des robots sont globalement sensibles à une augmentation de la durée de vie des robots. L'une des cibles principales d'éco-conception est donc bien de mettre sur le marché des machines robotisées présentant une durée de vie au moins égale à celle des tracteurs de manière à limiter

l'impact au kg des machines agricoles sur l'exploitation des matières premières, la toxicité humaine et terrestre, ainsi que l'eutrophisation des milieux aquatiques.

Dans une moindre mesure, l'analyse actuelle a considéré un temps d'utilisation des outils égal à la durée de travail dans le champ. En fonction de la nature des outils (notamment travail du sol), les outils ne sont pas utilisés en bout de rang, dans les phases de demi-tour. En fonction de la configuration des parcelles (longueur des rangs), le temps passé dans les tournières peut être de l'ordre de 20% du temps global de la mission et atteindre plus de 30% dans certaines configurations (rangs courts). En fonction des outils qui seraient utilisés (notamment la mise en place d'outils actifs), une analyse de sensibilité à ce paramètre est préconisée.

La diminution relative de l'impact des itinéraires robotisés par rapport à des machines conventionnelles passera donc en grande partie par des travaux visant à l'optimisation de la robustesse des plateformes, et donc à l'allongement de leur durée de vie utile. L'allongement de la durée de vie utile des robots aura pour principale conséquence de réduire le poids relatif d'un passage unitaire, et donc l'impact des itinéraires « consommant » des robots (cf. Tableau 22).

5.4.2. Versatilité des opérations culturales

L'une des spécificités des solutions robotisées est la capacité à concevoir et déployer de nouvelles fonctionnalités avec un cycle de développement réduit par rapport à des machines conventionnelles. Une solution robotique peut également se caractériser par une grande modularité, qui permet une réorientation des fonctionnalités d'une machine robotisée en fonction des ajouts ou des évolutions.

Ces fonctions peuvent être déployées en option dans une étape de configuration du matériel pour répondre à un besoin. Une telle configuration permet de proposer aux agriculteurs la base robotique adaptée à leur besoin, sans proposer des fonctions additionnelles inutilisées. Parmi les ajustements anticipés avec le plus fort impact, on peut notamment citer :

- Ajustement de la puissance des moteurs électriques
- Ajustement de la quantité de batteries électriques
- Déploiement de capteurs additionnels permettant de réaliser des opérations supplémentaires comme du scouting

La multiplication des options disponibles, utilisant une base robotisée commune, permet de réduire la quantité de machines spécialisées nécessaires pour réaliser l'itinéraire cultural à l'échelle de l'exploitation agricole, et donc l'impact sur la consommation de ressources minérales, et tous les impacts où la fabrication des machines est un contributeur significatif.

De plus, la capacité à réaliser plusieurs opérations de manière simultanée lors d'un unique passage du robot permet de réduire globalement les impacts sur le changement climatique, l'acidification des milieux et les autres dimensions impactées par les émissions de ressources fossiles.

Dans un second temps, l'Analyse du Cycle de Vie de ces solutions robotisées pourra être détaillée pour chacune de ces fonctions, au même titre que l'analyse qui a été menée sur les outils de travail du sol par exemple.

Par ailleurs, l'étude réalisée a uniquement considéré une durée de vie exprimée en heures de fonctionnement. L'usure des machines associée aux périodes de stockage n'a pas été prise en compte. Cette hypothèse devra être vérifiée dans une étude ultérieure. L'augmentation du taux d'usage des robots par la multiplication des opérations culturales réalisées à l'aide du robot permet une réduction des temps de stockage, et est supposé mener à une diminution du poids consommé par un passage du robot. La sensibilité des impacts à ce paramètre devra faire l'objet d'études ultérieures nécessitant plus de données sur la fiabilité des machines robotiques et conventionnelles.

5.4.3. Allongement de la disponibilité des machines

L'utilisation de robots électriques a un impact significatif sur les émissions associées à la consommation de ressources fossiles. Toutefois, l'étude de sensibilité a mis en évidence une sensibilité assez forte de cette contribution positive à la distance entre les champs et l'exploitation agricole. Pour les distances qui deviennent

supérieures à quelques kilomètres, la contribution du transport de la machine à la parcelle vient partiellement gommer l'impact positif de l'utilisation des machines électriques.

L'optimisation de l'impact sur le changement climatique peut être réalisée en travaillant sur cette étape de transport, soit par des moyens logistiques en vue d'optimiser les distances (lieux de stockage et de recharge des robots plus près des parcelles), soit par un travail sur l'optimisation de la disponibilité des machines. Certains constructeurs visent à laisser les robots sur les parcelles pendant plusieurs jours ou semaines, de manière à réaliser plusieurs passages de manière optimisée. Cette approche semble cohérente dès lors que le robot peut réaliser sa mission en autonomie, *i.e.* sans intervention humaine, y compris pour le lancement effectif de l'opération culturale. Sans cette autonomisation du robot sur sa parcelle, l'opération culturale nécessite l'intervention d'un opérateur, et donc son déplacement jusqu'à la parcelle, générateur d'émissions contributrices à l'effet de serre.

Pour résumer, deux axes de travail sont à ce jour identifiés pour maximiser l'impact sur le changement climatique des solutions robotisées électriques :

- 1- Optimiser les flux logistiques de transport des machines et des opérateurs
- 2- Autonomiser les opérations, de manière à laisser le robot sur une parcelle donnée durant tout le temps nécessaire à la réalisation des opérations.

Ce deuxième point se confronte à deux réalités : l'autonomie énergétique des machines et la disponibilité des équipements. Toute faute ou défaillance nécessitant l'intervention d'un opérateur sur la machine génère des émissions impactant négativement le changement climatique. La filière de la robotique agricole étant encore peu mature, ce paramètre est encore mal maîtrisé et impacte négativement le changement climatique.

A titre d'exemple, si l'on considère une opération de désherbage de l'intra-rang par des interceps dans le scénario VL9 (*i.e.* opération VL_13), avec une parcelle située à 4 km des hangars agricoles, le bénéfice d'une solution robotisée électrique est annulé dès que 14 km sont parcourus pour acheminer le matériel ou le personnel (Figure 26). Si l'on fait l'hypothèse conservatrice que le véhicule a la même consommation à vide pour transporter l'opérateur au champ, l'impact sur le changement climatique devient équivalent à une solution conventionnelle dès que l'opérateur est amené à faire 3 allers-retours jusqu'au robot dans la journée pour intervenir sur le robot.

6. Conclusion générale

L'étude présentée dans ce rapport a permis de dresser un premier bilan environnemental de l'impact de l'usage de robots agricoles pour des opérations de désherbage mécanique de l'intra rang et de l'inter rang en comparaison d'itinéraire de référence conventionnels. Ces résultats ne sont toutefois valables que pour les bassins viticoles étudiés, pour la vigne et au niveau de maturité technologique des robots.

Il ressort de cette étude que l'usage de solutions robotisées pour un désherbage en viticulture a globalement un impact environnemental plus important que les solutions conventionnelles dû :

- au transport du robot sur la parcelle → usage d'un véhicule utilitaire et d'une remorque pour transporter le robot jusqu'à la parcelle
- à la fabrication du robot, notamment lié à la fabrication des moteurs et câbles électriques, et des composants électroniques actifs et passifs → modélisation fine des robots avec intégration des composants électroniques qui rendent la comparaison difficile avec les tracteurs qui ne sont pas modélisés de manière aussi fine dans les bases de données ACV. Un ajustement de l'ICV des tracteurs par analogie technologique avec les robots met en évidence une réduction importante des écarts d'impact entre les solutions conventionnelles et robotisées. Un travail d'analyse complémentaire sur les inventaires du cycle de vie est à mener pour affiner les impacts liés à la fabrication des matériels agricoles.
- à la durée de vie des robots → les robots sont des technologies émergentes qui ont pour l'instant des durées de vie peu connues et considérées dans cette étude comme assez faibles comparées à celles des tracteurs. Une étude de sensibilité a mis en évidence les marges de progrès possibles sur les impacts

dont le principal contributeur est associé à la fabrication du matériel agricole. L'analyse de sensibilité montre qu'une durée de vie égale ou supérieure à celle des tracteurs permet d'envisager des impacts du même ordre de grandeur sur les catégories d'impacts épuisement des ressources minérales, toxicité humaine ou eutrophisation des milieux aquatiques.

- à la fonctionnalité des robots → les robots sont pour l'instant conçus pour remplir une seule tâche (ex : désherbage) dans une culture donnée (ex : vigne) contrairement aux tracteurs qui peuvent être utilisés pour une plus grande variété d'opérations culturales dans des systèmes de culture variés.

Les solutions robotisées à énergie électrique permettent, sous certaines conditions de distance et de logistique, de réduire les impacts environnementaux comme l'acidification des milieux (terrestre notamment) et la consommation de ressources fossiles nécessaires au fonctionnement des machines conventionnelles. Le réchauffement climatique est également moins impacté par les solutions robotisées, si l'on considère des itinéraires de désherbage mécanique ou mixte réalisés à l'aide de machines fonctionnant au GNR. De plus, bien que le désherbage chimique paraisse moins impactant que le désherbage mécanique (avec un tracteur ou un robot), les résultats sont à traiter avec précaution car cette étude n'a pas pris en compte l'exposition directe aux herbicides par le viticulteur (lors de la manipulation des produits et au champ).

Les résultats obtenus ont été évalués au regard de la performance de désherbage des solutions évaluées et ramenés à l'hectare désherbé. Ils ne sont donc évalués que par le service rendu « technologie » apporté par les robots. Les autres services rendus par la robotique tels que la réduction de la pénibilité du travail ou le fait que les robots pallient les difficultés de recrutement de la main d'œuvre ne sont pas évalués dans cette étude. Il serait intéressant dans l'avenir de disposer d'autres indicateurs sociaux et économiques en plus des indicateurs environnementaux proposés par cette étude pour évaluer la durabilité des solutions robotiques.

Plusieurs perspectives à ce travail ont été identifiées. Dans un premier temps, il sera nécessaire de consolider les données d'inventaire sur la fabrication des tracteurs pour pouvoir avoir un niveau de comparaison comparable à celle des robots. Dans un second temps, il sera nécessaire de consolider les données sur les consommations électriques et les rendements de chantier des différents outils de désherbage utilisés par les solutions robotiques.

Enfin, cette étude nous a amené à la réflexion que la mécanisation des exploitations agricoles a toujours été orientée vers une maximisation des débits de chantier en vue d'optimiser au maximum le temps nécessaire à la réalisation des opérations et ainsi optimiser l'utilisation de la main d'œuvre. La robotisation permet de ne plus intégrer cette contrainte dans les développements, et permet dès lors la recherche de nouveaux points de fonctionnement entre débit de chantier, efficacité de l'opération, consommation de matières premières et génération d'émissions. Travailler sur des débits de chantier plus faibles permettrait par exemple d'envisager l'utilisation d'unités moins puissantes, de moins les solliciter et ainsi d'envisager des augmentations de la durée de vie des machines. Les impacts attendus seraient de deux ordres : la diminution de l'impact sur la consommation des matières minérales ou fossiles et la diminution du poids de machine consommé par passage du robot. En contrepartie, une multiplication des unités pourrait être envisagée pour couvrir une surface équivalente dans un temps acceptable, ce qui pourrait mener à une augmentation de la pression sur les matières premières.

Cette étude a visé à proposer un premier éclairage sur les impacts relatifs d'une machine robotisée visant à remplacer les tracteurs et enjambeurs de vigne dans certaines opérations de travail du sol. Elle pourra notamment permettre la mise en place d'une démarche d'écoconception de l'usage des robots permettant de trouver le point de fonctionnement qui pourrait minimiser l'impact global des solutions robotisées.

7. Bibliographie

Abad, J., M. Diana, S. L. Gonzaga, C. José Félix and S. Ana (2020). "Under-vine cover crops: impact on weed development, yield and grape composition : This article is published in cooperation with the XIIIth International Terroir Congress November 17-18 2020, Adelaide, Australia. Guest editors: Cassandra Collins and Roberta De Bei." *OENO One* 54(4): 975-983.

Agreste (2019), Enquête Pratiques phytosanitaires en viticulture en 2016. *Agreste Les Dossiers* [En ligne]. Février 2019. N°2019-2.

Agreste (2020). Graph'Agri2020. Paris, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Service de la statistique et de la prospective: 220.

Agriculture Innovante (2019). Préparer son désherbage en 5 étapes. <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=Vr9LexbXnhg&t=2s>

Aissani, L., 2008. Intégration des paramètres spatio-temporels et des risques d'accident à l'Analyse du Cycle de Vie : Application à la filière hydrogène énergie et à la filière essence. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 354 pages.

Aktar, M. W., D. Sengupta and A. Chowdhury (2009). "Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards." *Interdisciplinary toxicology* 2(1): 1-12.

Alewu, B. and C. Nosiri (2011). Pesticides and human health. Pesticides in the Modern World – Effects of Pesticides Exposure. M. Stoytcheva, InTech: 231–250.

Asselin-Balençon A., Broekema R., Teulon H., Gastaldi G., Houssier J., Moutia A., Rousseau, V., Wermeille A., Colomb V. 2020. AGRIBALYSE v3.0: la base de données française d'ICV sur l'Agriculture et l'Alimentation. Methodology for the food products. Ed. ADEME 2020.

Bajwa, A. A., G. Mahajan and B. S. Chauhan (2015). "Nonconventional Weed Management Strategies for Modern Agriculture." *Weed Science* 63(4): 723-747.

Bak, T. and H. Jakobsen (2004). "Agricultural robotic platform with four wheel steering for weed detection." *Biosystems Engineering* 87(2): 125-136.

Basu, S., A. Omotubora, M. Beeson and C. Fox (2020). "Legal framework for small autonomous agricultural robots." *Ai & Society* 35(1): 113-134.

Bechar, A. and C. Vigneault (2016). "Agricultural robots for field operations: Concepts and components." *Biosystems Engineering* 149: 94-111.

Bechar, A. and C. Vigneault (2017). "Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems." *Biosystems Engineering* 153: 110-128.

Cho, S. I. and N. H. Ki (1999). "Autonomous speed sprayer guidance using machine vision and fuzzy logic." *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 42: 1137–1143.

Cloutier, D. C., R. Y. van der Weide, A. Peruzzi and M. L. LeBlanc (2007). Mechanical weed management. Non-Chemical Weed Management. M. K. Upadhyaya, R. E. Blackshaw and eds. Oxfordshire, UK, CAB International: 111–134.

Duke, S. O. (2012). "Why have no new herbicide modes of action appeared in recent years?" *Pest Management Science* 68: 505–512.

FarmBot. (2021). "Exploring the Carbon Footprint of FarmBot - A life-cycle analysis of FarmBot's CO2 emissions vs food from the grocery store." Retrieved 2021/06/04, from <https://farm.bot/pages/footprint>.

Fennimore, S. A., D. C. Slaughter, M. C. Siemens, R. G. Leon and M. N. Saber (2016). "Technology for automation of weed control in specialty crops." *Weed Technology* 30(4): 823-837.

Fountas, S., N. Mylonas, I. Malounas, E. Rodias, C. H. Santos and E. Pekkeriet (2020). "Agricultural Robotics for Field Operations." *Sensors* 20(9).

Fountas, S., T. A. Gemtos and S. Blackmore (2010). *Robotics and Sustainability. Soil Engineering*. Springer. Berlin, Germany: 69–80.

Frey, H. (2016). Analyse des pratiques d'enherbement des viticulteurs et formalisation des règles de décision utilisées pour le pilotage : Enquêtes dans l'Aude, le Gard, l'Hérault et les Pyrénées Orientales. *Sciences agricoles*. Disponible sur : < <https://hal.inrae.fr/hal-02801835> >

Gawron, J. H., Keoleian, G. A., De Kleine, R. D., Wallington, T. J., Kim, H. C. (2019). Deep decarbonization from electrified autonomous taxi fleets: Life cycle assessment and case study in Austin, TX. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [En ligne]. août 2019. Vol. 73, p. 130-141. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.06.007> >

Gawron, J. H., Keoleian, G. A., De Kleine, R. D., Wallington, T. J., Kim, H. C. (2018). Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects. *Environ. Sci. Technol.* [En ligne]. 6 mars 2018. Vol. 52, n°5, p. 3249-3256. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04576> >

Gianessi, L. P. and N. P. Reigner (2007). "The value of herbicides in U.S. crop production." *Weed Technology* 21: 559–566.

Gonzalez-de-Soto, M., L. Emmi, C. Benavides, I. Garcia and P. Gonzalez-de-Santos (2016). "Reducing air pollution with hybrid-powered robotic tractors for precision agriculture." *Biosystems Engineering* 143: 79-94.

Gonzalez-de-Soto, M., L. Emmi, I. Garcia and P. Gonzalez-de-Santos (2015). "Reducing GNR consumption in weed and pestcontrol using robotic tractors." *Computers and Electronics in Agriculture* 114: 96-113.

Guinee, J.B., Marieke Gorree, Reinout Heijungs, Gjalt Huppes, Rene Kleijn, Laurant van Oers, A. Wegener Sleeswijk, S. Suh, H.A. Udo de Haes, H. de Bruijn, R. van Duin, M.A.J. Huijbregts (2001). *Handbook on Life Cycle Assessment, Operational guide to the ISO standards Volume 1, 2a, 2b and 3*.

Hodgson, J. M. (1968). *The nature, ecology, and control of Canada thistle*. Tech. Bull. 1386. A. R. S. U.S. Department of Agriculture. Washington, D.C.

Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F., Stam G., Verones F., Vieira M., Zijp M., Hollander A., van Zelm R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int J Life Cycle Assess*, 22: 138: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1246-y>

ILCD Handbook (2010). *ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*: 417.

INERIS, 2020. Glyphosate et ses principaux composés, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 181229 - v2.0, 27/03/2020, 27 pages (<https://substances.ineris.fr/fr/page/14>)

ISO (2006). *ISO 14040 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. I. S. Organization.

ISO (2006). *ISO 14044 - Environmental management - Life cycle assessment - Requires and guidelines*.

Keeley, P. E. and R. J. Thullen (1989). "Growth and interaction of johnsongrass (*Sorghum halepense*) with cotton (*Gossypium hirsutum*). " *Weed Science* 37: 339–344.

Keeley, P. E. and R. J. Thullen (1991). "Growth and interaction of barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) with cotton (*Gossypium hirsutum*). " *Weed Science* 39: 369–375.

Koerhuis, R. (2020). "World's first robot catalogue with 35 propositions." *Future farming* November 2020: 20-39.

Lanini, W. T. and M. Le Strange (1991). "Low-input management of weeds in vegetable fields." *Calif. Agric.* 45(1): 11-13.

Lowenberg-DeBoer, J., I. Y. Huang, V. Grigoriadis and S. Blackmore (2020). "Economics of robots and automation in field crop production." *Precision Agriculture* 21(2): 278-299.

Manzone, M., M. Demeneghi, P. Marucco, M. Grella and P. Balsari (2020). "Technical solutions for under-row weed control in vineyards: Efficacy, costs and environmental aspects analysis." *Journal of Agricultural Engineering* 51(1): 36-42.

Maurel, V. B. and C. Huyghe (2017). "Putting agricultural equipment and digital technologies at the cutting edge of agroecology." *Ocl-Oilseeds and Fats Crops and Lipids* 24(3).

Ministère de l'Agriculture (2020). "Le plan Ecophyto, qu'est-ce que c'est?" Retrieved June 4th, 2021, from <https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest>.

Monaco, T. J., A. S. Grayson and D. C. Sanders (1981). "Influence of four weed species on the growth, yield, and quality of direct seeded tomatoes (*Lycopersicon esculentum*)." *Weed Science* 29(4): 394–397.

Nemecek T., Kägi T. (2007) Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems. Ecoinvent report n°15a, 308 pages.

Nicolopoulou-Stamati, P., S. Maipas, C. Kotampasi, P. Stamatis and L. Hens (2016). "Chemical Pesticides and Human Health: The Urgent Need for a New Concept in Agriculture." *Frontiers in public health* 4(148): 8 pages.

Oerke, E. C. and H. W. Dehne (2004). "Safeguarding production losses in major crops and the role of crop protection." *Crop Protection* 23(4): 275-285.

Pathak, A., Sethuramam, G., Ongel, A., Lienkamp, M. (2020). Impacts of electrification & automation of public bus transportation on sustainability—A case study in Singapore. *Forsch Ingenieurwes* [En ligne]. 6 juillet 2020. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s10010-020-00408-z> > (consulté le 18 mai 2021)

Pedersen, S. M., S. Fountas, H. Have and B. S. Blackmore (2006). "Agricultural robots - system analysis and economic feasibility." *Precision Agriculture* 7(4): 295-308.

Pimentel, D. and H. Lehman (1993). *The Pesticide Question: Environment, Economics, and Ethics*. London, Chapman & Hall.

Pradel, M. (2010). *Analyses du Cycle de Vie de chantiers d'épandage de boues de station d'épuration*. Livrable T3d – Projet ANR Ecodefi, 133 pages.

Reiser, D., E.-S. Sehsah, O. Bumann, J. Morhard and H. W. Griepentrog (2019). "Development of an Autonomous Electric Robot Implement for Intra-Row Weeding in Vineyards." *Agriculture* 9(1): 18.

Renaud-Gentié, C. (2015). *Eco-efficience des itinéraires techniques viticoles: intérêt et adaptations de l'analyse du cycle de vie pour la prise en compte des spécificités de la viticulture de qualité*. Thèse de doctorat, Université d'Angers, 254 pages.

Reus, J., P. Leendertse, C. Bockstaller, I. Fomsgaard, V. Gutsche, K. Lewis, C. Nilsson, L. Pussemier, M. Trevisan, H. Van Der Werf, F. Alfarroba, S. Blümel, J. Isart, D. McGrath and T. Seppälä (2002). "Comparison and evaluation of eight pesticide environmental risk indicators developed in Europe and recommendations for future use." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90(2): 177–187.

Roberts, H. A., R. T. Hewson and M. A. Ricketts (1977). "Weed competition in drilled summer lettuce." *Hortic. Res.* 17: 39–45.

Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M.D., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., Hauschild, M.Z., 2008. USEtox - The UNEP-SETAC toxicity model: Recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13, 532-546.

- Rueda-Ayala, V., J. Rasmussen and G. R. (2010). Mechanical Weed Control. Precision Crop Protection - the Challenge and Use of Heterogeneity. E. C. Oerke, R. Gerhards, G. Menz and R. Sikora. Dordrecht, Springer: 279-294.
- Shamshiri, R. R., C. Weltzien, I. A. Hameed, I. J. Yule, T. E. Grift, S. K. Balasundram, L. Pitonakova, D. Ahmad and G. Chowdhary (2018). "Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming." International Journal of Agricultural and Biological Engineering 11(4): 1-14.
- Shaner, D. L. (2000). "The impact of glyphosate-tolerant crops on the use of other herbicides and on resistance management." Pest Management Science 56: 320–326.
- Shrefler, J. W., W. M. Stall and J. A. Dusky (1996). "Spiny amaranth (*Amaranthus spinosus* L.) a serious competitor to crisphead lettuce (*Lactuca sativa* L.)." Hort. Sci. 31: 347–348.
- Slaughter, D. C., D. K. Giles and D. Downey (2008). "Autonomous robotic weed control systems: A review." Computers and Electronics in Agriculture 61(1): 63-78.
- Steward, B., J. Y. Gai and L. Tang (2019). The use of agricultural robots in weed management and control. Robotics and Automation for Improving Agriculture. J. Billingsley. 44: 161-185.
- Utstumo, T., F. Urdal, A. Brevik, J. Dørum, J. Netland, Ø. Overskeid, T. W. Berge and J. T. Gravdahl (2018). "Robotic in-row weed control in vegetables." Computers and Electronics in Agriculture 154: 36-45.
- Vigier, F., Lacour, S., Benzai, S., Dieudé-Fauvel, E. (2012). Comment déterminer la consommation des automoteurs agricoles ?. Sciences Eaux & Territoires, INRAE, 2012, p. 46 - p. 52. : <http://www.set-revue.fr/sites/default/files/articles/pdf/Vigier.pdf>
- Vougioukas, S. G. (2019). Agricultural Robotics. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, Vol 2. N. E. Leonard. 2: 365-392.
- World Health Organization (1990). Public Health Impact of Pesticides Used in Agriculture. England, World Health Organization.

8. Annexes

8.1. Annexe 1 : Valeurs des paramètres utilisés dans OLCA-Pest

Le Tableau 29 présente les valeurs attribuées aux différents paramètres pour les adapter au mieux aux scénarios étudiés. Les cases grises correspondent aux paramètres dont a été prise en compte la valeur par défaut. Dans les cases bleues, la valeur du paramètre a été choisie et reste la même pour tous les scénarios modélisés. Les cases vertes correspondent aux valeurs de paramètre variables en fonction des scénarios.

TABEAU 29 : VALEURS DES PARAMETRES UTILISES DANS OLCA-PEST

Paramètres	Valeurs
Substance name	Glyphosate ; Napropamide
Crop name	Grapes/Vines
Fraction intercepted by leaf (-)	0
Climate name	Cfb ; Csa
Month of application	Février ; Mars ; Avril ; Juin ; Octobre
Soil name	Soil 1 average (0.23/0.32/0.45//oc0.6/pH4.0)
Time modelles between pesticide application and emissions (days)	7
Application method	Canon "spider vault"
Drift reduction (%)	90
Dose applied (kg/ha)	1
Buffer zone	Ecosphere
Buffer zone width (m)	3
Pesticide fraction deposited on leaves in buffer zone (-)	0,4
Field width (m)	100
Field length (m)	100
Slope (%)	0
Depth of drainage (m)	0,6
Drainage fraction (-)	0,55
Annual irrigation (mm/year)	0
Tillage	Reduces tillage ; No tillage
Solid material density (kg/l)	2,65
Fraction Macropores (m)	0,002
Reference soil moisture content for soil biodegradation (-)	0,5
Response factor soil biodegradation rate on soil moisture content (-)	0,7
Q-Value (-)	2,58
Air boundary layer (m)	0,00475
Thickness of the laminar air boundary layer (m)	0,005
Reference areic mass of pesticide on plants (-)	0,0001

8.1. Annexe 2 : Sensibilité des impact écotoxicité des milieux aquatiques et toxicité humaine au regard des méthodes de caractérisation utilisées

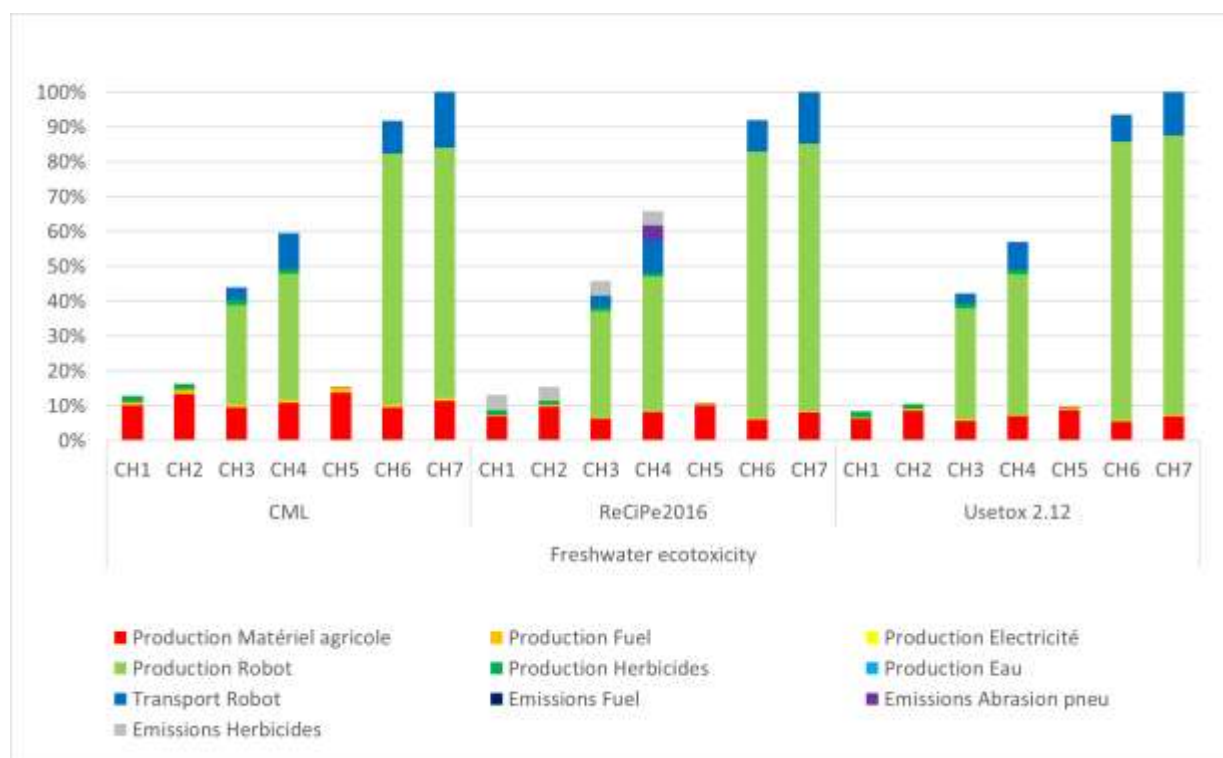


FIGURE 34. SENSIBILITE DES RESULTATS POUR L'ECOTOXICITE DES MILIEUX AQUATIQUES SELON LES METHODES DE CARACTERISATION UTILISEES – CAS DES SCENARIOS CHARENTES

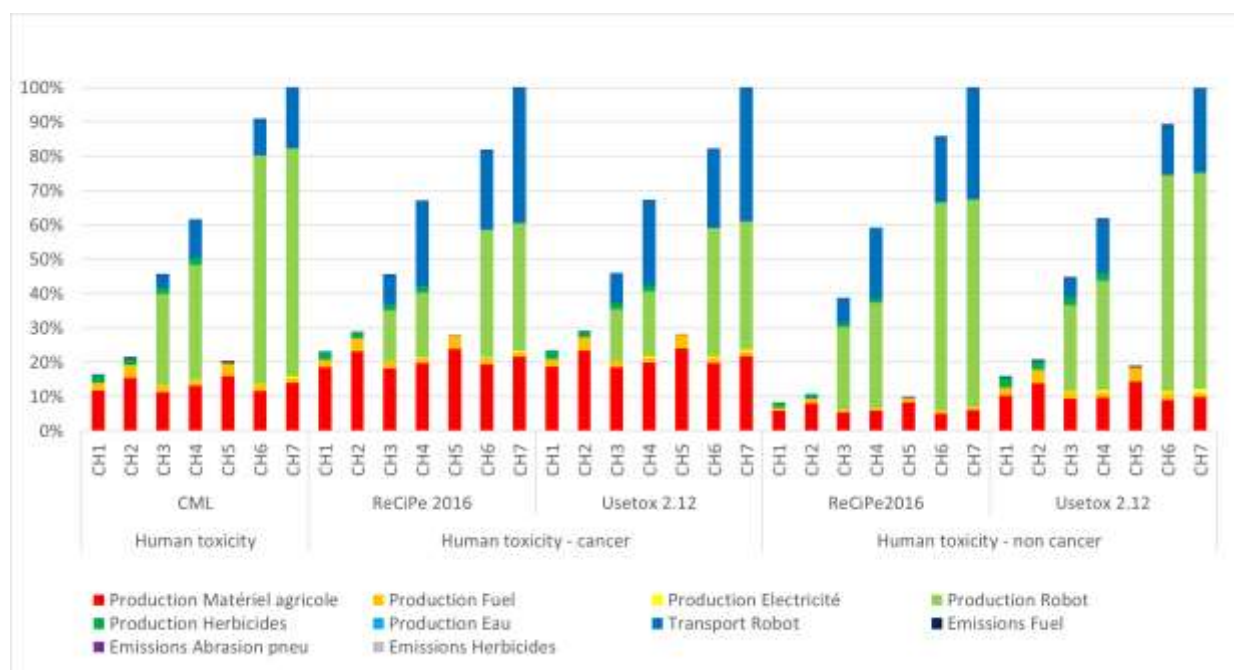


FIGURE 35. SENSIBILITE DES RESULTATS POUR LA TOXICITE HUMAINE SELON LES METHODES DE CARACTERISATION UTILISEES – CAS DES SCENARIOS CHARENTES