



HAL
open science

Impacts environnementaux du désherbage robotisé de l'intra rang des vignes sans intervention d'un opérateur humain - Cas du robot TED équipé d'intercep en Languedoc

Marilys Pradel, Lucas Mastromatteo, Maeve Malone, Cédric Seguineau

► To cite this version:

Marilys Pradel, Lucas Mastromatteo, Maeve Malone, Cédric Seguineau. Impacts environnementaux du désherbage robotisé de l'intra rang des vignes sans intervention d'un opérateur humain - Cas du robot TED équipé d'intercep en Languedoc. INRAE. 2023, 50 p. hal-04281552

HAL Id: hal-04281552

<https://hal.inrae.fr/hal-04281552>

Submitted on 13 Nov 2023

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.

Impacts environnementaux du désherbage robotisé de l'intra rang des vignes sans intervention d'un opérateur humain – Cas du robot TED équipé d'intercep en Languedoc

Marilys PRADEL, Lucas MASTROMATTEO – INRAE – UR TSCF

Cédric SEGUINEAU, Maeve MALONE – Naïo Technologies

Novembre 2023



Sommaire

Sommaire.....	3
Table des figures et des tableaux	5
Sigles et abréviations.....	6
1. Introduction.....	7
2. Principes relatifs à l'autonomie des robots agricoles.....	8
2.1. Concept d'autonomie.....	8
2.2. Application au domaine agricole.....	9
2.3. Application au robot TED	11
3. Impacts environnementaux associés à l'autonomisation du robot TED	12
3.1. Méthodologie utilisée	12
3.1.1. Définition de l'objectif et du champ de l'étude	12
3.1.2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie	13
3.1.3. Evaluation des impacts environnementaux.....	13
3.1.4. Interprétation des résultats.....	14
3.2. Définition des objectifs et du champ de l'étude	14
3.2.1. Objectifs de l'étude.....	14
3.2.2. Application et public visé.....	15
3.2.3. Revue Critique	15
3.2.4. Fonction du système et unité fonctionnelle	15
3.2.5. Champ de l'étude.....	16
3.2.6. Impacts pris en considération dans l'analyse des résultats.....	20
3.3. Inventaire des données.....	22
3.3.1. Hypothèses relatives à la collecte des données d'inventaires.....	22
3.3.2. Données relatives aux outils agricoles (tracteur, robot et outil intra-rang)	22
3.3.3. Données relatives à la consommation d'énergie.....	26
3.3.4. Émissions de substances dans l'air par la combustion de GNR	27
3.3.5. Émissions de métaux lourds par abrasion des pneus	29
3.3.6. Synthèse des données relatives aux opérations techniques par scénario	30
3.3.7. Données relatives au transport	31
3.3.8. Logiciel ACV utilisé pour la modélisation.....	31
3.4. Evaluation des impacts environnementaux des scénarios de désherbage.....	32
3.4.1. Analyse des impacts environnementaux des scénarios de désherbage pour la parcelle P1	33
3.4.2. Analyse de l'impact du facteur de forme de la parcelle sur les résultats ACV	36
3.4.3. Analyse de l'impact de l'autonomie du robot sur les résultats ACV.....	37
4. Discussion et conclusion générales	38
4.1. Discussion et conclusion au regard de l'autonomie du robot TED	38

4.2.	Discussion et conclusion au regard des impacts environnementaux du robot TED en mode autonome	40
5.	Bibliographie.....	42
6.	Annexes	46
6.1.	Annexe 1 : Résultats obtenus avec la méthode CML-IA et RECIPE2016	46
6.2.	Annexe 2 : Résultats obtenus pour la modalité « facteur de forme » avec la méthode PEF v.3.1	48
6.3.	Annexe 3 : Résultats obtenus pour la modalité « durée d'autonomie » avec la méthode PEF V3.1..	49

Table des figures et des tableaux

Table des Figures

Figure 1 : Système conventionnel.....	16
Figure 2 : Système robotisé - TED.....	17
Figure 3 : Robot TED en action dans un vignoble (source : www.naio-technologies.com)	17
Figure 4 : Périmètre d'étude.....	19
Figure 5. Composition des machines agricoles modélisées dans la base de données ecoinvent v.3.7.1 en % de la masse totale de la machine (Nemecek et Kägi, 2007).....	23
Figure 6. Composition actualisée d'un tracteur agricole, en % de la masse totale de l'engin	23
Figure 7. Comparaison entre la composition du tracteur actualisé et le robot TED, en % de la masse totale de l'engin (Pradel, 2023).....	24
Figure 8 : Analyse de contribution des opérations des scénarios avec la méthode PEF v3.1	34
Figure 9. Forme de la parcelle P1 (1 Ha, 100m x 100M, 40 rangs)	36
Figure 10. Forme de la parcelle P2 (1 Ha, 152,15m x 65,72M, 61 rangs)	36
Figure 11. Analyse des contribution des opérations des scénarios avec la méthode CML-IA.....	46
Figure 12. Analyse des contribution des opérations des scénarios avec la méthode RECIPE2016	47
Figure 13 : Analyse des résultats des scenarios pour la modalité « facteur de forme » avec la méthode PEF v3.1	48
Figure 14 : Analyse des résultats des scenarios pour la modalité « Durée d'autonomie » avec la méthode PEF v3.1	49

Table des Tableaux

Tableau 1 : Synthèse et caractéristiques des scénarios étudiés.....	18
Tableau 2 : Éléments pris en compte pour chaque intrant du système	19
Tableau 3 : Indicateurs de la méthode Product Environmental Footprint v3.1. utilisés dans l'étude	20
Tableau 4 : Flux entrants et sortants pour une opération de désherbage	22
Tableau 5 : Emissions variables liées à la combustion du GNR en fonction des tracteurs	28
Tableau 6 : Emissions par kg de GNR consommé	29
Tableau 7 : Caractéristiques des pneus en fonction du type de machine	30
Tableau 8 : Synthèse des émissions liées à l'abrasion des pneus.....	30
Tableau 9 : Synthèse des données d'entrée pour les opérations de désherbage	30
Tableau 10. Descriptif des légendes pour les analyses de contributions	32
Tableau 11. Impact du facteur de forme sur les résultats ACV avec la méthode PEF v3.1	37
Tableau 12. Impact de la durée d'autonomie sur les résultats ACV avec la méthode PEF v3.1.....	38

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

ADAS : Système avancé d'aide à la conduite

ARPA : Agricultural Robot Performance Assessment

BDD : Base de Données

CE : Communauté Européenne

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

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

DOC : Catalyseur d'Oxydation Diesel

DPF : Filtre à Particules Diesel

EN : Norme Européenne

ETM : Éléments Traces Métalliques

GNR : Gazole non routier

GNSS : Global Navigation Satellite Systems

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

GSM : Global System for Mobile Communications

IA : Impact Assessment

ICV : Inventaire du cycle de vie

ILCD : International Reference Life Cycle Data System

ISO : International Standard Organisation

MJ : Méga Joules

NMC : Nickel/Manganèse/Cobalt

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

PDF : percentage disappeared fraction of species

PEF : Product Environmental Footprint

SCR : Réduction Sélective Catalytique

UE : Union Européenne

UF : Unité fonctionnelle

1. Introduction

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 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 ciblée et détruite) 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. Elle est effectuée après le semis et consiste en un travail du sol superficiel avec une variété d'équipements telles que des bineuses ou des herses (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 herses 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 automatisées capables d'effectuer des tâches agricoles sans intervention humaine directe (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).

La plupart des robots agricoles actuellement sur le marché utilisent une ou plusieurs de ces technologies pour réaliser le désherbage mécanique des adventices dans les cultures en rangs. Ces solutions ont l'avantage d'éloigner l'opérateur humain de la machine et limiter ainsi les risques accidentogènes. Une précédente étude (Pradel et al, 2022) avait permis d'identifier les principaux impacts environnementaux d'une solution de désherbage, le robot TED commercialisé par la société Naïo Technologies, utilisée dans 3 vignobles français différents au moyen de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Cette nouvelle étude a pour ambition d'évaluer si l'automatisation des solutions robotiques dans les parcelles aggrave ou améliore les impacts environnementaux de ces dernières et de combler certaines limites identifiées dans l'étude de Pradel et al. (2022). Ce rapport est divisé en deux parties : une première partie présentant les grands principes relatifs à l'autonomie des robots et en particulier du robot TED et une seconde partie présentant la méthodologie et les impacts environnementaux ACV associés à l'autonomisation du robot TED.

2. Principes relatifs à l'autonomie des robots agricoles

2.1. Concept d'autonomie

Très souvent, les véhicules autonomes font référence à des applications routières pour lesquelles une classification en cinq niveaux d'autonomie est couramment utilisée (SAE Internationals, 2021). Cette classification ne peut pas être utilisée telle quel pour des applications agricoles, car elle fait référence à une fonction principale qui est de transporter des personnes ou des marchandises d'un point à un autre. Tant que l'humain reste dans la boucle, les niveaux d'autonomie décrivent en détail les interactions de moins en moins nombreuses entre le véhicule autonome et le conducteur.

Si une machine agricole est conçue pour rouler sur la route, la réglementation routière s'applique et inclut toute réglementation pertinente relative aux véhicules autonomes si l'utilisation de la route se fait de manière automatisée. Dans ce cas, la classification en cinq niveaux d'autonomie peut s'appliquer à cet usage spécifique de la machine agricole évoluant sur route.

A contrario, lorsque la machine est conçue uniquement pour une application hors route, ce cadre n'est plus pertinent. En effet, la principale différence est qu'une exploitation agricole renvoie à une grande variété de fonctions, qui peuvent être assurées en utilisant plusieurs types d'équipements, d'outils ou de plateformes mobiles. Sur le terrain, les machines et les tracteurs interviennent dans diverses combinaisons pour assurer une ou plusieurs fonctions définies, comme les travaux de travail du sol ou la pulvérisation.

De ce fait, il est plus commode de décrire les agroéquipements agricoles comme des machines ou des tracteurs embarquant des fonctions plus ou moins automatisées. Ces fonctions peuvent alors être exploitées en mode

manuel, en mode autonome ou en mode semi-autonome, c'est-à-dire qu'une fonction automatisée peut soit effectuer des opérations :

- Sous commande directe d'un opérateur en mode manuel,
- Sans aucune interaction avec les humains en mode autonome,
- Avec des interactions limitées avec les humains sur certaines actions spécifiques en mode semi-autonome.

Ainsi, une machine agricole autonome désigne une machine équipée de processus automatisés suffisamment intelligents pour que la machine puisse fonctionner et faire son travail sans aucune aide de l'opérateur une fois lancée dans son mode autonome. Cela inclut la sécurité des opérations qui est assurée par la machine elle-même, à condition que la machine fonctionne dans les limites appropriées. Cette approche est corroborée par les définitions introduites dans le nouveau Règlement Machine (UE) 23/1230 qui remplacera la Directive Machine en 2027. Dans ce nouveau règlement européen, les machines mobiles autonomes sont définies comme « une machine mobile qui dispose d'un mode autonome, dans lequel toutes les fonctions essentielles de sécurité de la machine mobile sont assurées dans sa zone de déplacement et travail sans interaction permanente d'un opérateur » (section 3.1.1c).

Un malentendu courant à propos des robots autonomes est la confusion entre les unités semi-autonomes et autonomes. En effet, un robot peut être conçu pour effectuer des opérations automatisées, comme des opérations de travail du sol. L'automatisation peut être suffisamment élevée pour que la machine décide elle-même comment se déplacer et comment agir sur le sol afin de maximiser les performances visées. Dans ce cas, aucune interaction avec l'opérateur n'est plus nécessaire. Toutefois, il s'agit toujours d'une unité « semi-autonome » du fait que la sécurité des opérations reste assurée par un opérateur qui doit rester à proximité de la machine ou sur le terrain pour surveiller et anticiper les situations dangereuses (principalement un spectateur s'approchant de la machine et s'exposant au danger dû au mouvement de la machine, ou la machine quittant la zone désignée où elle est censée fonctionner). L'interaction avec les humains est obligatoire pour que la machine fonctionne en toute sécurité.

Sur la base de la définition des machines mobiles autonomes proposée dans le nouveau règlement européen relatif aux machines, la désignation « machine autonome » ne devrait être utilisée que pour décrire des machines équipées de fonctions automatisées où la sécurité du fonctionnement en mode autonome est assurée par la machine elle-même, sans l'aide d'aucune interaction de l'opérateur.

2.2. Application au domaine agricole

Le robot TED est une machine dédiée uniquement aux applications hors route et exploitée en Europe. En conséquence, il est conforme aux règles européennes applicables aux machines, à savoir la Directive Machines 2006/42/CE jusqu'en 2027. Un nouveau règlement (UE) 2023/1230 a été publié récemment et entrera en vigueur à cette date. Cette réglementation est le résultat d'un processus de révision de la Directive Machines enclenché pour englober les « Nouvelles Technologies » qui sont de plus en plus intégrées dans la conception des solutions. Les nouvelles technologies sont un terme générique qui inclut entre autres l'internet des objets, l'intelligence artificielle et la robotique.

Le mot « autonomie » n'est jamais utilisé dans la Directive Machines et l'utilisation d'unités autonomes n'est pas interdite. Il n'existe pratiquement aucune exigence dans cette Directive en matière d'autonomie, ce qui implique pour les constructeurs de se positionner et d'innover dans la gestion de la sécurité des unités autonomes. Même si le règlement (UE) 2023/1230 n'est pas encore applicable, il peut être utilisé pour fournir des lignes directrices sur la manière de gérer les risques et les exigences associées en matière d'autonomie dans les parcelles agricoles.

Dans le cadre de la directive actuelle, les robots agricoles qui ne comportent pas d'outils coupants (type scie circulaire rotative ou outils de sciage) peuvent être mis sur le marché en utilisant un processus d'auto-certification. Autrement dit, le fabricant assume la responsabilité de garantir que le produit est conforme à toutes les exigences essentielles de santé et de sécurité décrites dans la Directive Machines. Lorsqu'elles sont

disponibles, le constructeur peut aussi s'appuyer sur des normes harmonisées pour l'aider à aller plus vite dans la mise en œuvre de solutions. Jusqu'à présent, aucune norme de type C¹ n'a été publiée concernant les opérations autonomes en agriculture. La seule norme disponible est une norme générique de type B, la EN ISO 18497 :2018, intitulée « Machines et tracteurs agricoles — Sécurité des machines agricoles hautement automatisées — Principes de conception » (ISO, 2018). Cette norme est actuellement en cours de révision au niveau ISO. Elle fournit des lignes directrices pour le balisage des fonctions de sécurité associées aux opérations autonomes. Quelle que soit la solution technique impliquée dans les fonctions de sécurité, les constructeurs doivent prouver l'efficacité du système de sécurité. Il est particulièrement nécessaire de recueillir des preuves des performances des fonctions ou sous-fonctions de sécurité critiques, comme la détection d'un être humain.

Depuis un an, plusieurs solutions ont été développées et mises sur le marché pour aider les conducteurs de véhicules à détecter et à gérer les humains. Ces solutions s'appuient sur des capteurs de vision et des algorithmes de *machine-learning* pour apprendre et détecter les personnes dans diverses conditions (Kukkala et al, 2018). Ils font partie du système avancé d'aide à la conduite (ADAS). Comme son nom l'indique explicitement, il s'agit avant tout d'une aide à la conduite pour le conducteur. La transposition de ces technologies aux unités autonomes hors route nécessite de passer de l'assistance aux performances éprouvées du système pour assurer la sécurité par lui-même.

En milieu agricole, ces performances doivent être prouvées dans des conditions qui peuvent être très éloignées de celles pour lesquelles les systèmes sont développés au départ. L'une des caractéristiques de l'environnement agricole est la forte variabilité des conditions environnementales et un environnement peu structuré (Tian et al, 2020). Jusqu'à présent, les méthodes qui permettent de prouver les performances d'un algorithme de *machine-learning* utilisé dans une fonction de sécurité sont manquantes (Hamon et al, 2020). En conséquence, les solutions techniques pour les systèmes de sécurité qui s'appuient sur des logiciels d'intelligence artificielle ne peuvent pas être déployées en utilisant une méthode standardisée pour évaluer et prouver la performance de la fonction de sécurité.

La norme EN ISO 18497:2018 donne des informations sur la manière de gérer les risques associés aux mouvements ou changements de direction automatisés, ainsi que sur la nécessité de disposer d'un dispositif de détection de personnes pour éviter les collisions. Il définit un obstacle de référence qui doit être détecté lorsqu'il est placé sur la trajectoire de la machine comme critère de succès. Dans tous les cas, l'unité autonome doit atteindre un état ne présentant pas de danger pour les personnes ou l'environnement avant le contact avec l'obstacle. Des protocoles de tests ont été conçus et mis en œuvre depuis la publication de la norme, comme ARPA1 développé dans le cadre d'un projet mené par INRAE (Debain et al, 2021). L'exigence fonctionnelle d'un système de détection d'obstacles peut devenir difficile à assurer dès lors que l'on envisage par exemple des machines enjambeurs pour des cultures pérennes comme la vigne. Dans ce cas, l'obstacle doit être détecté devant le trajet de la base roulante, mais également devant la zone enjambée où se trouve déjà la culture à travailler comme c'est le cas du robot TED.

Les systèmes de détection d'obstacles devraient alors être conçus pour faire face aux situations dans lesquelles les personnes peuvent être partiellement ou totalement masquées par la végétation et se présenter dans diverses postures en fonction des activités qu'elles effectuent. Cette complexité à gérer ces risques particuliers est à mettre en regard du manque d'unités autonomes disponibles sur le marché pour travailler dans les vignobles. Toutes les unités disponibles à l'heure actuelle impliquent qu'un opérateur reste raisonnablement proche des opérations, pour garantir que personne ne soit blessé par la machine pendant les opérations automatisées. Ce sont des unités semi-autonomes.

¹ Les normes de type A sont des normes de sécurité de base qui traitent des termes de base, des principes de conception et des aspects généraux pouvant être appliqués aux machines. Les normes de type B sont des normes de sécurité technique de base qui traitent des aspects de sécurité ou d'un type de dispositif de protection pouvant être utilisé pour une série de machines (B1 pour certains aspects de sécurité et B2 pour les dispositifs de protection). Les normes de type C sont des normes pour la sécurité des machines qui indiquent des exigences de sécurité détaillées sur une machine précise ou un groupe de machines.

2.3. Application au robot TED

Le robot enjambeur TED est un produit lancé en 2020. Il est capable de naviguer automatiquement dans les parcelles de vigne, à une vitesse maximale de 4,5 km/h. Il est conçu pour réaliser plusieurs opérations, notamment le désherbage mécanique. Il peut fonctionner dans des vignobles avec des pentes jusqu'à 20 % et des dévers jusqu'à 5 %. Le poids maximum de TED, outils compris, est de 2 500 kg. La plateforme mécanique est composée de 2 poutres latérales, 1 plateforme supérieure et 4 blocs roues qui contiennent les actionneurs de direction et de traction. TED dispose de 2 perches montées sur vérins, un de chaque côté, ce qui permet l'utilisation d'outils de désherbage classiques grâce à son interface standardisée.

TED est 100 % électrique, avec une capacité électrique maximale de 40 kWh. La technologie de batterie NMC fournit une haute densité d'énergie. L'architecture système est composée de 2 sous-systèmes différents :

- Le système de navigation d'abord, qui intègre un ordinateur embarqué. Il gère la navigation du robot à l'aide d'un récepteur GNSS et contrôle tous les actionneurs de la machine.
- Le système de sécurité agit comme un superviseur externe aux opérations et peut mettre le robot dans un état de sûreté à tout moment en coupant l'alimentation des actionneurs et en activant les freins.

Initialement, un opérateur devait rester à proximité de la machine pour assurer la sécurité des opérations. Il disposait d'un poste de commande sans fil équipé d'un bouton d'arrêt d'urgence, et était ainsi capable d'effectuer un arrêt du robot à tout moment et en toute sécurité. Toute l'analyse des risques a été revue pour la mise en œuvre du mode autonome.

Indépendamment du mode autonome, l'évaluation des risques selon la norme ISO 12100:2010 (ISO, 2010) avec présence obligatoire d'un opérateur local, en complément de l'application de la Directive Machines 2006/42/CE et de la EN ISO 18497 : 2018 (ISO, 2018), ont conduit à l'identification de cinq caractéristiques de sécurité de base (panneau de commande, signalisation et marquage des machines, avertissement visuel et sonore, relais de sécurité ; sélecteur à clé). Plusieurs risques significatifs supplémentaires ont été identifiés à partir du mode autonome et leur criticité évaluée selon le guide ISO/TR 14121-2:2012 (ISO, 2012). De même, les fonctions de sécurité ont été identifiées avec leur niveau de performance requis selon la norme EN ISO 13849-1:2015 (ISO, 2015).

Un système de détection d'obstacles est utilisé pour assurer la détection en toute sécurité des personnes exposées par leur proximité à des dangers provoqués par les mouvements de la machine. La détection d'obstacles devant les roues est constituée de 4 bumpers, solidaires de la roue. Les composants utilisés sont conformes à la norme ISO 13856-2:2013 (ISO, 2013) et conçus pour une machine présentant les caractéristiques mécaniques de TED.

L'analogie avec la norme ISO 3691-4:2020 (ISO, 2020) concernant les chariots industriels sans conducteur conduit à limiter la vitesse maximale de déplacement à 0,6 m/s (2,16 km/h) si la détection se base uniquement sur des dispositifs à contact. Cette limitation oblige à modifier les conditions d'utilisation du mode autonome, avec une fonction de sécurité pour garantir que la vitesse reste inférieure à 0,6 m/s lors du travail en mode autonome. La hauteur de détection des bumpers est fixée à 20 cm du sol, conformément aux recommandations de la norme ISO 13857 :2019 (ISO, 2019). La distance entre les bumpers de sécurité et les roues a été calculée puis testée dans le pire des cas, en fonction de la distance d'arrêt de la machine (pente descendante de 20% et sol glissant).

La détection des obstacles à l'intérieur du rang de vigne se fait par un dispositif breveté (FR3127668) basé sur un sondage mécanique des pieds de vignes. Il mesure le diamètre apparent des obstacles enjambés par le robot. Ce dispositif permet la création d'une zone d'exclusion de sécurité de 40 cm, centrée sur l'axe du robot. Tout obstacle d'un diamètre apparent supérieur à 20 cm, ou partiellement ou totalement extérieur à cette zone, déclenche un arrêt de sécurité avant que l'obstacle n'entre en contact avec les outils. Le rang de vigne lui-même représente un obstacle naturel qui empêche une personne de se tenir dans cette zone d'exclusion. Par conséquent, TED est conçu pour fonctionner en mode autonome uniquement sur vignes. Le robot effectue un arrêt en toute sécurité si l'obstacle franchi dépasse 20 cm de diamètre.

Afin de garantir que TED reste dans la zone de travail autonome, un système de barrière virtuelle a été conçu et intégré au système de sécurité. Il est basé sur la comparaison de deux sources GNSS différentes et permet les opérations de la machine en mode autonome que lorsque cette dernière se trouve à l'intérieur d'une zone préalablement définie. La définition du contour est réalisée manuellement par des personnes formées. Dans la plupart des cas, l'utilisateur n'est pas autorisé à gérer lui-même les cartes de sécurité. Le mode autonome ne peut pas être activé si le robot se trouve en dehors des zones autorisées mémorisées sur la machine.

Conformément au futur Règlement Machines (UE) 2023/1230, une fonction de supervision a été rajoutée sur le robot TED. La fonction actuellement définie permet à un superviseur d'avoir une vue d'ensemble de l'opération en temps réel, et de consulter les données de la machine et l'état de la mission. Il n'est pas nécessaire que le superviseur reste localement sur le terrain, ni qu'il joue un rôle actif dans la sécurité de la mission. Le superviseur peut alors être localisé ailleurs et il peut être désigné pour superviser plusieurs machines à la fois. Il peut commander à la machine de mettre en pause ses opérations autonomes, la machine est alors en attente et les fonctions de sécurité toujours activées. Tant que la machine n'est pas sortie du mode autonome, le superviseur peut autoriser la machine à reprendre ses opérations. Il peut également ordonner un arrêt, entraînant la fin des opérations autonomes. Une fois le mode autonome désactivé, un opérateur local doit se rendre sur la machine elle-même pour prendre les commandes manuellement.

3. Impacts environnementaux associés à l'autonomisation du robot TED

3.1. Méthodologie utilisée

L'Analyse du Cycle de Vie 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.

3.1.1. 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.

3.1.2. 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.

3.1.3. 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.

3.1.4. 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.

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

3.2.1. Objectifs de l'étude

Cette étude a été conduite dans le cadre d'un projet partenarial avec la société Naïo Technologies dans le cadre des activités du groupe « Eco-efficience » de l'association RobAgri² et en lien avec le Grand Défi de la Robotique Agricole dont une action porte sur l'évaluation des performances environnementales des solutions robotiques.

L'objectif de l'étude vise à évaluer l'impact environnemental d'une solution robotique (avec ou sans opérateur) et conventionnelle (système de référence) utilisée pour le désherbage mécanique des vignobles. Les pratiques agricoles et les technologies de désherbage robotique étant très variées, il a été décidé dans un premier temps

² <https://www.robagri.fr/>

de limiter l'étude ACV aux pratiques de désherbage intra-rang à l'aide d'intercepts dans le vignoble du Languedoc, pour lequel des données expérimentales étaient disponibles.

Aussi, bien que cette étude soit très spécifique à la région et à la technologie évaluée, la méthodologie proposée, quant à elle, peut être utilisée pour l'ensemble des solutions robotiques de désherbage de l'intra-rang existantes.

3.2.2. Application et public visé

Cette ACV a été avant tout réalisée dans le cadre d'un projet partenarial de recherche. Elle est destinée à apporter des éléments quantifiés sur l'impact environnemental lié à l'autonomie 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.

3.2.3. Revue Critique

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

3.2.4. Fonction du système et unité fonctionnelle

Pour être en accord avec les objectifs de l'étude, la fonction générale du système étudié est de maîtriser le développement des adventices localisées sous le rang dans le vignoble du Languedoc. Ce vignoble est caractérisé par une densité de 4 000 pieds par hectare, une largeur d'inter rang de 2.50 m et une absence de couvert végétal que ce soit sur l'intra rang (90% du vignoble concerné) ou l'inter rang (70% du vignoble concerné) (Agreste, 2019). La gestion des adventices en Languedoc est donc une gestion essentiellement mécanisée, le recours à l'enherbement comme technique de gestion des adventices est pratiqué dans une moindre mesure. La fonction étudiée sera donc la suivante : « **maîtriser les adventices sous les rangs d'une parcelle de vigne en Languedoc au moyen d'actions de désherbage mécanisé** ».

Les pratiques de désherbage mécanisé sont très variées. Elles peuvent être réalisées par différents outils de désherbage ayant des niveaux de performance différents selon les conditions pédoclimatiques du bassin viticole et les variations météorologiques annuelles. Elles dépendent également des pratiques individuelles des vigneron qui n'ont pas le même seuil de tolérance au salissement de l'intra rang par les adventices. Dans la pratique, une année aux conditions météorologiques particulièrement peu propices au désherbage mécanique peut compromettre l'atteinte de ce seuil de tolérance idéal. Par ailleurs, le seuil de tolérance de la présence d'adventices sur une parcelle (intra rang ou inter rang) est rarement quantifié. Aussi, nous avons considéré dans cette étude que le niveau de performance des outils utilisés était identique pour l'ensemble des scénarios.

Au regard des objectifs de l'étude et de la fonction du système, l'unité fonctionnelle suivante a été définie : « **Désherber les adventices sous le rang pour 1 hectare de vigne en Languedoc au moyen d'actions de désherbage mécanisé mobilisant des intercepts** ».

La notion de temporalité est absente de l'unité fonctionnelle car il est fait l'hypothèse que les solutions technologiques comparées :

- présentent la même efficacité de désherbage puisqu'elles utilisent les mêmes outils (intercepts), un seul passage est donc nécessaire pour comparer les solutions entre elles,
- sont réalisées dans les mêmes conditions pédoclimatiques.

Par contre, les dimensions d'une parcelle d'un hectare pouvant varier, ce critère sera pris en compte dans les scénarios pour évaluer l'influence de la taille et de la forme de la parcelle sur les résultats ACV.

3.2.5. Champ de l'étude

3.2.5.1. 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 adventives 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 et des outils de désherbage mécanique. 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 du réservoir de GNR (Figure 1).

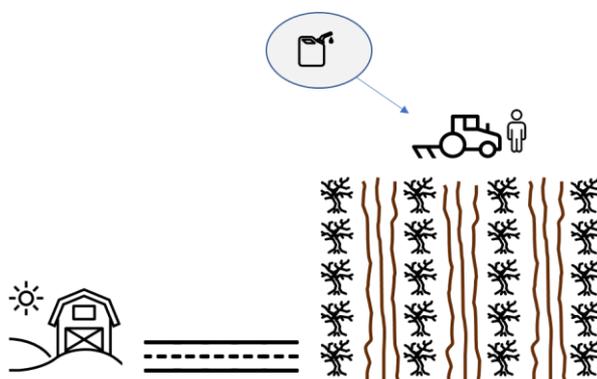


FIGURE 1 : SYSTEME CONVENTIONNEL

Système robotisé – TED :

Ce système robotisé mobilise un robot TED (Naïo Technologies) équipé d'outils de désherbage mécanique pour travailler le cavaillon. La description du robot TED est présentée plus en détail dans le §2.3. Le robot TED fonctionne avec de l'énergie électrique stockée dans une batterie. Il 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. La parcelle 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 (Figure 2 et Figure 3).

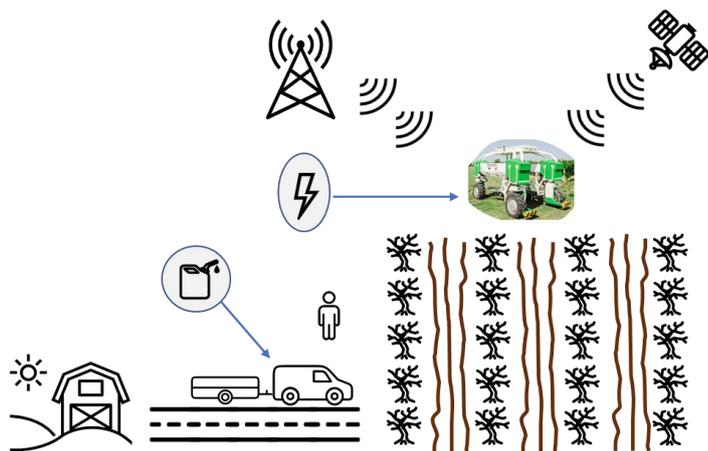


FIGURE 2 : SYSTEME ROBOTISE - TED



FIGURE 3 : ROBOT TED EN ACTION DANS UN VIGNOBLE (SOURCE : WWW.NAIO-TECHNOLOGIES.COM)

3.2.5.2. Scénarios étudiés

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. Le désherbage mécanique peut donc être réalisé dans ces deux zones. Toutefois, les enjeux de compétition entre adventices et vigne sont plus prégnants au niveau de l'intra-rang (ou cavaillon), c'est-à-dire la zone de plantation des ceps de vigne. Le désherbage est couramment réalisé avec des interceps, des outils de désherbage mécanique constitués d'une lame de 50 à 60 cm de long, qui travaille à quelques cm de profondeur dans le sol, et dont l'action est de couper les racines des adventices en place, qui ensuite se dessèchent.

Une précédente étude (Pradel et al., 2022) avait été conduite pour évaluer les impacts environnementaux du robot TED sur un itinéraire complet de désherbage. Le robot TED évalué nécessitait la présence obligatoire d'un opérateur humain équipé d'un bouton d'arrêt d'urgence à proximité de la machine pour sécuriser les opérations. Cette étude avait également pointé du doigt certains éléments limitants tels que le manque de données d'ICV actualisé pour les tracteurs agricoles, l'importance de la durée de vie du robot ou encore le besoin de faire évoluer la conception du robot TED vers un mode autonome avec des fonctions de sécurité additionnelles pour permettre d'opérer le robot sans intervention humaine.

Cette nouvelle étude vise à combler ces manques et à produire des résultats ACV actualisés. Pour cela, le cas du désherbage de l'intra rang avec des interceps en Languedoc a été utilisé comme cas d'étude pour tester la sensibilité des résultats ACV à trois modalités différentes, à savoir :

- La **mise à jour des données d'ICV pour les tracteurs** : la modélisation de l'opération de désherbage sera réalisée avec les données de fabrication de tracteur provenant de la BDD ecoinvent ou de l'ICV actualisé (Pradel, 2023).
- L'**autonomie du robot** : la modélisation de l'opération sera réalisée avec les données relatives à l'usage d'un robot TED nécessitant un opérateur humain à proximité ou celles relatives à l'usage d'un robot TED autonome ne nécessitant pas la présence d'un opérateur humain à proximité.
- La **taille de la parcelle** : la réalisation de l'opération sera testée sur une parcelle P1 de forme carrée et sur une parcelle P2 de forme rectangulaire.

Pour cette nouvelle étude, nous avons souhaité évaluer l'influence du facteur de forme d'une parcelle viticole sur les impacts environnementaux liés à son désherbage intra-rang. Le facteur de forme est égal au rapport entre la largeur, qui correspond à la direction des rangs de vignes, et la longueur de la parcelle.

Deux formes de parcelles ont été étudiées. La première parcelle est de forme carrée. Elle présente des côtés de 100 m de long (soit 1 hectare au total) et les rangs sont espacés de 2,5 m (P1). Cette parcelle est identique à

celle modélisée dans l'étude de 2022 (Pradel et al., 2022). La deuxième parcelle (P2) est de forme rectangulaire avec une longueur de 152,15 m et une largeur de 65,72 m. Les données sur la forme de cette dernière sont issues d'une parcelle réelle opérée par des robots TED. Dans le cadre de cette expérimentation, les robots ont été opérés directement par Naïo Technologies. Afin de pouvoir la comparer à la parcelle carrée, les données expérimentales ont été normalisées à l'hectare opéré, tout en conservant le facteur de forme initial. On considère également un espacement de 2,5 m entre les rangs. Ainsi, seul le facteur de forme varie entre les parcelles P1 et P2.

Le Tableau 1 présente une synthèse des modalités opératoires évaluées dont les impacts seront analysés dans ce rapport, à travers différents scénarios d'étude.

TABLEAU 1 : SYNTHÈSE ET CARACTÉRISTIQUES DES SCÉNARIOS ÉTUDIÉS

Code opération	Engin	Parcelle
TEDna_P1	Le robot TED nécessite l'intervention d'un opérateur humain (TEDna) dans la parcelle 1 (P1)	P1
Te_P1	Les données ecoinvent sont utilisées pour l'ICV du tracteur (Te) dans la parcelle 1 (P1)	P1
Tedfa_P1	Le robot TED ne nécessite pas l'intervention d'un opérateur humain (TEDfa) dans la parcelle 1 (P1)	P1
Ta_P1	Les données de Pradel (2023) sont utilisées pour l'ICV du tracteur (Ta) dans la parcelle 1 (P1)	P1
Tedfa_P2	Le robot TED ne nécessite pas l'intervention d'un opérateur humain (TEDfa) dans la parcelle 2 (P2)	P2
Ta_P2	Les données de Pradel (2023) sont utilisées pour l'ICV du tracteur (Ta) dans la parcelle 2 (P2)	P2

Les impacts des opérations prennent en compte les impacts liés à la fabrication du matériel (tracteur, robot, matériel de désherbage), à la consommation d'énergie (GNR, électricité), aux émissions liées à la combustion de GNR dans le moteur du tracteur, aux émissions liées à l'abrasion des pneus et les impacts des véhicules de transport pour amener le robot sur la parcelle.

3.2.5.3. 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

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...).

Les intrants et sortants considérés dans le périmètre sont présentés en Figure 4.

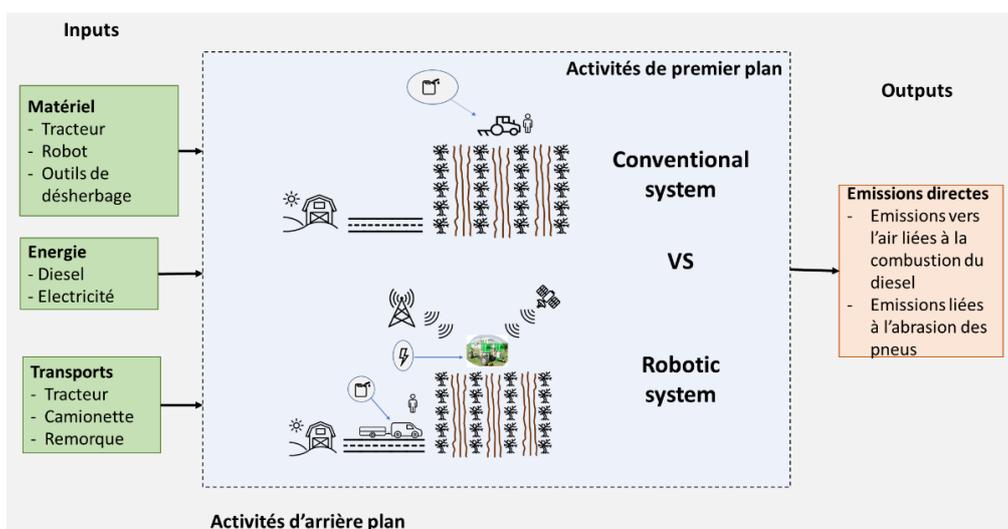


FIGURE 4 : PERIMETRE D'ETUDE

Le Tableau 2 présente les éléments pris en compte pour chaque intrant du système.

TABEAU 2 : ÉLÉMENTS 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
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	
Gazole Non Routier	Oui	
Électricité fonctionnement robots	Oui	

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

3.2.6.1. Choix de la méthode de caractérisation

Le choix de la méthode de caractérisation s'est porté sur la méthode Product Environmental Footprint (PEF) v3.1 recommandée par la Commission Européenne (2021). Le Tableau 3 présente les indicateurs midpoint de la méthode PEF v.3.1 utilisés dans cette étude.

TABEAU 3 : INDICATEURS DE LA METHODE PRODUCT ENVIRONMENTAL FOOTPRINT V3.1. UTILISES DANS L'ETUDE

Nom de l'indicateur		Unité	Méthode d'évaluation	Niveau de recommandation (UE) ^a	Signification
AP	Acidification	mol H ⁺ eq.	Accumulation d'excédents (Seppälä et al., 2006; Posch et al, 2008)	II	Impact des émissions d'oxydes d'azote, d'oxydes de soufre, d'ammoniac et d'acide chlorhydrique dont les retombées peuvent endommager les écosystèmes ainsi que les bâtiments
CCT	Climate Change, Total	kg CO ₂ eq.	Modèle de Berne – potentiels de réchauffement 100 ans sur la base du GIEC (IPCC, 2021)	I	Impact des émissions anthropiques sur le forçage radiatif de l'atmosphère contribuant à augmenter l'effet de serre.
EFT	Ecotoxicity, freshwater	CTUe	Sur la base du modèle USEto x2.1 (Fantke et al., 2017), tel qu'adapté dans Saouter et al., 2018	III/Interim	Impact des molécules et substances chimiques émises (métaux lourds, polluants organiques, pesticides...) sur les milieux aquatiques (eaux douces)
Eutro	Eutrophication, freshwater (F)	kg P eq.	Modèle EUTREND (Struijs et al., 2009) tel qu'appliqué dans ReCiPe	II	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.
	Eutrophication, Marine (M)	kg N eq.		II	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.
HTCT	Human toxicity - cancer	CTUh	Sur la base du modèle USEto x2.1 (Fantke et al., 2017), tel qu'adapté dans Saouter et al., 2018	III/Interim	Impact des molécules et substances chimiques cancérigènes émises (métaux lourds, polluants organiques, pesticides...) sur la santé de l'homme
HTnCT	Human toxicity – non cancer	CTUh		III	Impact des molécules et substances chimiques non cancérigènes émises (métaux lourds, polluants organiques, pesticides...) sur la santé de l'homme
IRHH	Ionizing radiation – human health	kBq U235 eq.	Modèle des effets sur la santé humaine tel que développé par Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al. 2000)	II	Impact des émissions anthropiques sur la présence de radiations ionisantes, elles-mêmes dues à la présence de composés radioactifs.

TABLEAU 3 (SUITE)

Nom de l'indicateur		Unité	Méthode d'évaluation	Niveau de recommandation (UE) ^a	Signification
OD	Ozone depletion	kg CFC-11 eq.	Modèle EDIP fondé sur les PACO de l'organisation météorologique mondiale (OMM) sur une période infinie (OMM 2014 + intégrations).	I	Impact des émissions anthropiques sur la destruction de la couche d'ozone (ozone stratosphérique)
PM	Particle matter	Disease incidence	Méthode PM (Fantke et al., 2016 dans PNUE 2016)	I	Impact sur la santé humaine des émissions de PM2.5 primaires et secondaires en intérieur et à l'extérieur dans les zones urbaines et rurales
POFHH	Photochemical oxidation formation – human health	kg NMVOC eq.	Modèle LOTO-EUROS (Van Zelm et al., 2008) tel qu'appliqué dans ReCiPe 2008	II	Impact des émissions anthropiques sur la création d'ozone troposphérique.
RUF	Resource use – fossil	MJ	Van Oers et al., 2002 tel que figurant dans la méthode CML 2002, v.4.8	III	Impact sur la consommation d'énergie primaire provenant de différentes sources non renouvelables (pétrole, gaz naturel, etc.)
RUM	Resource use - minerals	Kg Sb eq.	Van Oers et al., 2002 tel que figurant dans la méthode CML 2002, v.4.8	III	Impact sur la diminution des ressources disponibles dont les réserves sont limitées. Calcul basé sur les réserves ultimes.
WU	Water use	m ³ world eq.	Modèle Available Water REMaining (AWARE) (Boulay et al. PNUE, 2016)	III	Impact sur la consommation d'eau bleue, caractérisée par la différence les prélèvements et les rejets d'eau bleue dans l'environnement. L'eau bleue est l'eau que l'on trouve dans les lacs, les rivières et qui se recharge par les précipitations (pluie ou neige).

^a Niveau I : méthode recommandée et satisfaisante, Niveau II : méthode recommandée mais nécessite encore quelques améliorations (développements), Niveau III : méthode recommandée mais devant être interprétée avec précaution

3.2.6.2. 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. Les impacts sur l'occupation des sols et l'eutrophisation terrestre de la méthode PEF v3.1 n'ont pas été retenus dans l'analyse des résultats ACV.

3.3. Inventaire des données

3.3.1. 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 issues de la précédente étude de 2022 (Pradel et al., 2022).

Les opérations de désherbage sont modélisées à partir des données relatives aux tracteurs, aux robots agricoles, aux outils de travail du sol, 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 4.

TABLEAU 4 : FLUX ENTRANTS ET SORTANTS POUR UNE OPERATION DE DESHERBAGE

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

3.3.2. Données relatives aux outils agricoles (tracteur, robot et outil intra-rang)

3.3.2.1. Actualisation des données d'inventaire relative au tracteur

Les données utilisées pour modéliser le tracteur lors de l'étude de 2022 étaient issues de la base de données ecoinvent v3.7.1 (i.e. procédé « market for tractor, 4-wheel, agricultural »). Le processus de production de tracteur d'ecoinvent est basé sur d'anciennes données de 2002 et non mises à jour depuis. Ne disposant pas de données sur les fabricants ni de données bibliographiques sur la composition des tracteurs, ecoinvent a utilisé les données sur la fabrication des camions (tracteurs routiers) comme proxy pour la fabrication des tracteurs (Nemecek et Kägi, 2007). De même, les données relatives à l'énergie nécessaire pour la fabrication et la maintenance d'un tracteur sont issues de plusieurs publications datant des années 1996, 1999 et 2001 (Nemecek et Kägi, 2007).

Le procédé « market for tractor, 4-wheel, agricultural » de la base de données ecoinvent n'est plus représentatif des technologies actuelles du fait de l'absence de composants électroniques, de câbles électriques associés ou du système de dépollution, obligatoire désormais sur les tracteurs agricoles. En effet, le procédé tel que modélisé dans ecoinvent limite la composition du tracteur à de l'acier, du caoutchouc, du plastique, du verre, de la peinture et quelques autres métaux (Figure 5). Cependant, une analyse comparative des fonctions offertes par un tracteur de 50 kW avec un robot révèle des similitudes au niveau des équipements (GNSS, centrale inertielle...). Les cabines des tracteurs sont équipées d'affichages numériques et de divers modules d'interface homme-machine composés de composants électroniques. Les principales différences peuvent résider dans la motorisation (électrique pour les robots, thermique pour les tracteurs). De plus, si la motorisation du tracteur est électrique, les différences avec le robot deviennent très faibles, hormis un effet d'échelle, le tracteur étant censé être plus lourd que les robots pour une puissance disponible équivalente (poids de la cabine et des systèmes de protections intégrés de type ROPS).

Aussi, le procédé « tracteur » tel qu'il est modélisé dans la base de données ecoinvent n'étant plus représentatif de la composition des tracteurs actuels, un travail de mise à jour de l'inventaire du cycle de vie d'un tracteur a été conduit en 2023 (Pradel, 2023) afin de proposer un cadre comparatif plus approprié entre technologies.

Cet inventaire a été réalisé sur la base d'un tracteur construit en 2016, à partir de données issues du système technique d'un fabricant de tracteur agricole. La composition des différents composants a été recueillie dans la littérature grise et à dire d'experts. Il a été nécessaire également de s'appuyer sur des publications techniques et scientifiques, notamment afin de modéliser finement le système de dépollution du tracteur. Le système de dépollution de moteur diesel permet de respecter les dernières normes européennes sur les émissions des véhicules non routiers. Ce système est composé d'un catalyseur d'oxydation diesel (DOC), un filtre à particules diesel (DPF), ainsi qu'une réduction sélective catalytique (SCR). Ces trois modules de dépollution contiennent des métaux rares tels que le vanadium, le tungstène, le titane, le platine, le palladium ou encore le rhodium. Ils permettent avant tout une réduction de certaines émissions liées à la combustion de GNR par le tracteur. Ces réductions seront prises en compte dans l'ICV présenté ci-après dans le Tableau 5.

La composition actualisée résultant de ce nouvel inventaire du cycle de vie est représentée en Figure 6. On constate que certains composants absents du procédé ecoinvent représentent désormais une proportion massique non négligeable dans l'inventaire actualisé. C'est notamment le cas de l'électronique embarquée et du système de dépollution. La catégorie « électronique embarquée » comprend les cartes de commande, les câbles électriques et d'autres composants tels que le système GPS ou des caméras.

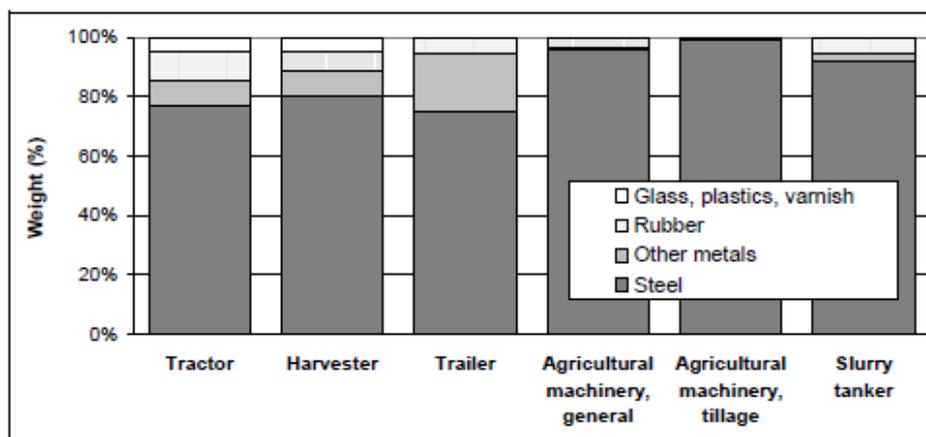


FIGURE 5. COMPOSITION DES MACHINES AGRICOLES MODELISEES DANS LA BASE DE DONNEES ECOINVENT V.3.7.1 EN % DE LA MASSE TOTALE DE LA MACHINE (NEMECEK ET KÄGI, 2007)

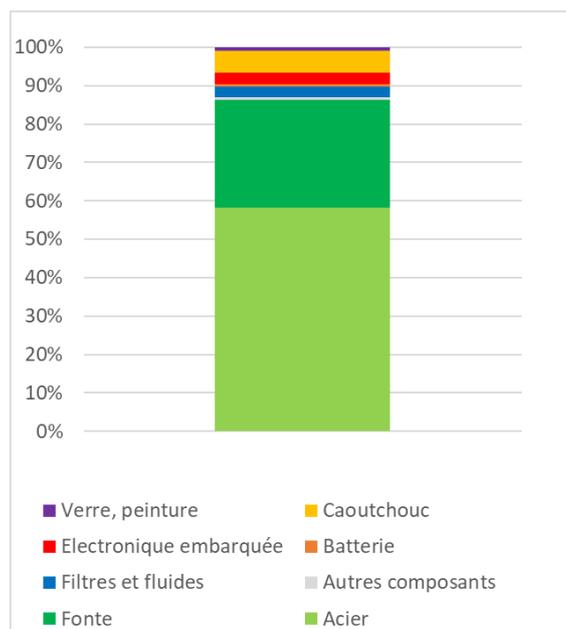


FIGURE 6. COMPOSITION ACTUALISEE D'UN TRACTEUR AGRICOLE, EN % DE LA MASSE TOTALE DE L'ENGIN

3.3.2.2. Actualisation des données d'inventaire relative au robot TED

La composition du robot TED est la même que celle de l'étude de 2022. Les principaux changements associés au robot TED travaillant en autonomie portent sur un nombre et donc un poids plus important pour les batteries ainsi que d'une réduction de la vitesse d'avancement du robot pendant l'opération de désherbage. Les nouvelles données ont été fournies par Naïo Technologies et ne seront pas divulguées dans ce rapport pour des raisons de confidentialité. La composition du robot TED est présentée en Figure 7.

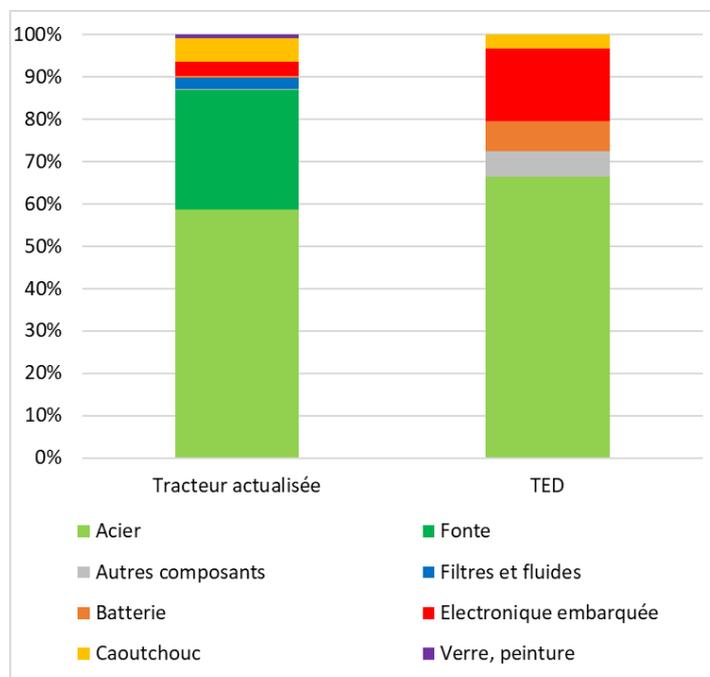


FIGURE 7. COMPARAISON ENTRE LA COMPOSITION DU TRACTEUR ACTUALISE ET LE ROBOT TED, EN % DE LA MASSE TOTALE DE L'ENGIN (PRADEL, 2023)

3.3.2.3. 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 :

Le tracteur modélisé est un tracteur de 50 kW d'une durée de vie de 7200 h et de masse 3600 kg.

Afin d'avoir une base de comparaison identique entre les scénarios, nous avons fait l'hypothèse d'une durée de vie pour le robot TED identique à celle du tracteur. La masse du TED est de 2083 kg sans les batteries. La masse des batteries du TED est de 160 kg. Toutefois, la quantité de batteries nécessaire pour le fonctionnement du robot sur l'ensemble de sa durée de vie dépend de l'autonomie du robot. Les données expérimentales du robot TED en mode autonome montre une autonomie des batteries de 12 h contre 6 h d'autonomie pour la version de TED nécessitant l'intervention d'un opérateur humain.

La quantité de batterie nécessaire sur l'ensemble du cycle de vie du TED a été calculée de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Masse de batterie totale}[kg] \\ = \text{Masse initiale}[kg] \times \frac{\text{Durée de vie TED}[h]}{(\text{Nb h cycle charge batterie}[h] \times \text{Autonomie batterie}[h])} \end{aligned}$$

Où Masse initiale = 160 kg, durée de vie TED = 7200 h, nb d'heures par cycle de charge = 1000 h

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 est stocké le GNR. 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.

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.

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

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.

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

La durée des trajets est définie de la manière suivante :

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

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. 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.

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

La valeur de volume du réservoir GNR du tracteur modélisé est de 90 litres.

3.3.2.4. Données relatives à l'outil de désherbage intra-rang

La même méthode d'allocation que pour les machines agricoles est utilisée pour l'outil de désherbage de l'intra-rang. 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.

L'outil de désherbage modélisé est une lame intercep de masse 80 kg et d'une durée de vie de 1500 h. Les données utilisées sont issues du rapport méthodologique Agribalyse® (Asselin-Balençon et al., 2021). La composition de l'outil 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).

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

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 :

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

Le nombre de rang par hectare est lui dépendant de la largeur de la parcelle et de la largeur entre les rangs.

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

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

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

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

La vitesse d'avancement considérée pour le tracteur équipé de lames intercep est de 4,5 km/h. Les données utilisées sont issues du rapport méthodologique Agribalyse® (Asselin-Balençon et al., 2021). La vitesse d'avancement pour le robot TED est de 2,16 km/h en mode autonome et de 2,5 km/h lorsqu'il est opéré par un opérateur humain.

3.3.3.2. Données relatives à la consommation de GNR

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

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

La consommation de fuel pour l'opération de désherbage avec le tracteur est de 13,94 L/ha. Les données utilisées sont issues du rapport méthodologique Agribalyse® (Asselin-Balençon et al., 2021).

3.3.3.3. Données relatives à la consommation d'électricité

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

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

$$\text{Avec Consommation électricité par heure}[kW] = \frac{\text{Capacité batterie}[kWh]}{\text{Autonomie}[h]}$$

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.

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 :

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

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 tracteurs³.

Emissions de particules fines :

³ <https://www.total-proxi-energies.fr/agriculteurs/actualites/quelle-difference-entre-gasoil-et-gnr>

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.

$$\begin{aligned} & \text{Facteur d'émission PM2.5 [g/kg GNR]} \\ & = A[\text{g PM2.5/kg GNR}] - B[\text{g PM2.5/(kg GNR * kW)}] * \text{Puissance nominale}^{0,1}[\text{kW}] \\ & \text{Avec } A=7,25 \text{ [g PM2.5/kg GNR]} \text{ et } B=3,62 \text{ [g PM2.5/(kg GNR * kW)]}. \end{aligned}$$

Une puissance nominale de 55 kW a été utilisée pour calculer le facteur d'émission de PM2.5 pour le tracteur modélisé. Ce facteur d'émission (1.846 g/kg GNR) est ensuite converti en g/L GNR.

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.

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

Le Tableau 5 présente les valeurs prises en compte pour le tracteur modélisé. Ces données proviennent de test sur banc d'essai réalisés par Agroscope⁴. Le modèle de tracteurs a été choisi de manière à ce que la puissance de son moteur corresponde à la puissance des tracteurs de la base de données Agribalyse.

TABEAU 5 : EMISSIONS VARIABLES LIEES A LA COMBUSTION DU GNR EN FONCTION DES TRACTEURS

Type de tracteur	Tracteur 50 kW
Tracteur testé	Kubota M7040 DTHQ
Date du test	2010
Consommation GNR en kg/kWh	0,307
Quantité de HC libéré (g/kWh)	0,36
Quantité de NOx libéré (g/kWh)	4,58
Quantité de CO libéré (g/kWh)	0,81

La modélisation des émissions liées à la combustion de GNR va varier selon la présence ou non d'un système de dépollution sur les tracteurs. Dans le cadre du tracteur modélisé à partir de la base de données ecoinvent, il est fait l'hypothèse que le système de dépollution n'est pas présent et que les émissions ne sont pas réduites.

Dans le cadre du tracteur actualisé, le système de dépollution est modélisé. L'ajout du système de dépollution nécessite de prendre en compte une réduction des émissions de monoxyde de carbone (CO), d'hydrocarbures (HC), d'oxydes d'azote (NO_x), de particules fines (PM), de méthane (CH₄) et de benzène (C₆H₆). Ces réductions correspondent à la différence entre les valeurs d'émissions maximales imposées par la norme Stage IV et les valeurs d'émissions des moteurs précédant les normes européennes. Les facteurs de réductions et les nouvelles valeurs d'émissions pour le tracteur actualisé sont synthétisés dans le Tableau 6 (Notter et Schmied, 2015). La prise en compte de la réduction sélective catalytique dans le système de dépollution nécessite également de modéliser une consommation annexe d'un agent réducteur azoté. Pour cela on émet l'hypothèse d'une

⁴ <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/publications/recherche-publications/test-tracteurs.html>

consommation d'*AdBlue*, composé de 32,5% d'urée et de 67,5% d'eau déminéralisée, à hauteur de 5% du volume du fuel consommé.

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

TABLEAU 6 : EMISSIONS PAR KG DE GNR CONSOMME

Émissions en g/L de GNR consommé	Tracteur 50 kW ecoinvent	% réduction d'émission	Tracteur 50 kW actualisé
Dioxyde de carbone CO ₂	2620,8	-	2620,8
Dioxyde de soufre SO ₂	0,8484	-	0,8484
Méthane CH ₄	0,10836	86 %	0,01514
Benzène C ₆ H ₆	0,006132	86 %	0,000876
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	1,55033	95 %	0,0677216
HC	0,985016287	81 %	0,127391428
NO _x	12,53159609	97 %	0,673402261
CO	2,216286645	86 %	0,363906954
Consommations annexes en g/L de fuel			
Urée	-		21,45
Eau déminéralisée	-		33,75

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, 0,026 et 0,006. Le Tableau 7 présente les valeurs utilisées pour calculer les émissions de métaux lourds liées à l'abrasion des pneus.

TABLEAU 7 : CARACTERISTIQUES DES PNEUS EN FONCTION DU TYPE DE MACHINE

	Tracteurs / TED	Remorque
Durée de vie pneu (h)	2 500	750
Quantité de pneu par machine (kg _{pneus} /kg _{machine})	0,0975	0,0475
Quantité de caoutchouc synthétique (kg _{Caoutchouc synthétique} /kg _{Pneu})	0,29	0,56

Les pneus des tracteurs et du robot TED sont modélisés par les données correspondant au pneu tracteur. 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 8 présente une synthèse des émissions de métaux lourds liées à l'abrasion des pneus.

TABLEAU 8 : SYNTHESE DES EMISSIONS LIEES A L'ABRASION DES PNEUS

Émissions en g/kg engin	Tracteur 50 kW	TED	Remorque
Zinc (Zn)	1,3029	1,3029	3,4048
Plomb (Pb)	2,1172E-03	2,1172E-03	5,5328E-03
Cadmium (Cd)	4,8859E-04	4,8859E-04	1,2768E-03

3.3.6. Synthèse des données relatives aux opérations techniques par scénario

Le Tableau 9 récapitule les données d'entrée nécessaires au calcul des impacts des opérations à partir des équations précédemment détaillées.

TABLEAU 9 : SYNTHESE DES DONNEES D'ENTREE POUR LES OPERATIONS DE DESHERBAGE

Scénarios	Autonomie	TED	Tracteur	Outil intra-rang	GNR	Electricité	Transport TED
		kg			L	kWh	t.km
TEDna_P1	6h	0,6826	-	0,1237	-	5,4969	8,9374
Te_P1	-	-	0,626	0,0687	17,60	-	-
Tedfa_P1	6	0,7286	-	0,1406	-	8,1467	7,6491
	7	0,7185	-		-	6,8174	6,3364
	10	0,7040	-		-	4,8880	4,4761
	12	0,6978	-		-	4,0734	3,7065
	15	0,6917	-		-	3,2587	2,9463
Ta_P1	-	-	0,626	0,0687	17,59	-	-
Tedfa_P2	6	0,8109	-	0,1406	-	9,0676	8,5137
	7	0,7998	-		-	7,5880	7,0526
	10	0,7836	-		-	5,4406	4,9821
	12	0,7767	-		-	4,5338	4,1254
	15	0,7699	-		-	3,6270	3,2793
Ta_P2	-	-	0,715	0,0687	20,12	-	-

3.3.7. 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 données 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 remorque⁵. 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.

3.3.8. 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.

⁵ <http://remorquedistrib.com/team/porte-engin/porte-engin>

3.4. Evaluation des impacts environnementaux des scénarios de désherbage

L'évaluation des impacts environnementaux des scénarios est faite avec la méthode de caractérisation PEF v3.1 présentée au paragraphe 3.2.6.1. Les résultats sont présentés de la manière suivante :

- Analyse de l'impact des scénarios de désherbage pour la parcelle P1 (globaux / contribution des procédés / modalités testées (Ta/Te ; TEDna/TEDfa))
- Analyse de l'impact du facteur de forme de la parcelle sur les résultats ACV
- Analyse de l'impact de l'autonomie du robot sur les résultats ACV

Pour rappel, les résultats sont relatifs au désherbage de l'intra rang d'une parcelle viticole d'une surface de 1 hectare dans le bassin viticole du Languedoc. 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 10.

TABLEAU 10. DESCRIPTIF DES LEGENDES POUR LES ANALYSES DE CONTRIBUTIONS

Intitulé de la légende	Code couleur	Regroupe
Production Matériel agricole		Fabrication du tracteur Fabrication du matériel de désherbage
Production GNR+AdBlue®		Fabrication du GNR et de l'AdBlue® (pour Ta uniquement)
Production Electricité		Fabrication de l'électricité utilisé par les robots lors de l'opération de désherbage
Production Robot		Fabrication du robot
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)

3.4.1. Analyse des impacts environnementaux des scénarios de désherbage pour la parcelle P1

Pour rappel, les scénarios comparés ici sont les scénarios :

- TEDna_P1 : Le robot TED nécessite l'intervention d'un opérateur humain dans la parcelle 1
- TEDfa_P1 : Le robot TED ne nécessite pas l'intervention d'un opérateur humain dans la parcelle 1
- Te_P1 : Les données ecoinvent sont utilisées pour l'ICV du tracteur dans la parcelle 1
- Ta_P1 : Les données de Pradel (2023) sont utilisées pour l'ICV du tracteur dans la parcelle 1

Les résultats obtenus avec la méthode PEF v3.1 sont présentés Figure 8. Pour une facilité de lecture, les extensions _P1 ne sont pas mentionnées dans le nom des scénarios dans les paragraphes ci-dessous. Les résultats obtenus pour deux autres méthodes, CML-IA (Figure 11) et RECIPE2016 (Figure 12), sont présentés en Annexe 1.

3.4.1.1. Impacts sur l'épuisement des ressources

Les impacts sur l'épuisement des ressources minérales (RUM) sont beaucoup plus importants pour les scénarios robotisés (TEDna et TEDfa) que pour les scénarios conventionnels (Te et Ta). Cette différence est principalement due à la production de composants électroniques actifs pour le robot.

Pour les scénarios robotisés, la production du robot est le principal contributeur à l'épuisement des ressources minérales. En regardant de plus près, trois éléments (hors batterie) contribuent principalement à l'impact sur les ressources minérales du robot, à savoir la fabrication des composants électronique actifs (36,3%), la fabrication des moteurs électriques (22,2%) et la fabrication des câbles électriques (14,7%). L'ensemble du robot TED et la batterie comptent respectivement pour 83,3% et 16,7% de l'impact sur l'épuisement des ressources minérales pour le scénario TEDna et 91,7% et 8,3% pour le scénario TEDfa.

Pour les scénarios conventionnels, l'impact sur l'épuisement des ressources minérales est majoritairement dû à la production du tracteur (94,4% pour Te et 96,5% pour Ta). Par ailleurs, la production du « tracteur actualisé » (Ta) est 2,46 fois plus impactante que celle du « tracteur ecoinvent » (Te). Cette différence est principalement liée à la contribution de deux composants du « tracteur actualisé », à savoir la batterie au plomb et l'électronique embarquée qui représentent respectivement 55,0% et 41,4% des impacts. La contribution de la batterie au plomb à l'épuisement des ressources minérales s'explique à 96% par la présence d'antimoine (Sb), utilisé en alliage Pb-Sb dans les électrodes. L'ajout de 10-12% de Sb permet de durcir le plomb, d'améliorer l'adhésion de la masse active et de protéger la batterie contre la corrosion.

Les impacts sur l'épuisement des ressources fossiles (RUF) sont quant à eux beaucoup plus importants pour les scénarios conventionnels (Te et Ta). Ces impacts sont principalement dûs à la production de GNR consommé par le tracteur, i.e. 92,5% pour Ta et 90,8% pour Te. Pour les scénarios robotisés, le principal contributeur est le transport des robots depuis le siège de l'exploitation jusqu'à la parcelle à désherber (76,8% pour TEDna et 58,1% pour TEDfa).

Les impacts sur la ressource en eau (WU) sont plus importants pour les scénarios robotisés TEDna et TEDfa que pour le scénario conventionnel Te. Toutefois, cette hiérarchie change avec l'utilisation du procédé « tracteur actualisé ». Le scénario Ta devient plus impactant que le scénario TEDfa du fait de l'usage d'AdBlue®, représentant une contribution de 36,7% à l'impact WU pour le scénario Ta. Pour les scénarios robotisés, la production du robot, son transport et la production d'électricité contribuent respectivement à 38,8%, 42,0% et 15,4% pour TEDna et à 53,2%, 24,7% et 16,1% pour TEDfa.

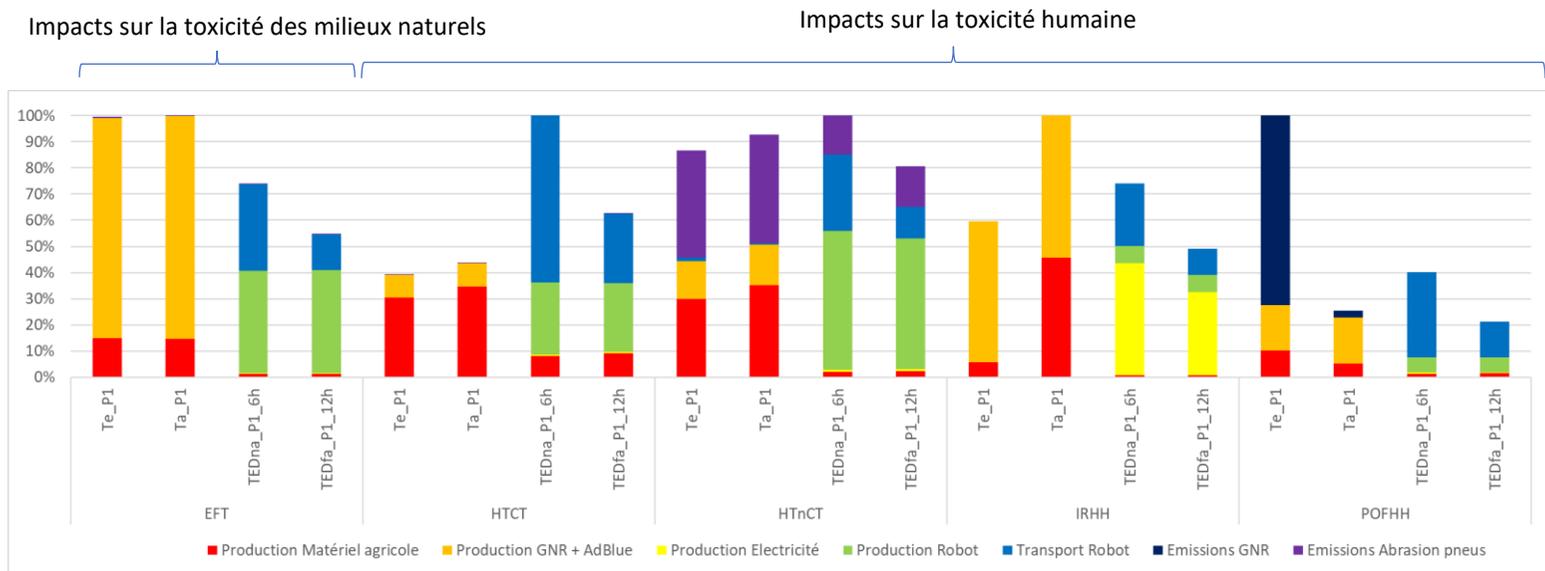
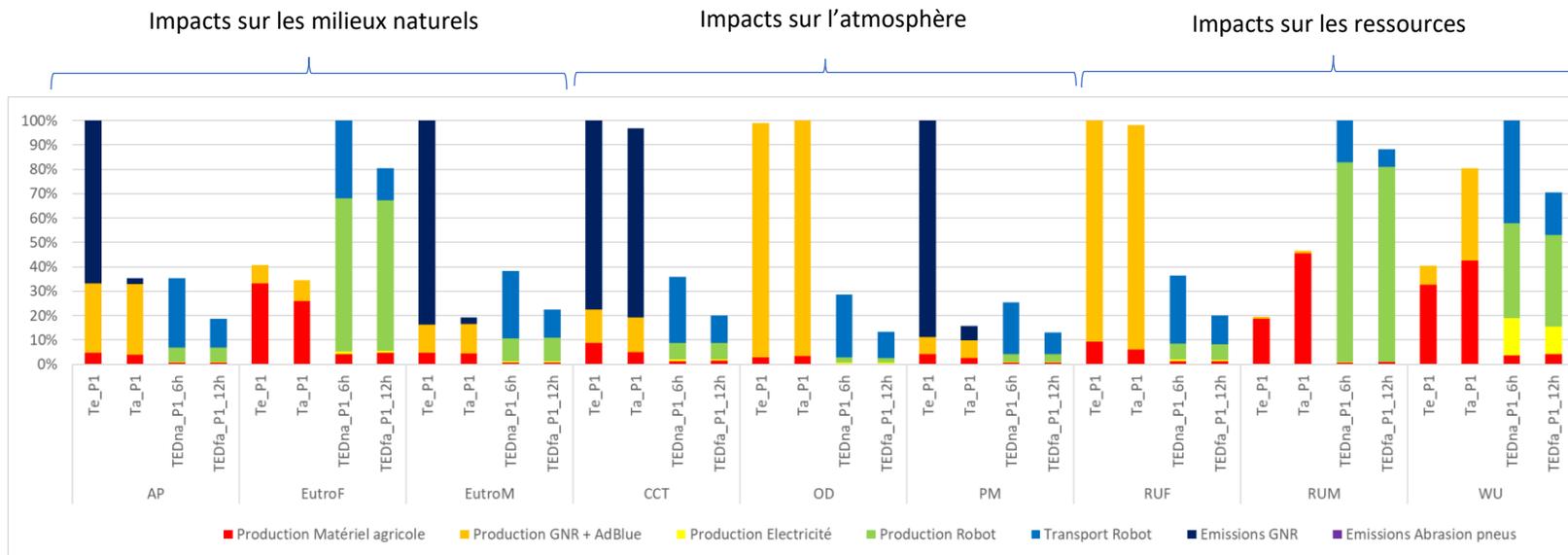


FIGURE 8 : ANALYSE DE CONTRIBUTION DES OPERATIONS DES SCENARIOS AVEC LA METHODE PEF V3.1

EFT : Ecotoxicité des eaux douces
 HTCT : Toxicité humaine – cancérogènes
 HTnCT : Toxicité humaine – non cancérogènes
 IRHH : Radiations ionisantes – santé humaine
 POFHH : Oxydation photochimique – santé humaine

3.4.1.2. Impacts sur l'atmosphère

A l'instar de l'impact sur l'épuisement des ressources fossiles, l'impact sur le changement climatique (CCT) est également bien plus important pour les scénarios conventionnels que pour les scénarios robotisés. Cela est dû à la contribution des émissions liées à la combustion GNR pour cet impact, qui est de 77,6% pour le scénario Te et de 80,0% pour le scénario Ta. On observe ici des valeurs très proches pour les impacts des scénarios « tracteur ecoinvent » et « tracteur actualisé » sur le changement climatique. Ici, le système de dépollution permet de réduire les émissions de CH₄ de 86% mais la quantité de CH₄ émise lors de la combustion du GNR étant plus faible que celle du CO₂, cette réduction est négligeable sur l'impact du changement climatique (cf. Tableau 6). La contribution des scénarios robotisés au changement climatique est, comme pour l'impact épuisement des ressources fossiles, expliquée par le transport du robot au champ (75,5% pour TEDna et 56,3% pour TEDfa).

L'impact sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique est bien plus important pour les scénarios conventionnels que pour les scénarios robotisés. Ils sont essentiellement dus à la production du GNR (96% pour Ta et 97% pour Te). Ces impacts s'expliquent par les émissions d'Halon 1301 lors de la production de GNR. Pour les scénarios robotisés, l'impact est dû essentiellement au transport des robots (90,1% pour TEDna et 79,8% pour TEDfa).

Concernant l'indicateur de formation de particules fines (PM), le scénario conventionnel Te est beaucoup plus impactant que le scénario Ta et les scénarios robotisés. Ceci s'explique par la présence du système de dépollution qui permet une réduction drastique des émissions de particules fines de 95%, entraînant une réduction de l'impact de 82,9% entre les scénarios Te et Ta. La réduction de l'impact entre le scénario TEDna et TEDfa est quant à lui expliqué comme pour l'impact épuisement des ressources fossiles et changement climatique par une diminution de l'impact lié au transport du robot (impact PM pour le transport du robot respectivement de 83,0% pour TEDna et 67,2% pour TEDfa).

3.4.1.3. Impacts sur les milieux naturels

Concernant les impacts sur l'acidification des milieux naturels (AP), le scénario conventionnel Te est beaucoup plus impactant que le scénario Ta et les scénarios robotisés. Comme pour l'impact sur les particules fines, ceci est lié au système de dépollution modélisé pour le Ta qui permet une réduction de 97% des NOx. Cette réduction drastique entraîne une réduction de l'impact de 64,4% entre les scénarios Ta et Te. La réduction de l'impact entre le scénario TEDna et TEDfa est quant à lui expliqué comme pour l'impact épuisement des ressources fossiles, changement climatique et particules fines par une diminution de l'impact lié au transport du robot (impact AP pour le transport du robot respectivement de 80,1% pour TEDna et 63,0% pour TEDfa). Le constat est similaire pour l'impact sur l'eutrophisation des eaux marines (EutroM), qui comme l'impact acidification est lié aux émissions de NOx.

En revanche, les impacts sur l'eutrophisation des eaux terrestres (EutroF) sont plus importants pour les scénarios robotisés et sont causés en grande majorité par la fabrication du robot (62,9% pour TEDna et 76,7% pour TEDfa). Ces impacts s'expliquent par la fabrication des composants électroniques actifs (32,3%), la fabrication des moteurs électriques (23,3%) et la fabrication des câbles électriques (11,6%).

3.4.1.4. Impacts sur l'écotoxicité des milieux naturels

A la différence des autres impacts ci-dessus, il n'y a que peu ou pas de différences pour l'impact sur l'écotoxicité des eaux terrestres (EFT) entre les scénarios conventionnels (Te et Ta), la production de GNR étant le principal contributeur à cet impact (84,0% pour les deux scénarios conventionnels). Pour les scénarios robotisés, l'impact sur l'écotoxicité des eaux terrestres s'explique par la production du robot, représentant la moitié des impacts avec le transport pour TEDna. La fabrication du robot pour TEDfa représente quant à elle 71,2% des impacts, le reste étant lié au transport du robot. Trois éléments composant le robot contribuent majoritairement à cet impact, à savoir la fabrication des moteurs électriques (33,8%), la fabrication des composants électroniques actifs (31,6%), et la fabrication du GPS (10%).

3.4.1.5. Impacts sur la toxicité humaine

Les impacts liés à la toxicité humaine sont divisés en deux sous-catégories : les impacts liés aux substances cancérigènes (HTCT) et non cancérigènes (HTnCT). Dans la cadre de la première sous-catégorie (HTCT), les scénarios robotisés sont les plus impactants comparés aux scénarios conventionnels et dus aux émissions de formaldéhyde (64,0%) générées lors du transport du robot. Les scénarios conventionnels et robotisés ont des impacts quasiment équivalents sur la seconde catégorie (HTnCT) expliqués par les émissions de métaux lourds lors de l'abrasion des pneus des tracteurs pour les scénarios conventionnels (48,6% pour Te et 45,4% pour Ta) et la fabrication du robot (52,9% pour TEDna et 62,0% pour TEDfa).

L'impact sur les radiations ionisantes est principalement causé par la production du GNR pour les scénarios conventionnels mais également par la production de l'énergie utilisée pour la fabrication et la maintenance du tracteur pour Ta pour lequel le mix énergétique français a été modélisé. Pour les scénarios robotisés, la production d'électricité et le transport des robots sont les principaux contributeurs. Les contributions sur cet impact s'expliquent par l'émission dans l'air de substances radioactives, essentiellement sous forme de Carbone 14 (C^{14}). Ces résultats sont toutefois à prendre avec précaution du fait que l'énergie utilisée pour la fabrication et la maintenance du robot n'a pas été modélisée faute de données.

Concernant l'impact sur le potentiel d'oxydation photochimique et son impact sur la santé humaine (POFHH), on retrouve les mêmes tendances que pour les indicateurs acidification, destruction de la couche d'ozone et particules fines. Le scénario conventionnel Te est beaucoup plus impactant que le scénario Ta et les scénarios robotisés. Ceci s'explique par la présence du système de dépollution qui permet une réduction drastique des émissions de CO de 86% et de NOx de 97%, entraînant une réduction de l'impact de 69,8% entre les scénarios Te et Ta.

3.4.2. Analyse de l'impact du facteur de forme de la parcelle sur les résultats ACV

Dans le cadre de l'étude de 2022, seule une parcelle de forme carrée de 100 m par 100 m (1ha) avait été modélisée. Afin de déterminer si le facteur de forme des parcelles est un facteur sensible sur les résultats ACV, deux parcelles expérimentales, P1 et P2, ont été utilisées pour la modélisation des scénarios ACV. Ces parcelles sont des parcelles utilisées pour des essais par Naïo Technologies. La parcelle P2 a une surface totale de 2,0456 ha (217,62 m de long et 94 m de large). Afin de pouvoir la comparer à la parcelle P1, les données ont été normalisées à l'hectare, tout en conservant le facteur de forme initial. On considère comme dans la parcelle 1 un espacement de 2,5 m entre les rangs. La parcelle P2 est travaillée dans le sens de la largeur. La flèche rouge sur la Figure 9 et la Figure 10 indique le sens dans lequel est travaillée la parcelle.



FIGURE 9. FORME DE LA PARCELLE P1 (1 HA, 100M x 100M, 40 RANGS)



FIGURE 10. FORME DE LA PARCELLE P2 (1 HA, 152,15M x 65,72M, 61 RANGS)

Le Tableau 11 présente les % d'augmentation du facteur de forme entre la parcelle P1 et la parcelle P2 que ce soit pour le scénario Ta ou TEDfa. Les résultats obtenus avec la méthode PEF v3.1 sont présentés en Figure 13 en Annexe 2.

Les deux parcelles sont juxtaposées, et ont été travaillées à 1 jour d'intervalles. Il est donc fait l'hypothèse que les conditions pédoclimatiques sont identiques pour les deux parcelles, et seul le facteur de forme impacte significativement les données de consommation et de débit de chantier.

TABLEAU 11. IMPACT DU FACTEUR DE FORME SUR LES RESULTATS ACV AVEC LA METHODE PEF V3.1

		Tracteur actualisé P1 -> P2	TEDfa P1 -> P2
Impacts sur les milieux naturels	AP	12,33%	9,80%
	EutroF	11,71%	9,62%
	EutroM	12,24%	9,85%
Impacts sur l'atmosphère	CCT	12,36%	9,51%
	OD	12,42%	9,97%
	PM	12,20%	9,66%
Impacts sur les ressources	RUF	12,37%	9,57%
	RUM	12,34%	10,06%
	WU	12,17%	9,62%
Impacts sur l'écotoxicité des milieux naturels	EFT	12,37%	9,94%
Impacts sur la santé humaine	HTCT	11,32%	8,80%
	HTnCT	12,31%	9,90%
	IRHH	12,40%	10,01%
	POFHH	12,12%	9,50%

La taille de la parcelle impacte globalement les résultats ACV bien que sur la variation de ces impacts soit assez faible (12,2% en moyenne pour Ta et 9,7% en moyenne pour TEDfa). La plus forte variation est obtenue pour l'impact sur la destruction de la couche d'ozone pour Ta et l'épuisement des ressources minérales pour TEDfa.

La principale explication de ces variations est le fait que le nombre de rang travaillé est plus important dans P2 que dans P1 même si la longueur de chaque rang est plus faible. Ceci entraîne une augmentation du rendement de chantier et par conséquent une augmentation de la quantité de matériel agricole et de fuel nécessaire pour réaliser l'opération de désherbage sur 1 ha. Le rendement de chantier dans les parcelles P1 et P2 passe ainsi respectivement de 2,31 à 2,57 h/ha pour TEDfa et de 1,21 à 1,39 h/ha pour Ta. De même, la consommation de fuel dans les parcelles P1 et P2 passe respectivement de 16,9 à 19,3 l/ha pour Ta et la consommation d'électricité de 4,07 à 4,53 kWh/ha pour TEDfa.

3.4.3. Analyse de l'impact de l'autonomie du robot sur les résultats ACV

Les données relatives à l'autonomie du robot TED en mode autonome (i.e. réalisation de la tâche de désherbage sans intervention d'un opérateur humain) sont issues de données de terrain fournies par Naïo Technologies. Les essais conduits avec le robot TED en mode autonome ont montré une vitesse du robot autonome limitée à 2,16 km/h pour pouvoir garantir une bonne détection des obstacles et ainsi assurer une sécurité suffisante autour du robot. Ce fonctionnement en mode autonome a eu pour conséquence une augmentation de l'autonomie des batteries jusqu'à 12h sans recharge nécessaire.

Ces données, impliquant une augmentation du double d'autonomie entre le robot TED nécessitant ou non la présence d'un opérateur, ont été utilisées pour évaluer la sensibilité de la durée d'autonomie du robot sur les résultats ACV produits. Quatre durées d'autonomie des batteries des robots ont été testées : 6h, 7h, 10h et 12h.

Le Tableau 12 présente les % d'augmentation ou de diminution des impacts au regard de l'augmentation d'autonomie des batteries du robot TEDfa (base 100 représentée par le scénario TEDfa_6h). Les résultats obtenus avec la méthode PEF v3.1 sont présentés en Figure 14 en Annexe 3.

TABEAU 12. IMPACT DE LA DUREE D'AUTONOMIE SUR LES RESULTATS ACV AVEC LA METHODE PEF V3.1

		TEDfa		
		6h -> 7h	6h -> 10h	6h -> 12h
Impacts sur les milieux naturels	AP	-13,82%	-33,43%	-41,56%
	EutroF	-6,55%	-15,88%	-19,78%
	EutroM	-12,27%	-29,69%	-36,90%
Impacts sur l'atmosphère	CCT	-13,12%	-31,74%	-39,46%
	OD	-15,62%	-37,77%	-46,94%
	PM	-14,26%	-34,48%	-42,86%
Impacts sur les ressources	RUF	-13,35%	-32,29%	-40,15%
	RUM	-4,62%	-11,22%	-13,98%
	WU	-10,62%	-25,82%	-32,17%
Impacts sur l'écotoxicité des milieux naturels	EFT	-7,90%	-19,12%	-23,78%
Impacts sur la santé humaine	HTCT	-11,07%	-26,78%	-33,30%
	HTnCT	-6,52%	-15,82%	-19,72%
	IRHH	-15,26%	-37,27%	-46,51%
	POFHH	-13,84%	-33,46%	-41,60%

Les résultats de l'analyse de sensibilité montrent que plus la durée d'autonomie des batteries est élevée, plus la réduction des impacts est forte. Cette réduction s'explique pour la plupart des impacts par une diminution de la durée de transport du robot puisque le besoin de transporter le robot pour le recharger sur l'exploitation agricole est moins important du fait de l'autonomie accrue des batteries. La réduction s'explique aussi, pour l'impact sur les radiations ionisantes, par les modalités de calcul choisies pour calculer la consommation énergétique horaire du robot. En effet, la consommation horaire est calculée en divisant la capacité des batteries par leur autonomie. Aussi, plus l'autonomie est élevée, plus la consommation d'énergie horaire de la batterie sera faible pour un même hectare travaillé (le rendement de chantier ne variant pas).

Comme montré dans le Tableau 12, l'augmentation de l'autonomie a peu d'impact sur l'épuisement des ressources minérales avec des réductions d'impacts comprise entre -4,6 et -14%. Au contraire, l'impact est plus important sur la destruction de la couche d'ozone qui présente la plus forte réduction avec valeurs allant de -15,6 à -46,7%.

4. Discussion et conclusion générales

L'étude présentée dans ce rapport a permis de dresser un premier bilan environnemental de l'impact de l'usage d'un robot autonome pour des opérations de désherbage mécanique de l'intra rang en comparaison d'itinéraires de référence conventionnels.

4.1. Discussion et conclusion au regard de l'autonomie du robot TED

Les tests et performances associées obtenus sur le robot TED équipé d'un mode autonome ont mis en évidence l'impact de l'autonomie sur les pratiques de désherbage. La première limitation identifiée à l'heure actuelle est due à la vitesse limitée à 2,16 km/h. Si les lames intercepts sont pertinentes à une telle vitesse, les disques obligent la machine à aller à une vitesse plus élevée. Cette opération peut encore être réalisée, sous réserve de la surveillance d'un opérateur local pour garantir la sécurité du chantier. Pouvoir travailler à des vitesses plus élevées nécessiterait de disposer de capteurs pour détecter les obstacles compatibles de vitesses plus élevées tout en préservant la disponibilité et l'efficacité du robot TED.

La notion usuelle de débit de chantier est ici à considérer avec précaution. En effet, la vitesse linéaire du TED étant plus faible, le nombre d'hectares opérés par heure en mode autonome reste plus faible qu'en mode supervisé. Toutefois, la réduction de puissance instantanée induite par cette réduction de vitesse permet d'assurer, à l'échelle de la journée, un nombre d'hectares traité sans recharge qui reste similaire à un mode supervisé. En mode autonome, le taux horaire de l'opérateur n'étant plus un élément de dimensionnement pour les calculs de rentabilité économique, la notion de débit de chantier à la journée peut dès lors être envisagée au regard de la performance agronomique de l'opération, et les durées de travail sont à comparer en premier lieu aux fenêtres météo disponibles pour réaliser une opération donnée. La légèreté relative du robot par rapport à un équivalent conventionnel permet d'augmenter la disponibilité opérationnelle du robot.

La mise en place d'un mode autonome sur le robot TED a également permis de revoir les dispositifs de sécurité, notamment le comportement du nouveau dispositif de portes de sécurité. La largeur de la zone d'exclusion a été ajustée pour trouver le meilleur compromis entre détection d'obstacles (hors vignes) et vignes mal alignées. Les arrêts déclenchés par le dispositif sur des parcelles expérimentales présentant des plantations de vieilles vignes non régulières ont un bilan très positif en garantissant que le robot TED reste suffisamment centré sur le rang pour éviter d'endommager la vigne lors de l'opération de désherbage. Dès que les vignes sont dispersées autour du rang, même si la carte a été ajustée pour que le robot TED ajuste sa trajectoire, des souches latérales ou de vieilles vignes trop décalées risquent d'être endommagées par les outils lors des opérations de désherbage. La détection d'un désalignement important par les portes de sécurité aide le vigneron à localiser le danger et à prendre les mesures appropriées pour éviter un dommage aux cultures lié aux opérations de désherbage mécanique. De fait, ce niveau de sécurité supplémentaire permet d'envisager une utilisation du robot sur des parcelles considérées comme non mécanisables.

Par ailleurs, en mode autonome, l'un des critères de performance à optimiser est la fréquence des interruptions de missions, nécessitant l'intervention d'un opérateur sur la machine pour la relancer. Dans ce cas, le coût (environnemental et économique) de l'interruption est important en raison du déplacement jusqu'à la parcelle généré par l'interruption. L'impact environnemental de ces déplacements n'ont pas été pris en compte dans le cadre de cette étude, en raison d'un manque d'un ensemble de données suffisamment grand pour être représentatif.

Il est à noter que quel que soit le mode de fonctionnement, le robot TED dispose de bumpers actifs situés à 20cm du sol, qui constitue une source importante d'interruptions lorsque certaines conditions de préparation des sols ne sont pas respectées. En effet, le taux d'interruption peut augmenter considérablement si de vieux cepes ou des sarments restent présents entre les rangs après les opérations d'entretien du printemps par exemple. De même, l'utilisation d'un tracteur sur des sols mal ressuyés peut entraîner la création d'ornières et de mottes de terre qui viendront perturber les bumpers du robot TED lors de son passage.

Le succès de la mise en œuvre d'une solution robotisée de désherbage repose donc beaucoup sur une bonne préparation du sol. Le corollaire de cette conclusion porte sur la mise en place d'un protocole standardisé pour l'évaluation des performances environnementales d'une machine autonome : le protocole devra décrire avec précision l'état du sol sur lequel les robots seront évalués, pour avoir un état répétable et maîtrisé.

Au final, les essais réalisés par Naïo Technologies ont permis d'évaluer comment les dispositifs de protection assurant la sécurité des opérations en mode autonome pouvait impacter la disponibilité et la performance des opérations. Dans la vigne, des risques spécifiques liés aux cultures apparaissent. Dans le cas du robot TED, ces risques ont été atténués grâce à l'utilisation d'un dispositif breveté permettant d'assurer la détection des personnes se trouvant à proximité des rangs de vigne. Les résultats expérimentaux sont plutôt prometteurs, sans aucune interruption supplémentaire provenant des mesures de protection liées au mode autonome. Les portes de sécurité s'avèrent être un moyen pratique pour assurer la sécurité des cultures, notamment lorsque des vignes sont dispersées autour des rangs. Le robot TED permet de déployer une mécanisation autonome sur des parcelles où cela n'aurait pas été possible auparavant.

Néanmoins, il restera à étudier dans quelle mesure le mode autonome, et les dispositifs de sécurité afférents, peuvent avoir un impact sur la disponibilité ou d'autres performances techniques. Dès lors, tout protocole

d'évaluation des performances environnementales devra également discriminer les modes d'utilisations dans son approche.

4.2. Discussion et conclusion au regard des impacts environnementaux du robot TED en mode autonome

Comme dans le cadre de l'étude de 2022, 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 → peu de variation dans la composition du robot entre le mode autonome et non autonome

Toutefois, selon les impacts considérés, la mise à jour de l'inventaire du cycle de vie des tracteurs avec des données actualisées a contribué à réduire ou augmenter l'impact de l'usage des systèmes conventionnels du fait :

- de l'usage du système de dépollution qui a permis de réduire grandement les émissions à l'usage du tracteur et donc de réduire les impacts sur l'acidification, l'eutrophisation marine et la formation d'ozone photochimique. Toutefois, la présence de métaux rares dans le système de dépollution (vanadium, rhodium et tungstène) contribue à l'augmentation de l'impact sur l'épuisement des ressources minérales.
- de la modélisation des composants électroniques qui entraîne une augmentation de l'impact sur l'épuisement des ressources minérales.
- de la prise en compte d'un mix énergétique français (composé à 75% d'énergie nucléaire) pour l'assemblage du tracteur actualisé qui entraîne une augmentation des impacts sur les radiations ionisantes.
- de la prise en compte de l'AdBlue® utilisé dans les moteurs de tracteurs modernes qui entraîne une augmentation de l'impact sur l'épuisement de la ressource en eau

Les autres catégories d'impacts ne sont pas affectées par l'actualisation de l'ICV du tracteur.

En conclusion, cette nouvelle étude a notamment permis d'identifier que l'usage du robot TED en mode autonome a permis d'avoir une plus grande autonomie de batterie liée à la réduction de la vitesse utilisée pour désherber avec les intercepts et par conséquent de réduire par deux le temps passé sur la route pour recharger le robot et donc réduire d'autant les impacts environnementaux concernés par le transport de ce dernier. Des études complémentaires devront être réalisées avec d'autres outils de désherbage pour pouvoir confirmer ces tendances, les résultats présentés ici n'étant valables que dans un contexte précis (usage d'intercep en Languedoc).

De plus, malgré la mise à jour de l'ICV du tracteur avec des données actualisées, la hiérarchie des impacts environnementaux entre tracteur et robot reste globalement inchangée. On note seulement une réduction d'écart entre les impacts affectés par l'utilisation d'engins thermiques (épuisement des ressources fossiles, particules fines, ozone photochimique).

L'analyse de sensibilité réalisée sur la taille de la parcelle a montré quant à elle que travailler les parcelles dans le sens de la largeur (côté le plus court) contribue à augmenter légèrement les impacts d'environ 10-12% pour des parcelles rectangulaires comparé à des parcelles de forme carrée. De plus, la qualité de la préparation des sols impacte sur le taux d'interruptions, et aura donc un impact environnemental sur la solution robotisée. Cette sensibilité devra faire l'objet d'une étude future. Ces éléments montrent qu'au-delà de l'écoconception des robots et des pratiques de désherbage, il est également important de se questionner plus systématiquement sur l'implantation et la conduite globale des cultures.

Enfin, cette étude a été réalisée en faisant l'hypothèse que l'efficacité de travail était identique entre robot et tracteur bien que l'on sache que ce n'est pas forcément le cas. Il est donc nécessaire de poursuivre les études en ce sens et d'avoir des données plus fines sur les performances agronomiques des robots agricoles, notamment en termes d'efficacité de travail, de compaction des sols ou de rendement de chantier.

Ces travaux ont également permis d'identifier les paramètres à prendre en compte dans la construction d'un référentiel standardisé visant à évaluer les performances environnementales d'une solution robotisée.

5. 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.

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.

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.

Boulay A.M., Bare J., Benini L., Berger M., Lathuillière M.J., Manzardo A., Margni M., Motoshita M., Núñez M., Pastor A.V., Ridoutt B., Oki T., Worbe S., Pfister S. (2016). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: Assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE)

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.

Commission Européenne (2021). Recommandation (UE) 2021/2279 de la commission du 15 décembre 2021 relative à l'utilisation de méthodes d'empreinte environnementale pour mesurer et indiquer la performance environnementale des produits et des organisations sur l'ensemble du cycle de vie. 442 pages.

Debain, C., Héritier, P., Clément, J., Sayegh, S., Berducat, M., (2021). Agricultural Robot Performance Assessment focused on safety functions, SIMA AgriTech Days 2021, 139-162.

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

Fantke, P., Evans, J., Hodas, N., Apte, J., Jantunen, M., Jolliet, O., McKone, T.E. (2016). Health impacts of fine particulate matter. In: Frischknecht, R., Jolliet, O. (Eds.), *Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators: Volume 1*. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, Paris, pp. 76-99

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).

Frischknecht, R., Braunschweig, A., Hofstetter P., Suter P. (2000), Modelling human health effects of radioactive releases in Life Cycle Impact Assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, Volume 20, Number 2, April 2000, pp. 159-189

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.

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.*

Hamon, R., Junklewitz, H., & Sanchez, I. (2020). *Robustness and explainability of artificial intelligence.* Publications Office of the European Union, 207.

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.

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

IPCC (2021). Chapter 7 table 7.15 and Supplementary material chapter 7 table 7.SM.7

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.*

ISO (2010). *Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction, (ISO Standard 12100:2010).*

ISO (2012). *Safety of machinery — Risk assessment — Part 2: Practical guidance and examples of methods, (ISO Standard 14121-2:2012)*

ISO (2013). *Safety of machinery — Pressure-sensitive protective devices — Part 2: General principles for design and testing of pressure-sensitive edges and pressure-sensitive bars, (ISO Standards 13856-2:2013)*

ISO (2015). *Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles for design, (ISO Standard 13849-1:2015)*

ISO (2018). *Agricultural machinery and tractors — Safety of highly automated agricultural machines — Principles for design, (ISO Standard 18947:2018).*

ISO (2019) Safety of machinery — Safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs, (ISO Standard 13857:2019)

ISO (2020) Industrial trucks — Safety requirements and verification — Part 4: Driverless industrial trucks and their systems, (ISO Standard 3691-4:2020)

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.

Kukkala, V. K., Tunnell, J., Pasricha, S., & Bradley, T. (2018). Advanced driver-assistance systems: A path toward autonomous vehicles. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 7(5), 18-25.

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.

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>.

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.

Notter, B. and Schmied, M. 2015: Non-road energy consumption and pollutant emissions. Study for the period from 1980 to 2050. Federal Office for the Environment, Bern. Environmental studies no. 1519: 237 pp.

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.

OMM (2014). Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 55, ISBN 92-807-1722-7, Scientific Assessment of Ozone Depletion, Geneva.

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.

Posch, M., J. Seppälä, J. P. Hettelingh, M. Johansson, M. Margni and O. Jolliet (2008). The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterization factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA. *International Journal of Life Cycle Assessment* 13(6): 477-486

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.

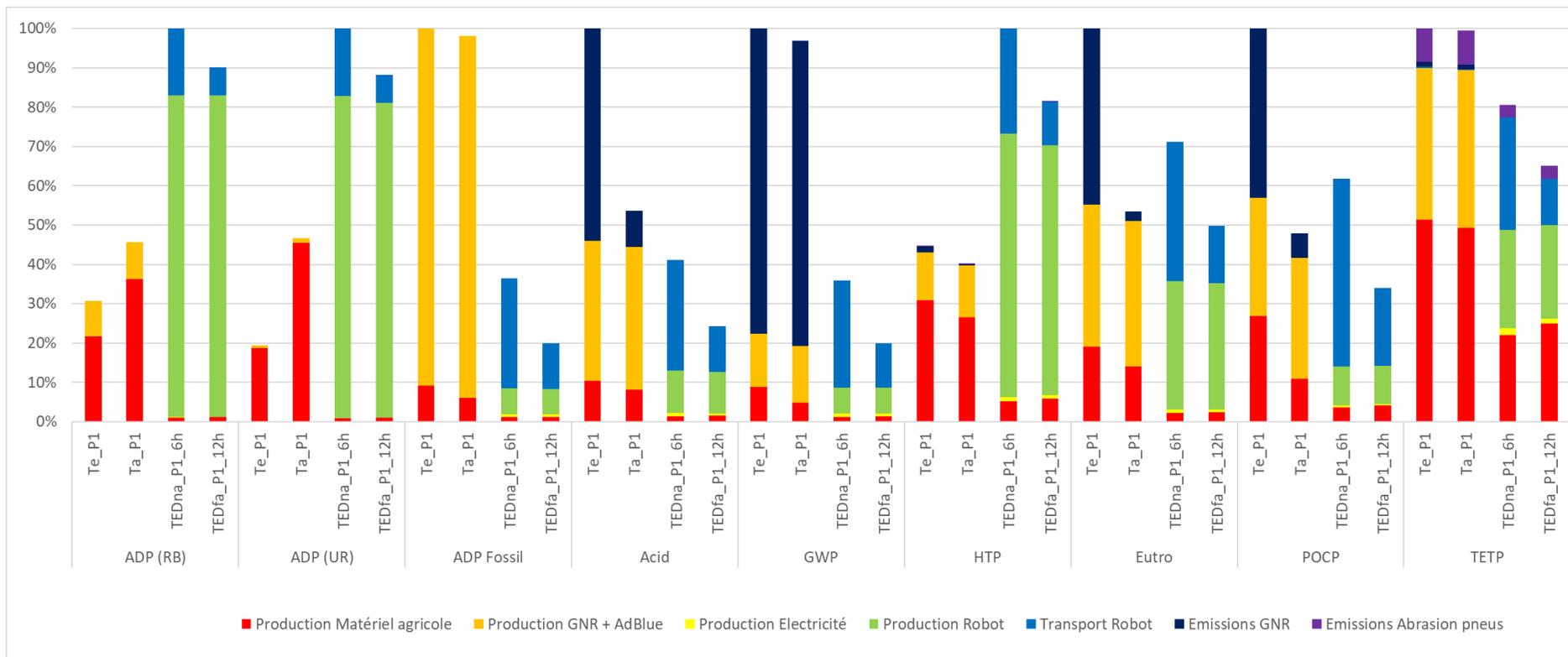
Pradel, M. (2023). Life Cycle Inventory data of agricultural tractors. *Data In Brief*, 48, 109174.

Pradel, M., de Fays, M., Seguineau, C., (2022): Comparative Life Cycle Assessment of intra-row and inter-row weeding practices using autonomous robot systems in French vineyards. *Science of The Total Environment*, 838, 156441.

- 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.
- 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.
- 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.
- SAE International, (2021): Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, (J3016:202104) SAE.
- Saouter, El, Biganzoli, F., Ceriani, L., Versteeg, D., Crenna, E., Zampori, L., Sala, S., Pant, R. Environmental Footprint: Update of the Life cycle Impact Assessment Methods – Ecotoxicity freshwater, human toxicity cancer, and non-cancer. EUR 29495 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-98182-1, doi: 10.2760/178544, EC-JRC114227
- Seppälä, J., M. Posch, M. Johansson and J. P. Hettelingh (2006). Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator. *International Journal of Life Cycle Assessment* 11(6): 403-416
- 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.)." *Hortic. 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.
- Struijs, J., Beusen, A., van Jaarsveld, H. and Huijbregts, M.A.J. (2008b). Aquatic Eutrophication. Chapter 6 in: Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M.A.J., De Schryver, A., Struijs, J., Van Zelm, R. (2008). ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation factors, first edition. Chapter in anthology Chapter on aquatic
- Tian, H., Wang, T., Liu, Y., Qiao, X., & Li, Y. (2020). Computer vision technology in agricultural automation—A review. *Information Processing in Agriculture*, 7(1), 1-19.
- Utstumo, T., F. Urdal, A. Brevik, J. Dørum, J. Netland, Ø. Overskeid, T. W. Berge and J. T. Gravidahl (2018). "Robotic in-row weed control in vegetables." *Computers and Electronics in Agriculture* 154: 36-45.
- van Oers, L, Koning, A, Guinée, JB, Huppes, G (2002). Abiotic resource depletion in LCA. Road and Hydraulic Engineering Institute, Ministry of Transport and Water, Amsterdam http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/report_abiotic_depletion_web.pdf
- Van Zelm, R., Huijbregts, M.A.J., Den Hollander, H.A., Van Jaarsveld, H.A., Sauter, F.J., Struijs, J., Van Wijnen, H.J., Van de Meent, D. (2008). European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment. *Atmospheric Environment* 42, 441-453
- World Health Organization (1990). *Public Health Impact of Pesticides Used in Agriculture*. England, World Health Organization.

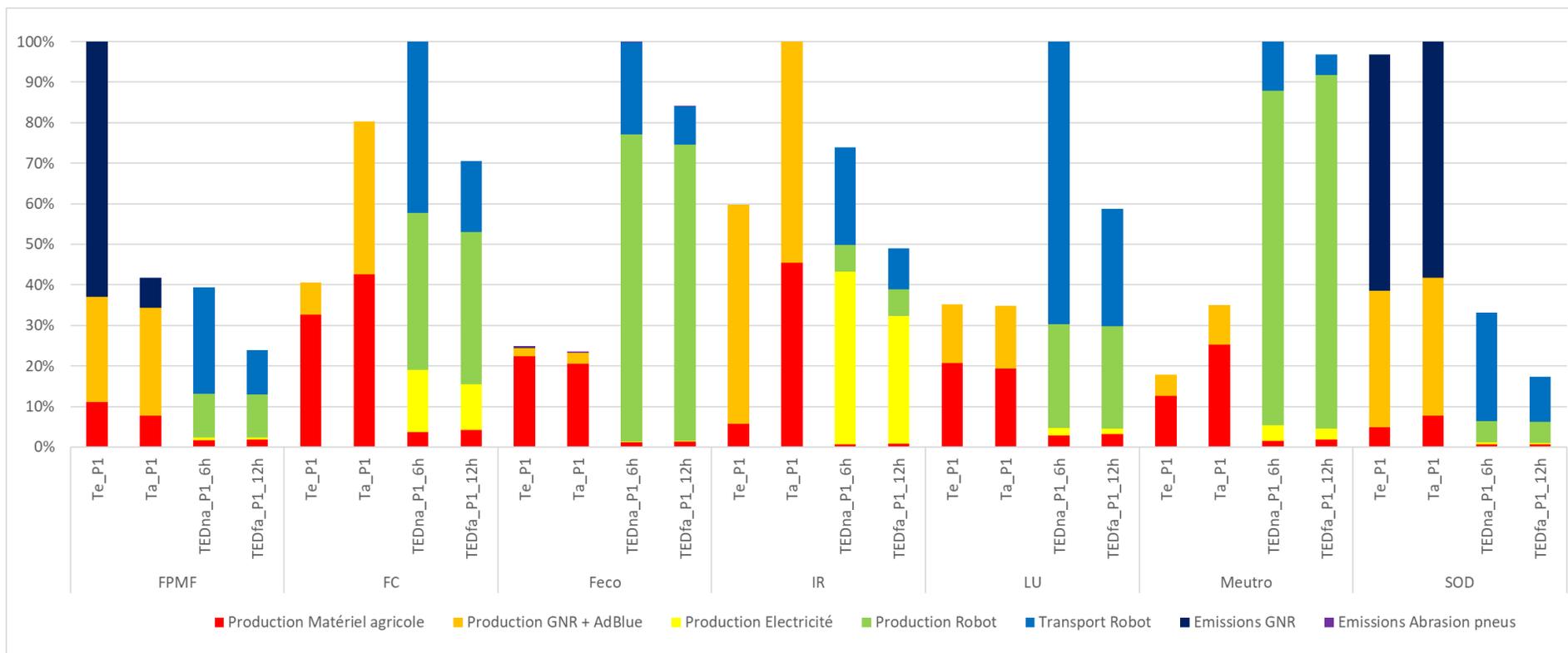
6. Annexes

6.1. Annexe 1 : Résultats obtenus avec la méthode CML-IA et RECIPE2016



Légende des impacts: Abiotic depletion fossil (ADP Fossil), Abiotic depletion reserves base (ADP RB), Abiotic depletion ultimate reserves (ADP UR), Acidification potential (Acid), Eutrophication potential (Eutro), Global Warming Potential 100 years (GWP), Human Toxicity Potential (HTP), Photochemical Ozone Creation Potential (POCP), and Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP)

FIGURE 11. ANALYSE DES CONTRIBUTION DES OPERATIONS DES SCENARIOS AVEC LA METHODE CML-IA



Légende des impacts: Fine particulate matter formation (FPMF), Freshwater consumption (FC), Freshwater ecotoxicity (Feco), Ionizing radiation (IR), Land use (LU), Marine eutrophication (Meutro), Stratospheric Ozone Depletion (SOD)

FIGURE 12. ANALYSE DES CONTRIBUTION DES OPERATIONS DES SCENARIOS AVEC LA METHODE RECIPE2016

6.2. Annexe 2 : Résultats obtenus pour la modalité « facteur de forme » avec la méthode PEF v.3.1

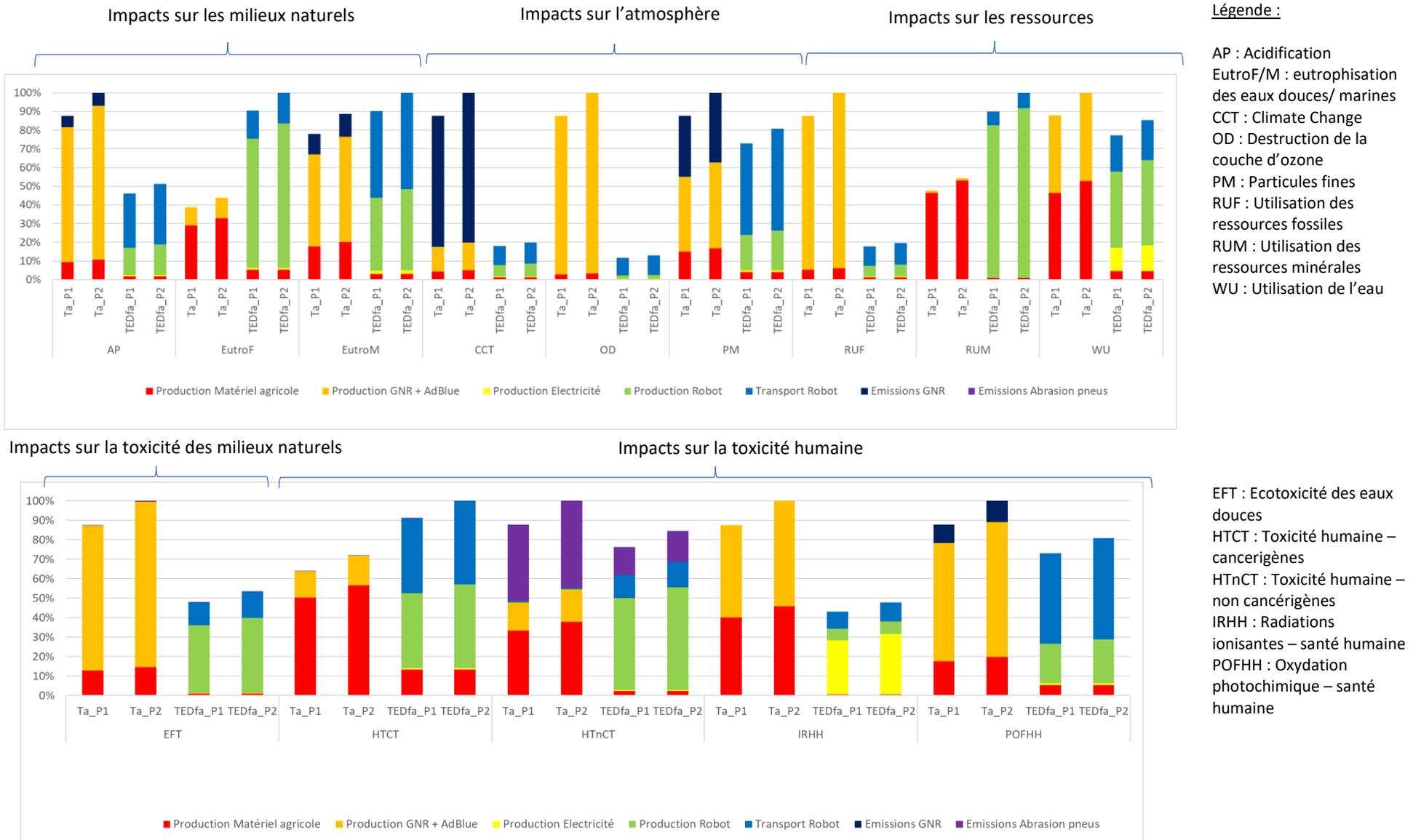


FIGURE 13 : ANALYSE DES RESULTATS DES SCENARIOS POUR LA MODALITE « FACTEUR DE FORME » AVEC LA METHODE PEF V3.1

6.3. Annexe 3 : Résultats obtenus pour la modalité « durée d'autonomie » avec la méthode PEF V3.1

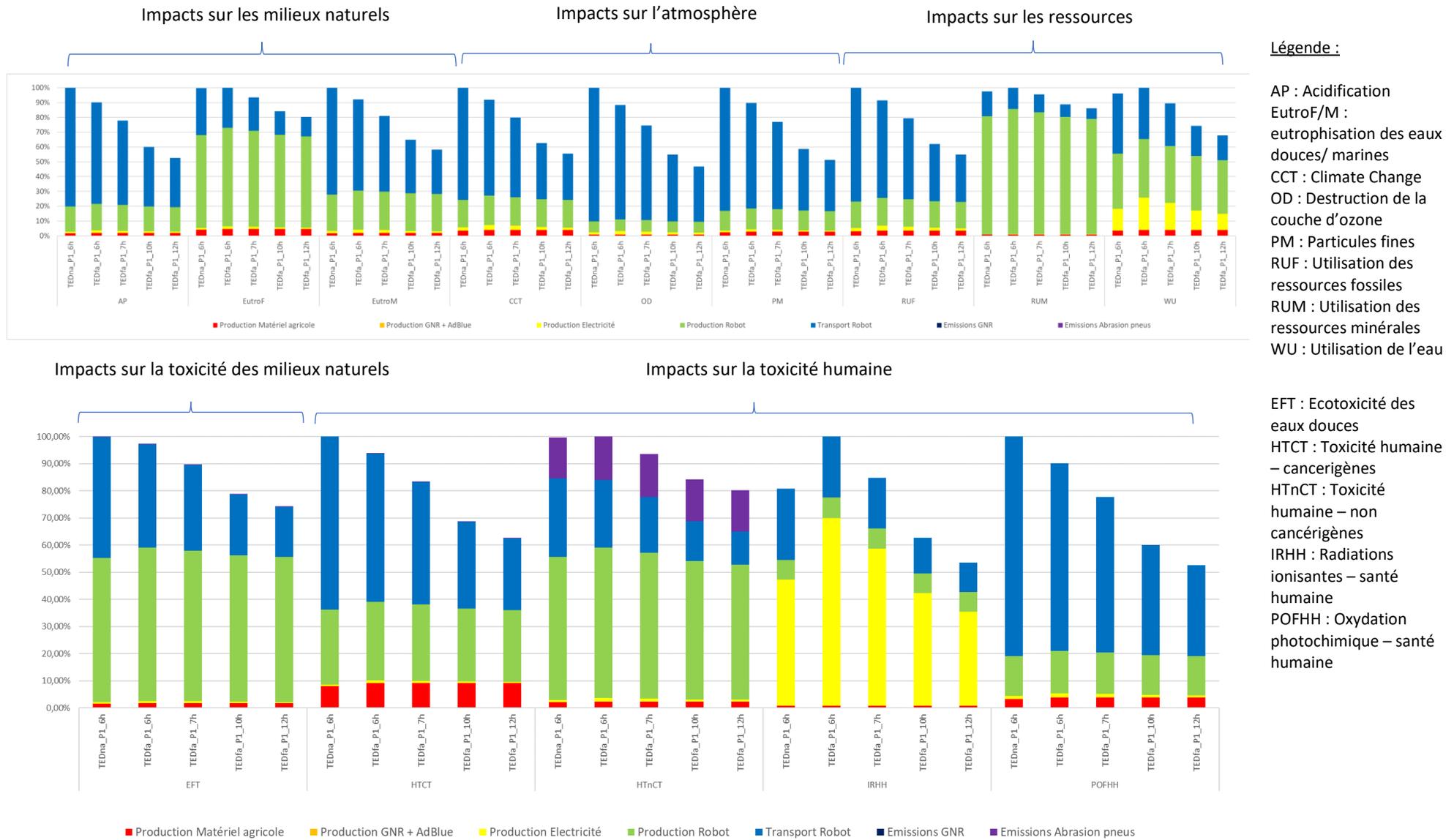


FIGURE 14 : ANALYSE DES RESULTATS DES SCENARIOS POUR LA MODALITE « DUREE D'AUTONOMIE » AVEC LA METHODE PEF V3.1