

Master 2 (GETIA)

Gestion des Entreprises et Technologies Innovantes  
pour les Agroéquipements

## Evaluation technique et environnementale (bilan carbone) de l'enjambeur électrique

Mémoire de fin d'études

4 septembre 2023

Media KHALIL



**Gawain JONES**

**Enseignant Référent  
L'institut Agro Dijon**

**Benjamin ALBAN &  
Guillaume PAIRE**

**Maîtres de Stage  
Vinipôle Sud Bourgogne**

## Remerciements

Je tiens à remercier, en premier lieu, Benjamin ALBAN, qui m'a permis d'effectuer mon stage chez Vinipôle Sud Bourgogne, et qui m'a orienté durant mon stage. Je tiens également à remercier Guillaume PAIRE, mon maître de stage, pour le suivi de ce projet jusqu'à son aboutissement.

Je remercie vivement Gawain JONES, mon tuteur à l'institut Agro Dijon, pour sa patience et pour ses réponses à toutes mes questions, ainsi que l'ensemble de l'équipe pédagogique pour son soutien et suivi.

Je remercie également l'équipe de Vinipôle Sud Bourgogne à Davayé pour leur accueil, leur bienveillance. Je remercie particulièrement Olivia TROLY.

Un grand merci à tous ceux qui ont participé à cette étude, les techniciens et les viticulteurs. J'adresse ma gratitude à ma famille pour son soutien moral, surtout mon mari Mirvan Yousef. La patience de mes enfants (Miran & Dilara) me touche énormément.

Je remercie tout aussi mes amis pour leur aide précieuse.

# Evaluation technique et environnementale (bilan carbone) de l'enjambeur électrique

## Contents

I.	Introduction.....	1
II.	Présentation de l'organisme .....	1
III.	Objectif d'étude et problématique :.....	3
IV.	L'enjambeur électrique.....	3
1.	Définition .....	3
a.	L'enjambeur.....	3
b.	Historique de l'innovation de l'enjambeur.....	3
2.	Le tracteur enjambeur thermique .....	4
3.	Le tracteur enjambeur électrique.....	4
a.	Notions d'électricité .....	4
b.	Courant alternatif ou continu .....	5
c.	La différence entre kW et kWh.....	5
4.	Architecture d'un véhicule électrique.....	6
a.	Le moteur électrique.....	6
b.	L'onduleur des véhicules électriques.....	6
c.	Le calculateur .....	6
d.	Convertisseur AC/DC .....	6
e.	Batterie lithium.....	7
5.	L'enjambeur électrique ALPO.....	10
6.	L'enjambeur Laboureur 56.....	12
V.	Etude comparative de l'enjambeur électrique et thermique : .....	13
1.	Evaluation technique .....	13
a.	Les courbes de puissance/ couple :.....	13
b.	Le rendement .....	15
c.	L'adhérence.....	17
d.	Le porte-outil: .....	18
e.	Ergonomie de conduite .....	19
2.	Evaluation environnementale.....	19
a.	L'empreinte carbone: .....	19
b.	L'analyse du cycle de vie de l'enjambeur électrique .....	21

c.	Evaluation environnementale du véhicule électrique : Méthodologies et application	
	22	
VI.	Evaluation économique:	31
1.	Coûts fixes:	32
a.	Coût d'amortissement:	32
b.	Les frais d'intérêt:	33
c.	Les frais d'assurance et de remisage :	33
2.	Les charges variables:	34
a.	Les frais de réparation :	34
b.	Les frais de carburant et de lubrifiants :	35
3.	Les charges totales pour un tracteur enjambeur :	35
VII.	Impact social:	36
1.	Les risques liés à l'utilisation d'un enjambeur électrique:	37
a.	Risques induits par des problèmes électriques :	37
b.	Risques de positionnement :	37
c.	Risques liés au renversement de l'enjambeur:	37
2.	Enquête utilisateur pour l'enjambeur électrique ALPO:	38
3.	Résultats :	38
VIII.	Conclusion :	42

## I. Introduction

La moitié de la surface du territoire métropolitain est destinée à l'agriculture. En France, il y a 750 000 hectares de vignes de cuves sur une surface de 11 % de la surface mondiale et une exploitation agricole sur cinq est consacrée aux activités viticoles.

Après l'Italie, la France est le 2<sup>e</sup> producteur mondial de vin. (Cniv, 2019)

Pour réaliser les travaux dans les vignes, les viticulteurs utilisent des tracteurs enjambeurs. Il existe plusieurs marques françaises. En 2022, le nombre d'enjambeurs immatriculé a encore augmenté, après deux années marquées par un changement de norme moteur et la difficulté de s'approvisionner en moteurs offrant les bonnes configurations. (Vimond, 2023)

Les trois marques leaders sont Bobard, Tecnomat et Dérot, Ferma et Pellenc viennent après. Ces marques produisent des enjambeurs thermiques, comme la plupart des producteurs de machines agricoles. (Vimond, 2023)

Depuis la révolution industrielle, les températures moyennes mondiales ont augmenté énormément.

Actuellement, la température moyenne de la planète est de 0,95 à 1,20°C plus élevée qu'à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Les scientifiques estiment qu'une augmentation de 2°C par rapport aux niveaux pré-industrialisés entraînerait des conséquences dangereuses et catastrophiques sur le climat et l'environnement. (Guillot, 2018)

Après la Chine, les États-Unis et l'Inde, l'UE était le quatrième émetteur mondial de gaz à effet de serre en 2019. (Guillot, 2018)

Le BIVB (Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne) a estimé que la filière des vins de Bourgogne en 2019 est responsable de 372 600 t de CO<sub>2</sub>, ce qui représente l'ensemble des émissions d'une ville de 40 000 habitants pendant un an.

En raison de l'urgence climatique, la France a décidé de réduire ses émissions conformément à l'accord de Paris. Le projet de la Stratégie Nationale Bas Carbone a pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre jusqu'en 2050. Ses deux objectifs sont : atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et réduire l'empreinte carbone de la consommation des Français. Une agriculture bas carbone vise à une réduction de 19 % des émissions en 2030 et de 46 % en 2050. (Bizot, 2023)

Afin d'atteindre ces objectifs, les leviers à mettre en place sont le développement de l'agroécologie, l'agroforesterie et l'agriculture de précision.

Les engins avec un moteur à combustion contribuent au changement climatique, en raison de la production de gaz à effet de serre. De plus, la diminution des ressources fossiles et les problèmes politiques constituent un obstacle face à la production de ce genre d'engins.

Les constructeurs de machines agricoles ont commencé à fabriquer des machines alimentées en énergie électrique. Sabi Agri est une entreprise qui ne fabrique que des machines agricoles électriques. Un engin électrique avec zéro émission à l'échappement peut améliorer la qualité de l'air.

Dans cette étude, le tracteur enjambeur ALPO sera évalué au niveau technique, en termes de bilan carbone durant son cycle de vie, de consommation d'énergie et de gain énergétique. En outre, une étude sociale va être réalisée pour connaître l'avis des utilisateurs de cet enjambeur.

## II. Présentation de l'organisme

Le Vinipôle Sud Bourgogne est une association basée à Davayé (71960) constituée de :

- 3 membres fondateurs : le Département de Saône-et-Loire, la Chambre d'Agriculture de Saône-et-Loire et le Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne (BIVB).
- 3 membres associés : Le Lycée viticole “Lucie Aubrac” et le CFPPA de Davayé, Le Centre Œnologique de Bourgogne et L’Institut Français de la Vigne et du Vin.

Ce lieu (*Error! Reference source not found.*), ouvert aux professionnels, réunit sur le site du Lycée Viticole de Davayé : conseils, analyses œnologiques, formations et expérimentations. Cet ensemble de compétences est au service de la filière et l'accompagne dans la mise en place d'une vitiviniculture durable en Bourgogne du Sud.



*Figure 1 : VitiLab et Vinipôle*

Les missions du Vinipôle Sud Bourgogne sont de répondre aux enjeux de demain et parmi son programme de recherche, 5 grandes thématiques sont développées :

- Changement climatique : atténuation (bilan carbone), adaptation (maintien d’une production en quantité et qualité) et gestion des accidents climatiques (gel, grêle, canicule...).
- Matériel végétal : conserver, sélectionner, évaluer et produire des vignes adaptées aux exigences sanitaires, environnementales et qualitatives des prochaines décennies (porte-greffe, variétés, cépages...).
- Agriculture de précision : évaluation, utilisation et réglages de nouveaux outils (épandeurs engrais, pulvérisateurs, Outils d’Aide à la Décision...) et de nouvelles méthodes culturales (densité, mode de conduite, intrants...).
- Agroécologie : évaluation et mise en place d’infrastructures agroécologiques (arbres, haies...) pour favoriser la biodiversité et encourager les démarches de certification environnementale (Agriculture Biologique...).
- Numérique et Robotique :

Dans le cadre du développement de cette dernière thématique, a vu le jour en 2021 le VITILAB, pôle de Recherche & Développement (R&D) du Vinipôle Sud Bourgogne.

Le VITILAB c’est:

- Un centre de ressources : il a pour vocation de diffuser les usages et techniques numériques en viticulture qui répondent aux enjeux contemporains du terrain.
- Un lieu d'expérimentations : il évalue et teste en grandeur nature des services, des outils ou des usages nouveaux destinés à la filière vitivinicole du type exosquelette, applications mobiles, robotique...
- Un espace de coworking : travailler dans un cadre stimulant avec bornes interactives, réalité virtuelle et un FabLab à disposition avec imprimante 3D, découpe laser, scanner 3D et fraiseuse numérique.

C'est dans le contexte de l'expansion de la thématique 'Numérique et Robotique' que ce travail intervient.

### III. Objectif d'étude et problématique :

En agriculture et notamment en viticulture, le sujet du changement climatique revêt une importance considérable. La chambre d'agriculture de Saône-et-Loire a lancé le projet de MECA VITI ZE : un tracteur vigneron connecté et autoguidé à zéro émission de CO<sub>2</sub>. L'objectif est de tester et de démontrer au plus grand nombre de viticulteurs l'intérêt de ces solutions mixant des innovations industrielles et numériques pour répondre aux grands enjeux de demain, en diminuant l'empreinte carbone par utilisation de solutions moins productrices de gaz à effet de serre.

Cette étude va répondre aux questions suivantes :

- L'enjambeur électrique répond-t-il aux attentes environnementales et techniques pour avoir une solution moins polluante et plus performante ?
- Est-ce que l'utilisation de l'enjambeur électrique permet d'économiser de l'énergie ?

### IV. L'enjambeur électrique

#### 1. Définition

##### a. L'enjambeur

Le tracteur enjambeur est un tracteur agricole avec trois ou quatre roues pour permettre le travail en viticulture. L'enjambeur peut servir pour atteler plusieurs équipements nécessaires à la réalisation des travaux en viticulture tels que : rogneuses, écimeuses, épandeurs d'engrais, pulvérisateurs de produits phytosanitaires, tête de récolte de la vendange, outils de travail du sol et broyeur de sarments. (IRSTEA, 2013)

L'enjambeur est un tracteur de catégorie T4.1. Ce tracteur est conçu pour les cultures hautes en ligne, telles que la vigne. Le châssis est entièrement ou partiellement surélevé de telle sorte qu'il peut circuler parallèlement aux lignes de culture avec les roues droites et gauches de part et d'autre d'une ou plusieurs lignes. La conception de l'enjambeur permet de porter ou actionner des outils qui peuvent être fixés à l'avant, entre les essieux, à l'arrière ou sur une plateforme. (Légifrance, 2022)

##### b. Historique de l'innovation de l'enjambeur

Le premier tracteur enjambeur a été réalisé par Jean Buche qui travaillait avec l'entreprise Bobard en Bourgogne après la seconde guerre mondiale, en 1950.

La construction d'une première série de tracteurs enjambeurs est réalisée après de nombreux essais et mises au point. Ces enjambeurs pourront donc servir dans des plantations étroites (allées de passage comprises entre 0,90 m et 1,50 m), à haute densité de pieds à l'hectare, dans



les secteurs de grandes appellations : Champagne, Bourgogne, Bordelais, Jura, Savoie, Muscadet. (Bobard, 2023)

## 2. Le tracteur enjambeur thermique

Le tracteur enjambeur thermique a un moteur qui transforme l'énergie contenue dans le carburant en énergie mécanique.

Il existe plusieurs constructeurs d'enjambeurs thermiques : John Deere – CNH – Bobard – Faupin – Pellenc – Tecnomat – Ferma – GRV – Dérot – Gregoire....

Dans le tableau suivant, les constructeurs sont classés selon leurs parts de marché des enjambeurs vigneronniers entre les années 2018 et 2022. (Vimond, 2023)

*Tableau 1 : Répartition des premières immatriculations d'enjambeurs vigneronniers par marque (2018- 2022) AXEMA. SIV-DIVA. (Vimond, 2023)*

	2018	2019*	2020	2021	2022
BOBARD	38,0%	26,0%	38,9%	46,3%	35,6%
TECNOMA**	24,4%	26,9%	21,7%	24,8%	30,4%
DEROT	4,9%	3,1%	6,8%	8,7%	9,2%
FREMA	7,3%	7,8%	12,2%	7,4%	7,5%
PELLENC	0,6%	5,3%	2,7%	2,6%	5,7%
GREGOIRE	8,3%	7,4%	6,5%	3,8%	4,0%
GRV	7,3%	17,1%	0,9%	0,3%	2,1%
SABI AGRI	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,1%
VERMANDE	0,0%	0,4%	1,5%	1,8%	1,9%
AUTRES MARQUES	9,1%	5,9%	8,9%	4,3%	1,6%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

## 3. Le tracteur enjambeur électrique

Afin de réduire l'impact environnemental de l'agriculture, l'idée de remplacer un enjambeur thermique par un électrique est apparue. Le premier enjambeur électrique est fabriqué par Kremer Viticole (T4E) en 2012 avec une puissance de traction équivalente à 110 CV, le deuxième enjambeur électrique (Voltis) de Tecnomat la même année, puis Sabi Agri avec sa gamme de produit électrique en 2017. (de Nadaillac, 2016)

### a. Notions d'électricité

Les trois unités les plus fréquemment utilisées en électricité :

Le volt (V), qui détermine la tension électrique ;

L'ampère (A), symbole de l'intensité ;

Le watt (W) exprime la puissance. Il résulte de la multiplication des volts par les ampères ( $V \times A = W$ ).



À partir de ces trois unités, on utilisera le kilowatt (kW, soit 1000 watts) pour donner la puissance et la rapidité de charge des appareils de recharge. Enfin, le kilowattheure (kWh) désignera une quantité d'énergie délivrée ou une capacité de stockage. Ainsi, si la capacité de la batterie de la voiture électrique est de 52 kWh (c'est le cas de la Renault Zoé), la batterie sera pleinement chargée en un peu plus de 14 heures avec une recharge de 3,7 kW. (EDF, 2021)

### b. Courant alternatif ou continu

Quelle est la différence entre la recharge AC et DC ?

Recharge en courant alternatif (AC) :

Le courant qui circule dans le réseau électrique est un courant alternatif. La batterie d'un véhicule électrique ne peut stocker l'électricité que sous forme de courant continu (DC). Donc il est essentiel d'avoir un convertisseur AC/DC sous le capot du véhicule qui transforme le courant alternatif en courant continu avant qu'il soit stocké dans la batterie. La transformation de courant alternatif en continu prend un temps de recharge supplémentaire. Les bornes de recharge AC fournissent une charge normale (3,7 kW) à plus puissante (jusqu'à 22 kW) et peuvent parfois monter jusqu'à 43 kW. (Le Flem et Bubendorff, 2020)

Recharge en courant continu (DC) :

Dans ce cas la borne est directement équipée d'un convertisseur AC/DC puissant qui permet de délivrer du courant continu et d'alimenter la batterie du véhicule immédiatement.

Ces bornes qui délivrent du courant continu offrent une recharge rapide à ultra-rapide et peuvent arriver jusqu'à 350 kW. (Le Flem et Bubendorff, 2020)



Figure 2 : Le convertissement de type de courant.

### c. La différence entre kW et kWh

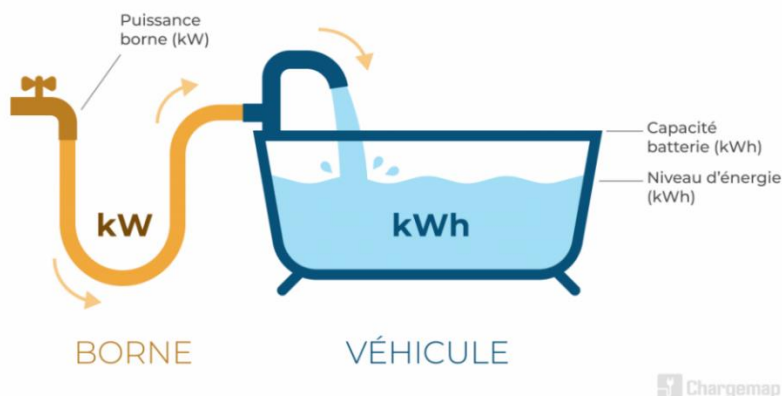


Figure 3 : La différence entre kW et kWh. (Le Flem et Bubendorff, 2020)

L'apport en eau de la borne correspond à la puissance instantanée de la borne, exprimée en kW. La baignoire représente la capacité de la batterie, elle s'exprime en kWh. Le débit d'eau transféré à la baignoire correspond à la quantité d'énergie fournie au véhicule électrique comme le montre la Figure 3.

En résumé, le kW mesure la puissance instantanée délivrée par la borne tandis que le kWh mesure l'énergie consommée par la borne et fournie au véhicule. (Le Flem et Bubendorff, 2020)

#### 4. Architecture d'un véhicule électrique

##### a. Le moteur électrique

Deux électroaimants : le stator et le rotor composent le moteur d'un véhicule électrique. Le stator est la partie fixe qui produit un champ magnétique constant à partir de courant continu. Le rotor est mobile et produit son champ magnétique avec du courant alternatif. Ces éléments s'attirent et se repoussent en permanence. La rotation du rotor permet de faire avancer le véhicule. (Opel, 2023)

Pour faire rouler le véhicule électrique, il existe deux types de moteurs électriques à courant alternatif : des moteurs asynchrones et des moteurs synchrones.

Le rotor dans le moteur asynchrone est soumis à une rotation en essayant de rattraper le champ magnétique tournant et créé par le stator. L'avantage de ce type est que sa puissance est élevée.

En revanche, le rotor d'un moteur synchrone tourne à la même vitesse que le champ magnétique. Il produit un couple élevé à vitesse réduite. L'avantage est son poids léger. (Renault, 2021)

##### b. L'onduleur des véhicules électriques

L'onduleur ou le convertisseur permet de convertir la tension alternative triphasée du moteur électrique en une tension continue destinée à charger la batterie lors du freinage. A l'inverse, quand le moteur tourne il convertit la tension continue de la batterie en tension alternative triphasée. (Opel, 2023)

##### c. Le calculateur

Grâce aux nombreux capteurs dont le calculateur dispose, il contrôle les flux d'énergie. En accélérant et appuyant sur la pédale (capteur potentiomètre), le calculateur gère le flux d'énergie selon le degré d'accélération. De même, en relâchant la pédale, il gère la récupération d'énergie en envoyant le flux généré par le moteur électrique vers la batterie tout en modulant le débit électrique. (Fiche Auto, 2023)

##### d. Convertisseur AC/DC

C'est un élément qui transforme le courant alternatif du réseau (AC) en courant continu (DC) étant donné que la batterie ne stocke l'énergie que sous forme de courant continu. Certaines bornes DC sont équipées d'un convertisseur pour injecter directement le courant continu dans la batterie, cela permet une recharge rapide ou ultra rapide. (Lara, 2022)

### e. Batterie lithium

La batterie est un organe qui permet de conserver une énergie sous forme chimique. Il existe plusieurs chimies, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients. La batterie est composée d'une multitude de cellules sous forme de petites batteries individuelles et la désynchronisation de ces batteries peut poser des problèmes. (Fiche Auto, 2023)

La capacité d'une batterie est exprimée en kilowattheure (kWh). Les constructeurs des batteries garantissent ces batteries « accumulateurs » entre 5 et 8 ans ou entre 100 000 et 150 000 km pour les voiture électrique (pour les machines agricoles, les données reste en année) dans les 70 % de sa capacité, car la batterie se dégrade avec le temps parallèlement au comportement de conduite et de recharge de l'utilisateur. Donc, sa durée de vie peut atteindre une dizaine d'années comme le véhicule lui-même.

Pour que la batterie fonctionne au mieux de ses capacités, la température interne doit être contrôlée. Le véhicule garantit cette opération automatiquement via un système de refroidissement. Selon le constructeur, le système de refroidissement diffère. Ils peuvent utiliser l'air passif (flux d'air généré par le mouvement du véhicule) ou actif (ventilateurs) qui est moins performant mais plus abordable. Un autre système pouvant être utilisé par les constructeurs est un circuit de refroidissement par liquide caloporteur ce qui est le plus efficace. (Lara, 2021)

#### ❖ Les composants d'une batterie électrique

Des cellules électrochimiques composent la batterie d'un véhicule électrique. Le moteur fonctionne grâce à l'énergie stockée dans ces cellules.

Pour fabriquer une batterie de véhicule électrique, plusieurs matériaux sont utilisés comme le lithium, le nickel, le cobalt et le manganèse qui sont capables de stocker l'énergie en grande quantité sous un format compact. Parmi ces matériaux, le lithium est très léger, sa capacité de stockage par unité de poids est très importante. Il s'agit de même pour le cobalt, le manganèse et le nickel, mais le cobalt est plus lourd que le lithium. (Pollien, 2022)

#### ❖ Les composants d'une cellule

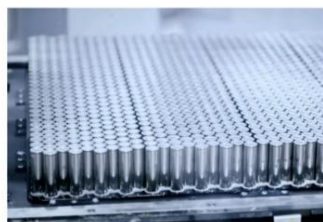
La figure 4 montre que la cellule d'une batterie se compose de 4 éléments principaux :

- Cathode : une électrode positive est composée d'oxydes métalliques.
- Anode : c'est une électrode négative en graphite (carbone pur).
- Électrolyte : ce qui permet la circulation entre les deux électrodes d'ions de lithium.
- Séparateur : il est équipé de petits pores destinés à laisser passer les ions lithium, son rôle est de bloquer tout électron qui voudrait passer afin qu'il soit forcé de le faire par les cosses de la batterie. (Fiche Auto, 2021)



Figure 4 : Principe et fonctionnement de la batterie Lithium -ion. (Darding, 2021)

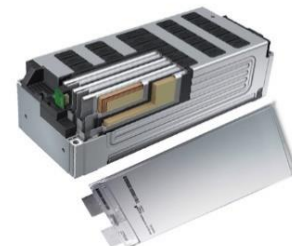
- ❖ Les modèles de cellules de batterie :
  - Les cellules cylindriques, similaires à la forme d'une pile classique
  - les cellules prismatiques.
  - les cellules pouch. (Darding, 2021)



Cellules cylindriques (Tesla)



Cellules prismatiques (BMW)



Cellules pouch (Audi)

Figure 5 : type de cellules de batterie. (Darding, 2021)

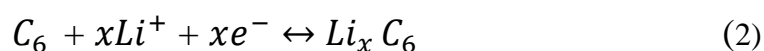
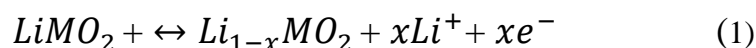
- ❖ Le fonctionnement d'une batterie :

Plusieurs batteries lithium-ion sont branchées entre elles en série ou en parallèle dans un pack de batteries lithium-ion. Chaque batterie délivre 12 V et est elle-même composée de cellules branchées en série. Ces cellules délivrent entre 3 à 4 V. (Chagnes, 2022a)

En cas de charge complète de la cellule, le lithium sous forme ionique se stocke dans l'anode. Le lithium est oxydé et relâche des électrons lorsqu'une demande en électricité est effectuée. Tandis que les électrons empruntent le circuit électrique pour alimenter les différents organes, le lithium se déplace vers l'autre électrode (la cathode) à travers l'électrolyte.

Lorsque le lithium arrive dans la cathode, il réagit avec la matière active de la cathode et les électrons qui ont traversé le circuit électrique pour y être stockés (réduction). En cas de recharge de la batterie, les réactions inverses se produisent pour faire circuler les ions lithium vers l'anode en graphite. (Darding, 2021)

Les cycles de charge et de décharge continuent à insertion et désinsertion du lithium des matériaux d'électrodes en fonction des réactions d'oxydoréduction sont les suivants :



Dans ces équilibres, la charge est la réaction qui s'étend de la gauche vers la droite et la décharge est la réaction inverse, de la droite vers la gauche. (Chagnes, 2022a)

#### ❖ Les unités et les caractéristiques de la batterie :

Le volt (V) représente l'unité de tension de la batterie alors que l'intensité du courant s'exprime en ampère (A). La différence de potentiel électrique entre l'anode et la cathode détermine la tension d'une cellule. Le produit de la tension de la borne de recharge et de l'intensité du courant qui l'alimente représente la puissance de charge qui est exprimée en watt (W). (Darding, 2021) La capacité énergétique de la batterie qui représente la quantité d'énergie disponible dans la batterie et détermine l'autonomie d'un véhicule électrique est exprimée en kilowattheure (kWh). Cette valeur correspond à la puissance que peut délivrer la batterie pendant une heure.

La capacité de charge de la batterie détermine l'intensité maximum utilisable pour recharger la batterie et est généralement exprimée en ampère-heure (Ah), tandis que l'unité internationale est le coulomb (C). (Darding, 2021)

Le kilowattheure (kWh) représente la puissance d'une batterie d'un véhicule électrique, c'est-à-dire la quantité d'énergie que la batterie peut consommer en une heure d'utilisation.

Ce chiffre peut être entre 15 et 100 kWh. Quand le nombre de kWh est faible, l'autonomie de la batterie sera faible aussi. La batterie aura besoin d'être rechargée régulièrement car elle va se vider rapidement. Au contraire, l'autonomie de la batterie sera grande lorsque le nombre de kWh est élevé. (Volkswagen, 2022)

#### ❖ La durée de vie d'une batterie d'un véhicule électrique

La conception de la batterie d'un véhicule électrique permet de conserver une efficacité optimale durant au moins 1000 cycles de charges complètes (de 0 à 100 % de la capacité), cela peut traduire que la durée de vie moyenne est estimée à 10 ans pour parcourir entre 200 000 et 500 000 km.

Pour une capacité réduite, la durée de vie de la batterie peut s'étendre bien au-delà. En évitant les charges rapides, la batterie vieillit moins rapidement. Le fait d'utiliser le véhicule régulièrement et de respecter l'écoconduite, permet de réduire la consommation d'énergie. (Dutheil, 2022)

#### ❖ La recharge

Pour recharger un véhicule électrique, il existe deux types de recharge : la recharge lente avec un courant alternatif (AC), et la recharge rapide avec un courant continu (DC).

L'important est de savoir que la batterie d'un véhicule électrique ne peut stocker que du courant continu. (Volkswagen, 2022) (Ooreka, 2023a)

Le type de recharge qui existe sur les bornes de recharge à domicile 220 V est la recharge lente AC, et nécessite de 10 à 13 h pour recharger la batterie. En l'occurrence, c'est le convertisseur du véhicule qui transforme le courant alternatif du réseau électrique public en courant continu. (Volkswagen, 2022) (Ooreka, 2023a)

Il est possible d'installer des bornes de recharge en courant continu (DC) « wallbox », ce qui permet de recharger à partir de 22 kW. Le courant alternatif du réseau dans ce cas est converti en courant continu dans la borne de recharge et pas dans le convertisseur du véhicule. L'avantage de ce type est une grande puissance de recharge et un temps de recharge court. La recharge se fait entre 8 et 10 heures en version 16 A et 4 à heures en version 32 A, et coûte 600 €, hors installation. (Volkswagen, 2022) (Ooreka, 2023a)

C'est pareil pour les bornes de recharge haute puissance. Elles fonctionnent en courant continu (DC) à très haute intensité. Elles existent sur l'autoroute. La puissance de recharge de ce type est au minimum de 100 kW et peut aller jusqu'à 350 kW. Le temps pour recharger un véhicule en charge DC de 100 à 125 kW à 80 % prend environ 30 minutes, et coûte 900 €, hors installation. (Volkswagen, 2022) (Ooreka, 2023a)

Deux critères peuvent déterminer le temps de charge d'un véhicule électrique :

- La taille de la batterie et sa capacité de charge
- Le mode de charge utilisé. (Kia, 2023)

❖ Conseil pour la recharge de la batterie :

La puissance de recharge sera limitée si le niveau de batterie avant la recharge est inférieur à 10 %.

Pour recharger la batterie de 80 à 100 %, il faudra au moins le même temps que pour recharger de 20 à 80 %.

La charge durant les périodes de canicule ou de grand froid est plus longue, car la température idéale de la batterie se situe entre 20 et 25 degrés Celsius. (Le Flem et Bubendorff, 2020)

L'absence de boîte de vitesses dans les véhicules électriques réduit le coût d'entretien. Elle est inutile car le fonctionnement du moteur d'une voiture électrique peut se poursuivre sans problème jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de tours par minute. Il fournit directement la rotation, contrairement à un moteur thermique qui doit convertir le mouvement rectiligne des pistons en mouvement circulaire via son vilebrequin. Logiquement, il y a beaucoup moins de pièces en mouvement dans une voiture électrique que dans un véhicule thermique. Elle n'a pas besoin d'huile pour son moteur, est dépourvue de courroie de distribution et nécessite donc bien moins d'entretien. (Lara, 2022)

## 5. L'enjambeur électrique ALPO

L'entreprise Sabi Agri basée à Saint-Beauzire, a été créée par Laure et Alexandre PREVAULT OSMANI pour répondre au besoin croissant d'agroéquipements au service de l'agriculture durable. Sabi Agri est une entreprise qui conçoit et fabrique des agroéquipements électriques performants et agroécologiques. Elle a lancé son premier enjambeur électrique au salon Tech & Bio en 2017. Il existe quinze modèles monorang de la gamme ALPO qui sont à voie variable de 20 cm, choix de la largeur de 95 à 200 cm. Le poids de l'enjambeur ALPO est de 2100 kg ce qui, avec des pneus basse pression, permet d'avoir un impact minime sur le sol. Le catalogue contient trois versions du tracteur enjambeur électrique léger ALPO.

- ALPO Basic
- ALPO 4X4, tous terrains, toutes cultures
- ALPO enjambeur. (Portail, 2020)



L'ALPO enjambeur avec un châssis de 950 kg, d'une longueur de 2,80 m, et une hauteur de 2,15 m est approprié pour les vignes étroites (1 m minimum). Il est équipé de quatre roues motrices (dont deux directrices) qui sont animées par quatre moteurs électriques donnant une puissance de 50 Cv (autonomie de 8 heures, charge en 2 heures). Le relevage arrière a une capacité de 200 kg, tandis que le relevage central est de 150 kg. (Bourgeois, 2019)

L'enjambeur viticole ALPO peut réaliser tous les travaux du sol (bineuse, intercep, décavaillonneuse, griffes, disques...) de même que l'entretien de la vigne (écimeuse, rogneuse, tondeuse). L'animation de ces outils peut se faire mécaniquement ou grâce à une centrale hydraulique.



*Figure 6 : Enjambeur ALPO.*

L'enjambeur ALPO acheté par Vinipôle Sud Bourgogne depuis un an, est un tracteur homologué route, avec une vitesse de pointe entre 21 et 25 km/h.

Sa conception lui permet une garantie anti-retournement, avec un toit équipé de panneaux solaires pour protéger le conducteur du soleil et prolonger l'autonomie de la batterie lorsqu'il fait tourner certains outils telle la rogneuse qui consomme l'énergie solaire lors de son démarrage. (Tilve, 2023)

L'enjambeur ALPO est équipé d'une pompe hydraulique de petit volume de 23,4 litres. L'huile dans la colonne de direction est nécessaire pour l'homologation routière, afin de transporter de petits outils tels que des interceps et avec une courte autonomie. Le but n'est pas d'avoir une machine hydrauliquement intensive qui réduirait l'autonomie.

Pour assurer un maximum de confort, le siège est monté sur un compresseur. Le vérin électrique commandé par un boîtier à côté du volant et le joystick effectuent l'entraînement. Tandis que la pédale est responsable de l'avancement. Dans le cas où le joystick est couplé avec un régulateur de vitesse -qui s'enclenche de 0,2 à 20 km/h avec des paliers de 0,2 km/h-, le joystick peut être utilisé pour avancer. La vitesse de travail maximum que l'ALPO peut atteindre est de 8 km/h. (Tilve, 2023)

Les caractéristiques de l'enjambeur ALPO :

Puissance	50 Cv
Capacite de batterie	41,2 kWh
Les roues	4 roues motrices, les quatre moteurs électriques sont intégrés dans les roues.
Poids	2100 kg
Poids batterie	400 kg
Outils	Compatibles avec les outils standards : électriques, mécaniques, hydrauliques
Zones de travail	3 zones
La durée de vie de la batterie	10 ans pour 7 à 10 heures de travail/jour
La durée de recharge	2h avec chargeur rapide- 4h avec chargeur normal
Toit	Equipé avec panneaux solaires apporte jusqu'à 20 % d'autonomie supplémentaire
Choix de la largeur	95 à 200 cm
Hauteur enjambée	205 cm
Source hydraulique	23,4 litres
Pneumatique	Michelin Multibib 320/65 R16
Angle de braquage	53°

## 6. L'enjambeur Laboureur 56

Exemple d'un enjambeur thermique :

Afin de comparer l'enjambeur thermique avec l'enjambeur électrique ALPO, il faut trouver un tracteur enjambeur de puissance et de poids proches de celui d'ALPO. Donc, le plus pertinent est le Laboureur 56 Cv

Moteur	kohler 56 Cv- 1,9 L – 3 cylindres
Régime	2600 tr/ min
Energie	GNR
Angle de braquage	65°
Rayon de braquage	3,5 m

Freins	Statiques POCLAIN sur les deux roues arrière par manque de pression Dynamique POCLAIN sur les deux roues avant
Avancement	Manipulateur hydraulique et joystick multifonction
Châssis	Tubulaire acier
Porte-outils	2 porte-outils avant type parallélogramme 2 porte-outils arrière à relevage hydraulique avec clapet piloté électriquement
Pneumatique	Roues Av 280/70 R 16. Roues Ar280/70 R 20.
Source hydraulique	Source hydraulique double 2* 42 litres à 2600 tr/min
Cabine	Deux feux de travail avant + 1 arrière + 2 grands rétroviseurs électriques

## V. Etude comparative de l'enjambeur électrique et thermique :

### 1. Evaluation technique

#### a. Les courbes de puissance/ couple :

Pour connaître la performance d'un moteur, il est essentiel d'avoir des courbes qui varient en fonction du régime du moteur.

La courbe de puissance.

La courbe du couple. (Boéchat, 2012) Comme montre le Figure 7.

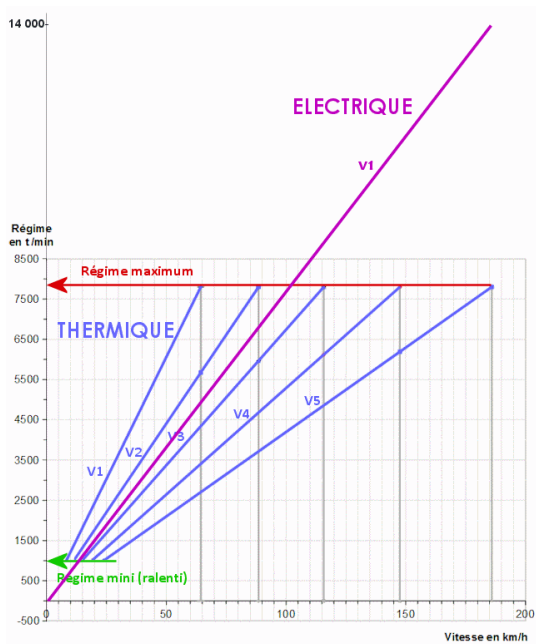


Figure 7 : Courbe Puissance/Couple pour le moteur thermique et électrique. (Fiche Auto, 2019)

Les moteurs électriques fonctionnent à des régimes très élevés, ce qui permet de supprimer la boîte de vitesse.

Le moteur thermique perdra du temps à changer de rapports avec en plus, à la clé, des ruptures de couple, ce qui représente un avantage non négligeable pour le moteur électrique.

Le moteur électrique a une seule courbe de puissance / couple, pendant que le moteur thermique a plusieurs courbes pour chaque rapport. (Fiche Auto, 2019)

#### La différence de puissance entre moteurs thermiques et électriques :

Grâce à son régime très élevé, le moteur électrique a une plage longue avec un couple et une puissance très importante. La courbe de couple s'élanche, atteint un palier puis descend. Tandis que la courbe de puissance progresse très vite et descend tranquillement plus la vitesse monte. (Fiche Auto, 2019)

La courbe de puissance et du couple du moteur thermique se situent plus vers le milieu de la plage du régime moteur. Le couple et la puissance d'un moteur thermique se développent au maximum dans une petite partie de la plage du régime, ce qui explique l'existence de la boîte de vitesses pour utiliser ce pic de puissance/couple sur toute la période d'augmentation de la vitesse. (Fiche Auto, 2019)

En résumé, le moteur électrique dispose d'un régime moteur allant jusqu'à 16000 tours/ min avec un couple et une puissance de bon niveau sur toute cette plage. En revanche le moteur thermique atteint difficilement 8000 tours/ min avec un couple et une puissance élevée sur une petite plage du régime moteur comme montrent les courbes ci-dessous. (Fiche Auto, 2019)

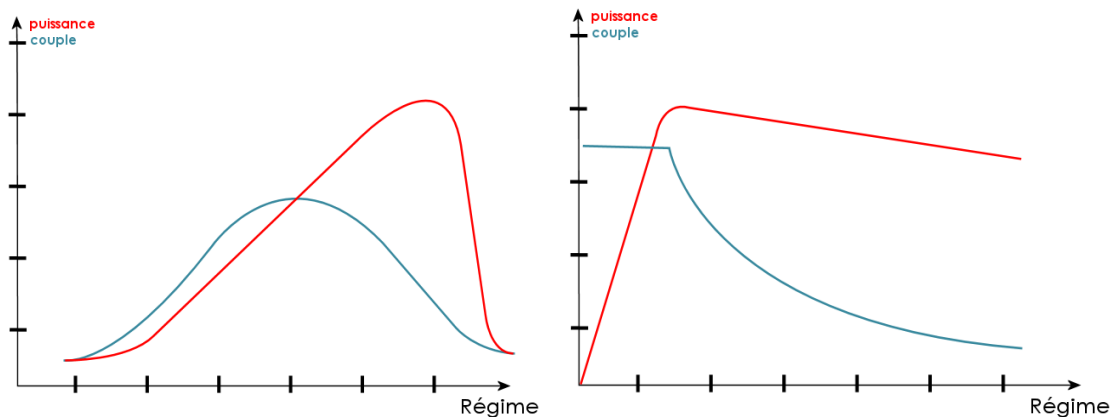


Figure 8 : Courbe moteur thermique

Courbe moteur électrique. (Fiche Auto, 2019)

### b. Le rendement

Le rendement s'exprime par un chiffre compris entre 0 et 1, ou en pourcentage. Le chiffre (1) signifie un meilleur rendement et le chiffre 0 est un mauvais rendement. (Aquitaine, 2020)

- Le rendement des moteurs thermiques et électriques :

Les courbes de puissance/couple ne sont pas suffisantes pour évaluer la performance d'un tracteur. Il faut prendre en compte le rendement du moteur qui représente le ratio entre la quantité d'électricité produite en entrée et la quantité d'énergie mécanique. Il est calculé en divisant la puissance électrique alimentant le moteur par la puissance mécanique restituée par le moteur.

Le calcul de puissance mécanique se fait sur la base du couple et de la vitesse angulaire :

$$P_{mec} = P_{out} = \tau * \omega \quad (3)$$

Tandis que le calcul de puissance électrique se fait sur la base de la tension et du courant fournis au moteur :

$$P_{elec} = P_{in} = I * V \quad (4)$$

L'énergie se perd pendant le processus de conversion sous la chaleur, la friction, les pertes ohmiques et le bruit, ce qui conduit à avoir une puissance mécanique de sortie inférieure à la puissance électrique d'entrée.

$$\text{Rendement du moteur} = P_{mec} / P_{elec} = P_{out} / P_{in} \quad (5)$$

Si toute la puissance électrique est convertie en énergie mécanique  $P_{in}=P_{out}$ , cela donne un rendement de 100 %, mais pour l'instant il n'existe aucun moteur à 100 % de rendement. (Sensel, 2019)

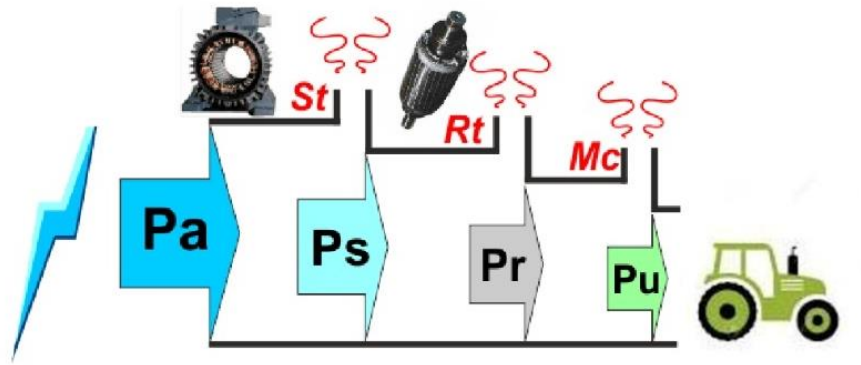


Figure 9 : Puissance moteur électrique. (DUPAS, 2016)

- $P_a$  = Puissance électrique absorbée
- $P_s$  = Puissance transmise par le stator
- $P_r$  = Puissance transmise par le rotor
- $P_u$  = Puissance mécanique réellement utile. (DUPAS, 2016)

Efficacité énergétique :

L'indice IE représente l'efficacité énergétique des moteurs asynchrones, elle se présente sous 4 classifications :

- IE1 : Efficacité standard
- IE2 : Efficacité supérieure
- IE3 : Efficacité premium
- IE4 : Efficacité super premium. (DUPAS, 2016)

Si le moteur a un indice d'efficacité IE4, il peut offrir un rendement de 95 % à partir de 50 kW de puissance, comme expliqué ci-dessous :

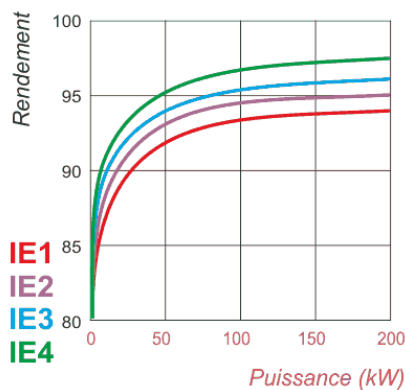


Figure 10 : Courbe efficacité de moteur. (DUPAS, 2016)

Le rendement du moteur diesel :

Il représente le rapport entre la quantité de carburant offerte et la quantité de travail fournie en échange.

Le rendement optimal d'un moteur diesel peut atteindre 45 %.



En résumé, le meilleur rendement d'un moteur thermique dépasse à peine 40 %, autrement dit, seulement 40 % de l'énergie produite par la combustion du carburant est transformée en mouvement, alors que le reste est dissipé sous forme de chaleur. Dans le moteur électrique, le rendement varie de 75 à 95 %. La puissance maximale du moteur électrique est plus élevée que la valeur en kWh de la batterie, puisqu'il n'utilisera pas la puissance maximale pendant toute la période de fonctionnement. (Pilven, 2020)

### c. L'adhérence

Dans certaines conditions, les roues du tracteur ont tendance à patiner, ce qui affecte grandement ses performances, il est donc nécessaire de maintenir l'adhérence du tracteur au sol. Sous l'effet du poids, les pneus ont tendance à s'agripper à la surface du sol. Pour limiter le gaspillage d'énergie et l'usure des pneumatiques, il est nécessaire d'avoir de bonnes conditions d'adhérence permettant de transmettre le couple de traction nécessaire avec un glissement faible. Il existe plusieurs solutions pour augmenter l'adhérence sur un sol agricole :

- ✚ Augmenter la surface de contact entre le sol et les pneus par :
  - Le choix de pneumatiques larges, et en bon état avec un grand diamètre.
  - La réduction, dans les limites autorisées, de la pression de gonflage des pneus.
  - Le jumelage des roues motrices.
  - Au choix de 4 roues motrices ou de chenilles. (Houmy et Hassan II, 2017)

- ✚ Augmentation de la charge verticale sur les roues motrices :

Il est possible d'utiliser des masses d'alourdissement ou un gonflage à l'eau. De même, les outils tractés peuvent transférer une partie de leurs poids à l'essieu arrière. Il est fréquent quand un instrument porté, attaché à l'attelage trois points du relevage hydraulique, est utilisé. Ce type d'attelage augmente le poids du tracteur de 20 %, qui se focalise sur l'essieu arrière en réduisant légèrement le poids sur l'essieu avant.

En revanche, l'utilisation de lestage excessif peut conduire à des pertes par roulement plus élevé et par conséquent à des pertes d'énergie. (Houmy et Hassan II, 2017)

- ✚ Améliorer la liaison tracteur-outil :

La performance du tracteur agricole est influencée par l'outil accompagné.

Au niveau de la transformation de la charge : l'outil permet d'améliorer l'adhérence pour l'attelage à 3 points en augmentant la charge au niveau des roues motrices.

Au niveau du réglage des outils : le mauvais réglage peut produire des efforts "parasites" perturbant le travail du tracteur. (Houmy et Hassan II, 2017)

- ✚ L'entretien régulier du tracteur :

Effectuer l'entretien du tracteur selon les préconisations du constructeur permet de détecter les dysfonctionnements et les surconsommations au niveau du filtre à air, de la vidange et de la vérification des injecteurs. (Houmy et Hassan II, 2017)

## Les moteurs électriques intégrés aux roues :

### Avantages :

- Le moteur électrique est intégré dans la roue pour bien gérer le passage de la puissance aux roues.
- L'unité centrale est capable d'ajuster avec finesse la puissance ou le freinage d'une roue, indépendamment des autres, grâce aux différents capteurs (accélérations, forces latérales et longitudinales, patinage éventuel d'une roue, etc.) (Hayez, 2021)

### Inconvénients :

- Ils coûtent plus cher qu'un moteur plus traditionnel.
- Les roues ne sont pas suspendues avec le reste du châssis et doivent donc endurer les différents chocs que prennent les roues, ainsi qu'une demande de renforcement du châssis en raison d'une augmentation de la masse non suspendue.
- Il n'y a pas de transmission ce qui rend plus difficile la montée dans les tours du moteur. (Hayez, 2021)

#### d. Le porte-outil:

Selon la configuration du tracteur enjambeur, il est muni de différents porte-outils. Il existe généralement des porte-outils entre roues et des porte-outils positionnés derrière les roues arrière.

Deux grandes familles de porte-outils entre roues sont commercialisées sur le marché :

- Le porte-outil à pousser : figure 11, il s'agit d'une perche sur laquelle se fixent les outils à l'aide d'une bride en croix. La perche peut être munie d'un cadre à coulisses pour adapter la largeur de travail aux rangs de vigne. Il existe un guide qui est positionné sur la partie avant de la perche. Il maintient l'ensemble du porte-outil dans l'axe du rang, limitant ainsi les contraintes mécaniques latérales. (Maté Vi, 2023a)



*Figure 11 : porte- outil à pousser. (Maté Vi, 2023a)*

- Le porte-outil à tirer : figure 12, il s'agit d'un parallélogramme déformable équipé d'un carré en partie basse. L'intérêt de ce type est de faciliter le travail des outils de désherbage mécanique. Cependant il réduit l'espace disponible entre les roues avant et arrière. (Maté Vi, 2023a)



Figure 12 : porte-outil à tirer. (Maté Vi, 2023a)

#### e. Ergonomie de conduite

Les constructeurs ont développé le poste de conduite depuis des années, car l'ergonomie de travail et le confort du conducteur entraînent une conséquence sur la qualité du travail. En utilisant des suspensions pneumatiques, les sièges sont devenus plus confortables. Les automatismes sont également apparus chez certains constructeurs de tracteurs enjambeurs. De plus, la protection du conducteur est plus assurée qu'avant. Les éléments du poste de conduite dépendent des travaux attendus du tracteur. (Maté Vi, 2023b)

- L'écran :

Cet élément, avec le temps, devient indispensable lors de la conception du poste de conduite. Il peut être tactile pour certains tracteurs. Il offre des informations qui sont utiles pour faciliter la traçabilité des opérations réalisées à la parcelle. (Maté Vi, 2023b)

- Le joystick :

Dans les tracteurs avec électronique embarquée, les commandes se trouvent centralisées sur un joystick. L'avancement du tracteur et les fonctions hydrauliques se font depuis une commande unique. Le développement d'une transmission hydrostatique ou à variation continue permet d'intégrer des fonctions supplémentaires sur le joystick. (Maté Vi, 2023b)

- Electronique embarquée :

L'électronique embarquée permet d'envisager la conduite autrement. Selon qu'il s'agisse d'aides à la conduite, plus ou moins performantes selon la technologie utilisée (capteur optique, ultrason, GPS, etc.) ou simplement en fournissant des informations telles que la consommation instantanée de carburant, le débit de travail/ha ou la gestion temporisée des épandeurs hydrauliques. (Maté Vi, 2023b)

## 2. Evaluation environnementale

### a. L'empreinte carbone:

L'empreinte carbone est un indicateur. Il vise à mesurer l'impact spécifique d'une ou plusieurs activités humaines sur l'environnement. L'empreinte carbone se concentre sur la quantité de gaz à effet de serre produit par les activités en question. (Dumont, 2023)

Les gaz à effet de serre (GES) tels que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ , qui représentent 97 % des six GES pris en compte dans le protocole de Kyoto), sont inclus dans l'empreinte carbone. (Gendre, 2023)

L'effet de serre est un phénomène naturel par lequel les gaz à effet de serre régulent naturellement le climat en interdisant une partie des rayonnements solaires d'être renvoyés vers l'espace. Depuis la révolution industrielle, la concentration des gaz à effet de serre ne cesse d'augmenter ce qui conduit à aggraver ce phénomène, et à entraîner des modifications du climat. Les émissions de  $\text{CO}_2$  représentent la majorité de l'effet de serre, ce gaz venant de la

combustion d'énergie fossile. En revanche, en agriculture, les principaux GES sont le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). (Jouart, 2021)

Les gaz à effet de serre sont évalués en équivalent CO<sub>2</sub> (gaz référence), car ces gaz n'ont pas un Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) identique. Pour comparer ces gaz, sur 100 ans, il est avéré que l'émission de 1 kg de CH<sub>4</sub> a le même effet que 28 kg de CO<sub>2</sub>, et l'émission de 1 kg de N<sub>2</sub>O a le même effet que 265 kg de CO<sub>2</sub>. (Rouyer, 2020)

### **Répartition de l'empreinte carbone globale**

Pour mieux comprendre et résoudre le problème du phénomène d'effet de serre. Il faut chercher les secteurs d'activités les plus polluants dans le monde, en représentant la répartition des secteurs en pourcentage :

- Production de chaleur et d'électricité (25 %)
- Agriculture, foresterie et utilisation des sols (24 %)
- Industrie (21 %)
- Transports (14 %)
- Autres productions d'énergie (10 %)
- Construction (6 %). (Fournier, 2019)

Les secteurs les plus polluants varient selon le pays. Après analyse de la répartition sectorielle des émissions carbone dans le monde, il apparaît que l'industrie et la production d'énergie en Chine sont les secteurs les plus polluants représentant près de 80 % de leur bilan carbone. Cependant, le secteur des transports aux Etats-Unis est le secteur le plus polluant avec 36 % contre 9 % pour l'industrie. (Fournier, 2019)

Les émissions de CO<sub>2</sub> par secteur en France :

D'après le rapport CITEPA 2019, les émissions de CO<sub>2</sub> se répartissent en France entre ces différents secteurs :

- Transports 29 %,
- Bâtiments résidentiels/Tertiaire 20 %,
- Agriculture, sylviculture et gestion des sols 19 %,
- Industries manufacturières 18 %,
- Transformation de l'énergie 11 %,
- Déchets 3 %. (Fournier, 2019)

### **Empreinte carbone du secteur de l'agriculture**

L'augmentation de la production agricole mondiale depuis 1960, a un impact non négligeable sur le climat. La répartition de l'empreinte carbone du secteur de l'agriculture provient à 48 % de l'élevage, 41 % des cultures et 11 % des machines agricoles. (Rakotonavahy, 2022)

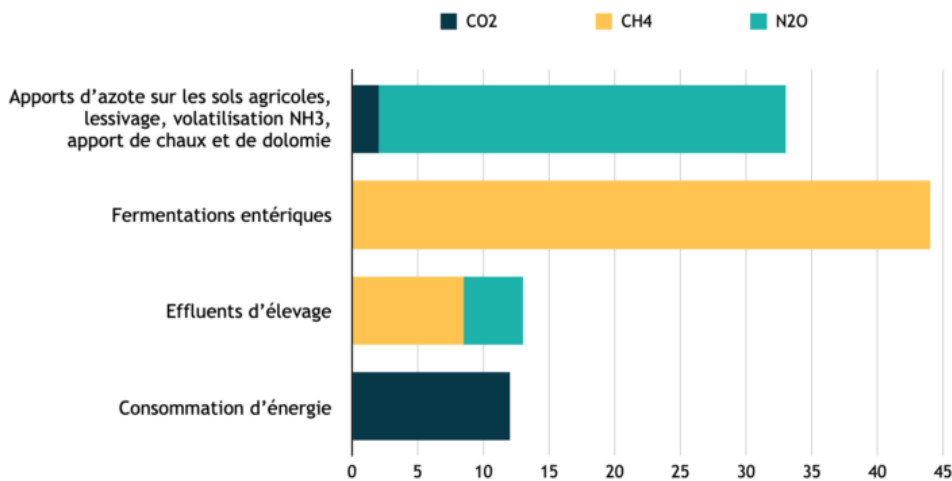


Figure 13 : Répartition des secteurs agricoles selon leurs émissions de gaz à effet de serre. (Rakotonavahy, 2022)

Une exploitation agricole consomme deux types d'énergie : l'énergie directe et l'énergie indirecte.

L'énergie directe réunit toutes les sources d'énergie directement utilisées sur l'exploitation (carburant, électricité...).

L'énergie indirecte représente toutes les énergies qui ont été utilisées avant l'activité agricole, et sont issues de la fabrication et du transport des intrants.

L'énergie primaire exprime les consommations : 1 L de GNR (Gazole Non Routier) domestique = 45,6 MJ d'énergie primaire = 35,5 MJ d'énergie finale.

L'unité qui exprime les consommations d'énergie est le joule (J) et ses multiples, comme le mégajoule (1 MJ = 1 million de joules) et le gigajoule (1 GJ = 1 milliard de joules). (Rouyer, 2020)

L'enjambeur électrique et le changement climatique :

Lors de l'utilisation des enjambeurs électriques, y-a-t-il un impact sur les enjeux climatiques ? Pour répondre à cette question, il faut savoir de quoi dépendent les émissions de gaz à effet de serre :

Elles dépendent tout d'abord des modes de fabrication et d'extraction des matériaux, principalement pour la batterie. Elles dépendent aussi de l'autonomie du véhicule qui est liée directement à la taille de la batterie et enfin de l'électricité consommée lors de la recharge du véhicule et de son empreinte carbone et de ses autres pollutions. (Bieuville, 2023b)

#### b. L'analyse du cycle de vie de l'enjambeur électrique

##### Définition de l'ACV

L'analyse de cycle de vie est une méthodologie qui peut évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'une activité. Le but de cette analyse est d'évaluer précisément l'ensemble des impacts environnementaux liés à une activité, en abordant toutes les différentes étapes de cette activité.

Lors de la comparaison de l'impact de deux produits, le terme d'analyse de cycle de vie comparative est utilisé, afin de choisir l'option la plus écologique. (Bieuville, 2023a)

## Comment faire une ACV ?

Afin de réaliser une ACV, il est nécessaire de procéder à un audit complet du cycle de vie du produit étudié afin de déterminer ses ressources et ses externalités.

Il est possible d'obtenir une cartographie précise des impacts environnementaux, après avoir croisé les données obtenues de cette analyse avec les données d'impact environnemental.

La norme ISO 14040 et ses dérivées sont des normes internationales qui définissent la méthodologie de réalisation d'une ACV. (Bieuville, 2023a)

## L'analyse du cycle de vie d'un véhicule électrique

L'analyse du cycle de vie d'un véhicule électrique comprend l'ensemble des émissions carbone, de sa fabrication à sa fin de vie. Avec cette méthodologie, un bilan rigoureux des émissions de gaz à effet de serre peut être calculé. (Bieuville, 2023b)

Les étapes pour le cycle de vie d'un engin électrique comme c'est le cas dans cette étude sont les suivantes :

- Le processus d'extraction et de traitement des matières premières, notamment les métaux et terres rares comme le lithium, le cobalt, le nickel, le manganèse qui sont utilisés pour fabriquer la batterie.
- L'étape de production de la voiture électrique et de la batterie. Ces deux premières phases sont responsables à 75 % de la pollution sur l'ensemble du cycle de vie, et 45 % proviennent de la seule production des batteries.
- L'utilisation du véhicule électrique ne dégrade pas la qualité de l'air.
- La production d'électricité dépend des sources de production utilisées, car le charbon n'a pas le même impact que le nucléaire ou les énergies renouvelables.
- La fin de vie peut contribuer à réduire le bilan carbone en réemployant la batterie et en recyclant les matériaux des véhicules électriques. (Bieuville, 2023b)

**Le véhicule étudié est produit, assemblé et vendu en France.** Le transport entre l'usine de production et le distributeur n'a pas été pris en compte.

### c. [Evaluation environnementale du véhicule électrique : Méthodologies et application](#)

Afin de savoir quel tracteur émet le plus de CO<sub>2</sub>, il est logique d'analyser les parties importantes des deux tracteurs et par l'observation, il s'avère que les deux tracteurs sont similaires en termes de châssis et de pneus. La seule différence majeure est que l'engin électrique a une batterie au lithium et un moteur électrique, tandis que l'engin thermique a un moteur diesel et une batterie de démarrage.

#### ○ *La phase d'extraction des matériaux :*

Un dixième des gaz à effet de serre à l'échelle mondiale provient de l'extraction et du raffinage des métaux, avec des variations considérables. L'acier et l'aluminium produisent à eux seuls près de 90 % des émissions de CO<sub>2</sub> des dix-sept métaux étudiés dans cette note. (Bueb et To, 2020)



Tableau 2 : Emission de CO<sub>2</sub> par tonne produite de métal. (Bueb et To, 2020)

**Émissions de CO<sub>2</sub> par tonne produite de métal et coût carbone par rapport au prix du métal**

Famille de métaux	Métal	Production totale (en tonnes)	Émissions de CO <sub>2</sub> (en tCO <sub>2</sub> /t)	Émissions mondiales de CO <sub>2</sub> (MtCO <sub>2</sub> )	Coût carbone en €/t (avec un prix de 57 €/tCO <sub>2</sub> )	Coût carbone par rapport au prix du métal
<b>Métaux de base</b>	Aluminium	60 000 000	17	1 025	974	60 %
	Chrome	36 000 000	5	185	293	4 %
	Magnésium	970 000	36	35	2 051	117 %
	Nickel	2 300 000	11	25	608	5 %
	Acier	1 800 000 000	2	3 346	106	25 %
<b>Métaux d'alliage</b>	Cobalt	140 000	3	0	155	1 %
	Cuivre	21 000 000	4	82	223	4 %
	Titane	5 400 000	30	161	1 704	11 %
	Zinc	13 000 000	4	47	207	9 %
<b>Métaux précieux</b>	Antimoine	140 000	1	0	57	1 %
	Platine	160	20 600	3	1 174 200	4 %
	Or	3 260	5 100	17	290 700	1 %
	Argent	27 000	104	3	5 900	1 %
<b>Métaux high-tech</b>	Néodyme	23 000	33	1	1 865	4 %
	Molybdène	300 000	11	3	616	5 %
	Tungstène	82 000	29	2	1 666	4 %
	Yttrium	7 100	63	0	3 619	11 %

Note : sur les deux colonnes de droite, les coûts carbone sont calculés sur la base d'une taxe carbone de 57 euros par tonne, prix moyen proposé par la commission Stern-Stiglitz.

Source : France Stratégie

**L'extraction et le raffinage du lithium :**

La production d'une tonne d'hydroxyde de lithium par l'extraction de roche dure, nécessite environ 15 t de CO<sub>2</sub> qui représente 60% de total production mondiale. Une tonne d'hydroxyde de lithium produite par les bassins d'évaporation nécessite 5 t de CO<sub>2</sub> ce qui est trois fois moins que l'extraction-raffinage à partir des minerais de lithium comme le spodumène, dans les mines à ciel ouvert et représente 40% de total production mondiale. (Vulcan Energy, 2021)

Tableau 3 : Extraction du lithium.

	Pourcentage de production	Emission CO <sub>2</sub> en Kg de lithium	Emission CO <sub>2</sub> selon le part de marche
Lithium de roche dure	60%	15 kg	9 kg
Lithium des bassins d'évaporation	40%	5 kg	2 kg
<b>Total</b>	<b>100%</b>		<b>11 kg</b>

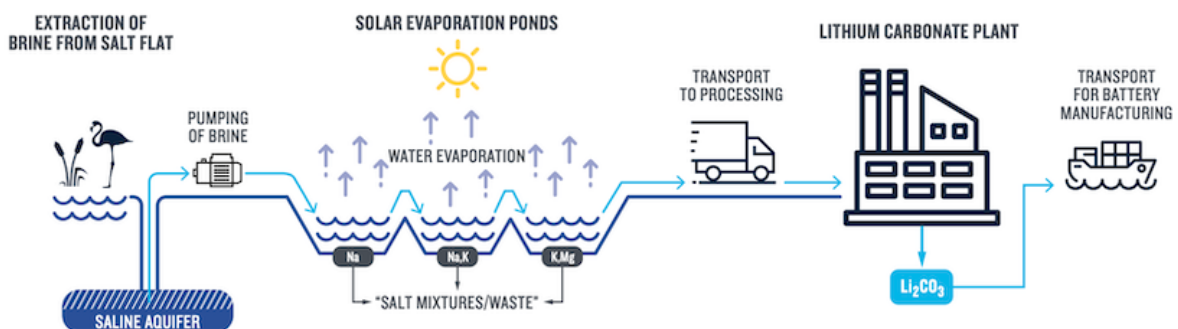


Figure 14 : Les étapes de l'extraction et du raffinage du lithium. (Langlois, 2023)

L'extraction d'une tonne de ferromanganèse produit 0,08 t de CO<sub>2</sub>. (Westfall *et al.*, 2015)

Le graphite synthétique est fabriqué à partir de coke de pétrole et de goudron de houille, tandis que le graphite naturel est produit naturellement dans les dépôts minéraux. (Content, 2021)

Les deux types de graphite peuvent être utilisés dans les batteries comme matériaux d'anode. En 2020, la part de marché de graphite synthétique est de 58 % de marché des anodes contre 39% pour le graphite naturel. Toutefois, cela pourrait changer au cours de la prochaine décennie. D'ici 2030, la demande d'anodes pour le graphite naturel devrait connaître une augmentation de 1437 %, contre une augmentation de 705 % pour le graphite synthétique. (Content, 2021)

Pour produire 1 kg de graphite synthétique 4,9 kg de CO<sub>2</sub> vont émettre. Cela représente environ trois fois la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> résultant de la production de 1 kg de graphite naturel (1 kg graphite naturel = 1-2 kg CO<sub>2</sub>). (Content, 2021)

*Tableau 4 : la production de graphite et l'émission du CO<sub>2</sub>.*

	Pourcentage de production	Emission CO <sub>2</sub> en Kg	Emission CO <sub>2</sub> selon la part de marché en kg
Graphite synthétique	58%	4,9	2,842
graphite naturel	39%	1,6	0,624
Total	97%		<b>3,466 kg</b>

Une tonne de fer produit émet 1,83 tonnes de CO<sub>2</sub>. (Counts, 2023)

○ *La phase de fabrication:*

Pour connaître l'impact environnemental d'un tracteur enjambeur électrique, il faut bien analyser la phase de fabrication. En comparaison avec un tracteur enjambeur thermique, il est à noter que la différence entre eux est le moteur et la batterie alors que les deux enjambeurs ont la même caisse et les mêmes pneus. Il existe des métaux comme le cuivre qui entre dans la fabrication du moteur électrique pour assurer l'électrification et la connexion. Et pour alléger la structure du véhicule électrique, l'aluminium est utilisé à plus de 40 % par rapport au véhicule thermique. Le processus pour extraire ces métaux est très émetteur de CO<sub>2</sub>. La production d'un véhicule électrique émet donc deux fois plus de gaz à effet de serre qu'un véhicule thermique. (Franceinfo, 2020)

Pour étudier l'impact carbone de production d'un véhicule, il est nécessaire de décomposer le véhicule électrique pour analyser les matériaux et l'impact de production de chaque composant.

- La batterie d'ALPO a une capacité de 41,2 kWh, le poids de 400 kg. Le tableau ci-dessous illustre les métaux composants de cette batterie : graphite, aluminium, nickel, cuivre, acier, manganèse, cobalt et fer. (Bhutada, 2022)

Tableau 5 : Composants de la batterie lithium-ion et l'émission CO<sub>2</sub>. (Bhutada, 2022)

Métal	Partie de cellule	% de total	Montant contenu dans la batterie (kg)	Émission CO <sub>2</sub> en kg de métal	Total émission CO <sub>2</sub>
Graphite	Anode	28,10%	112,4	3,466	389,5784
Aluminium	Cathode Boîtier, Courant, Collecteur	18,90%	75,6	17	1285,2
Nickel	Cathode	15,70%	62,8	11	690,8
Cuivre	Courant Collecteur	10,80%	43,2	4	172,8
Acier	Boitier	10,80%	43,2	2	86,4
Manganèse	Cathode	5,40%	21,6	0,08	1,728
Cobalt	Cathode	4,30%	17,2	3	51,6
Lithium	Cathode	3,20%	12,8	11	140,8
Fer	Cathode	2,70%	10,8	1,83	19,764
<b>Total</b>		<b>100%</b>	<b>399,6</b>		<b>2838,67 kg</b>

Pour 1 kWh de batterie lithium-ion, l'émission CO<sub>2</sub> soit  $2838,67/41,2 = 68,89$  kg CO<sub>2</sub>

- Le moteur électrique se compose du stator (plaques de fer enveloppées de cuivre) pour 41 %, du carter (aluminium) pour 39 % et du rotor (cuivre) pour 20 %. (Solomon *et al.*, 2020)

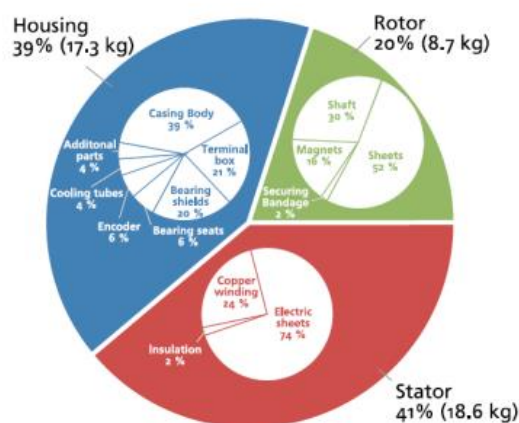


Figure 15 : Les composants d'un moteur électrique. (Solomon *et al.*, 2020)

Le poids de moteur électrique intégré à la roue est 17 kg, les quatre moteurs compte 68 kg. (Hayez, 2021)

Tableau 6 : Emission CO<sub>2</sub> en kg pour un moteur électrique.

Moteur électrique 68 kg					
Composants	Répartitions	Le poids des composants	Matière des composants	Emission kg CO <sub>2</sub> /kg de métal produite	Emission CO <sub>2</sub> en kg
Stator	41%	27,88	Fer	2	55,76
Carter	39%	26,52	Aluminium	17	450,84
Rotor	20%	13,60	Cuivre	4	54,40
Total	100%	68,00			<b>561,00</b>

Total émission CO<sub>2</sub> pour la phase d'extraction de matériaux pour un enjambeur électrique :  
L'émission total du CO<sub>2</sub> (moteur + batterie) = 561 + 2838,67 = **3399,67 Kg CO<sub>2</sub>**.

➤ Eléments constitutifs d'un moteur diesel

Bloc moteur : en fonte Fe<sub>3</sub>C ou en alliage aluminium moulé. (Bourma, 2020) 58 kg

La culasse : en fonte ou en alliage aluminium. (Bourma, 2020) 15 kg

Les carter de protection : en alliage léger. (Bourma, 2020)

Les parties mobiles :

- Le piston : en aluminium. (Thompson, 2012)
- La bielle : en acier (Benjamin, 2019)
- Le vilebrequin : en acier forgé. (Technipedia, 2023)
- Le volant moteur : en fonte d'acier (Ooreka, 2023b) 7kg
- Les soupapes : en acier. (Bourma, 2020) 6 soupapes
- L'arbre à came : en acier. (Bourma, 2020)

Le poids de moteur Kohler 56 Cv (KDI 1903 TCR 3 cylindre) est de 233 kg. (Manini, 2023)

Le bloc moteur représente jusqu'à un quart du poids total du moteur :  $233/4 = 58$  kg

80 kg aluminium \* 17 = 1360 kg CO<sub>2</sub>

153 kg acier \* 2 = 306 kg CO<sub>2</sub>

En total l'émission CO<sub>2</sub> pour produire le moteur diesel est de **1666** kg CO<sub>2</sub>.

➤ Batterie plomb

Facteurs d'émission en kg équivalent CO<sub>2</sub> par unité est 1,64 kg. (City of winnipeg, 2023)

Tableau 7: Émission CO<sub>2</sub> en kg pour extraire le plomb pour une batterie. (Robertson, 2023)

Teneur en plomb en kg	Émission CO <sub>2</sub> en kg	Poids de batterie en kg
7,26	11,90	12,25 - 13,61
8,16	13,39	13,61 - 14,97
9,07	14,88	14,97 - 16,33

Total émission CO<sub>2</sub> pour la phase d'extraction de matériaux pour un enjambeur thermique :  
L'émission total du CO<sub>2</sub> (moteur + batterie) = 1666 + 13 = 1679 Kg CO<sub>2</sub>.

○ *La phase de production de l'énergie :*

Dans cette étude, il existe trois sources d'énergies : l'énergie fossile (diesel), l'énergie électrique et l'énergie solaire comme une énergie secondaire pour prolonger l'autonomie de la batterie de l'enjambeur électrique. Afin de déterminer l'impact environnemental de chaque source d'énergie, il est important d'analyser le cycle de vie qui commence de l'extraction jusqu'à l'utilisation de cette énergie pour faire travailler l'engin correspondant. (Ayoun, 2021)

• La production de diesel :

Les émissions de gaz à effet de serre durant la production du diesel, peuvent être détaillées comme suit pour la France :

*Tableau 8 : Emission amont pour le diesel en GJ PCI (ADEME, 2023)*

Combustible	Extraction et process		Transport		Raffinage		Distribution		Total (kgCO <sub>2</sub> e/GJ PCI)
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	
Diesel	4,42	0,037	0,9		8,32	0,012	1		15,9

Les émissions de gaz à effet de serre pour la production et la combustion de diesel sont présentées dans le tableau suivant :

*Tableau 9 : Emission amont et combustion pour le diesel en GJ PCI. (ADEME, 2023)*

Combustible	Total amont (kgCO <sub>2</sub> e/GJ PCI)	Combustion (kg de gaz /GJ PCI)			Total Combustion (kgCO <sub>2</sub> e/GJ PCI)
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
Diesel	<b>15,9</b>	75,0	0,001	0,0023	<b>75,6</b>

\*PCI - Pouvoir Calorifique Inférieur du combustible exprimé en GJ/tonne

Le PCI indique la quantité de chaleur libérée par la combustion d'une unité de masse de produit de 1 kg dans des conditions standardisées. Les valeurs de PCI élevées, signifient que le produit fournit plus d'énergie. (ADEME, 2023)

Tableau 10 : l'émission total CO<sub>2</sub> pour le diesel en différent unité. (ADEME, 2023)

Combustible	Total amont + combustion (kgCO <sub>2</sub> e par ... PCI)				
	GJ	KWh	Tep	Kg	Litre
Diesel	91,5	0,330	3845	3,85	3,25

En conséquence, un litre de diesel émet 3,25 kg de CO<sub>2</sub> sur le cycle de vie, lors des phases amont et de combustion de diesel.

- La production d'électricité et ses sources :

Des unités de production génèrent de l'électricité, en utilisant des formes d'énergie différentes qu'elles transforment en électricité. Il existe un réseau de transport et de distribution d'électricité à l'échelle métropolitaine entre ces unités et le réseau européen. (Raillard, 2020)

En France, divers vecteurs énergétiques alimentent ces unités de production : l'uranium 235 (centrales nucléaires), l'eau stockée en altitude (centrale hydroélectrique), le gaz (cycles combinés au gaz et centrales thermiques classiques), le charbon (centrales au charbon), ou l'énergie éolienne (turbines éoliennes), photovoltaïque (panneaux photovoltaïques), ou biomasse (centrales à biomasse). (Raillard, 2020)

Depuis 1990, les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'Union européenne ont diminué de 41 % par kWh d'électricité produite, et atteignent 317 g de CO<sub>2</sub>/kWh en 2018. Les niveaux d'émissions sont très variables entre les pays de l'UE, mais ils ont tous la même tendance de réduction d'émission de CO<sub>2</sub>. Par exemple, en Allemagne, l'émission de CO<sub>2</sub> est de 430 g de CO<sub>2</sub>/kWh et en Pologne de 781 g de CO<sub>2</sub>/kWh, car ils utilisent le charbon pour produire l'électricité. Contrairement aux pays ayant développé les énergies nucléaires ou renouvelables comme la France et la Suède. (SDES, 2021)

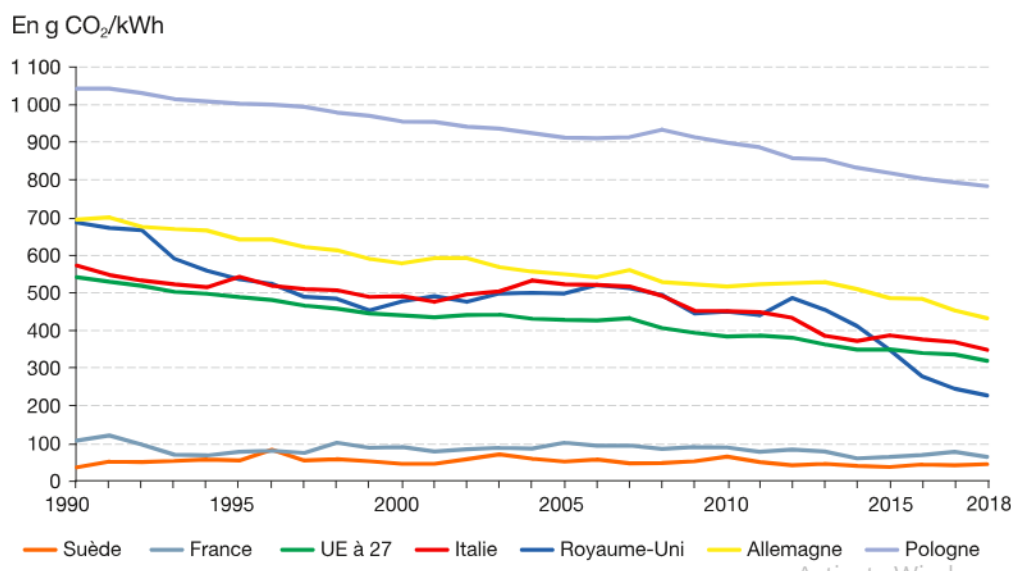


Figure 16 : Emission CO<sub>2</sub> pour produire 1 kWh dans les pays d'UE. (SDES, 2021)

Les véhicules électriques consomment directement l'électricité grâce à un moteur électrique. Par conséquent, l'énergie cinétique du véhicule n'est pas produite par une combustion au sein du véhicule. L'usage du véhicule électrique n'émet pas de CO<sub>2</sub>. En revanche, produire de

l'électricité peut émettre du CO<sub>2</sub>, principalement par la combustion de gaz et de charbon dans les centrales associées. D'après la base carbone de l'ADEME, le mix électrique français émet 57 g de CO<sub>2</sub>/kWh (cette émission est de 420 g de CO<sub>2</sub>/kWh en moyenne pour le mix de l'Union Européenne à 27 pays en 2020). (Raillard, 2020)

○ *La phase d'utilisation de la machine :*

● L'émission de CO<sub>2</sub> d'un moteur électrique :

Selon les données de ADEME, la production de 1 kWh émet près de 57g de CO<sub>2</sub> en France.

L'enjambeur travaille 55 à 60 jours par an et la journée de travail compte de 5 à 10 heures. La batterie d'ALPO tient une journée de travail.

La capacité de la batterie est 41,2 kWh, la consommation d'électricité pour recharger la batterie est 50 kWh (donnée de site d'expérimentation à Rully lors de recharge complète de la batterie).

$50 \times 57 = 2850$  g de CO<sub>2</sub> = 2,85 kg de CO<sub>2</sub> pour une journée de travail

Pour une heure de travail  $2,85 \text{ kg} / 8 = 0,35$  kg CO<sub>2</sub>.

La durée de vie de l'enjambeur est 10 ans, l'enjambeur travaille 300 heures/an

3000 heures sur la durée de vie :  $3000 * 0,35 = 1050$  kg CO<sub>2</sub>.

● L'émission de CO<sub>2</sub> d'un moteur diesel :

Le diesel correspond à un hexadécane C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>. La combustion du diesel émet du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). La combustion d'un litre de diesel est de 2,65kg de CO<sub>2</sub>. (Noblet, 2021)

Cela signifie que la phase de production de diesel émet :  $3,25 - 2,65 = 0,6$  kg CO<sub>2</sub>.

La consommation de l'enjambeur thermique Laboureur56 est de 4 L/h. En considérant que la journée de travail est de 8 heures, il faudra donc 32 L de carburant.

L'émission totale pour un jour sans tenant compte la phase de production de diesel sera :

$32 \times 2,65 = 84,8$  kg CO<sub>2</sub>

Sur la durée de vie (3000 heures) =  $84,8 * 3000 = 254400$  kg CO<sub>2</sub>.

L'émission totale pour un jour en tenant compte la phase de production de diesel sera :

$32 \times 3,25 = 104$  Kg CO<sub>2</sub>

L'émission pour la phase de production d'énergie est donc :  $104 - 84,8 = 19,2$  kg CO<sub>2</sub>

Sur la durée de vie (3000 heures) =  $19,2 * 3000 = 57600$  kg CO<sub>2</sub>

Total émission CO<sub>2</sub> pour les phases d'extraction, production d'énergie et utilisation de machine est :



Tableau 11 : Total émission CO2 en kg.

	Laboureur56	ALPO
<b>Construction de machine</b>	1679	3399,67
<b>Production d'énergie</b>	57600	1050
<b>Utilisation</b>	254400	0
<b>Total émission CO<sub>2</sub> en kg</b>	<b>313679 kg</b>	<b>4899,67 kg</b>

○ *La phase de fin de vie*

La durée de vie de la batterie d'un véhicule électrique est de 10 à 15 ans, ou 1000 cycles de recharge. La première voiture électrique a été mise en route en 2012, donc il n'y a pas d'information sur une durée de vie réelle, et encore moins de données sur l'enjambeur électrique, car le premier enjambeur électrique a été mis en service en 2017.

Pour définir la durée de vie de la batterie, il faut compter le nombre de batteries utilisées durant la vie du véhicule et il existe deux types de durée de vie :

Durée de vie calendaire : La batterie est capable de résister aux dégradations dues à l'usage et au temps. La fréquence d'utilisation, la température et l'humidité peuvent déterminer cette durée.

Durée de vie cyclique : Elle est définie par le nombre de charges-décharges que la batterie peut supporter. Elle est associée à la profondeur de décharge qui lui est imposée. (Pons *et al.*, 2010)

Le recyclage d'un véhicule électrique se fait en deux temps :

- Démontage du véhicule avant broyage, séparation des résidus de broyage, traitement des déchets : optimisation potentielle sous forme de réemploi (pneus, moteur), recyclage des métaux et valorisation énergétique des matériaux composites,
- Le recyclage des batteries. (Pons *et al.*, 2010)

Les ferrailles sont achetées par des récupérateurs au prix du marché. Ils les passent aux déchèteries sous forme de volume. Après broyage, les métaux sont séparés et réutilisés en aciérie et métallurgie. (Tristan, 2019)

Pour réduire l'empreinte environnementale du véhicule électrique, il est conseillé de recycler les composants de la batterie. La loi en Europe depuis 2006 impose aux sociétés automobiles de recycler au moins 50 % de la masse de la batterie lithium-ion. Les ressources minérales (cobalt, manganèse, nickel, cuivre, lithium) sont recyclées, mais ne sont pas forcément réutilisées pour la production de batteries neuves. (Tristan, 2019)

Les constructeurs de véhicules électriques récupèrent les batteries pour réparer les cellules endommagées (**Reconditionnées**) ou produire de nouvelles batteries à partir des matériaux récupérés (**Recyclées**). Les matériaux comme le nickel, le manganèse et le cobalt sont isolés par une méthode d'hydrométallurgie. Il existe aussi des sociétés spécialisées dans le recyclage des batteries. (Babled, 2022)

Il est peu fréquent qu'une batterie de voiture électrique arrive à la fin de sa durée de vie. Autrement dit, que sa capacité à conserver l'électricité soit de 0 %. La plupart des batteries doivent être remplacées quand elles n'ont plus que 70 % de capacité de conservation d'énergie, ce qui peut arriver autour de 8 à 10 ans. (Babled, 2022)

#### Le recyclage des batteries :

Le fait de recycler une batterie est une opération dangereuse, car elle comporte des risques électriques (l'énergie dans les packs de batteries n'est pas négligeable), des risques d'explosion et d'emballement thermique, et finalement des risques chimiques (production de gaz toxiques comme *HF*, exposition aux matériaux potentiellement cancérigènes). (Lucas et Gajan, 2021)

Le recyclage des batteries ne répond pas aux besoins totaux d'un pays en pleine croissance économique mais il peut y contribuer partiellement. D'autre part, le recyclage permet de réduire l'équivalent d'environ 9 t de CO<sub>2</sub> les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie d'une batterie de véhicule électrique : l'extraction des métaux contribue à 63 % du CO<sub>2</sub> émis, et les 37 % restant proviennent de la fabrication des batteries. En utilisant les matériaux issus de batteries recyclées, on peut réduire de 13 à 26 % les émissions de gaz à effet de serre provenant de la fabrication des batteries. (Chagnes, 2022b)

Il existe en France deux sociétés capables de recycler ces types de batteries : EURODIEUZE, située en Moselle, et la SNAM, Société Nouvelle d'Affinage de Métaux, située dans l'Aveyron.

La réglementation européenne impose qu'au minimum 50 % des matériaux composant une batterie de véhicule électrique soient recyclés. Le taux de recyclage des batteries en France atteint les 65 %. Le lithium, le cobalt, le nickel et le cuivre sont des métaux récupérables à 90 %. (Babled, 2022)

## **VI. Evaluation économique:**

Travailler les vignes en enjambeur électrique ou thermique ? Est-ce que l'acquisition d'un enjambeur 100 % électrique est rentable par rapport à un enjambeur équivalent thermique ?

L'évolution de la technologie des batteries des véhicules électriques permet de baisser le coût d'achat de ce genre de véhicule, mais le marché des enjambeurs électriques est en plein développement et considère de nouveaux produits dans le marché du matériel viticole. Un enjambeur électrique est généralement plus cher que son équivalent en thermique, mais la subvention du gouvernement se situe à 40 % pour l'achat d'un enjambeur ALPO.

Les agriculteurs qui veulent acquérir du matériel inclus dans la liste des 23 agroéquipements dits de 3<sup>ème</sup> révolution agricole peuvent bénéficier de l'aide de l'Etat jusqu'en 2030. Depuis le 1<sup>er</sup> mars 2023, Marc Fesneau (Ministre de l'agriculture) a annoncé une enveloppe de 40 millions d'euros. Elle fait suite aux 20 millions d'euros de financement destinés à limiter l'utilisation des produits phytosanitaires et des engrais de synthèse et à optimiser l'irrigation.

Les aides totales annoncées par le ministre de l'Agriculture Julien Denormandie en 2021, s'élèvent à 400 millions d'euros, dont 100 millions d'euros consacrés aux producteurs de fruits et légumes. Les niveaux de financement proposés par cette vague sont de 20, 30, ou 40 % selon le matériel. Le délai d'exécution est fixé à 18 mois à compter de la date d'autorisation d'achat. Ces subventions seront attribuées dans la limite des crédits disponibles. (Lévêque, 2023)

9 solutions subventionnées à 40 %, L'enjambeur viticole électrique ALPO (Sabi Agri) est un de ces solutions subventionnées. (Lévêque, 2023)

L'enjambeur ALPO 50 CV coûte 140 000 €, dont 40 % sont subventionnés, ce qui va coûter finalement 84 000 € aux viticulteurs. L'obtention de la subvention n'étant pas automatique, les deux coûts vont être pris en compte (140 000 € et 84000 €) dans la suite de cette étude.

L'enjambeur Laboureur 56 CV de la Société GRV coûte 100 000 € selon le concessionnaire OUVRARD.

Pour faire la simulation, il faut prendre en compte les coûts fixes et les coûts variables.

## 1. Coûts fixes

Ce sont des coûts non variables lors de l'utilisation de la machine. Il faut tenir compte de l'amortissement, de l'intérêt, de l'assurance et du remisage. D'autre part, les coûts fixes par unité de travail effectué diminuent avec l'augmentation du nombre annuel d'heures utilisées ou d'acres plantées. (Van kempen, 2015)

### a. Coût d'amortissement

La charge annuelle la plus importante d'un matériel agricole est le taux d'amortissement ; il comporte l'usure et la dépréciation du matériel pendant chaque année d'utilisation. Il s'agit d'une provision pour le renouvellement du matériel. La durée d'amortissement peut être estimée en fonction du type de matériel et de son utilisation.

La dépréciation des matériels neufs est analysée pour estimer la valeur résiduelle dans le temps pour une utilisation normale. Par exemple, la dépréciation pour le tracteur est principalement liée au nombre d'heures d'utilisation. (Van kempen, 2015)

Une étude de de la Cuma Ouest a montré que la durée d'amortissement d'un tracteur est évaluée à 7 ans d'utilisation, et que le taux de dépréciation est de 19 %. (Cuma, 2015)

En considérant les mêmes conditions de travail pour les deux enjambeurs, pour calculer la valeur résiduelle d'un enjambeur, la formule suivante peut être utilisée :

Valeur résiduelle = coût d'achat  $\times$  (1 - taux de dépréciation) <sup>7</sup>

Valeur résiduelle de l'ALPO = 140 000  $\times$  (1 - 19 %) <sup>7</sup> = 32027,5 €

Valeur résiduelle du Laboureur = 100 000  $\times$  (1 - 19 %) <sup>7</sup> = 22876,79 €

Base amortissable = Valeur d'achat - valeur résiduelle

Durée d'amortissement = Durée d'utilisation

Amortissement = Base amortissable / Durée d'amortissement. (Van kempen, 2015)

Tableau 12 : Calcule le coût d'amortissement

	Laboureur	ALPO sans Subvention	ALPO avec subvention
<b>Valeur d'achat</b>	100000	140000	84000
<b>Valeur résiduelle</b>	22876,8	32027,5	32027,5
<b>Durée d'utilisation</b>	7	7	7
<b>Base Amortissable</b>	77123,2	107972,5	51972,5
<b>Amortissement</b>	11017,6	15424,6	7424,6
<b>Valeur nette comptable</b>	22876,8	32027,5	32027,5

b. Les frais d'intérêt

Le montant des frais d'intérêt s'applique au prêteur ou à l'intérêt sur le capital investi dans la machine.

Il serait judicieux de corriger le taux d'intérêt en fonction de l'inflation, car l'inflation réduit le coût réel de l'investissement dans la machinerie agricole. Si la moyenne d'intérêt est de 5 % et que le taux d'inflation est de 2 %, la valeur corrigée ou le réel est de 3 %.

Il existe une méthode qui peut regrouper l'amortissement et les frais d'intérêt dans un seul calcul. Cette méthode s'appelle le recouvrement du capital.

Recouvrement du capital = (amortissement total x facteur de recouvrement du capital) + (valeur de reprise x taux d'intérêt)

Facteur de recouvrement du capital : Du ANNEXE N1, 3 % d'intérêt sur 5 ans

Tableau 13 : Calcul du coût de recouvrement du capital.

	Laboureur <sup>56</sup>	ALPO sans subvention	ALPO avec subvention
<b>Amortissement total</b>	77123,2	107972,5	51972,5
<b>Facteur de recouvrement du capital</b>	0,218	0,218	0,218
<b>Valeur de reprise</b>	22876,8	32027,5	32027,5
<b>Taux d'intérêt</b>	3%	3%	3%
<b>Recouvrement du capital €/an</b>	17499,2	24498,8	12290,8

c. Les frais d'assurance et de remisage

Les frais d'assurance et de remisage d'une machine agricole sont considérés comme une partie faible par rapport aux autres charges fixes. En règle générale, les frais annuels de remisage et d'assurance, normalement, représentent 1 % du prix d'achat de la machine. (Molenhuis, 2020)

Pour Laboureur :  $1 \% * 100\ 000 = 1000 \text{ €/an}$

Pour ALPO :  $1 \% * 140\ 000 = 1400 \text{ €/an}$

## 2. Les charges variables:

Les charges variables augmentent avec l'utilisation de la machine. Elles englobent les frais de réparation, le carburant et les lubrifiants, ainsi que la main-d'œuvre. (Molenhuis, 2020)

### a. Les frais de réparation :

Les frais de réparation au début de la vie du tracteur sont réduits, ils augmentent avec son utilisation.

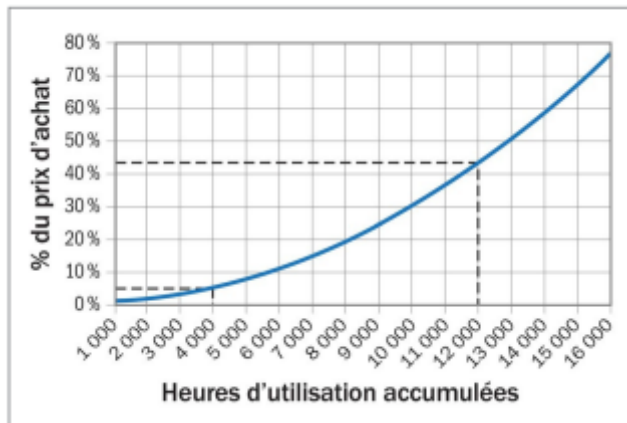


Figure 17 : Coûts de réparation accumulés pour un tracteur à 4 roues motrices. Source : American Society of Agricultural and Biological Engineers Standards, 2015

Comme la figure le montre, le coût de réparation est de 4,8 % du prix d'achat pendant les premières 4000 heures d'utilisation, tandis que pour 12000 heures d'utilisation, la courbe grimpe pour atteindre 42,3 % du prix d'achat.

Pour l'enjambeur thermique Laboureur :

Le prix d'achat : 100 000 €

L'utilisation prévue est de 300 h / an sur 10 ans pour un total de 3000 heures, et les frais de réparation sont de 3,6 % du prix d'achat =  $100\ 000 * 3,6 \% = 3600 \text{ €}$ .

Pour le cas de l'enjambeur électrique ALPO :

Les enjambeurs électriques devraient présenter un faible niveau de maintenance. Il n'y a pas de filtres à changer hors ceux de la cabine, et très peu de pièces d'usure car très peu de pièces en mouvement. (X-Media, 2016)

Si l'enjambeur électrique est considéré comme un enjambeur thermique. Compte tenu du fait que l'enjambeur électrique ne nécessite qu'une dizaine de pièces détachées contre un millier pour les véhicules thermiques et qu'il n'y a pas non plus de moteur à combustion, ni de boîte à vitesse, la réparation et la révision de ce type de machine sont réduites de 20 à 30 % par rapport à l'équivalent thermique.

On peut déduire que le coût de réparation de l'enjambeur électrique ne doit pas dépasser :  $3600 - (3600 * 30 \%) = 2520 \text{ €}$  théoriquement. (Ravaloson, 2019)

b. Les frais de carburant et de lubrifiants :

La consommation d'énergie :

La meilleure source pour connaître la consommation d'énergie est le constructeur ou le concessionnaire. Sinon, la consommation de la machine peut être calculée directement en utilisant la machine durant une heure de travail puis le carburant restant est soustrait du total dans le réservoir avant de commencer le calcul.

Le prix de 1 litre de gasoil non routier selon les données de Global Petrol Prices au 27/08/2023 est de 1,35 €. (PrixFioul, 2023)

La consommation du Laboureur est 4 L/h

Le prix de 1 kWh selon EDF au 21/07/2023 est de 0,1464 €. (Dusanter, 2023)

Pour l'enjambeur électrique, la consommation de l'énergie est calculée à partir du nombre de kWh consommé sur la borne de recharge pour une recharge complète. Dans le cas de l'enjambeur ALPO, elle est de 50 kWh. Donc, la consommation de la machine est calculée à partir de cette valeur divisée par l'autonomie de l'enjambeur qui se situe entre 6 et 10 heures, soit une moyenne de 8 heures de travail.

La consommation d'ALPO est donc de  $50/8 = 6,25$  kW pour une heure de travail.

*Tableau 14 : Le coût annuel de l'utilisation des deux types d'enjambeur.*

	Laboureur 56	ALPO
Consommation gasoil	4 L/h	N/A
Consommation d'électricité	N/A	6,25 kW
Prix de 1 litre de gasoil	1,35 €	N/A
Prix de 1 kW	N/A	0,1464 €
Le coût d'une heure	5,4 €	0,915 €
<b>Le coût annuel (300 h/an)</b>	<b>1620 €</b>	<b>274,5 €</b>

Les lubrifiants :

Selon les données du concessionnaire OUVRARD, le Laboureur présente un coût de 1500 € par an pour la vidange. Il est vrai que l'ALPO n'a pas besoin de vidange, mais plutôt de graissage.

Les frais annuels de carburant et lubrifiants pour le Laboureur =  $1620 + 1500 = 3120$  €

Les frais annuels de carburant et lubrifiants pour l'ALPO = 274,5 €

3. Les charges totales pour un tracteur enjambeur :

*Tableau 15 : Charge totale pour les tracteurs enjambeurs*

Charges annuelles			Laboureur56	ALPO sans subvention	ALPO avec subvention
	Frais d'amortissement	Recouvrement du capital	17499,16 €/an	24498,83 €/an	12290,8 €/an
	Frais d'intérêt				

Charges fixes par an	Frais d'assurance et de remisage	1000 €/an	1400 €/an	1400 €/an
Charges variables par an	Frais de réparation et entretien	3600 €/an	2520 €/an	2520 €/an
	Frais de carburants et lubrifiants	3120 €/an	274,5 €/an	274,5 €/an
Total des charges		25219,16 €/an	28693,33 €/an	16485,3 €/an

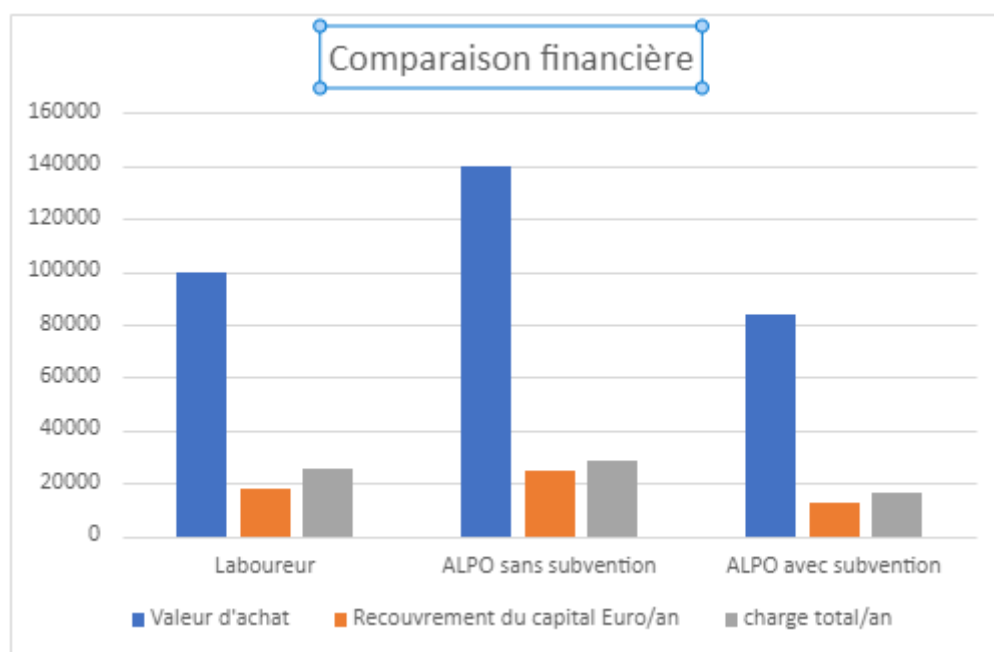


Figure 18 : Comparaison financière entre l'enjambeur thermique et électrique (sans et avec subvention).

Les charges variables pour un enjambeur électrique sont plus basses que pour un enjambeur thermique. Cela signifie que le moteur électrique est efficace et nécessite peu de réparation et d'entretien. De plus, l'énergie utilisée (électricité) est moins chère que le diesel pour l'enjambeur thermique. Cependant, le coût d'achat d'un enjambeur électrique reste plus élevé et affecte les charges fixes.

## VII. Impact social:

Remplacer un enjambeur thermique par un électrique, ou ajouter un enjambeur électrique au parc de machines d'un viticulteur est un défi pour un nouveau constructeur de machines agricoles dans la mesure où il propose une idée très innovante, notamment dans le domaine du matériel viticole.

Pour faire connaître ses nouveaux produits, Sabi-Agri a participé aux événements comme SITEVI et les manifestations organisées par les chambres d'agriculteurs. De plus, la société a des points revendeurs comme : Richy – Agriviti – Alabeurth- Guenon, qui sont répartis en France comme indiqué sur la carte dans l'ANNEXE N2.



Un enjambeur électrique avec zéro émission de CO<sub>2</sub> lors de l'utilisation, était un objectif primordial pour rentrer dans ce domaine. Néanmoins, quels sont les risques et avantages de cet enjambeur d'une manière analytique ainsi que les commentaires des utilisateurs de cette machine ?

### 1. Les risques liés à l'utilisation d'un enjambeur électrique

Étant donné que les batteries des véhicules électriques présentent un risque qui n'est pas négligeable, les risques pour un enjambeur électrique peuvent être classés dans trois groupes différents :

#### a. Risques induits par des problèmes électriques

- Chocs électriques à la recharge :

Pour recharger un véhicule électrique, il est nécessaire d'avoir des tensions élevées de 110-240 V. Cela met les utilisateurs en danger quand ils branchent, débranchent et manipulent les câbles.

Les câbles et l'équipement de charge peuvent être touchés par de nombreux dommages, par exemple : les dommages liés à l'usure du câblage et des fiches, le frottement des câbles, le traînage et les conditions météorologiques. Tous ces facteurs augmentent le risque de choc électrique. (Inrs, 2023)

- Court-circuit:

La conception légère des batteries lithium-ion avec une grande capacité de stockage d'énergie les rend susceptibles d'être endommagées par une surchauffe ou lorsqu'elles sont soumises à des températures élevées par une réaction d'emballement thermique.

En cas de court-circuit dans un véhicule électrique, l'électrolyte liquide inflammable contenue dans les batteries lithium-ion peut provoquer une boule de feu spontanée à haute tension, brûlant à des températures extrêmement élevées et libérant de grandes quantités de gaz toxiques. (Inrs, 2023)

#### b. Risques de positionnement

- Trébucher sur les câbles de charge
- Collisions avec des piétons et des véhicules

#### c. Risques liés au renversement de l'enjambeur

Les causes de renversement d'un enjambeur :

- Le centre de gravité pour les tracteurs enjambeurs est plus élevé que celui des autres véhicules.
- Le travail dans les pentes et les dévers.
- Le sol glissant à cause de fortes précipitations.
- La vitesse de travail élevée.
- Le travail dans des parcelles se terminant par un talus ou un fossé. (La vigne, 2017)

La conception d'ALPO avec un centre de gravité bas à 103 cm permet de stabiliser l'enjambeur durant le travail dans les parcelles et sur la route. Les utilisateurs d'ALPO ont été interrogés sur leurs avis lors de l'utilisation de l'enjambeur selon une grille de questions.

## 2. Enquête utilisateur pour l'enjambeur électrique ALPO

### Informations sur l'exploitation :

1. Quel est le nom de votre exploitation ?
2. Quelle est la surface de votre exploitation en ha ?
3. Combien d'enjambeurs avez-vous ?
4. Pourquoi avez-vous décidé de remplacer votre enjambeur thermique par un enjambeur électrique ?

### Informations sur ALPO :

1. Comment avez-vous connu l'enjambeur ALPO ?
2. Depuis combien de temps avez-vous l'ALPO ?
3. Combien d'heures par an utilisez-vous l'ALPO ?
4. Quels outils de travail du sol utilisez-vous sur l'ALPO ?
5. Quelle est la puissance de votre enjambeur ALPO en CV ?
6. Quel est le temps de recharge de votre enjambeur ALPO ?
7. Quelle est l'autonomie de votre enjambeur ALPO en heures ?

### Quel est votre avis sur l'utilisation de l'ALPO ?

1. Comment évaluez-vous le confort d'ALPO ?
2. Comment évaluez-vous la conduite d'ALPO ?
3. Comment évaluez-vous le bruit du moteur de l'ALPO ?
4. Comment évaluez-vous la vibration d'ALPO ?
5. Comment évaluez-vous la sécurité d'ALPO ? Sur la route et sur les parcelles ?
6. Comment évaluez-vous l'ALPO ? Stabilité ? Maniabilité ? Visibilité ?
7. Comment évaluez-vous l'ALPO dans les pentes ?
8. Que pensez-vous de l'entretien ? Quelle est sa fréquence ?

## 3. Résultats

L'enquête a été envoyée à 9 viticulteurs qui disposent d'un enjambeur ALPO. Leurs noms nous ont été communiqués par le commercial de Sabi Agri. L'enquête a été envoyée via un lien sur les boîtes mail des viticulteurs. 4 sur 9 ont répondu à cette enquête. 3 en Bourgogne et 1 en Champagne. Ils ont des surfaces d'exploitation entre 7,5 et 18 ha, et un parc d'enjambeurs compris entre 2 et 4.

Selon eux, les avantages de posséder un enjambeur électrique sont les suivants :

- Bruit du moteur réduit.
- Poids léger.
- Vibrations éliminées.
- Tassement du sol réduit.
- Entretien de la machine plus simple.
- Matériel plus économe, et plus durable.
- Confort de travail.

- Indépendance énergétique.
- Propreté.

Les outils de travail du sol utilisés par les viticulteurs sur l'ALPO :

- Griffage
- Intercep mécanique, hydraulique
- Disque orientable
- Disques pulvés
- Des outils de Belhomme

L'enjambeur roule entre 150 et 450 h/an, il a une autonomie de 6 à 12 h de travail selon le travail effectué. Le temps de recharge est en moyenne de 2 heures.

En demandant leurs avis pendant l'utilisation de l'enjambeur :

- Sur le confort :

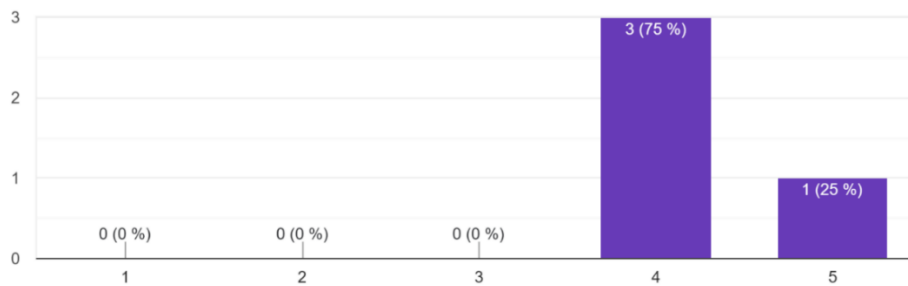
Comment évaluez-vous le confort d'Alpo



- Sur la conduite :

Comment évaluez-vous la conduite d'Alpo

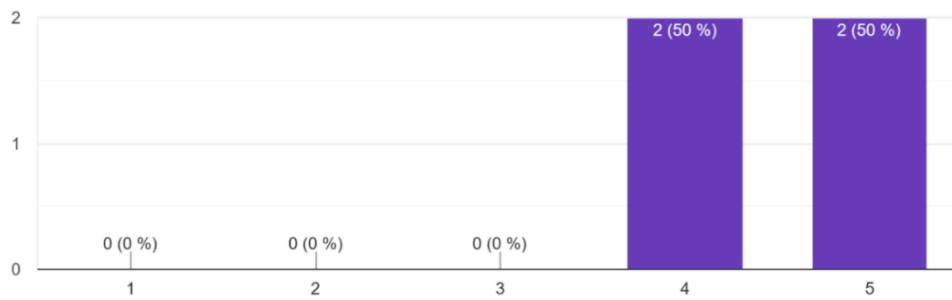
4 réponses



- Sur le bruit du moteur :

### Comment évaluez-vous le bruit de moteur d'Alpo

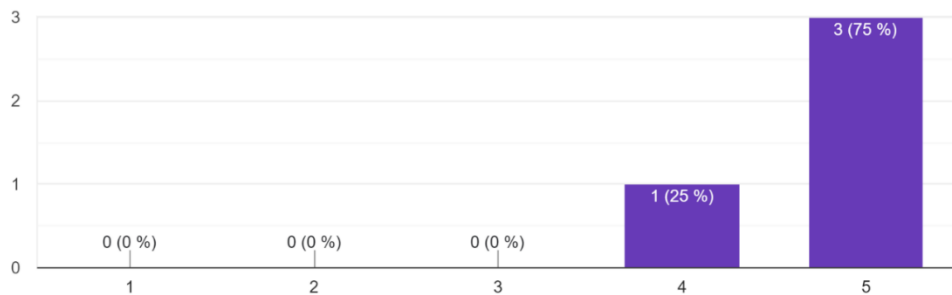
4 réponses



### - Sur la vibration :

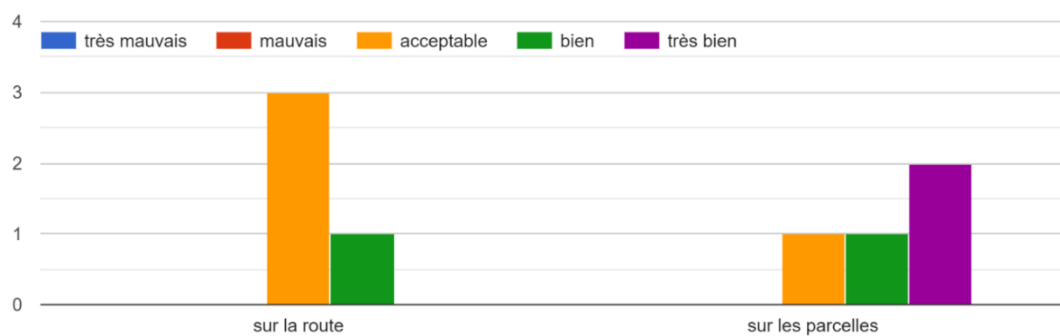
#### Comment évaluez-vous la vibration d'Alpo

4 réponses



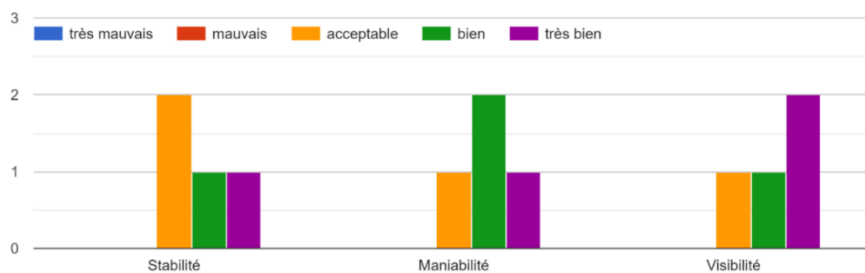
### - Sur la sécurité sur la route et dans la parcelle :

#### Comment évaluez-vous la sécurité d'Alpo?



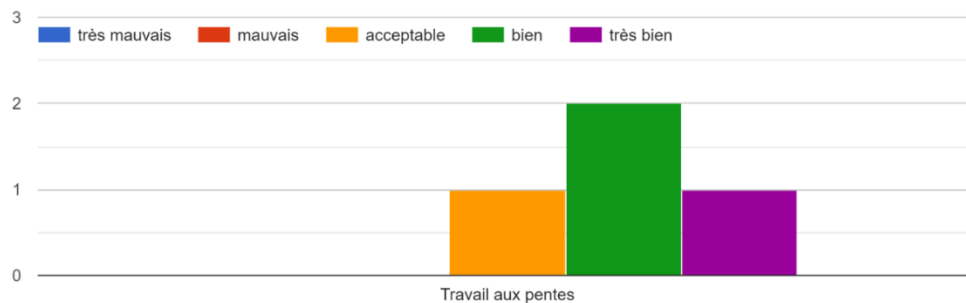
### - Sur la stabilité, – la maniabilité, – la visibilité :

Comment évaluez-vous l'Alpo?



### - Dans les pentes

Comment évaluez-vous l'Alpo dans les pentes ?



Les 4 viticulteurs interrogés sont d'accord sur le fait que l'entretien de l'enjambeur ALPO est facile, et qu'il n'a besoin que de graissage et de vérifier les visseries de temps en temps.

## VIII. Conclusion

Dans cette étude, l'enjambeur électrique ALPO fabriqué par la société Sabi Agri a été évalué. L'évaluation est effectuée en termes techniques, en termes d'impact environnemental sur le cycle de vie de ce genre de machine, en comparaison avec un enjambeur thermique (Laboureur56) qui dispose d'une puissance et un poids proche de celui d'ALPO, et en termes économiques, pour savoir quel est l'enjambeur qui coûte le moins. Pour finir, une enquête sociale est envoyée aux utilisateurs d'ALPO pour recueillir leur avis sur ce nouveau produit, en tenant compte du faible nombre d'utilisateurs, ce qui entraîne une faible réponse statistique.

L'étude montre que le rendement d'un moteur électrique est plus important que celui d'un moteur thermique, mais les enjeux dans ce genre de machine qui marche avec une batterie est l'autonomie de la batterie et le temps nécessaire pour recharger la batterie. Ce qui n'est pas le cas avec l'enjambeur, car il ne parcourt pas beaucoup de kilomètres comme la voiture, et n'a pas besoin de travailler à grande surface comme les tracteurs en grande culture.

En ce qui concerne l'impact environnemental, et pour comparer les deux enjambeurs, une analyse du cycle de vie est effectuée pour chaque enjambeur. La phase d'extraction et de fabrication est la plus polluante, la batterie lithium-ion avec le moteur électrique émettent 3399,67 Kg CO<sub>2</sub>. Tandis que le moteur diesel et la batterie de démarrage émettent 1679 Kg de CO<sub>2</sub>. La phase de production d'énergie et l'utilisation d'énergie n'est pas négligeable. Pour produire 1 kWh d'électricité, il faut 0,057 kg CO<sub>2</sub> pour le mix électrique français, alors que pour produire un litre de diesel, il faut 0,65 kg de CO<sub>2</sub>. L'enjambeur électrique ALPO émet 2,85 kg de CO<sub>2</sub> pendant la phase d'utilisation et la phase de production d'énergie, tandis que l'enjambeur thermique Laboureur émet 104 kg de CO<sub>2</sub>.

L'étude économique est réalisée pour analyser les coûts de chaque enjambeur. L'enjambeur électrique est plus onéreux que l'équivalent thermique, ce qui rend les charges fixes plus élevées pour l'enjambeur ALPO en comparaison avec le Laboureur 56. En ce qui concerne les charges variables, l'enjambeur électrique est plus économique, car il n'a pas besoin de répartition et les frais d'électricité sont plus faibles. L'enjambeur ALPO est un produit subventionné par l'Etat sous conditions, les deux cas (avec et sans subventions) ont donc été étudiés.

Enfin, l'étude sociale sur l'enjambeur ALPO a montré que l'utilisation de l'enjambeur électrique est plus facile. En plus il est économe en énergie, n'a pas besoin d'entretien, silencieux, et a un tassement de sol réduit. Cependant, les années d'utilisation de cet enjambeur (en moyenne pour les viticulteurs interrogés est deux ans) sont peu, car il est un nouveau produit sur le marché.

## Liste de figures :

Figure 1 : VitiLab et Vinipôle.....	2
Figure 2 : Le convertissement de type de courant.....	5
Figure 3 : La différence entre kW et kWh. (Le Flem et Bubendorff, 2020) .....	5
Figure 4 : Principe et fonctionnement de la batterie Lithium -ion. (Darding, 2021) .....	8
Figure 5 : type de cellules de batterie. (Darding, 2021).....	8
Figure 6 : Enjambeur ALPO.....	11
Figure 7 : Courbe Puissance/Couple pour le moteur thermique et électrique. (Fiche Auto, 2019) .....	14
Figure 8 : Courbe moteur thermique                      Courbe moteur électrique. (Fiche Auto, 2019)	15
Figure 9 : Puissance moteur électrique. (DUPAS, 2016) .....	16
Figure 10 : Courbe efficacité de moteur. (DUPAS, 2016) .....	16
Figure 11 : porte- outil à pousser. (Maté Vi, 2023a) .....	18
Figure 12 : porte- outil à tirer. (Maté Vi, 2023a).....	19
Figure 13 : Répartition des secteurs agricoles selon leurs émissions de gaz à effet de serre. (Rakotonavahy, 2022) .....	21
Figure 14 : Les étapes de l'extraction et du raffinage du lithium. (Langlois, 2023).....	23
Figure 15 : Les composants d'un moteur électrique. (Solomon et al., 2020) .....	25
Figure 16 : Emission CO2 pour produire 1 kWh dans les pays d'UE. (SDES, 2021) .....	28
Figure 17 : Coûts de réparation accumulés pour un tracteur à 4 roues motrices. Source : American Society of Agricultural and Biological Engineers Standards, 2015 .....	34
Figure 18 : Comparaison financière entre l'enjambeur thermique et électrique (sans et avec subvention. ....	36



Liste de tableaux :

Tableau 1 : Répartition des premières immatriculations d'enjambeurs vigneron par marque (2018- 2022) AXEMA. SIV-DIVA. (Vimond, 2023) .....	4
Tableau 2 : Emission de CO2 par tonne produite de métal. (Bueb et To, 2020).....	23
Tableau 3 : Extraction du lithium. ....	23
Tableau 4 : la production de graphite et l'émission du CO2.....	24
Tableau 5 : Composants de la batterie lithium-ion et l'émission CO2. (Bhutada, 2022).....	25
Tableau 6 : Emission CO2 en kg pour un moteur électrique.....	26
Tableau 7: Émission CO2 en kg pour extraire le plomb pour une batterie. (Robertson, 2023) .....	26
Tableau 8 : Emission amont pour le diesel en GJ PCI (ADEME, 2023) .....	27
Tableau 9 : Emission amont et combustion pour le diesel en GJ PCI. (ADEME, 2023).....	27
Tableau 10 : l'émission total CO2 pour le diesel en différent unité. (ADEME, 2023).....	28
Tableau 11 : Total émission CO2 en kg.....	30
Tableau 12 : Calcule le coût d'amortissement.....	33
Tableau 13 : Calcul du coût de recouvrement du capital. ....	33
Tableau 14 : Le coût annuel de l'utilisation des deux types d'enjambeur.....	35
Tableau 15 : Charge totale pour les tracteurs enjambeurs.....	35

## Bibliographie :

**ADEME.** 2023. *Base Empreinte®*. file:///C:/Users/User/Downloads/Base-Carbene-Documentation-generale-v23-0.pdf (Consulté le 25 août 2023).

**Aquitaine T.** 2020. *3 choses à savoir sur le rendement des moteurs électriques*. <https://www.transmission-aquitaine.com/3-choses-a-savoir-sur-le-rendement-des-moteurs-electriques> (Consulté le 9 août 2023).

**Ayoun L.** 2021. *Quelle est l'empreinte carbone d'une voiture thermique vs électrique ?* <https://www.hellocarbo.com/blog/calculer/empreinte-carbone-voiture/> (Consulté le 25 août 2023).

**Babled A.** 2022. *Le recyclage de batterie de voiture électrique*. <https://www.beev.co/voitures-electriques/recyclage-batterie-voiture-electrique/> (Consulté le 26 août 2023).

**Benjamin.** 2019. *Bielle origine ou bielle forgée ? Avantages ? Comment les choisir ? Bielle sur mesure ?* <https://www.mespiecesauto.com/bielle-origine-ou-bielle-forgee-avantage-comment-les-choisir-a-quoi-faire-attention/> (Consulté le 23 août 2023).

**Bhutada G.** 2022. *The Key Minerals in an EV Battery*. <https://elements.visualcapitalist.com/the-key-minerals-in-an-ev-battery/> (Consulté le 2 septembre 2023).

**Bieuville B.** 2023a. *ACV (Analyse de Cycle de Vie) : définition, exemples et explications*. <https://www.sami.eco/blog/acv-analyse-de-cycle-de-vie> (Consulté le 22 août 2023).

**Bieuville B.** 2023b. *Bilan Carbone d'une Voiture Électrique : mythes et réalité*. <https://www.sami.eco/blog/bilan-carbone-voiture-electrique> (Consulté le 22 août 2023).

**Bizot J.-Y.** 2023. *Les Leviers Mobilisable Pour Reduction son empreinte Carbone.pdf*.

**Bobard.** 2023. *Notre histoire*. <http://www.bobard.com/notre-societe/notre-histoire/> (Consulté le 8 août 2023).

**Boéchat S.** 2012. *Choix d'un tracteur : Caractéristiques du moteur*.

**Bourgeois C.** 2019. *Un enjambeur électrique adapté à toutes les vignes*. <https://www.vitisphere.com//actualite-90687-un-enjambeur-electrique-adapte-a-toutes-les-vignes.html> (Consulté le 8 août 2023).

**Bourma F.** 2020. *Éléments constitutifs d'un moteur diesel.* <https://www.piecetrip.com/2019/01/elements-constitutifs-dun-moteur-diesel.html> (Consulté le 23 août 2023).

**Bueb J. et To E.** 2020. *Comment évaluer l'externalité carbone des métaux.* <https://www.strategie.gouv.fr/publications/evaluer-lexternalite-carbone-metaux> (Consulté le 22 août 2023).

**Chagnes A.** 2022a. Enjeux dans le recyclage des batteries lithium-ion. *Élaboration et recyclage des métaux*, DOI : 10.51257/a-v2-m2460

**Chagnes A.** 2022b. Enjeux dans le recyclage des batteries lithium-ion. *Élaboration et recyclage des métaux*, DOI : 10.51257/a-v2-m2460

**City of winnipeg.** 2023. *Appendix 7.pdf.* [https://legacy.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012\\_Appendix\\_H-WSTP\\_South\\_End\\_Plant\\_Process\\_Selection\\_Report/Appendix%207.pdf](https://legacy.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-WSTP_South_End_Plant_Process_Selection_Report/Appendix%207.pdf) (Consulté le 28 août 2023).

**Cniv.** 2019. *Chiffres clés.* <https://www.intervin.fr/etudes-et-economie-de-la-filiere/chiffres-cles> (Consulté le 8 août 2023).

**Content S.** 2021. *Natural Graphite: The Material for a Green Economy.* <https://elements.visualcapitalist.com/natural-graphite-the-material-for-a-green-economy/> (Consulté le 1 septembre 2023).

**Counts T.W.** 2023. *Environmental Impact of Steel.* <https://www.theworldcounts.com/challenges/planet-earth/mining/environmental-impact-of-steel-production> (Consulté le 1 septembre 2023).

**Cuma O.** 2015. *methode\_amortissement\_cumaouest.pdf.* [http://www.ouest.cuma.fr/sites/default/files/methode\\_amortissement\\_cumaouest.pdf](http://www.ouest.cuma.fr/sites/default/files/methode_amortissement_cumaouest.pdf) (Consulté le 27 août 2023).

**Darding G.** 2021. *Technique : batterie Li-ion.* <https://www.guillaumedarding.fr/technique-batterie-li-ion-5031187.html> (Consulté le 8 août 2023).

**Dumont J.** 2023. *Empreinte carbone : calculer, réduire et compenser son impact.* <https://greenly.earth/fr-fr/blog/guide-entreprise/empreinte-carbone-definition-methode-calcul> (Consulté le 22 août 2023).

**DUPAS G.** 2016. *Courbes de Couple, Rendement, Cos Phi et Mesure de Vitesse d'un MAS.* <https://www.tecnipass.com/cours-materiels-machines-moteur.asynchrone?page=6> (Consulté le 21 août 2023).

**Dusanter C.** 2023. *Prix de l'électricité : prix du kWh en 2023 et évolutions.* <https://opera-energie.com/prix-electricite-prix-du-kwh/> (Consulté le 27 août 2023).

**Dutheil C.** 2022. *Prix d'une batterie de voiture électrique.* <https://www.maif.fr/vehicule-mobilite/guide-voiture-electrique/prix-batterie> (Consulté le 8 août 2023).

**EDF.** 2021. *Voiture électrique : sous quelle puissance fonctionne-t-elle ?* <https://izi-by-edf.fr/blog/voiture-electrique-voltage/> (Consulté le 28 août 2023).

**Fiche Auto.** 2021. *Composition d'une batterie au lithium / Composants d'une batterie lithium.* <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/voiture-electrique/s-2506-composition-d-une-batterie-au-lithium.php> (Consulté le 8 août 2023).

**Fiche Auto.** 2019. *Différences entre moteur électrique et moteur thermique.* <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-2233-differences-entre-moteur-electrique-et-moteur-thermique.php> (Consulté le 9 août 2023).

**Fiche Auto.** 2023. *Fonctionnement d'une voiture électrique / Architecture d'une voiture électrique.* <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1946-fonctionnement-d-une-voiture-electrique.php> (Consulté le 8 août 2023).

**Fournier C.** 2019. *Quels secteurs émettent le plus de CO2 en France et dans le monde ?* <https://youmatter.world/fr/emissions-co2-par-secteur-monde-france/> (Consulté le 22 août 2023).

**Franceinfo.** 2020. *VIDEO. Lithium, cobalt, manganèse, cuivre, aluminium : produire une voiture électrique est-il vraiment écologique ?* [https://www.francetvinfo.fr/meteo/climat/video-lithium-cobalt-manganese-cuivre-aluminium-produire-une-voiture-electrique-est-il-vraiment-ecologique\\_4183381.html](https://www.francetvinfo.fr/meteo/climat/video-lithium-cobalt-manganese-cuivre-aluminium-produire-une-voiture-electrique-est-il-vraiment-ecologique_4183381.html) (Consulté le 23 août 2023).

**Gendre I.** 2023. *Empreinte carbone et comparatif par type de transport.* <https://greenly.earth/fr-fr/blog/actualites-ecologie/empreinte-carbone-comparatif-transport> (Consulté le 22 août 2023).

**Guillot J.D.** 2018. *Les actions de l'UE contre le changement climatique | Actualité | Parlement européen.*

[https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/8/story/20180703STO07129/20180703STO07129\\_fr.pdf](https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/8/story/20180703STO07129/20180703STO07129_fr.pdf) (Consulté le 8 août 2023).

**Hayez V.** 2021. *Moteur électrique intégré à la roue: la solution miracle?* <https://www.touring.be/fr/articles/moteur-electrique-integre-roue-solution-miracle> (Consulté le 21 août 2023).

**Houmy K. et Hassan II I.** 2017. *Mécanisation : Amélioration des performances du tracteur.* <https://www.agri-mag.com/2017/06/17/mecanisation-amelioration-performances-tracteur/> (Consulté le 21 août 2023).

**Inrs.** 2023. *Utilisation de batteries au lithium - Votre métier - INRS.* <https://www.inrs.fr/metiers/energie/utilisation-batteries-lithium.html> (Consulté le 27 août 2023).

**Jouart A.** 2021. *FAQ\_20220608\_bas\_carbone\_ACSE.pdf.* [https://grandest.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Grand-Est/049\\_Inst-Acal/RUBR-agro-environnement/ACSE\\_2020\\_2022/FAQ\\_20220608\\_bas\\_carbone\\_ACSE.pdf](https://grandest.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/049_Inst-Acal/RUBR-agro-environnement/ACSE_2020_2022/FAQ_20220608_bas_carbone_ACSE.pdf) (Consulté le 22 août 2023).

**Kia F.** 2023. *Temps de charge des véhicules électriques | Kia passe à l'électrique.* <https://www.kia.com/fr/mobilite-electrique/temps-de-charge-vehicules-electriques/> (Consulté le 8 août 2023).

**La vigne.** 2017. *Accident.pdf.* <https://www.vitisphere.com/images/magazine/Accident.pdf> (Consulté le 27 août 2023).

**Langlois P.** 2023. *Impacts de l'extraction et du raffinage du lithium sur l'environnement : 1 – Les méthodes traditionnelles.* <https://roulezelectrique.com/impacts-de-l'extraction-et-du-raffinage-du-lithium-sur-lenvironnement-1-les-methodes-traditionnelles/> (Consulté le 22 août 2023).

**Lara H.** 2021. *Batterie.* <https://www.automobile-propre.com/lexique/batterie/> (Consulté le 8 août 2023).

**Lara H.** 2022. *Une voiture électrique, comment ça fonctionne?* <https://www.automobile-propre.com/dossiers/le-fonctionnement-dune-voiture-electrique/> (Consulté le 8 août 2023).

**Le Flem M. et Bubendorff O.** 2020. *Puissance et temps de recharge : comment éviter les mauvaises surprises?* <https://blog.charge-map.com/fr/puissance-et-temps-de-recharge-eviter-mauvaises-surprises/> (Consulté le 8 août 2023).

**Légifrance.** 2022. *Article R311-1 - Code de la route - Légifrance.*

**Lévêque O.** 2023. *23 matériels subventionnés au titre de la « 3e révolution agricole » | L'Arboriculture fruitière.* <https://www.arboriculture-fruitiere.com/articles/vie-de-filiere/23-materiels-subventionnes-au-titre-de-la-3e-revolution-agricole> (Consulté le 27 août 2023).

**Lucas I. et Gajan A.** 2021. *Le recyclage des batteries Li-ion.* <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/electrochimie/le-recyclage-des-batteries-li-ion> (Consulté le 27 août 2023).

**Manini V.** 2023. Translated from the original manual in Italian language.

**Maté Vi.** 2023a. *Porte-outils - Maté Vi.* <https://www.matevi-france.com/viticulture/traction/tracteur-enjambeur/1838-porte-outils.html> (Consulté le 22 août 2023).

**Maté Vi.** 2023b. *Poste de conduite - Maté Vi.* <https://www.matevi-france.com/viticulture/traction/tracteur-enjambeur/1836-poste-de-conduite.html> (Consulté le 22 août 2023).

**Molenhuis J.R.** 2020. 20-008 – Comment calculer les coûts des machines agricoles.

**de Nadaillac C.** 2016. *Le T4E de Kremer roule sans un bruit.* <https://www.monviti.com/videos/viticulture/le-t4e-de-kremer-roule-sans-un-bruit> (Consulté le 8 août 2023).

**Noblet G.** 2021. *Empreinte environnementale, calcul des émissions de CO2.* <https://groupenoblet.com/empreinte-environnementale-calcul-des-emissions-de-co2/> (Consulté le 3 septembre 2023).

**Ooreka.** 2023a. *Batterie voiture électrique : types, fonctionnement et coût - Ooreka.* [//entretien-voiture.ooreka.fr/astuce/voir/511041/batterie-de-voiture-electrique](https://entretien-voiture.ooreka.fr/astuce/voir/511041/batterie-de-voiture-electrique) (Consulté le 8 août 2023).

**Ooreka.** 2023b. *Volant moteur : définition, rôle et maintenance - Ooreka.* [//entretien-voiture.ooreka.fr/astuce/voir/545799/volant-moteur](https://entretien-voiture.ooreka.fr/astuce/voir/545799/volant-moteur) (Consulté le 23 août 2023).

**Opel.** 2023. *La conduite électrique | Comment fonctionne un véhicule électrique | Opel France.* <https://www.opel.fr/mobilite-electrique/electrique-tout-simplement/connaissances-techniques.html> (Consulté le 8 août 2023).

**Pilven M.** 2020. *Voitures électriques - kW et kWh, quelles sont les différences ?* <https://insideevs.fr/features/396040/kw-kwh-differences-puissance-energie/> (Consulté le 21 août 2023).

**Pollien S.** 2022. *Batterie de voiture électrique : sa composition.* <https://izi-by-edf.fr/blog/composition-batterie-voiture-electrique/> (Consulté le 8 août 2023).

**Pons M.-N., Andre M., Laforest V., Blanc I., et Boulch D.L.** 2010. Denis ABLITZER Professeur, Ecole des Mines de Nancy.

**Portail F.** 2020. *Alpo bouscule les codes du tracteur.* <https://www.materielagricole.info/decouvertes/article/729205/alpo-bouscule-les-codes-du-tracteur> (Consulté le 31 août 2023).

**PrixFioul.** 2023. *Prix du Gazole Non Routier.* [https://prixfioul.fr/prix\\_du\\_gnr.php](https://prixfioul.fr/prix_du_gnr.php) (Consulté le 27 août 2023).

**Raillard N.** 2020. *2020-02-04\_Étude-de-l'impact-carbone-de-loffre-de-véhicules\_V1.pdf.* [https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2020/02/2020-02-04\\_%C3%89tude-de-l'impact-carbone-de-loffre-de-v%C3%A9hicules\\_V1.pdf](https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2020/02/2020-02-04_%C3%89tude-de-l'impact-carbone-de-loffre-de-v%C3%A9hicules_V1.pdf) (Consulté le 25 août 2023).

**Rakotonavahy I.** 2022. *L'empreinte carbone par secteur d'activités en France et dans le monde.* <https://www.hellocarbo.com/blog/calculer/empreinte-carbone-par-secteur/> (Consulté le 22 août 2023).

**Ravaloson M.** 2019. *Entretien voiture électrique : combien ça coûte et ce qu'il faut faire.* <https://selectra.info/energie/guides/conso/voiture-electrique/entretien> (Consulté le 27 août 2023).

**Renault.** 2021. *Tout ce que vous devez savoir sur un moteur de voiture électrique - Renault Group.* <https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/tout-ce-que-vous-devez-savoir-sur-un-moteur-de-voiture-electrique/> (Consulté le 8 août 2023).

**Robertson A.** 2023. *How Much Lead is in a Car Battery? (Surprising Facts Revealed) | Toolswweek.* <https://toolsweek.com/how-much-lead-is-in-a-car-battery/> (Consulté le 25 août 2023).

**Rouyer L.** 2020. *44 livret levier energie ACSE 2020 01.pdf.* [https://moselle.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/National/FAL\\_commun/publications/Grand-Est/44\\_livret\\_levier\\_energie\\_ACSE\\_2020\\_01.pdf](https://moselle.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Grand-Est/44_livret_levier_energie_ACSE_2020_01.pdf) (Consulté le 22 août 2023).



**SDES C. général au développement.** 2021. *Émissions de GES de l'industrie de l'énergie.* <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/10-emissions-de-ges-de-lindustrie-de-lenergie.php> (Consulté le 26 août 2023).

**Sensel M.** 2019. *Déterminer le rendement d'un moteur électrique.* <https://sensel-measurement.fr/fr/blog/determiner-le-rendement-d-un-moteur-electrique-n486> (Consulté le 9 août 2023).

**Solomon D., Gundabattini E., et Rassiah R.S.** 2020. Materials for lightweight electric motors – a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 906, p. 012020. DOI : 10.1088/1757-899X/906/1/012020

**Technipedia.** 2023. *Conception et principe de fonctionnement du vilebrequin.* <https://www.ms-motorservice.com/fr/technipedia/post/conception-et-principe-de-fonctionnement-du-vilebrequin/> (Consulté le 23 août 2023).

**Thompson J.** 2012. *Aluminum Vs. Steel Diesel Engine Pistons.* <https://www.motortrend.com/features/1211dp-aluminum-vs-steel-diesel-engine-pistons/> (Consulté le 3 septembre 2023).

**Tilve A.** 2023. *On a testé pour vous : l'enjambeur électrique Alpo.* <https://www.agri71.fr/articles/31/03/2023/On-a-teste-pour-vous-l-enjambeur-electrique-Alpo-91221/> (Consulté le 9 août 2023).

**Tristan.** 2019. *Les voitures anciennes moins polluantes que les voitures neuves ?* <https://sortiedegrange.com/les-voitures-anciennes-moins-polluantes-que-les-voitures-neuves/> (Consulté le 26 août 2023).

**Van kempen P.** 2015. *Methode\_comparative\_couts\_mecanisation.pdf.* [https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/National/FAL\\_commun/publications/National/Casdar/Methode\\_comparative\\_couts\\_mecanisation.pdf](https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/National/Casdar/Methode_comparative_couts_mecanisation.pdf) (Consulté le 27 août 2023).

**Vimond L.** 2023. *Immatriculations 2022 - Le marché des tracteurs enjambeurs disputé | Réussir Vigne.* <https://www.reussir.fr/vigne/immatriculations-2022-le-marche-des-tracteurs-enjambeurs-dispute> (Consulté le 8 août 2023).

**Volkswagen.** 2022. *Le voltage d'une voiture électrique influe sur la puissance de charge qu'une batterie est capable d'accepter, et donc sur la vitesse de charge.* <https://www.volkswagen.fr/app/faq/reponse/quel-est-le-voltage-d-une-voiture-electrique> (Consulté le 8 août 2023).

**Vulcan Energy.** 2021. *Zero Carbon Lithium™*. <https://v-er.eu/zero-carbon-lithium/> (Consulté le 22 août 2023).

**Westfall L.A., Cramer M.H., Davourie J., McGough D., et Ali M.** 2015. LIFE-CYCLE IMPACTS AND COSTS OF MANGANESE LOSSES AND RECOVERY DURING FERROMANGANESE PRODUCTION.

**X-Media.** 2016. *Ecoutez le silence!* <https://www.mon-viti.com/videos/viticulture/ecoutez-le-silence> (Consulté le 27 août 2023).

## ANNEXES :

### ANNEXE N1 : Facteur de recouvrement du capital. (Molenhuis, 2020)

**Tableau 2.** Facteurs de recouvrement du capital

Année	Taux d'intérêt													
	2 %	3 %	4 %	5 %	6 %	7 %	8 %	9 %	10 %	11 %	12 %	13 %	14 %	15 %
1	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15
2	0,515	0,523	0,530	0,538	0,545	0,553	0,561	0,568	0,576	0,584	0,592	0,599	0,607	0,615
3	0,347	0,354	0,360	0,367	0,374	0,381	0,388	0,395	0,402	0,409	0,416	0,424	0,431	0,438
4	0,263	0,269	0,275	0,282	0,289	0,295	0,302	0,309	0,315	0,322	0,329	0,336	0,343	0,350
5	0,212	0,218	0,225	0,231	0,237	0,244	0,250	0,257	0,264	0,271	0,277	0,284	0,291	0,298
6	0,179	0,185	0,191	0,197	0,203	0,210	0,216	0,223	0,230	0,236	0,243	0,250	0,257	0,264
7	0,155	0,161	0,167	0,173	0,179	0,186	0,192	0,199	0,205	0,212	0,219	0,226	0,233	0,240
8	0,137	0,142	0,149	0,155	0,161	0,167	0,174	0,181	0,187	0,194	0,201	0,208	0,216	0,223
9	0,123	0,128	0,134	0,141	0,147	0,153	0,160	0,167	0,174	0,181	0,188	0,195	0,202	0,210
10	0,111	0,117	0,123	0,130	0,136	0,142	0,149	0,156	0,163	0,170	0,177	0,184	0,192	0,199
11	0,102	0,108	0,114	0,120	0,127	0,133	0,140	0,147	0,154	0,161	0,168	0,176	0,183	0,191
12	0,095	0,100	0,107	0,113	0,119	0,126	0,133	0,140	0,147	0,154	0,161	0,169	0,177	0,184
13	0,088	0,094	0,100	0,109	0,113	0,120	0,127	0,134	0,141	0,148	0,156	0,163	0,171	0,179
14	0,083	0,089	0,095	0,101	0,108	0,114	0,121	0,128	0,136	0,143	0,151	0,159	0,167	0,175
15	0,078	0,084	0,090	0,096	0,103	0,110	0,117	0,124	0,131	0,139	0,147	0,155	0,163	0,171
16	0,074	0,080	0,086	0,092	0,099	0,106	0,113	0,120	0,128	0,136	0,143	0,151	0,160	0,168
17	0,070	0,076	0,082	0,089	0,095	0,102	0,110	0,117	0,125	0,132	0,140	0,149	0,157	0,165
18	0,067	0,073	0,079	0,086	0,092	0,099	0,107	0,114	0,122	0,130	0,138	0,146	0,155	0,163
19	0,064	0,070	0,076	0,083	0,090	0,097	0,104	0,112	0,120	0,128	0,136	0,144	0,153	0,161
20	0,061	0,067	0,074	0,080	0,087	0,094	0,102	0,110	0,117	0,126	0,134	0,142	0,151	0,160

Source : Edwards, William. *Estimating Farm Machinery Costs*, Université d'État de l'Iowa, 2015.

*ANNEXE N2 : les points revendeur de Sabi Agri.*

