



Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie
CVT - Consortium de Valorisation Thématique

EN²OR

Energies pour Engins Off-Road

Décembre 2018

AVERTISSEMENT

La méthodologie utilisée, ainsi que les résultats obtenus, relèvent de la seule responsabilité des rédacteurs qui ont réalisé l'étude. Ils n'engagent ni l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie (ANCRE), ni l'ensemble des organismes membres de l'Alliance. Les parties intéressées sont invitées, le cas échéant, à faire part de leurs commentaires au CVT Ancre.

Membres du comité de suivi scientifique

ANGELBERGER Christian (IFPEN)
CHABRELIE Marie-Françoise (CVT ANCRE)
HISSEL Daniel (CNRS, animateur GP6 Ancre)
LUCCHESI Paul (CEA, animateur GP6 Ancre)
PACAUD Pierre (IFPEN, animateur GP6 Ancre)
USTER Guillaume (IFSTTAR, animateur GP6 Ancre)

Équipe projet et Rédacteurs

RABEAU Fabien (IFPEN, coordinateur de l'étude)
DE MAGNEVAL Eliot (CVT ANCRE)
TIBERGHIEEN Pauline (CVT ANCRE)

La reproduction ou la présentation publique à des fins professionnelles, même partielle par quelque procédé que ce soit, est strictement interdite sans l'autorisation du directeur du CVT Ancre.

La reproduction de cette étude et/ou le transfert de fichier à des tiers sont interdits en respect du code de la propriété intellectuelle. Cette étude est strictement réservée au signataire de l'accord de confidentialité.

Adossé à l'Alliance, **le Consortium de Valorisation Thématique de l'Ancre** a pour objectif d'améliorer l'efficacité et le flux de transfert de technologies de la sphère publique vers les entreprises. Constituées de cartographies de brevets et de publications, d'enquêtes terrain auprès d'industriels français et étrangers et d'analyses de marché, **les études stratégiques mutualisées du CVT Ancre** ont pour but d'identifier des opportunités et de formuler des recommandations sur les filières à promouvoir. La synergie entre experts scientifiques de l'Ancre et analystes en intelligence économique et stratégie apporte une inégalable valeur ajoutée.

ÉTUDES STRATÉGIQUES DU CVT ANCRE EN COURS

- Etude prospective ANCRE / ATHENA
« Etude des conditions pour un développement soutenable de nouvelles technologies de l'énergie : la géothermie et le stockage de chaleur / froid dans le sous-sol »

Pour en savoir plus :

<https://www.allianceenergie.fr/cvt/etudes/>



Table des matières

Executive summary	5
Introduction	6
I. Domaine off-road : définition, normes et technologies	7
a. Définition d'un engin off-road	7
b. Secteurs off-road identifiés	7
c. Enjeux de réduction des émissions de polluants du secteur off-road.....	8
d. Normes d'émission du secteur off-road	8
II. Marché des engins off-road et ses acteurs.....	14
a. Volumes de vente des engins off-road	14
b. Taux d'électrification des engins off-road	18
c. Chaîne de valeur des secteurs agricole et chantier, mine & carrière.....	19
III. Potentiel d'électrification des engins off-road	23
a. Maturité des technologies.....	23
b. Besoins et attentes du client	28
c. Contexte politique et normatif.....	29
d. Infrastructures de recharge	30
e. Coût global de possession	33
f. Synthèse des véhicules à potentiel d'électrification.....	34
IV. Choix technologiques pour l'électrification	36
a. Systèmes de stockage de l'énergie	36
b. Motorisations.....	40
c. Chaîne de transmission.....	41
V. Modèles existants et réalisations techniques.....	42
a. Electrification	42
b. L'hybridation	47
Conclusions et recommandations	54
a. Conclusions	54
b. Entreprises cibles françaises.....	54
c. Recommandations	55

Table des Figures & Tableaux

Figure 1 : Les secteurs du domaine off-road.....	7
Figure 2 : exemples de consommation de véhicules off-road	8
Figure 3 : Evolution des normes anti-pollution du secteur off-road concernant les NOx, les HC et les particules (g/KWh), en fonction des catégories de puissance (P).....	10
Figure 4 : Normalized Speed and Torque over NRTC.....	11
Figure 5 : Fonctionnement du système EGR.....	12
Figure 6 : Part de chaque secteur dans les volumes de ventes totaux des engins off-road en France	14
Figure 7 : Volume de vente de machines agricoles en France (2015-2016).....	15
Figure 8 : Volumes de vente des machines de chantier, mines et carrières en France en 2016	16
Figure 9 : Positionnement dans l'UE de la France concernant la production d'équipements agricoles, de chantier, mines et carrières	17
Figure 10 : Taux d'électrification estimés des secteurs off-road.....	18
Figure 11 : Chaîne de valeur du secteur de l'agroéquipement	19
Figure 12 : Chaîne de valeur du secteur des engins de chantier, mine et carrière	21
Figure 13 : Puissances et autonomies requises en fonction des secteurs off-road.....	24
Figure 14 : Puissances et autonomies requises pour les engins agricoles	25
Figure 15 : Puissances et autonomies requises pour les engins de chantier	26
Figure 16 : Puissances et autonomies requises pour les engins de mines et carrières	27
Figure 17 : Limites d'émission imposées par la norme Stage V	30
Figure 18 : Possibilités d'électrification en fonction des types d'application	32
Tableau 1 : Potentiel d'électrification d'engins off-road du secteur de l'agroéquipement :	34
Tableau 2 : Potentiel d'électrification d'engins off-road des secteurs de l'équipement de chantier, des mines et des carrières :	34
Tableau 3 : Potentiel d'hybridation d'engins off-road du secteur de l'agroéquipement :	35
Tableau 4 : Potentiel d'hybridation d'engins off-road du secteur de l'équipement de chantier, mines et carrières :	35
Figure 19 : Comparaison des performances de différents types de batteries.....	36
Figure 20 : Evolution du prix des batteries li-ion, entre 2010 et 2025	37
Figure 21 : Comparaison de dispositifs de stockage d'énergie	39
Figure 22 : Comparaison d'un moteur thermique et d'un moteur électrique concernant la puissance et couple en fonction du régime moteur	43
Figure 23 : Tracteur e100 Vario présenté par Fendt.....	44
Figure 24 : Tracteur électrique ALPO de Sabi Agri.....	45
Figure 25 : Pelle électrique e12 de Mecalac.....	45
Figure 26 : Chargeuse de chantier électrique Kramer	46
Figure 27 : Balayeuse électrique 500 ze, Tennant.....	46
Figure 28 : Différents types d'architectures de véhicules automobiles hybrides	47
Figure 29 : Différentes architectures hybrides de chargeuses sur roues.....	48

Figure 30 : Typologie des véhicules hybride dans le domaine off-road.....	49
Figure 31 : Distribution de puissance du rouleau compresseur hybride Hamm avec entraînement Power Hybrid50	
Figure 32 : Types et nombre d'engins off-road hybridés	51
Figure 33 : Architecture de la chaîne de transmission de la pelle hybride Komatsu PC-200-8	52
Figure 34 : Pelle hydraulique hybride 336E H Caterpillar.....	53
Figure 35 : Chargeuse sur roues 644k de John Deere	53
Tableau 5 : Entreprises françaises du secteur des chantiers, mines et carrières pouvant être concernées par l'électrification d'engins off-road	54
Tableau 6 : Entreprises françaises du secteur agricole pouvant être concernées par l'électrification d'engins off-road	55

Executive summary

Les engins off-road couvrent différents besoins dans les domaines suivants : agriculture, paysagisme, manutention, chantier, exploitation minière, exploitation forestière, équipement aéroportuaire, maritime, ferroviaire et militaire. La grande majorité de ces engins off-road se propulsent ou travaillent grâce à un moteur thermique du fait de la facilité de stockage du carburant liquide et de ses spécificités intéressantes: forte densité d'énergie (Wh/kg) et forte densité de puissance (W/kg). Toutefois, les contraintes de dépollution devenant de plus en plus drastiques, voire certains usages ne tolérant pas l'émission de polluants, l'électrification de certains engins devient une alternative intéressante au moteur thermique seul.

Afin d'identifier les engins off-road qui seraient susceptibles d'être électrifiés à horizon 2025 et d'accompagner l'industrie française dans ce domaine, l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie [ANCRE] propose l'étude : «Energies pour Engins Off-Road» [EN²OR]. Cette étude donne une vision globale au regard des informations trouvées dans la littérature et des échanges obtenus avec les syndicats, fédérations, instituts ou industriels.

L'électrification du domaine off-road permettra, à terme, certains bénéfices tels que la réduction du bruit et des vibrations pour le confort de l'utilisateur et du milieu environnant. Il permettra normalement de réduire les intervalles de temps entre deux maintenances, le coût en consommation d'énergie et la durée des tâches réalisées afin d'augmenter le retour sur investissement. De plus, il permettra selon la solution technologique envisagée de limiter les émissions polluantes. En contrepartie, les solutions électrifiées pâtiront d'un coût à l'achat plus élevé et devront prouver leur fiabilité dans des environnements extrêmes et assurer une maturité technologique suffisante pour approcher certains marchés. Enfin, le domaine est actuellement peu qualifié en main d'œuvre afin d'assurer la maintenance des appareils, ce qui pénalise son déploiement.

Plusieurs entreprises françaises qui assemblent des engins auraient un intérêt à électrifier certaines applications si cela n'est pas déjà fait. Les principaux véhicules concernés sont : la balayeuse, le chargeur, la foreuse, le rouleau compresseur, le tracteur de faible puissance et la mélangeuse automotrice. En ce qui concerne les entreprises, il est possible de citer principalement: le groupe Fayat, Manitou, CEDRIS, GRV, FREMA, Pellenc, Lucas et Kuhn.

Enfin, un certain nombre de recommandations peuvent être formulées afin de contribuer à favoriser l'émergence de solutions électrifiées des engins off-road, en travaillant sur quatre thématiques : la recherche et le développement, les leviers financiers et économiques, les compétences requises et la communication.

Introduction

Les engins off-road couvrent différents besoins dans les domaines suivants : agriculture, paysagisme, manutention, chantier, exploitation minière, exploitation forestière, équipement aéroportuaire, maritime, ferroviaire et militaire. La grande majorité de ces engins off-road se propulsent ou travaillent grâce à un moteur thermique du fait de la facilité de stockage du carburant liquide et de ses spécificités intéressantes: forte densité d'énergie (Wh/kg) et forte densité de puissance (W/kg). Toutefois, les contraintes de dépollution devenant de plus en plus drastiques, voire certains usages ne tolérant pas l'émission de polluants, l'électrification de certains engins devient une alternative intéressante au moteur thermique seul.

Afin d'identifier les engins off-road qui seraient susceptibles d'être électrifiés à horizon 2025 et d'accompagner l'industrie française dans ce domaine, l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie [ANCRE] propose l'étude : «Energies pour Engins Off-Road» [EN²OR]. Cette étude donne une vision globale au regard des informations trouvées dans la littérature et des échanges menés avec les syndicats, fédérations, instituts ou industriels.

Cette synthèse abordera dans un premier temps l'état de l'art du domaine off-road avec une définition du périmètre de l'étude, un bref exposé des technologies utilisées et l'évolution des normes depuis les années 2000. Dans un second temps, une étude de marché et une chaîne de valeur sur certains secteurs seront présentées afin d'identifier les engins sur lesquels un développement technologique serait viable économiquement, aurait un intérêt pour réduire les émissions polluantes et identifierait l'ensemble des industriels français associés. Sur chaque engin des différents domaines étudiés, le potentiel d'électrification sera évalué au regard de cinq critères : la maturité des technologies, le besoin du client final, le contexte politique et normatif, les infrastructures de recharge et le coût global de possession. De cette analyse détaillée conjuguée à l'étude de marché découlera une synthèse des engins à potentiel qui sera comparée aux réalisations que certains constructeurs ont pu proposer à ce jour. Enfin, des recommandations seront faites pour développer l'électrification du domaine off-road au niveau de la recherche et du développement, des financements publics, de la communication, des compétences et de la formation.

I. Domaine off-road : définition, normes et technologies

a. Définition d'un engin off-road

Dans la littérature, on retrouve une multitude de définitions différentes d'un engin off-road. Le domaine off-road n'est pas un secteur nettement défini, il regroupe une typologie variable de véhicules. Dans le souci de cadrer au mieux cette étude, nous avons choisi de donner la définition suivante :

Un engin off-road est un appareil ou véhicule industriel motorisé (thermique, électrique), à usage terrestre, servant à effectuer au moins une tâche principale qui produit de la valeur ajoutée pour l'entreprise et qui ne se déplace généralement pas sur les routes.

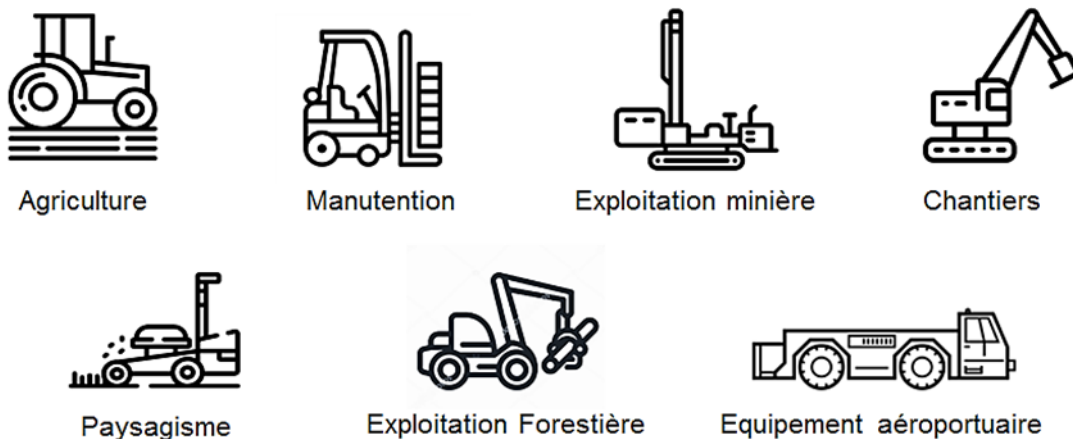
Cette définition exclut tous les véhicules non routiers à usage personnel ou utilisés dans le cadre d'activités de loisir. Dans la littérature anglaise, il sera courant de retrouver les termes off-highway vehicles (OHV) et non-road mobile machinery (NRMM). Trois secteurs, souvent inclus dans le domaine off-road dans la littérature, ont été écartés de la présente étude afin de limiter le spectre de celle-ci : le secteur ferroviaire, le secteur maritime et le secteur militaire.

A partir de cette définition, il est possible d'identifier un grand nombre de véhicules, couvrant de nombreuses applications diverses et variées, qui peuvent être regroupés dans différents secteurs.

b. Secteurs off-road identifiés

Le domaine off-road regroupe une grande variété de véhicules, qui selon leur contexte d'utilisation, peuvent être regroupés dans les segments suivants¹ :

Figure 1 : Les secteurs du domaine off-road



Bien entendu, certains engins peuvent être utilisés dans plusieurs secteurs. Le chargeur agricole, par exemple, est un engin de manutention utilisé pour réaliser des opérations de manutention au sein d'une exploitation agricole. Après avoir clarifié les limites de l'étude et caractérisé le sujet, nous allons présenter les enjeux de l'étude.

¹ <https://www.euromot.eu/our-industry/nonroad-mobile-machinery/#top>

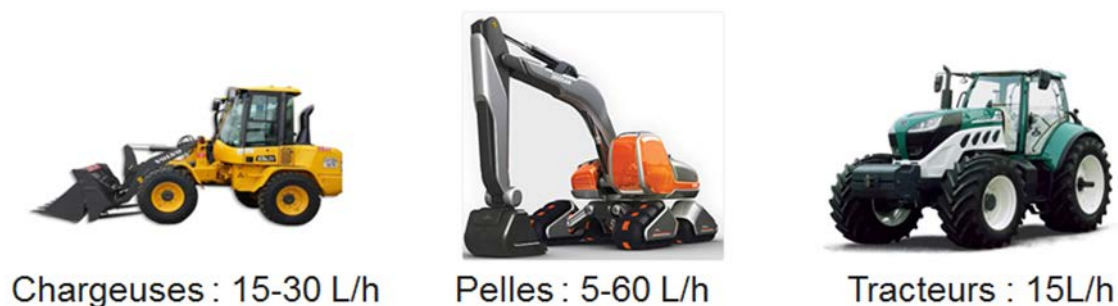
c. Enjeux de réduction des émissions de polluants du secteur off-road

La prise de conscience concernant l'impact des moteurs thermiques sur l'environnement et la santé des êtres vivants n'est pas récente. La lutte contre la pollution de l'air devient de plus en plus un enjeu majeur, à toutes les échelles, des plans d'action sont mis en œuvre pour améliorer la qualité de l'air.

Des solutions alternatives aux véhicules thermiques ont émergé ces 20 dernières années dans le domaine des transports, et des normes antipollution sont venues encadrer les émissions des véhicules. Concernant le domaine off-road, ce dernier n'a pas tout de suite été concerné par les normes antipollution, en raison du faible nombre de véhicules comparé au secteur routier. En effet, c'est un secteur qui regroupe une grande diversité d'engins, mais ces derniers sont produits et vendus en petite série. Pourtant, à part dans certains sous-secteurs, la plupart des véhicules off-road existent encore uniquement en tout thermique, la grande majorité fonctionne au diesel, et consomme une grande quantité d'énergie. Ainsi, si la part du secteur non routier dans les émissions de polluant est moins importante que celle du secteur routier, elle n'est pas pour autant négligeable. En 2011, une étude évalue que les véhicules off-road étaient responsables de 20% des émissions de NOx de l'ensemble des véhicules à moteur et 25% des émissions de particules en Europe².

En outre, dans le secteur non routier, les puissances des véhicules mises en jeux sont considérables, la gamme de puissance s'étend de quelques kW à plusieurs milliers de kW. Dans le secteur des mines et carrières notamment, l'exploitation des minerais demande des engins très puissants pour creuser la roche.

Figure 2 : exemples de consommation de véhicules off-road



Comme l'illustre la Figure 2 ci-dessus, la consommation d'énergie des engins off-road est importante, ce qui, combiné à une utilisation intensive, en font une source de pollution conséquente. C'est pourquoi, depuis le milieu des années 1990, les émissions de ce secteur sont encadrées par des normes anti-pollution.

d. Normes d'émission du secteur off-road

Dans le secteur off-road, comme dans le secteur routier, des normes sont établies afin de limiter les émissions de polluants rejetés par les moteurs thermiques pour réduire leur impact sur l'environnement et sur la santé. Ces normes sont de plus en plus contraignantes

² https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Non-Road-Tech-Pathways_white-%20paper_vF_ICCT_20160915.pdf

pour les constructeurs, qui sont dans l'obligation de mettre sur le marché des véhicules avec des moteurs moins polluants.

La prise de conscience concernant l'importance des émissions des engins off-road a été relativement tardive. Les premières normes datent du milieu des années 1990, et s'inspirent grandement de celles mises en place pour la catégorie poids lourds du secteur routier qui existaient déjà depuis 1988³. Ces normes anti-pollution ne sont pas appliquées mondialement, chaque pays définissant sa propre norme. Cependant, on distingue deux normes majeures de référence : les « Tiers », élaborés par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis, et les « Stages » imposées dans l'Union Européenne⁴. La première norme off-road, Tier I, a été instaurée aux Etats-Unis en 1996. Concernant l'Union Européenne, Stage I est entrée en vigueur en 1999. Les normes Stage et Tier évoluent en même temps, environ tous les 4-5 ans, et généralement sur les mêmes niveaux de limites.

La norme anti-pollution sépare et classe les moteurs en différentes catégories de puissances, et chaque catégorie a une limite d'émissions à respecter pour les polluants visés. Les polluants concernés sont :

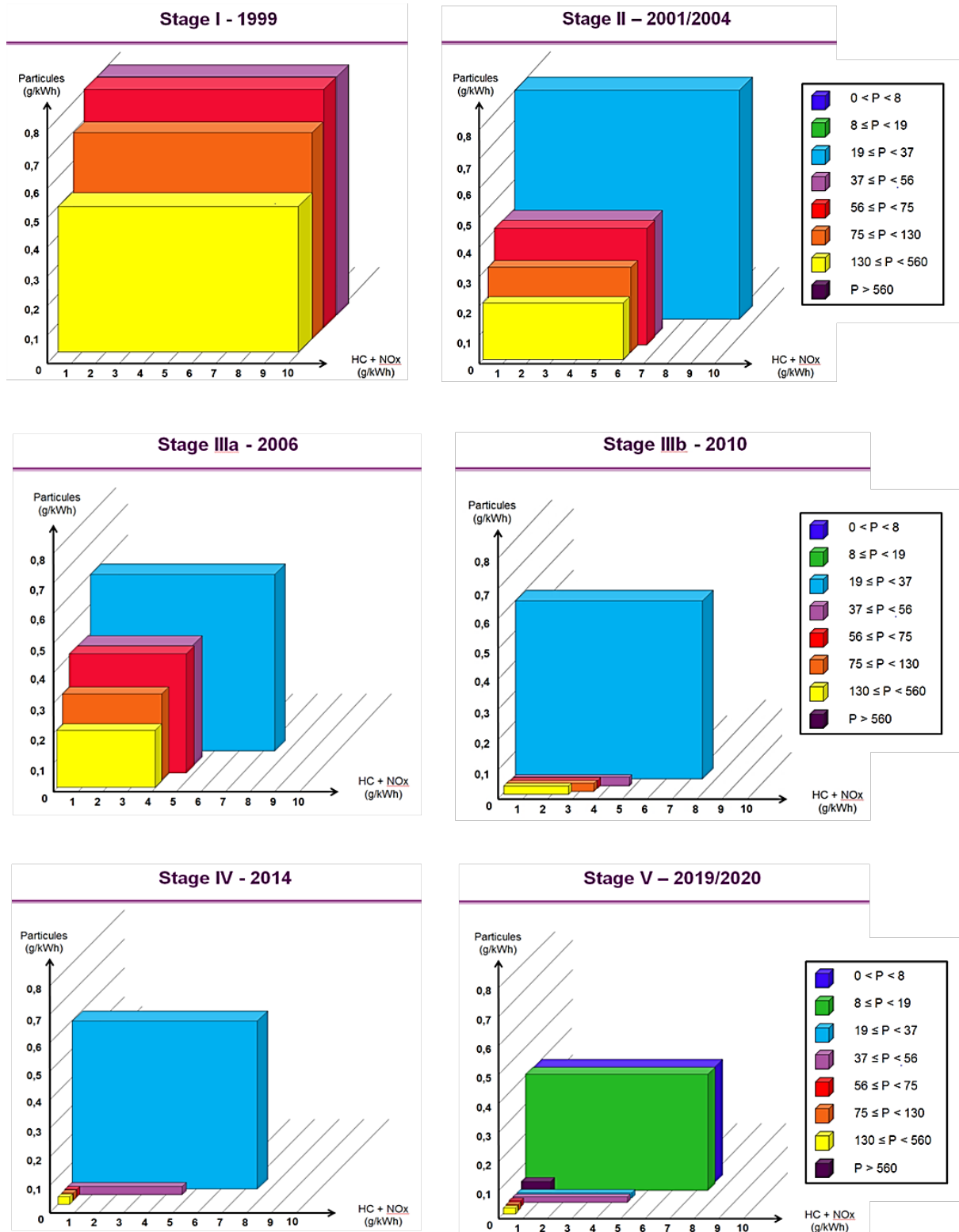
- **Le monoxyde de carbone (CO)** : il réduit la capacité du sang à transporter l'oxygène. Il est produit suite à une combustion incomplète du carburant, généralement cela est dû à un manque d'oxygène dans le mélange.
- **Les hydrocarbures imbrûlés (HC)** : certains d'entre eux sont cancérigènes et apparaissent dans le cadre d'une combustion incomplète. Les moteurs Diesel sont encore les plus propres sur ce point, car leur combustion est plus complète que celle des moteurs à essence.
- **Les oxydes d'azote (NOx)** : cette famille de gaz génère des troubles respiratoires, des maux de tête et participe à la formation de brouillard de pollution, d'ozone de surface et de pluies acides. Jusqu'à présent, les moteurs Diesel rejettent une quantité de NOx environ sept fois supérieure aux motorisations essence.
- **Les particules** : elles résultent de l'agglomération de suies formées lors de combustions riches et/ou basses températures. Au-delà de leur quantité rejetée dans l'air, leur impact dépend de leur taille : plus elles sont petites, plus elles pénètrent dans l'organisme, provoquant des effets nocifs.

A chaque nouvelle étape dans la mise en application des normes anti-pollution, la limite d'émissions à ne pas dépasser pour chaque polluant est abaissée. Aujourd'hui, en Europe, la norme en vigueur est Stage IV, et va être remplacée par Stage V entre 2019 et 2020. Les graphiques ci-dessous montrent l'évolution des limitations imposées selon les catégories de puissance des véhicules, concernant les NOx et les hydrocarbures (HC), placés sur l'axe des abscisses, et les particules, sur l'axe des ordonnées.

³ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/normes-euros-demissions-polluants-vehicules-lourds-vehicules-propres>

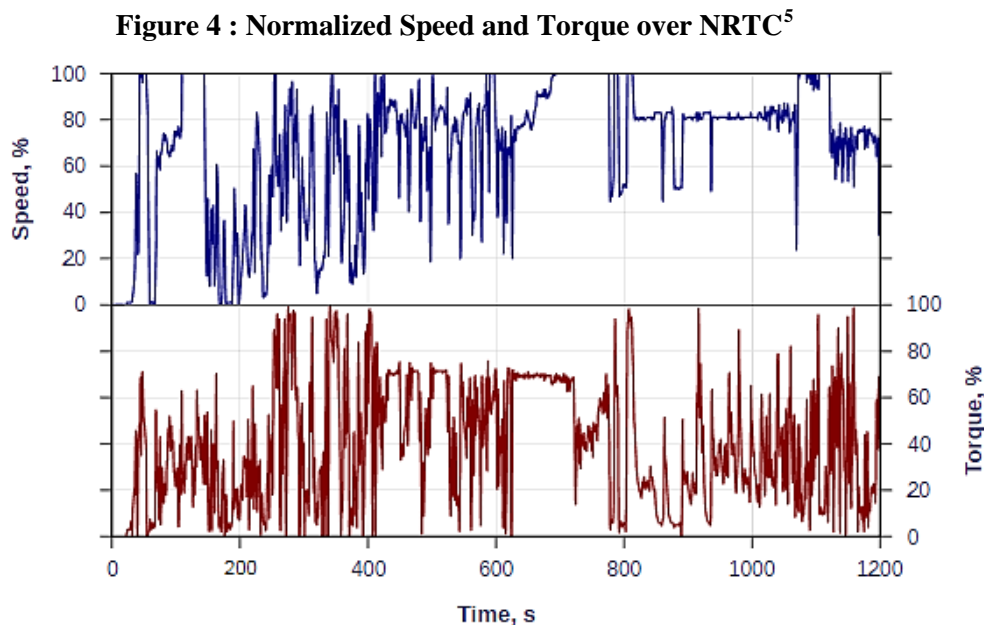
⁴ https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/environment-protection/non-road-mobile-machinery_en

Figure 3 : Evolution des normes anti-pollution du secteur off-road concernant les NOx, les HC et les particules (g/KWh), en fonction des catégories de puissance (P)



Comme on peut le constater en regardant le graphique ci-dessus, Stage V couvre toutes les gammes de puissance, ce qui n'était pas le cas pour les normes précédentes, où seuls les moteurs de puissances comprises entre 19 kW et 560 kW étaient concernés. Stage V est pour l'instant la norme anti-pollution off-road la plus sévère, elle n'a pas d'équivalent dans le système normatif américain. Par ailleurs, la grande nouveauté de cette norme est la limitation du nombre de particules émises par les moteurs, car les particules les plus dangereuses pour la santé ne sont pas les plus lourdes, mais les plus petites, appelées les particules fines. Pour le moment, il n'est pas encore question de stage VI, mais il est probable que l'objectif de ces normes sera de se rapprocher de plus en plus du 0 émission, ce qui va pousser les constructeurs à étudier des solutions alternatives.

Pour contrôler le respect des limites d'émissions d'un véhicule selon la norme en vigueur, celui-ci doit être homologué durant un cycle d'essai. Seuls les moteurs sont soumis au cycle d'homologation, et celui-ci est effectué sur un banc d'essai. Le cycle d'homologation spécifique aux moteurs des engins off-road est le NRTC, pour Non-Road Transient Cycle. Un tel cycle illustré à la Figure 4 correspond à une succession de cycles d'utilisations de machines off-road, et se veut représentatif de l'usage réel d'un véhicule off-road. Durant ce cycle, le moteur est soumis aux différents points de contraintes de couple et de puissance, et les émissions rejetées par le moteur sont mesurées. Si celles-ci respectent la limitation fixée par la norme, le moteur est homologué.



Il n'existe à ce jour aucun cycle d'essai destiné à l'homologation d'une motorisation hybride (combinaison d'un moteur thermique et d'un moteur électrique ou hydraulique). Dans le cas d'un véhicule hybride, seul le moteur thermique doit respecter les normes anti-pollution. D'après nos entretiens réalisés dans le cadre de cette étude, un groupe de travail rattaché au CISMA, Syndicat des équipements pour la construction infrastructure sidérurgie et manutention, travaille à l'élaboration d'un cycle d'homologation pour les motorisations hybrides. Un tel cycle inciterait plus facilement les motoristes à hybrider leur véhicule pour respecter les normes anti-pollution. En effet, dans la plupart des motorisations hybrides, le moteur électrique assiste le moteur thermique en fournissant de l'énergie supplémentaire lors

⁵ dieselnet.com

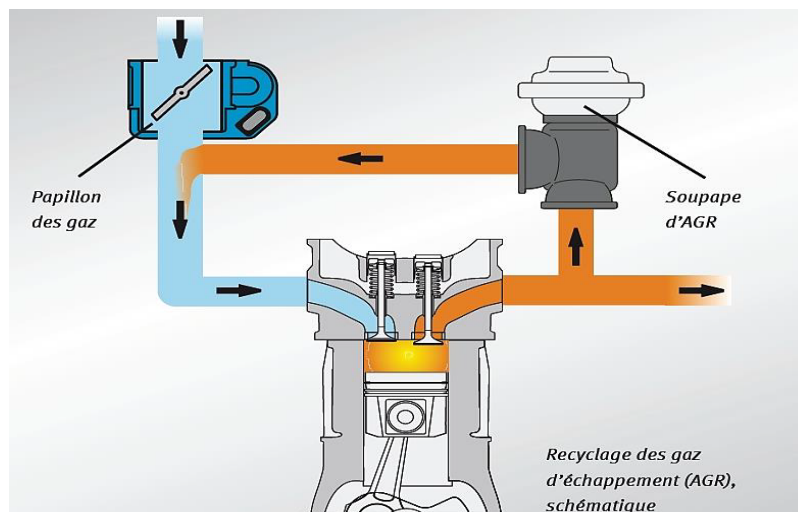
des pics de puissance ou de couple. Finalement, le moteur thermique est moins sollicité et fournit moins d'effort, et ainsi émet moins de polluants qu'un véhicule thermique de même puissance et devant effectuer la même tâche.

Les normes poussent les départements de R&D des constructeurs à innover constamment pour limiter l'impact environnemental de leur moteur. Pour les motoristes, il est possible de réduire les émissions par deux approches différentes : soit directement à la source, c'est-à-dire en jouant sur le déroulement de la combustion interne au moteur afin qu'elle consomme moins de carburant et produise moins de polluants, soit à la sortie du moteur, en traitant les gaz d'échappement, c'est le « post traitement ». Comme exemple de traitement des polluants à la source, on retrouve le dispositif suivant :

- Le système EGR (Exhaust Gaz Recirculation)

Ce système a pour objectif de réduire le taux d'oxyde d'azote (NOx) rejeté par le moteur. Son principe est la recirculation d'une partie des gaz produits par le moteur dans celui-ci, en passant par une vanne EGR, voir la Figure 5 ci-dessous. Les NOx résultent de l'oxydation de l'azote de l'air à haute température. La réintroduction des gaz d'échappement, au préalable refroidis en circulant par la vanne EGR, va permettre d'introduire moins d'air dans le moteur, donc moins d'oxygène, mais aussi de réduire la température de combustion. La baisse de la température et du taux d'oxygène va permettre de réduire la production de NOx. Cependant, ce système peut diminuer le rendement et les performances du moteur thermique, et la combustion « imparfaite » qui résulte de la baisse de la température peut augmenter la production de particules. Or, ces particules sont aussi limitées par les normes, et afin d'être en conformité avec celle-ci, le système EGR devra être couplé à un filtre à particule.

Figure 5 : Fonctionnement du système EGR



On distingue également deux approches de systèmes de post traitement permettant de réduire les émissions :

- Le filtre à particules (FAP)

Le filtre à particules, constitué de cloisons poreuses en céramique, va filtrer les gaz d'échappement et stocker les particules avant de les détruire lors d'une régénération. Cette régénération se réalise d'elle même lorsque le moteur fonctionne de manière ininterrompue pendant plusieurs heures. Si ce n'est pas le cas, la régénération est alors déclenchée par l'envoi d'un surplus de carburant au moteur, ou vers un injecteur dédié dans la ligne d'échappement. L'augmentation de la température des gaz d'échappement va ainsi permettre de brûler les particules prisonnières du filtre.

- Le système SRC (Selective Catalytic Reduction)

La solution SCR va traiter les NOx émis par le moteur a posteriori par une succession de réactions chimiques dans un catalyseur. Plus précisément, à leur sortie du moteur, les gaz d'échappement vont passer dans plusieurs catalyseurs, qui vont modifier la nature des molécules de ces gaz par l'ajout d'urée. Cette urée, mélangée avec de l'eau, est commercialisée sous le nom d'AdBlue.

Ces systèmes de post traitement, très couramment utilisés pour les véhicules off-road, contribuent à respecter les limitations fixées. Les constructeurs d'engins off-road peuvent aussi jouer sur d'autres facteurs pour réduire les émissions. Par exemple, Volvo Penta a été le seul motoriste à proposer des moteurs sans filtre à particules tout en respectant les limitations fixées par stage IV, grâce à une optimisation des performances de leurs moteurs, ce qui leur permettait de proposer des moteurs à des prix plus compétitifs. En revanche, Volvo doit maintenant rattraper son retard concernant cette technologie pour Stage V, car les limitations fixées pour les particules sont trop exigeantes pour que les motoristes puissent se passer de cette technologie⁶. Dans tous les cas, ces innovations représentent un véritable défi aussi bien technologique qu'au niveau économique. Le prix d'acquisition des moteurs grimpe au fur et à mesure de la mise en application de nouvelles normes, toujours plus restrictives et exigeantes, bien que les constructeurs s'efforcent d'en maîtriser les coûts. En plus de cela, ces systèmes augmentent les besoins ainsi que les coûts en maintenance des véhicules et peuvent aussi porter atteinte à leur fiabilité. Le défi des constructeurs est donc de respecter la norme en vigueur tout en limitant la hausse du prix du moteur, et cela sans compromis quant à l'efficacité et à la consommation de leur machine. Bien entendu, il existe d'autres normes encadrant le secteur non routier, notamment en termes de sécurité en lien avec les véhicules non routiers et leur utilisation, mais l'objectif ici n'est pas d'en faire une description exhaustive.

Après un point sur l'état des lieux du secteur des engins off-road et de ses enjeux en matière d'émissions de polluants, une étude du marché du secteur ainsi qu'une analyse de la chaîne de valeur des sous-secteurs de l'agroéquipement et des chantiers ont été réalisées, enrichies par des interviews de producteurs et d'utilisateurs de ces engins.

⁶ <http://www.dbmoteurs.fr/blog/comment-anticiper-les-normes-anti-pollution>

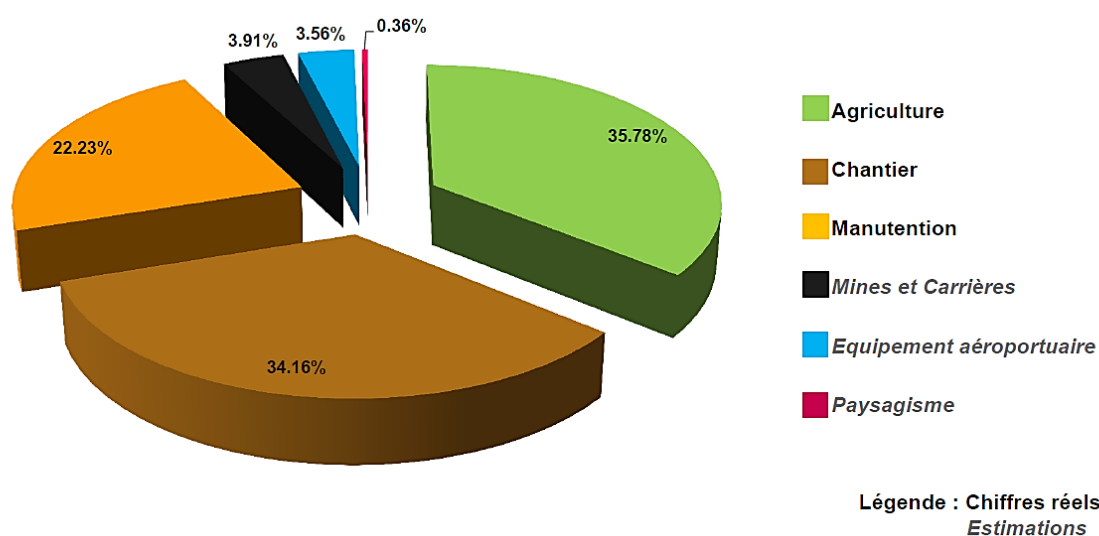
II. Marché des engins off-road et ses acteurs

a. Volumes de vente des engins off-road

- En France

De manière générale, la grande majorité des engins off-road sont produits et vendus en petite série, entre 10 et 1000 par an. Seuls quelques véhicules sortent du lot, notamment le tracteur qui est l'outil indispensable dans le monde de l'agriculture, dont le nombre de ventes s'élève à plusieurs milliers par an.⁷

Figure 6 : Part de chaque secteur dans les volumes de ventes totaux des engins off-road en France



La Figure 6 représente une estimation de la répartition de chaque secteur dans la vente annuelle de tous les engins off-road en France. Obtenir des chiffres pour chacun des secteurs étant compliqué, seule une estimation a pu être faite. Le secteur de l'exploitation forestière est inclus dans celui de l'agriculture. Ce dernier, avec le secteur des chantiers, représentent 70% des ventes d'engins off-road. C'est pourquoi, dans la suite de cette étude, nous allons nous concentrer sur ces deux secteurs en particulier pour en étudier le potentiel d'électrification. Ce sont aussi les deux secteurs, avec celui des mines & carrières, où nous avons réussi à obtenir le plus d'informations et de données. Nous allons, par la suite, en présenter les spécificités plus en détail.

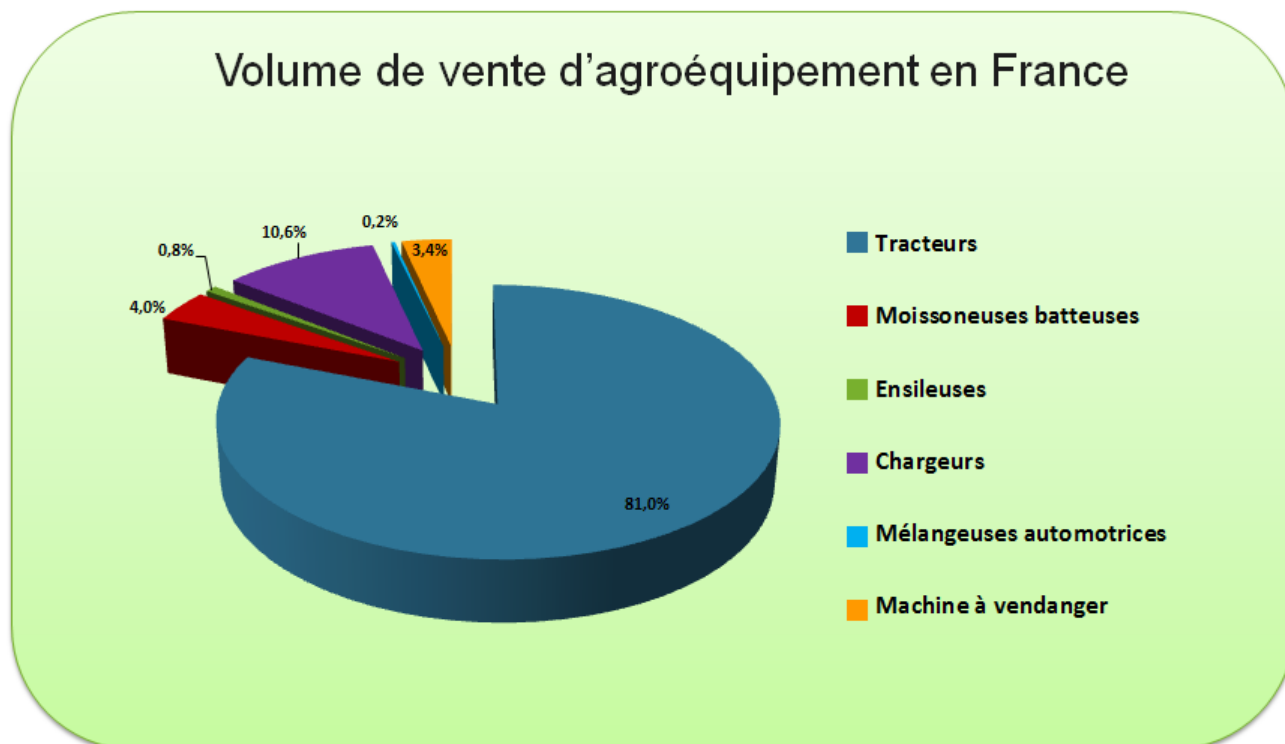
Secteur de l'agroéquipement

Comme le montre la Figure 7, le tracteur est l'engin de base de l'agriculture, avec plus de 80% des volumes de vente, et il répond à des besoins très variés dans le domaine agricole. Dans son utilisation, il va être amené à tracter des attelages, mais aussi à manutentionner des

⁷ https://www.researchgate.net/publication/316579650_Electric_and_Hybrid_Electric_Non-Road_Mobile_Machinery_-_Present_Situation_and_Future_Trends

produits agricoles. Ainsi le tracteur peut pratiquement réaliser tous les travaux au sein de l'exploitation, s'il est couplé avec l'outil adapté.

Figure 7 : Volume de vente de machines agricoles en France (2015-2016)⁸



En France, le marché de l'agroéquipement est un marché florissant, avec une majorité de PME et TPE, et seulement quelques grandes entreprises qui couvrent aussi d'autres sous-secteurs de l'off-road. La France est le premier marché européen d'équipement agricole, car elle possède un grand marché intérieur. Cette situation peut rester stable, sous réserve que les agriculteurs gardent une capacité d'investissement relativement élevée et stable.

De grands groupes internationaux ont implanté des usines de production en France, comme Claas, AGCO et John Deere. C'est un réel avantage dans la mesure où c'est une porte d'entrée vers les marchés d'exportation. Par exemple, le groupe CLAAS, leader européen de la moissonneuse-batteuse et leader mondial des ensileuses automotrices, possède deux sites de production en France qui exportent respectivement 70% et 75% de leur production en Europe et dans le monde, et emploient 900 et 400 salariés⁹.

Cependant, le secteur de l'agroéquipement pâtit de certaines faiblesses. En effet, un nombre important de sociétés d'équipement agricole sont réduites en taille et leur marché se limite au marché local français. Très peu d'entreprises exportent. Les fournisseurs de composants de machines agricoles sont de moins en moins compétitifs, par manque d'innovation dans leurs produits tout en gardant des prix élevés. Par ailleurs, la coopération

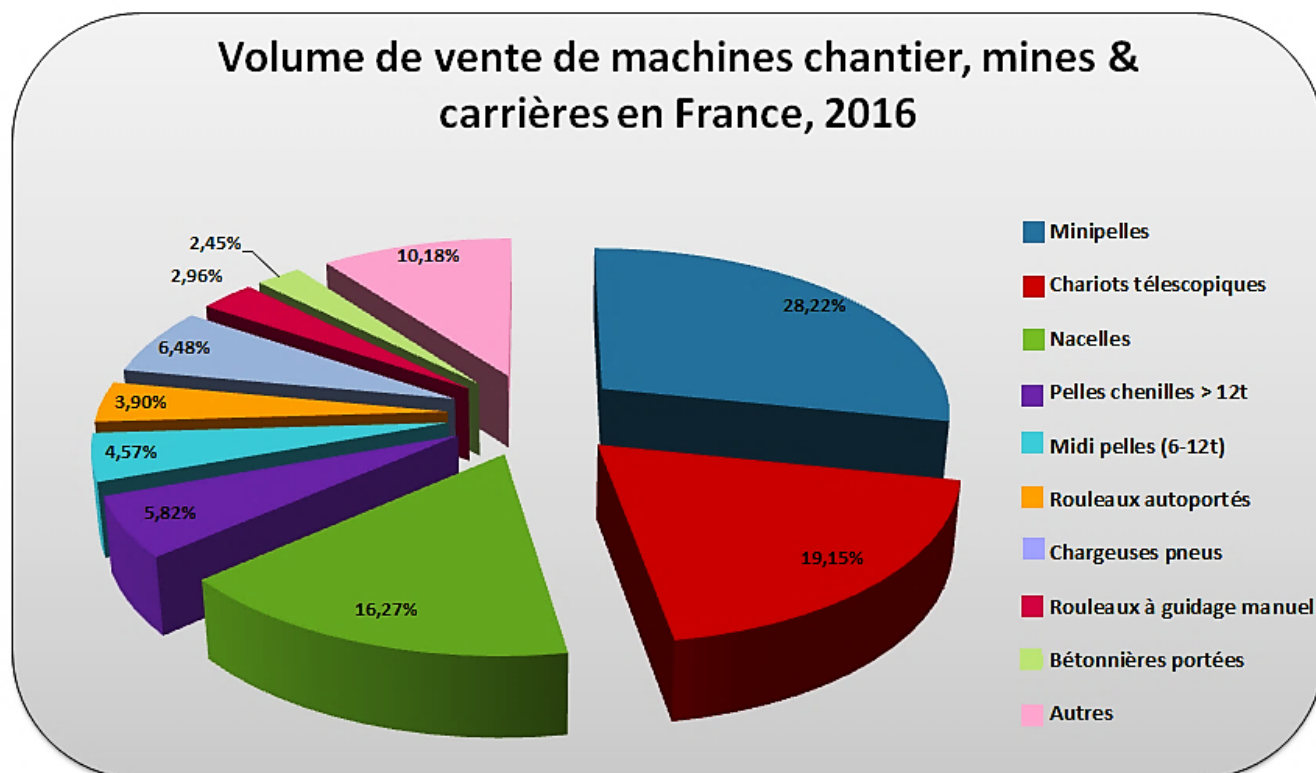
⁸<http://www.axema.fr/agroequipements/Pages/Article.aspx?IDArticle=368&Categorie=Economie>

⁹http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/pdf/Pages_de_Document_complementaire_au_rapport_c_ontributions_VERSION_DEC2014-2_annexe_2_cle8132dc-1.pdf

entre l'industrie et les universités en terme de recherche appliquée semble être beaucoup moins systématique que dans d'autres pays.

Secteur des équipements de chantier, mines & carrières

Figure 8 : Volumes de vente des machines de chantier, mines et carrières en France en 2016



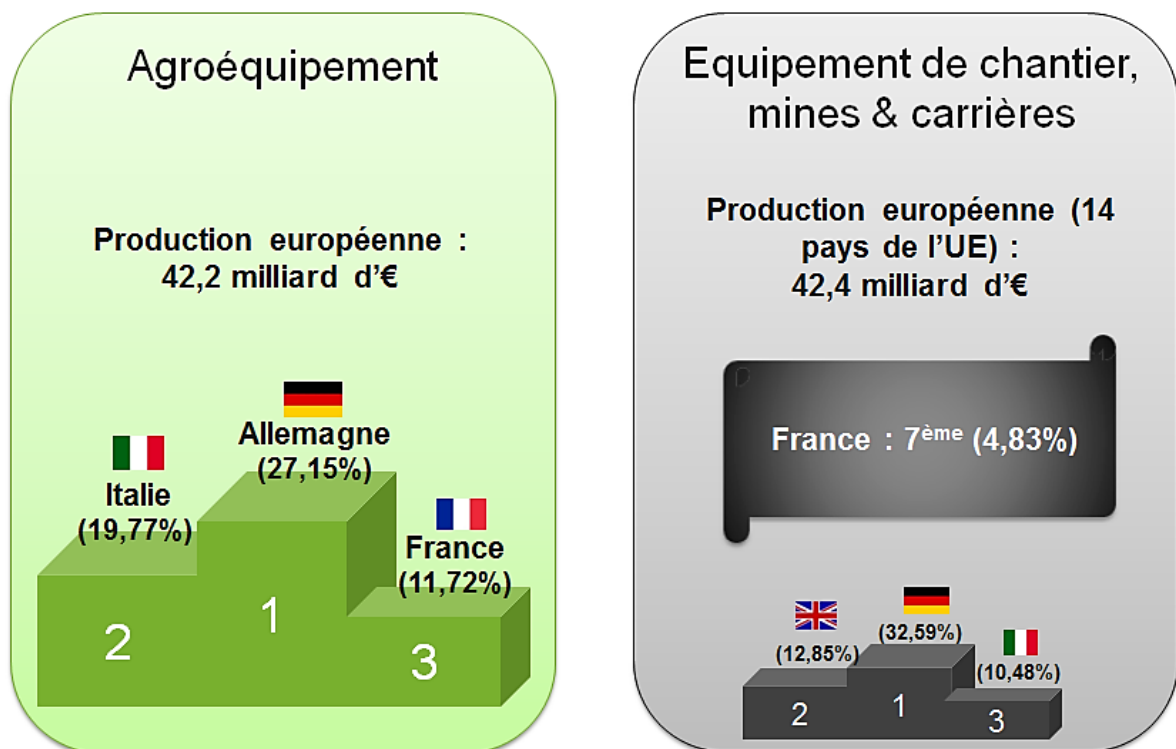
Les midi-pelles sont des véhicules présents sur la quasi totalité des chantiers, où ils servent aux travaux de terrassement et d'excavation. Le secteur de la construction et de l'extraction est également un marché porteur en France. Les constructeurs d'équipements de construction et d'extraction connaissent en ce moment un boom au niveau de leurs activités. Des machines sont aussi importées de l'étranger pour répondre aux besoins du marché. C'est également un secteur où la compétition entre les acteurs est très forte, et où la notoriété de la marque joue beaucoup dans l'orientation des choix des clients.

- **En Europe**

A l'échelle de l'Europe, d'après nos estimations, la répartition serait similaire à celle montrée sur la Figure 8 pour la France, avec cependant une part plus importante de 50% d'engins agricoles dans la vente totale des engins off-road.

La Figure 9 montre que concernant la production d'agroéquipement et d'équipement de chantier, mines et carrières, la France est bien positionnée et s'inscrit pleinement au sein du marché européen. L'Allemagne est un grand producteur de machines agricoles, de chantier, mines et carrières, et c'est un partenaire privilégié de la France pour les échanges de ces véhicules.

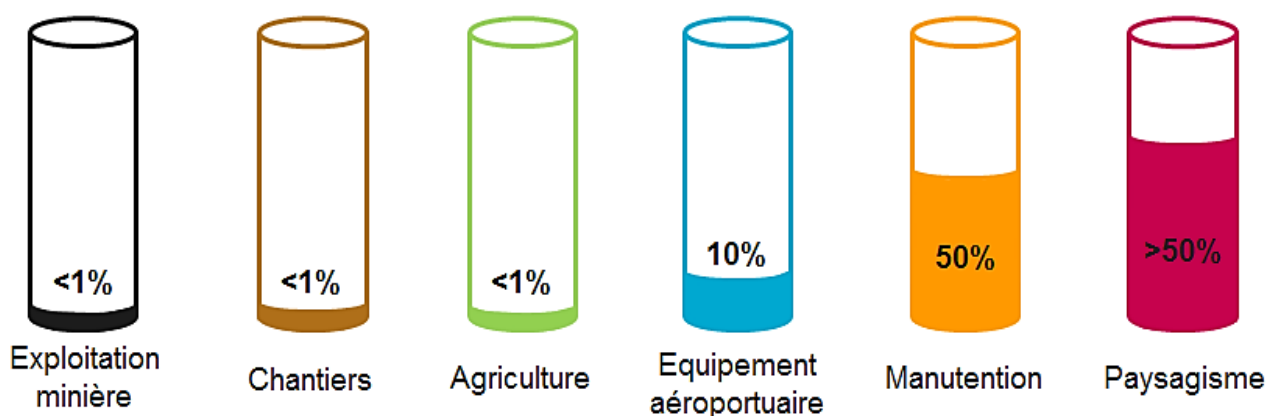
Figure 9 : Positionnement dans l'UE de la France concernant la production d'équipements agricoles, de chantier, mines et carrières



b. Taux d'électrification des engins off-road

Les solutions électriques dans le domaine off-road sont assez récentes. Après un état de l'art du marché des engins off-road électriques basé notamment sur la littérature, nous avons pu estimer le taux d'électrification des différents sous-secteurs off-road, c'est-à-dire la part actuelle des engins off-road qui sont électrifiés à 100%. La Figure 10 schématise le taux d'électrification des sous-secteurs, c'est-à-dire le nombre de véhicules à motorisation électrique estimé relatif au nombre total d'engins. Ne sont pas pris en compte ici les prototypes présentés lors des salons spécialisés, ni les véhicules hybrides.

Figure 10 : Taux d'électrification estimés des secteurs off-road



Certains secteurs ont déjà entamé le virage de l'électrification. Pour les domaines de la manutention et du paysagisme, cela s'explique principalement par le fait qu'une très grande partie des machines motorisées sont peu puissantes, et que ces machines évoluent dans un environnement où les possibilités de recharge des batteries sont grandes. Le secteur aéroportuaire est aussi assez avancé en matière d'électrification, et certaines grosses machines comme les tracteurs de camions sont en cours de développement en version tout électrique. Cela s'explique en partie par le fait que ce secteur est contraint par les pouvoirs publics qui souhaitent que les aéroports réduisent leur empreinte carbone, et par le fait que ces flottes sont captives, c'est-à-dire évoluant dans un secteur géographique très restreint et délimité, facilitant la recharge.

D'après l'étude de marché conduite par la société de conseil Frost & Sullivan sur l'hybridation des véhicules non routiers **Erreur ! Signet non défini.**, 3% des chaînes de transmission de véhicules non-routiers dans le monde sont actuellement des chaînes de transmission hybrides. Dans cette étude, la part de véhicules hybrides en 2025 est estimée à 5% du total des véhicules non routiers.

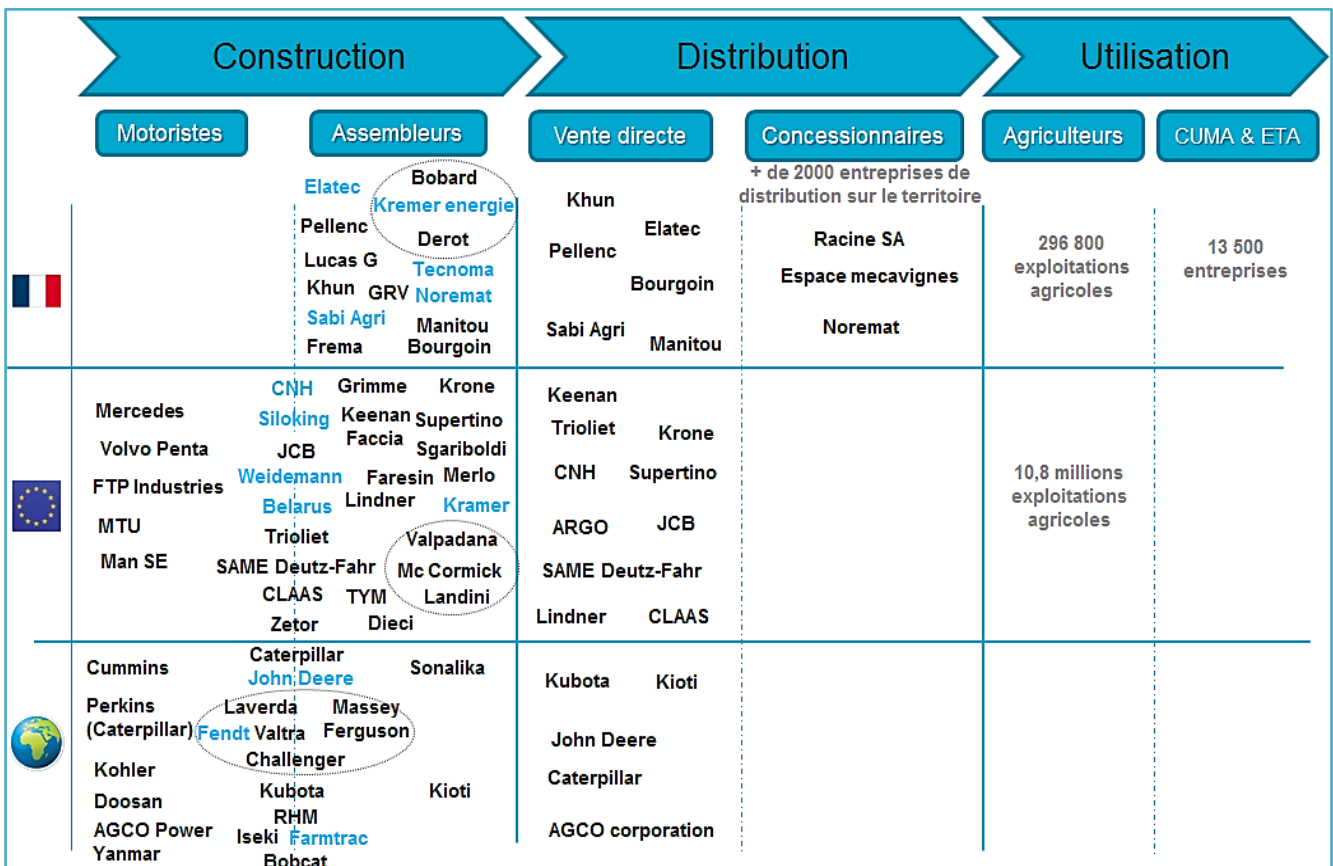
c. Chaîne de valeur des secteurs agricole et chantier, mine & carrière

Pour mieux cerner les solutions qui permettraient de favoriser l'électrification du secteur off-road, la compréhension des mécanismes favorisant l'émergence de nouvelles technologies est nécessaire et doit reposer sur une identification des articulations entre les différents acteurs de la chaîne de valeur, de leurs besoins ainsi que de leurs attentes technologiques. Dans cette partie, nous allons nous concentrer sur la chaîne de valeur du secteur de l'agriculture, ainsi que sur celle du secteur des chantiers regroupé avec celui des mines et carrières en raison de la similarité de certains engins et acteurs.

- **Secteur de l'agroéquipement**

En ce qui concerne les acteurs actifs de la chaîne de valeur du secteur de l'agroéquipement, on distingue 3 catégories : les constructeurs, les distributeurs et les clients. A l'ensemble de ces acteurs principaux, s'ajoutent des organismes facilitateurs qui structurent la chaîne de valeur, en apportant un cadre législatif et réglementaire, un soutien financier et technique au développement du secteur. La Figure 11 propose une cartographie des acteurs du secteur. Les entreprises dont le nom est en bleu sont celles qui proposent actuellement, à la vente ou encore au stade de prototype, des solutions 100% électriques dans leur gamme de produit.

Figure 11 : Chaîne de valeur du secteur de l'agroéquipement



Production

Comme il a déjà été évoqué, en France les producteurs d'agroéquipement comprennent principalement des PME, et très peu de grandes entreprises. Les producteurs de tracteurs en France sont majoritairement des entreprises étrangères implantées sur le sol français. La France possède cependant des instituts de R&D, avec de fortes compétences en ingénierie moteurs et véhicules. Mais il apparaît qu'il y ait des difficultés de coopération entre les organismes de R&D et les PME. Ce secteur étant visé par les normes anti-pollution, les constructeurs doivent redoubler d'efforts pour les respecter, sans réel avantage au final pour le client.

Distribution

Les chambres d'agriculture ont de moins en moins le rôle de conseil en machinisme auprès des agriculteurs. A cause de la chute de certaines subventions, des stations expérimentales ferment. Le nombre de conseillers en agroéquipement chute (désamour du métier, les plus âgés et expérimentés partent à la retraite sans avoir transmis leur expertise), et leur prestation se standardise pour devenir systématiquement payante. Aujourd'hui, le rôle du concessionnaire s'en retrouve renforcé : il est le premier conseiller avant l'achat, et sera bientôt l'unique conseiller vers lequel les agriculteurs pourront se tourner.

Le réseau français de concessionnaires est vaste couvrant l'ensemble du territoire. Généralement, ce tissu d'entreprises de vente d'agroéquipement est caractérisé par de petits concessionnaires, des entreprises familiales qui ont un rôle de conseil auprès des agriculteurs, avec qui ils ont une vraie relation de proximité et de confiance. Les concessionnaires assurent la vente de machines neuves et d'occasion, mais aussi le service après-vente, ainsi que l'approvisionnement en pièces détachées. Certains concessionnaires ont un accord d'exclusivité avec un tractoriste, puis proposent différentes marques selon les outils, sauf pour les constructeurs qui proposent toute la gamme de tracteurs avec les outils associés. La tendance aujourd'hui s'oriente vers le regroupement et la concentration des distributeurs pour améliorer leur expertise, notamment sur du matériel agricole de pointe. Les saisonnalités posent un réel problème d'organisation pour les distributeurs, notamment pour les opérations de maintenance.

Il faut aussi savoir que certaines machines, et notamment les tracteurs, finissent leur vie à l'étranger, en particulier dans les pays en voie de développement. Lorsque le client achète une machine, le gain à la revente est un critère particulièrement regardé. Or, plus les machines se perfectionnent, plus il est difficile de leur offrir une seconde vie à l'étranger. Les moteurs acceptent de plus en plus difficilement le carburant moins raffiné, et les spécificités techniques dépassent souvent les compétences des techniciens pour la prise en charge des pannes.

Utilisation

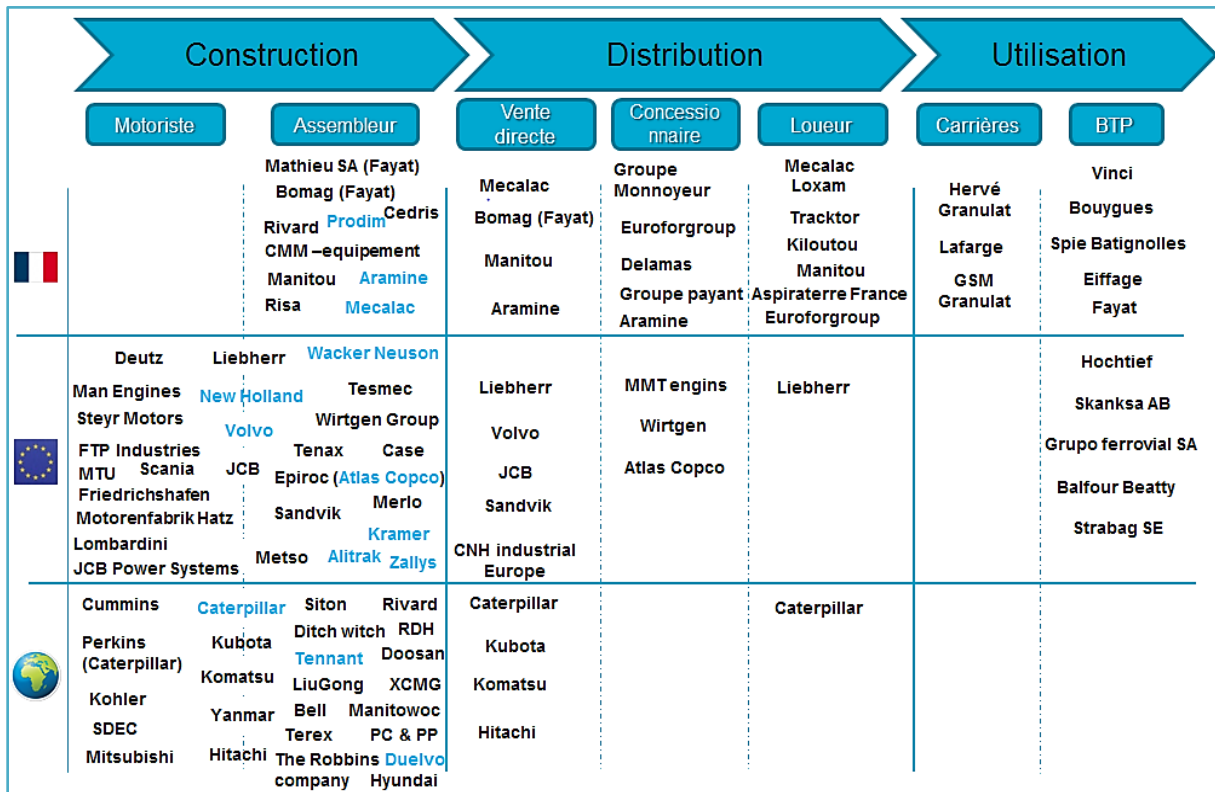
Le nombre d'agriculteurs en France s'est considérablement réduit par rapport au XX^e siècle, et continue de décroître. En effet, la majorité des agriculteurs aujourd'hui ont plus de 50 ans, et ceux qui partent à la retraite ne sont pas systématiquement remplacés. La mécanisation de l'agriculture a permis, en partie, de résoudre ce déficit de main d'œuvre. C'est aussi pourquoi beaucoup de projets d'innovation s'orientent aujourd'hui vers une automatisation des engins agricoles. L'accent est aussi mis sur l'augmentation de la productivité des équipements, de leur taille, et de leur confort. Enfin, les agriculteurs cherchent aussi l'indépendance énergétique, ce qui ouvre la voie aux carburants alternatifs comme le bio-carburant. L'enjeu aujourd'hui est de développer une agriculture de précision,

afin de réduire les intrants agricoles, c'est-à-dire les pesticides et engrais chimiques. Cela permet d'introduire moins de produits nocifs dans l'environnement, et permet également que l'exploitant réalise des économies sur ces produits.

En raison d'un prix à l'achat élevé et dans un souci de rentabilité, certains agriculteurs décident de partager leur matériel. Ces agriculteurs se regroupent dans le but de mettre en commun le matériel, dans ce que l'on appelle les coopératives d'utilisation du matériel agricole (CUMA). D'après une enquête de 2015, il existe 12 260 CUMA en France, et près d'un agriculteur sur deux fait partie d'une CUMA¹⁰. La tendance actuelle est à la mutualisation des équipements, qui s'accroît de plus en plus face à la baisse des revenus des agriculteurs et donc de leur capacité d'investissement. Cela permet aussi de mutualiser les coûts en maintenance et de réduire le poids de l'endettement, ainsi que les risques face aux incertitudes liées aux réformes à venir de la PAC, la Politique Agricole Commune, principale source de subvention pour les agriculteurs français.

- **Secteur des équipements de chantier, mine et carrière**

Figure 12 : Chaîne de valeur du secteur des engins de chantier, mine et carrière



Production

Comme le montre la Figure 12, le secteur de l'équipement pour construction et l'extraction est caractérisé par une forte compétitivité entre ses acteurs. C'est aussi un secteur très concentré : en 2016, les cinq premières entreprises de construction réalisent plus de 52% du chiffre d'affaires total, et les cinquante premières près de 99%¹¹. Dans ce secteur, la

¹⁰ <http://www.cuma.fr/content/les-chiffres-cles-des-cuma#>

¹¹ Chiffres extraits d'une étude de marché du Xerfi sur la fabrication et l'importation de machine pour la construction et l'extraction

notoriété de la marque joue beaucoup dans le critère d'achat. Ainsi, pour renforcer leur position, les entreprises optent pour une croissance externe. Les constructeurs essaient d'intégrer les acteurs en amont et en aval de la chaîne de valeur, c'est-à-dire les fournisseurs de composants et les distributeurs. Cela permet de maîtriser toute la chaîne de valeur. Mais les constructeurs cherchent aussi à diversifier leurs activités. On peut citer par exemple l'achat de l'allemand Wirtgen, société active dans le secteur de la construction, par l'américain John Deere, spécialisé dans l'agriculture. Le constructeur américain met ainsi la main sur plusieurs marques réputées en France ainsi que sur un réseau de plus de 150 distributeurs en Europe dans le domaine de la construction.

Distribution

Les concessionnaires ont également un rôle de conseil auprès des entreprises qui souhaitent acheter les engins. Cette relation est moins forte que dans le secteur agricole car la plupart des entreprises ont un service dédié à la gestion du parc de matériel et donc à l'achat des machines.

En ce qui concerne les entreprises de location d'équipements, l'âge moyen du parc de machine des loueurs est de 50 mois, en 2016¹². En moyenne, ces entreprises renouvellent une partie, voire toute la flotte, tous les 2 ans. Certains assembleurs, notamment les plus gros, qui vendent directement leur production, proposent aussi un service de location. Cette activité représente cependant une faible part dans le chiffre d'affaires ; pour Liebherr par exemple, cela représente seulement 6% du chiffre d'affaires total. Les loueurs pèsent un poids important dans la distribution de matériel de chantier et pour l'extraction, ils représentent aujourd'hui 40% du matériel distribué en France. Visiblement, selon les personnes de ce domaine interrogées au cours de cette étude, il semble que les loueurs de matériel aient vocation à prendre de plus en plus de place sur le marché des équipements de construction et d'extraction. En effet, les entreprises cherchent davantage à jouir d'un service plus que d'un bien. La location offre clairement un avantage : l'entreprise peut déléguer certaines opérations liées aux véhicules, notamment la fiabilité qui est peu regardée lorsque le client loue le matériel, si la machine tombe en panne les loueurs la remplace rapidement par un autre modèle fonctionnel.

Utilisation

Les industriels de la construction et de l'extraction ont trois moyens de se procurer le matériel nécessaire à leurs activités : acheter, louer, ou sous-traiter. La stratégie adoptée dépend de la culture de l'entreprise, mais aussi de sa structure. En effet, les entreprises qui préfèrent posséder le matériel sont en particulier celles qui possèdent leur propre pôle de maintenance des véhicules au sein de l'entreprise.

¹² Chiffres extraits d'une étude de marché du Xerfi sur la fabrication et l'importation de machine pour la construction et l'extraction

III. Potentiel d'électrification des engins off-road

Dans cette partie, nous allons présenter les différents critères qui ont été choisis et étudiés pour évaluer le potentiel d'électrification des engins off-road. Compte tenu du fait que les secteurs aéroportuaire, de la manutention et du paysagisme sont ceux avec un taux d'électrification élevé, les engins off-road qu'ils emploient n'ont pas été pris en considération.

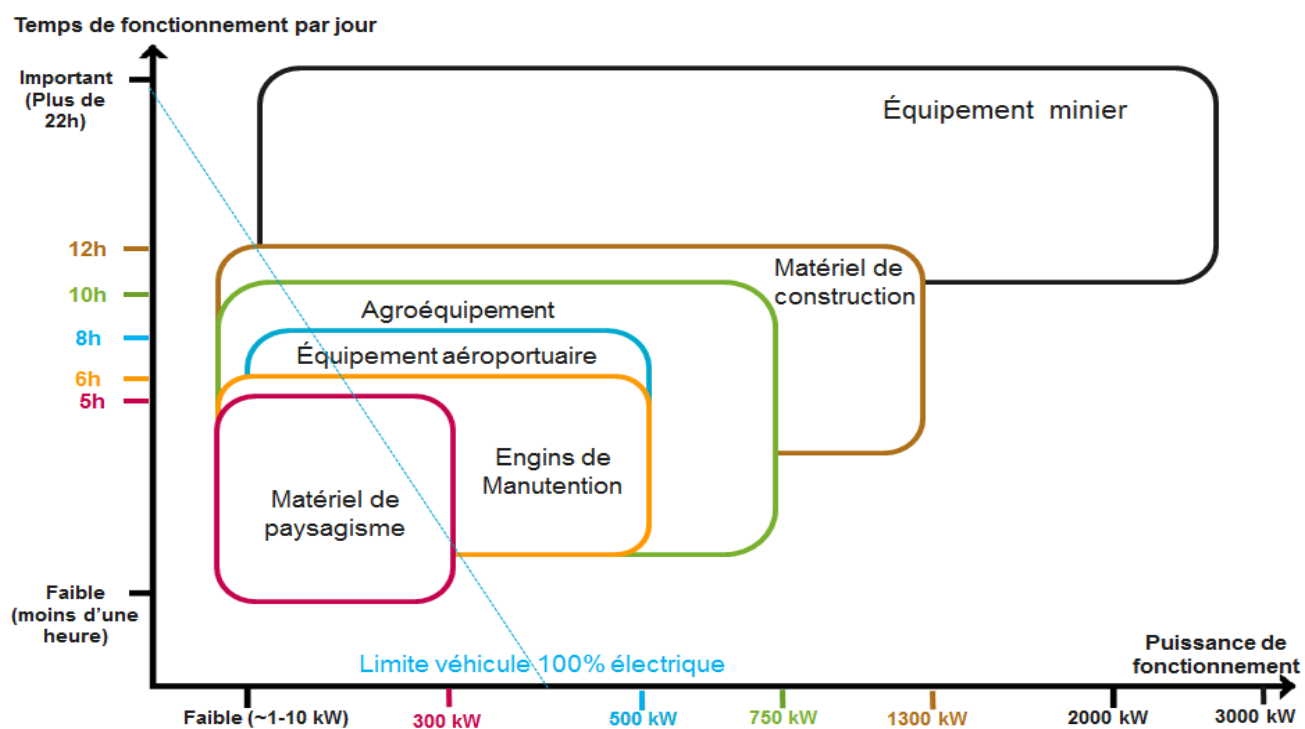
a. Maturité des technologies

La maturité des technologies existantes évalue leur capacité à répondre aux besoins des utilisateurs en matière d'autonomie et de puissance, afin que les véhicules puissent remplir la mission demandée. Plus précisément, il s'agit d'analyser le potentiel d'électrification uniquement d'un point de vue énergétique, sans pour l'instant se préoccuper du coût.

Les batteries lithium ion sont les batteries les plus performantes aujourd'hui, mais elles sont tout de même limitées en termes de densité énergétique (kWh/Kg) et de densité de puissance (kW/Kg). Par exemple, il serait possible d'électrifier un véhicule d'une puissance équivalente à 200 kW, mais ce véhicule ne serait pas capable de fonctionner pendant plus de 5h. Techniquement, un tel véhicule électrique pouvant fonctionner aussi longtemps pourrait exister, mais cela impliquerait une augmentation très significative de la taille et du poids de l'engin. Or dans certains secteurs, une augmentation du poids du véhicule poserait un problème. Dans l'agriculture par exemple, un tracteur puissant (plus de 300 kW) permettra de réaliser des travaux difficiles, comme le labour, mais son poids important pourrait causer le tassement des sols, et en altérer la qualité. Un tracteur électrique de même puissance sera inévitablement plus lourd, à cause du poids des batteries. Pour certains véhicules cependant, le poids des batteries n'est pas nécessairement un inconvénient. En effet, pour les engins de levage et de manutention, les batteries ont un effet de lest, ce qui pourrait permettre de déplacer des charges plus lourdes. Il faudra certes plus de puissance pour faire avancer le véhicule, mais le gain en productivité pourrait ne pas être négligeable.

La Figure 13 récapitule les gammes de puissances des engins pour chaque secteur, ainsi que leur fourchette moyenne d'autonomie. La limite « véhicule 100% électrique » a été établie en fonction des performances actuelles des batteries et se veut approximative.

Figure 13 : Puissances et autonomies requises en fonction des secteurs off-road

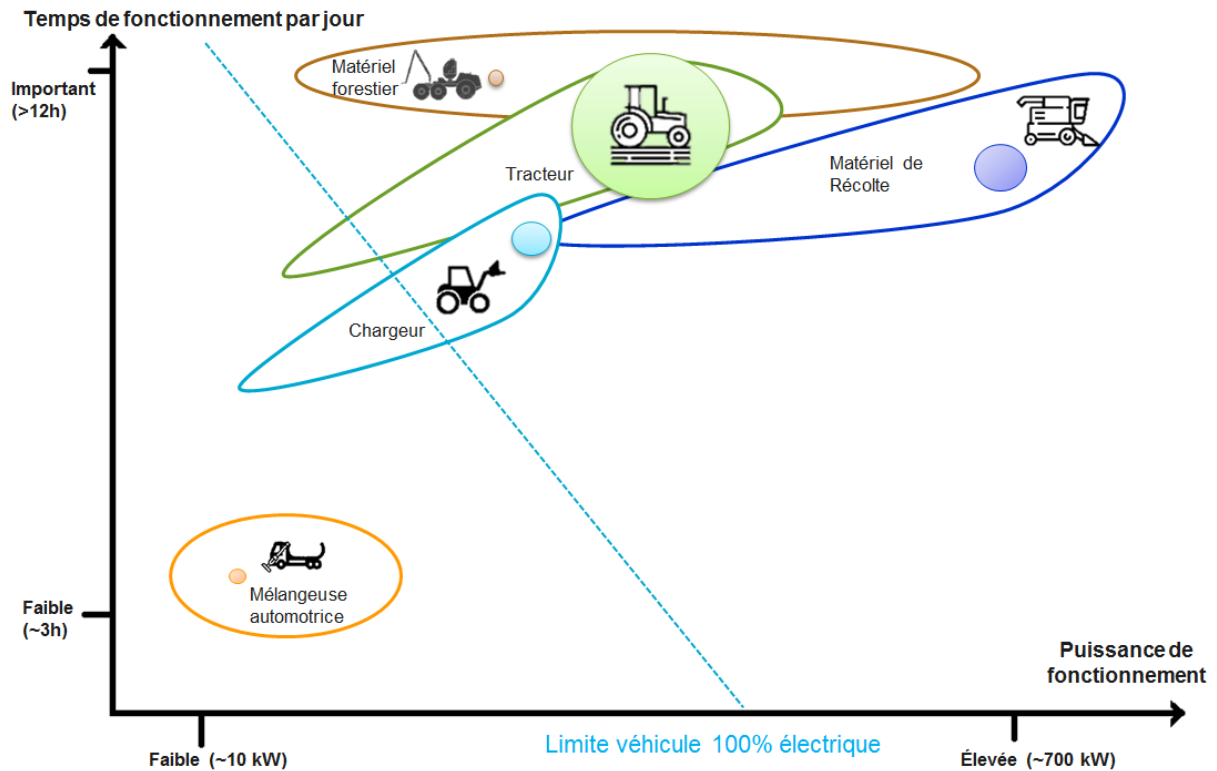


Dans le reste de cette section, des figures détaillent les catégories d'engins en fonction de chaque secteur off-road, permettant d'avoir un aperçu des véhicules qui pourraient techniquement être électrifiés du point de vue des performances des batteries actuelles.

- **Agriculture**

Dans le domaine agricole, les machines automotrices qui pourraient être électrifiées seraient donc la mélangeuse automotrice, une partie des chargeurs agricoles, ainsi que les tracteurs de faible puissance.

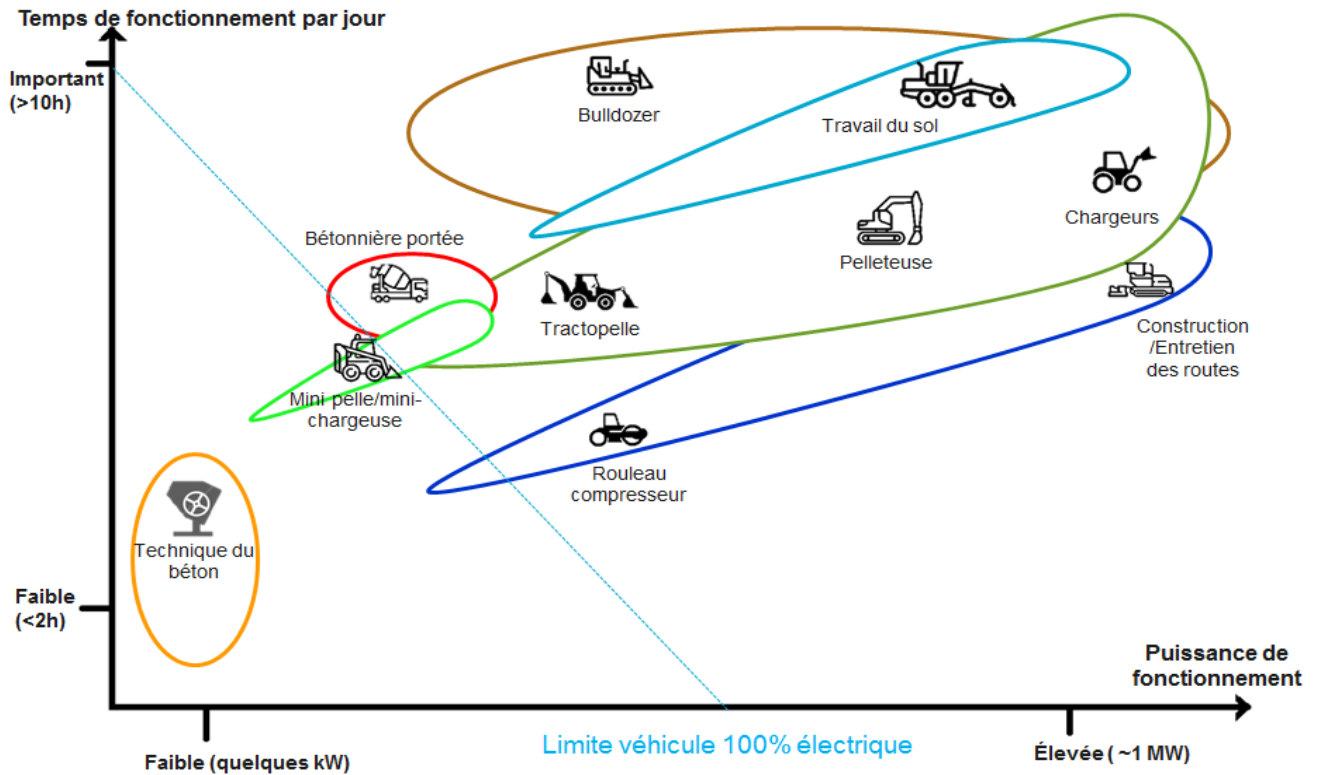
Figure 14 : Puissances et autonomies requises pour les engins agricoles



- **Chantiers**

Dans le secteur des chantiers, tous les véhicules appartenant à la famille des techniques du béton (truelles, plaques vibrantes, ...) pourraient être électrifiés en raison de leur très faible besoin de puissance et leur utilisation peu longue. Les bétonnières, les midipelles et chargeuses, ainsi que les rouleaux compresseurs de faible puissance remplissent aussi les conditions d'autonomie et de puissance pour envisager leur électrification.

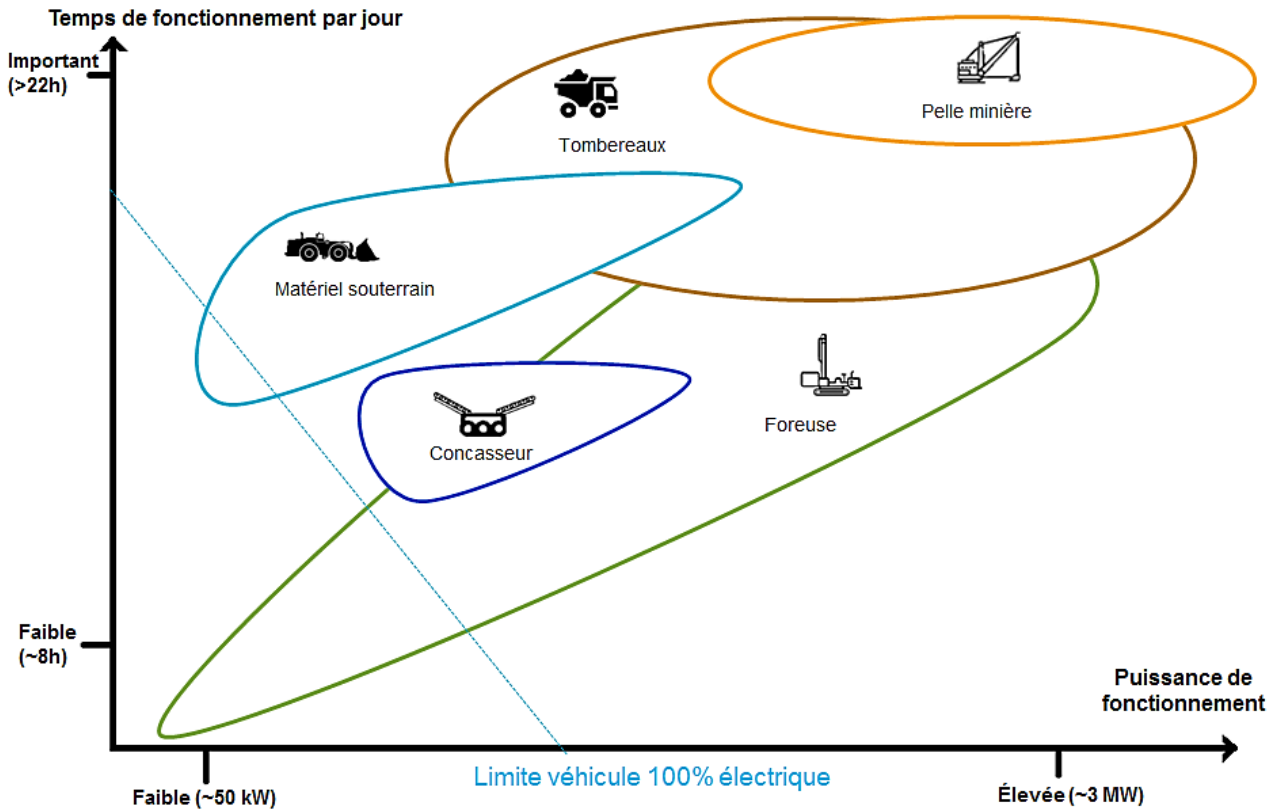
Figure 15 : Puissances et autonomies requises pour les engins de chantier



- **Mines et carrières**

Enfin, dans le secteur des mines et carrières, la gamme la moins puissante des foreuses et du matériel souterrain seraient susceptibles d'être électrifiés. Dans ce secteur, les véhicules sont très puissants et sont amenés à travailler sur de longues périodes.

Figure 16 : Puissances et autonomies requises pour les engins de mines et carrières



- **Hybridation**

Concernant l'hybridation des engins off-road, il n'y a pas de contrainte en termes de puissance et de besoin d'autonomie des véhicules. Il est finalement possible technologiquement d'hybrider n'importe quel engin, le verrou technique porte plus sur l'intégration des composants électriques pour que cela ne porte pas atteinte à la compacité de l'engin.

b. Besoins et attentes du client

Dans le domaine off-road, en fonction du type d'engin, de la mission à réaliser et du contexte d'utilisation, les clients n'ont pas les mêmes attentes lors de leur achat. Les clients seront donc plus ou moins sensibles aux avantages et aux spécificités qu'apportent les solutions électriques selon les véhicules dont ils ont besoin. Dans cette partie, sera examiné le niveau d'acceptation des solutions électriques ou hybrides par les utilisateurs des machines en fonction de leurs besoins, attentes et perceptions en ce qui concerne les performances des engins. L'évaluation de ce critère repose principalement sur les différents entretiens qui ont été menés durant l'étude avec les utilisateurs d'engins off-road.

- **Secteur des chantiers, mines & carrières**

Dans ce secteur, les engins électriques n'ont pas bonne réputation car ils sont considérés comme étant trop chers et peu performants. D'un autre côté, la consommation énergétique des engins dans ce secteur est très surveillée, et les entreprises fournissent de nombreux efforts pour réduire ce pôle de dépense. En effet, beaucoup d'entreprises de BTP font suivre des formations d'éco conduite aux conducteurs car la manière de conduire un engin off-road a un impact notable sur sa consommation énergétique. Ainsi, avec l'augmentation des prix du carburant, les entreprises de BTP et les exploitants de carrières sont de plus en plus demandeurs de solutions énergétiquement moins consommatrices. Ainsi, malgré le fait que la plupart des entreprises aient des doutes sur la fiabilité des engins électriques, le progrès des technologies et l'augmentation des prix du carburant les rendent plus ouvertes aux solutions électriques, sous condition que celles-ci soient économiquement avantageuses au final. Selon les entreprises interrogées, le critère de la consommation semble être le second regardé par les entreprises du BTP et de l'extraction, après celui de la fiabilité ou du rendement.

- **Secteur agricole**

En revanche, dans l'agriculture, tant que le niveau des taxes concernant le GNR ne va pas augmenter, la consommation en énergie du véhicule ne sera pas le principal critère regardé lors de l'achat d'une machine agricole. Globalement, les solutions permettant de réduire la consommation semblent actuellement être une préoccupation moindre que dans le secteur du BTP. Il est aussi important de rappeler que les agriculteurs ont une capacité d'investissement très restreinte, le prix à l'achat étant en conséquence décisif dans le choix final du véhicule, ce qui pourrait être un frein majeur à l'adoption de solutions électriques. Cependant, certains marchés de niche, comme les exploitants de terres certifiées biologiques ou certaines marques de luxe, seraient potentiellement plus sensibles et ouverts à des solutions n'émettant pas de polluants locaux. De plus, les solutions permettant de rendre les machines agricoles autonomes, afin en particulier de pallier le manque de main d'œuvre et ainsi d'améliorer la productivité, seront bien accueillies.

c. Contexte politique et normatif

L'émergence de solutions alternatives aux moteurs diesel ne se fera pas sans une certaine contrainte des pouvoirs publics qui ont des moyens d'incitation (voire de contrainte) à la fois économiques, politiques et normatifs. Dans cette partie, sera étudiée l'influence des pouvoirs publics et des collectivités locales sur l'adoption de solutions électriques. Il s'agit d'analyser si ces institutions seraient en mesure de favoriser l'émergence d'engins électriques de façon directe ou indirecte par des moyens législatifs, comme des normes (contraintes en termes d'émissions), ou des incitations financières (bonus à l'achat, etc) par exemple.

Les industriels, professionnels du BTP ou agriculteurs ne sont soumis à aucune norme en matière d'émission de polluants de leurs machines. Seuls les constructeurs des engins off-road sont soumis aux normes d'émission concernant les moteurs, comme mentionné dans la Partie 1.4 ci-dessus. Cependant, l'investissement en R&D pour développer des systèmes de combustion et de post traitement respectant les normes d'émission se répercute sur le prix final de l'engin. Ce coût est d'autant plus important que la machine fonctionne avec un moteur puissant.

Ensuite, parmi ces facteurs, on retrouve également l'augmentation des prix du carburant qui est un manque à gagner pour les utilisateurs des machines. Ceux-ci ont par conséquent plus d'exigences concernant les performances et les niveaux de consommation d'énergie. En septembre 2018, le gouvernement a annoncé sa volonté de rehausser la taxe du gazole non routier (GNR) pour les entreprises industrielles. Cela pourrait en particulier concerner la filière BTP, grande consommatrice de GNR. Selon Jacques Chanut, président de la FFB (Fédération Française du Bâtiment) : « Alors que les agriculteurs et l'industrie ferroviaire sont épargnés, cette mesure illustre le retour en force de l'écologie punitive pour notre secteur. Il eut été plus judicieux d'équilibrer cette décision par la mise en place d'un dispositif incitant à l'usage de matériels électriques, aujourd'hui très coûteux et pas toujours performants, afin de favoriser l'émergence d'une filière propre »¹³. Mais cette mesure, si elle est maintenue, pourrait fortement favoriser l'émergence de solutions électriques pour réduire l'impact financier de l'augmentation des prix du GNR.

Enfin, les pouvoirs publics, notamment en France mais également dans d'autres pays, ont la volonté de limiter la pollution dans les zones urbaines. Cela passe par la définition de zones de faibles émissions, couramment désignées sous le terme de Low Emission Zone (LEZ). Les zones de faibles émissions consistent à interdire l'accès à une ville ou partie de ville aux véhicules et engins qui ne répondent pas à certaines normes d'émissions (normes Euro) ou non pourvus de certains équipements (présence d'un filtre à particules)¹⁴. Ce dispositif existe depuis une dizaine d'années en France et a été mis en place dans les villes de Paris et Grenoble, d'autres villes étant en train d'envisager de faire de même. On peut donc imaginer que les pouvoirs publics seraient plus enclins à soutenir financièrement la transition électrique de tous les engins off-road qui sont amenés à travailler dans les villes, zones où la qualité de l'air est contrôlée pour des raisons de santé publique.

En ce qui concerne les normes d'émission de polluants mentionnées précédemment, elles sont une incitation pour les constructeurs qui travaillent sur les solutions hybrides, à

¹³ <https://www.lemoniteur.fr/article/hausse-du-prix-du-gazole-dans-le-btp-les-professionnels-denoncent-une-mesure-brutale.1993069>

¹⁴ <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/zones-faibles-emissions-lez-europe-ademe-2017-rapport.pdf>

utiliser des moteurs moins puissants, qui de fait polluent moins. En effet, hybrider un véhicule permet d'avoir recours à des moteurs thermiques de moindres puissances, car le moteur électrique fournit une part de la puissance nécessaire au fonctionnement du véhicule. Cela peut permettre de changer de catégorie de puissance dans les normes d'émission pour le moteur thermique.

La Figure 17 résume les limites de polluants fixées par la norme Stage V. En particulier, il peut être intéressant de changer de catégorie pour Stage V quand la puissance du véhicule se situe autour de 19 kW ou 56 kW. Les contraintes d'émission de HC, NOx et particules (en nombre et en masse) sont moindres si la puissance du moteur est en dessous de la barre des 19 kW. Même raisonnement pour les HC et NOx si la puissance du moteur passe juste sous la barre des 56 kW.

Figure 17 : Limites d'émission imposées par la norme Stage V

Puissance kW	CO g/kWh	HC g/kWh	NOx g/kWh	Particules PM (masse) g/kWh	Particules PN (nombre)
0 < P < 8	8,00	(HC + NOx ≤ 7,50)		0,40	-
8 ≤ P < 19	6,60	(HC + NOx ≤ 7,50)		0,40	-
19 ≤ P < 37	5,00	(HC + NOx ≤ 4,70)		0,015	1x10 ¹²
37 ≤ P < 56	5,00	(HC + NOx ≤ 4,70)		0,015	1x10 ¹²
56 ≤ P < 130	5,00	0,19	0,40	0,015	1x10 ¹²
130 ≤ P ≤ 560	3,50	0,19	0,40	0,015	1x10 ¹²
P > 560	3,50	0,19	3,50	0,045	-

Ces différentes mesures sont des exemples de facteurs qui, sans viser directement le domaine des engins off-road en particulier, créent un contexte favorable à l'émergence de solutions électriques dans ce secteur. Dans ce cas, on constate que le domaine urbain est particulièrement visé par les pouvoirs publics en termes de restriction d'émissions de polluants, ce qui pourrait faciliter la promotion des solutions électriques dans ce contexte.

d. Infrastructures de recharge

Envisager le développement de solutions électriques conduit à se poser la question des modalités de recharge des batteries des engins, et ainsi à étudier l'accessibilité au réseau électrique. Il est nécessaire d'examiner les possibilités qui s'offrent au client pour recharger la machine, et d'envisager les problématiques qu'il pourrait rencontrer pour réapprovisionner le véhicule en énergie.

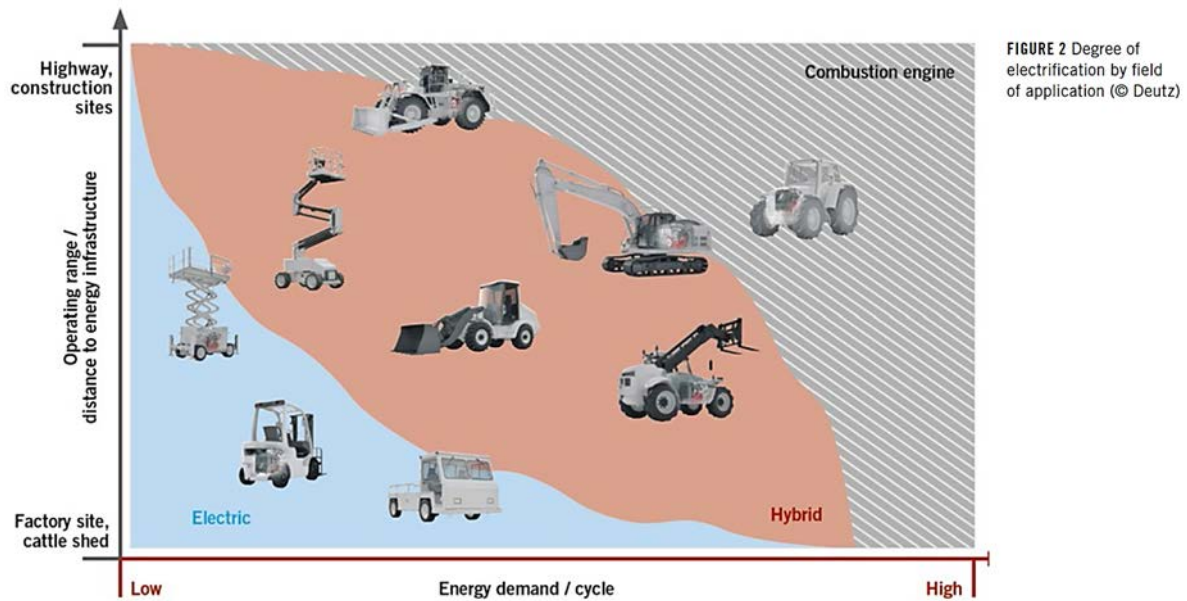
Pour la recharge des engins off-road, on peut distinguer plusieurs cas de figures :

- Dans un premier cas, le véhicule a suffisamment d'autonomie pour remplir une journée de travail, et sera donc rechargé durant la nuit. Il s'agit du cas le plus simple, car mis à part dans les lieux non urbains et non raccordés au réseau électrique, il est possible de trouver un endroit pour recharger un véhicule.
- Dans la majorité des cas, les batteries sont susceptibles d'avoir besoin d'être rechargées au cours de la journée. Des constructeurs envisagent la solution de batteries amovibles, c'est-à-dire le pack de batterie pourrait être remplacé par un autre chargé au cours de la journée, sans perdre trop de temps. Mais au regard des puissances mises en jeu dans le domaine off-road, les batteries seraient beaucoup trop lourdes pour être changées manuellement, il faudrait faire intervenir une aide technique pour réaliser l'échange. En outre, posséder deux packs de batterie demande un investissement très conséquent.
- Une autre solution explorée par les constructeurs est celle de la charge rapide qui permettrait de recharger les batteries en quelques heures. Cependant, c'est une installation qui demande un certain investissement, mais également, selon une personne travaillant dans la technologie des batteries interrogée dans le cadre de l'étude, le mode de recharge rapide peut diminuer drastiquement leur durée de vie.

Ainsi, la question des bornes de chargement est une question cruciale pour le développement de solutions électriques. En 2014, le Conseil de l'Union Européenne a adopté la directive AFI (Alternative Fuels Infrastructures). Celle-ci dicte le déploiement dans chaque Etat membre d'infrastructures pour les carburants de substitution (électricité, hydrogène ou gaz naturel), et donc de bornes de recharge¹⁵. Chaque pays de l'UE a la liberté de choisir sa propre stratégie et ses objectifs en matière de développement de structure de recharge. En France, l'ADEME a publié en 2012 un livre vert pour les infrastructures de recharge de véhicules électriques. Ce livre est constitué de recommandations portant sur la standardisation des normes de prises et de charges. Des précisions sont également apportées concernant le réseau national d'infrastructures de recharge, les fonctionnalités et les usages des bornes¹⁶. Au niveau des infrastructures de recharge, la prise EDF classique délivre 2 à 3 kW, les Wallbox (bornes de recharge pour particuliers) montent à 10-15 kW, les bornes de recharge mises en place pour les véhicules particuliers dans les villes et sur les routes sont situées entre 15 et 50 kW, et enfin les bornes Tesla dépassent les 100kW de puissance. Mais aujourd'hui les infrastructures de recharge existent en nombre limité et sont adaptées uniquement pour les véhicules légers. Les engins off-road doivent donc faire avec les structures existantes, plus ou moins accessibles selon le contexte d'utilisation.

¹⁵ http://www.averre-france.org/Site/Article/?article_id=5775

¹⁶ http://www.averre-france.org/Site/Article/?article_id=5944

Figure 18 : Possibilités d'électrification en fonction des types d'application¹⁷

La Figure 18 montre que l'éloignement d'un véhicule par rapport au réseau électrique joue sur le potentiel d'électrification de celui-ci. En effet, plus un véhicule sera éloigné de l'infrastructure de recharge, moins il sera envisageable de l'électrifier. On remarque que la solution de l'hybridation constitue un bon compromis entre le besoin de puissance et l'éloignement de la structure de recharge. Cette problématique peut par exemple s'illustrer dans le domaine des travaux publics et selon plusieurs caractéristiques des chantiers qu'il concerne :

- La taille des chantiers : les chantiers de taille plus importante ou ceux qui vont durer un certain temps peuvent être reliés, dans un temps comparativement court, au réseau électrique, permettant ainsi de recharger les véhicules. En revanche, cela pourrait s'avérer plus difficile pour les petits chantiers courts, car le temps de raccordement au réseau pourrait être trop long par rapport à la durée totale du chantier.
- La localisation des chantiers : les chantiers urbains sont, de fait, à proximité du réseau électrique de la ville. En revanche pour les chantiers non urbains, c'est une question plus complexe qui dépend de leur durée et de leur éloignement au réseau électrique le plus proche.
- Le type de chantiers : il sera possible d'envisager un raccordement au réseau électrique pour les chantiers fixes, en revanche, il paraît plus compliqué d'avoir accès au réseau électrique pour les chantiers mobiles.

Ainsi, pour les petits chantiers situés hors des villes et mobiles, par exemple l'entretien de petites routes en zone rurale, on peut estimer qu'il y a une très faible probabilité qu'ils soient raccordés au réseau électrique. Dans ces cas de figure, l'introduction de machines électriques au sein du parc paraît problématique. Aujourd'hui, les chantiers de ce type sont ravitaillés par des camions citernes, qui permettent aux véhicules de remplir leur réservoir de carburant. Dans l'agriculture, une ferme permet la recharge sur site car les machines ne s'en éloignent pas trop ; surtout en France où les très grandes exploitations sont peu nombreuses.

¹⁷ Deutz - CO2-neutral Mobility Potential of Alternative Fuels and Electrification for Off-highway Applications

Enfin, dans le domaine de l'exploitation des carrières, les matériaux extraits sont traités dans une usine située à proximité (moins d'un kilomètre) du lieu d'exploitation, qui est de fait raccordée au réseau. Donc tous les véhicules qui évoluent au sein de l'usine de traitement se trouvent directement à proximité d'un raccordement électrique.

e. Coût global de possession

Le coût global de possession, ou total cost of ownership (TCO), est un critère regardé par les entreprises qui achètent du matériel, afin d'évaluer non seulement l'investissement à l'achat, mais aussi pour prendre en compte les frais d'exploitation du matériel. Il est évident que l'électrification des machines mobiles entraîne actuellement une augmentation non négligeable du prix d'achat du véhicule, et si le client se focalise uniquement sur ce chiffre, il ne choisira jamais la solution électrique car ce ne sera pas rentable. Or, un véhicule électrique aujourd'hui a un coût de fonctionnement moins élevé que le véhicule thermique. En effet, le coût d'une recharge des batteries est beaucoup moins élevé qu'un plein de GNR, et cette différence s'accroît si le prix du GNR augmente. Cependant, beaucoup de clients ne privilégient pas particulièrement l'approche TCO et se focalisent en premier lieu sur le prix d'achat de la machine. Nous cherchons ici à identifier quels secteurs, et donc quelles catégories de clients, seraient plus sensibles à l'approche TCO, mais aussi à évaluer l'importance du coût de fonctionnement par rapport au coût global de possession de la machine.

Si l'on compare le coût d'un véhicule thermique et celui d'un véhicule électrique, le résultat dépend fortement de la durée de possession de la machine et des heures de fonctionnement à l'année. Plus la machine sera conservée longtemps et utilisée de façon intensive, plus le véhicule électrique sera économiquement avantageux par rapport au véhicule thermique. Ainsi, il semble plus probable que les solutions électriques soient davantage rentables dans les secteurs des chantiers, mines et carrières, où les machines sont exploitées de manière intensive, généralement toute l'année. En revanche, dans le secteur agricole, l'utilisation des machines varie en fonction des saisons, mais elles sont également utilisées moins longtemps durant la journée. Cependant, si le véhicule est utilisé dans le cadre d'une CUMA (Coopérative d'utilisation du Matériel Agricole), l'avantage devient significatif.

D'après une étude de marché sur les engins off-road hybride¹⁸, en moyenne une machine hybride coûterait entre 20% et 30% plus cher que son équivalent en tout thermique. De plus, d'après l'analyse des prototypes présentés lors des salons, l'hybridation d'un véhicule permettrait de réduire la consommation de carburant de 10% à 40%, selon les applications. A cela, on peut ajouter la baisse des opérations de maintenance. Cependant, ces chiffres sont ceux annoncés par les constructeurs, il existe peu de retour d'expériences de la part des entreprises qui possèdent de telles machines sur la consommation réelle des engins et sur son évolution au cours du temps.

¹⁸ Etude Frost & Sullivan, mars 2018 : "Hybridization Trends in the Global Off-highway Vehicle Market, 2017–2025"

f. Synthèse des véhicules à potentiel d'électrification

Au regard de tous les critères mentionnés ci-dessus, les 4 tableaux suivants proposent une synthèse du potentiel d'électrification et d'hybridation de différents engins off-road des secteurs de l'agroéquipement et des chantiers, mines & carrières. Ci-dessous, la liste des engins n'est pas exhaustive, car limitée aux engins ayant les volumes de vente les plus importants.

La légende de lecture de ces tableaux est comme suit :

- ✓ - : pas d'intérêt
- ✓ = : peu de potentiel (neutre)
- ✓ + : potentiel modéré
- ✓ ++ : potentiel fort

• Potentiel d'électrification :

Tableau 1 : Potentiel d'électrification d'engins off-road du secteur de l'agroéquipement :

Véhicules / Critères	Maturité des technologies	Besoins et attentes du client	Contexte politique et normatif	Infrastructures de recharge	TCO	Synthèse
Tracteur Petit (40-90 kW)	+	+	=	+	=	++
Tracteur Moyen (90-180 kW)	=	=	=	-	=	-
Tracteur Gros (>180 kW)	-	-	=	-	=	-
Ensileuse	-	=	=	-	=	-
Moissonneuse-batteuse	-	=	=	-	=	-
Chargeur	+	=	=	-	=	+
Machine à vendanger	-	=	=	-	=	-
Aérateur	+	=	=	-	=	-
Faucheuse-débroussailluse	-	=	=	-	=	-
Mélangeuse automotrice	++	+	=	+	=	++

Tableau 2 : Potentiel d'électrification d'engins off-road des secteurs de l'équipement de chantier, des mines et des carrières :

Véhicules / Critères	Maturité des technologies	Besoin et attentes du client	Contexte politique et normatif	Infrastructures de recharge	TCO	Synthèse
Balayeuse	+	+	+	+	+	++
Bétonnière portée	+	+	-	=	+	+
Bulldozer	-	+	-	=	+	=
Camion minier	=	+	-	=	+	+
Chargeur transporteur	=	+	+	+	+	++
Chargeuse de chantier	+	+	+	+	+	++
Concasseur	-	+	-	=	+	=
Crible	=	+	-	=	+	+
Excavatrice-aspiratrice	-	+	-	=	+	=
Foreuse	+	+	-	=	+	+
Fraiseuse routière	=	+	-	=	+	+
Pelle à câble	-	+	+	+	+	++
Pelleteuse	=	+	+	+	+	++
Rouleau compresseur	=	+	-	=	+	+
Stabilisatrice de sol	-	+	-	=	+	=
Tombereau	=	+	-	=	+	+
Tracteur	=	+	-	=	+	+
Tractopelle	=	+	-	=	+	+
Transporteur	-	+	-	=	+	=

- **Potentiel d'hybridation**

Tableau 3 : Potentiel d'hybridation d'engins off-road du secteur de l'agroéquipement :

Véhicules / Critères	Maturité des technologies	Besoins et attentes du client	Contexte politique et normatif	Infrastructures de recharge	TCO	Synthèse
Tracteur Petit (40-90 kW)	++	+	=	+	=	++
Tracteur Moyen (90-180 kW)	+	+	=	-	=	+
Tracteur Gros (>180 kW)	+	+	=	-	=	+
Ensileuse	=	+	=	-	=	=
Moissonneuse-batteuse	=	+	=	-	=	=
Chargeur	+	+	=	+	=	+
Machine à vendanger	=	+	=	-	=	=
Aérateur	=	=	=	-	=	-
Faucheuse-débroussailluse	=	+	=	-	=	=
Mélangeuse automotrice	++	+	=	+	=	++

Tableau 4 : Potentiel d'hybridation d'engins off-road du secteur de l'équipement de chantier, mines et carrières :

Véhicules / Critères	Maturité des technologies	Besoin et attentes du client	Contexte politique et normatif	Infrastructures de recharge	TCO	Synthèse
Balayeuse	=	+	+	+	+	++
Bétonnière portée	=	+	=	=	+	+
Bulldozer	=	+	=	=	+	+
Camion minier	=	+	=	=	+	+
Chargeur transporteur	=	+	=	=	+	+
Chargeuse de chantier	=	+	+	=	+	++
Concasseur	=	+	=	=	+	+
Crible	=	+	=	=	+	+
Excavatrice-aspiratrice	=	+	=	=	+	+
Foreuse	=	+	=	=	+	+
Pelle à cable	=	+	+	+	+	++
Pelleteuse	=	+	+	+	+	++
Rouleau compresseur	=	+	=	=	+	+
Tombereau	=	+	=	=	+	+
Tracteur	=	+	=	=	+	+
Tractopelle	=	+	=	=	+	+
Transporteur	=	+	=	=	+	+

IV. Choix technologiques pour l'électrification

a. Systèmes de stockage de l'énergie

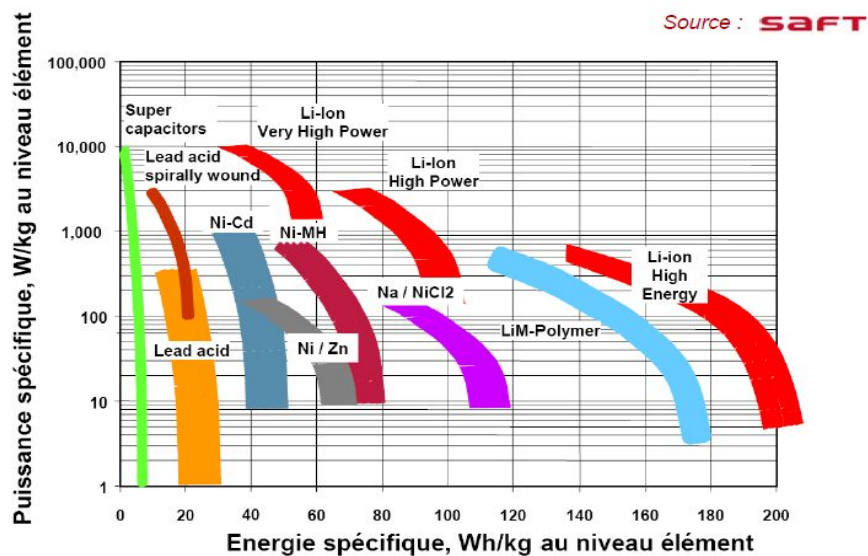
Les batteries, les supercapacités et les accumulateurs hydrauliques sont des systèmes de stockage d'énergie. Les batteries et les supercapacités stockent de l'énergie électrique, tandis que les accumulateurs stockent de l'énergie sous forme hydraulique.

- **Batteries**

Les batteries sont constituées de plusieurs cellules assemblées. Ce système de stockage est une technologie clé pour le développement des véhicules électriques. La majorité des batteries intégrées dans les véhicules sont des batteries au lithium ion (li-ion), qui sont considérées aujourd'hui comme les plus performantes en termes de densité d'énergie (Wh/kg) et de densité de puissance (W/kg), comme le montre la Figure 19.

Figure 19 : Comparaison des performances de différents types de batteries

Diagramme de Ragone des batteries



L'Europe accuse un retard concernant la production des batteries, aujourd'hui les cellules sont majoritairement importées d'Asie. C'est pourquoi l'Europe a besoin de développer un savoir-faire dans la production de la technologie « 4ème génération de cellules », qui sont les batteries tout solide. Il s'agit de remplacer le solvant électrolyte, la substance conductrice de l'électricité, par une plaque de verre. Cette technologie est prévue pour 2025. Ce type de batteries aurait une meilleure densité d'énergie et entraînerait moins de risques d'explosion en cas d'accident. Le gouvernement français a d'ailleurs prévu d'investir massivement pour développer cette filière considérée comme stratégique.¹⁹

¹⁹ <https://www.numerama.com/sciences/380688-nouvelle-generation-de-batteries-lithium-ion-la-france-prete-a-soutenir-la-rd.html>

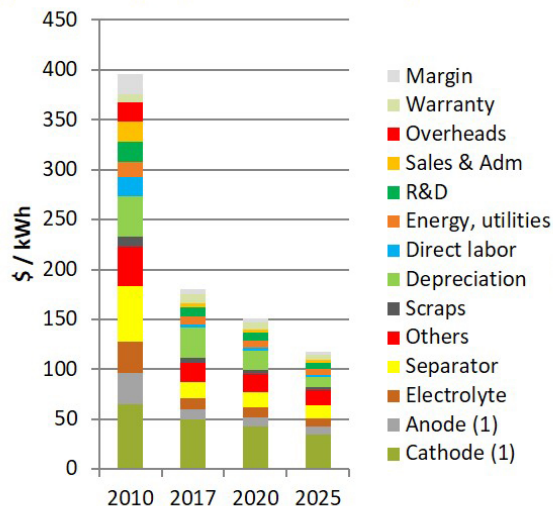
Dans le secteur off-road, l'intégration des batteries dans le véhicule peut représenter un véritable challenge technique. Celles-ci ont un volume conséquent en raison du besoin de puissance de l'engin, et génèrent beaucoup de chaleur lors du fonctionnement. Ainsi, il est nécessaire de considérer également un système de refroidissement des batteries qui peut être à air ou à eau et qui peut poser un véritable problème en termes d'encombrement et de faisabilité. Par ailleurs, les constructeurs qui envisagent des solutions électriques ne peuvent généralement pas se servir directement de packs de batteries déjà assemblées et à destination des véhicules légers. En effet, les engins off-road ne sont pas soumis aux mêmes contraintes, ni amenés à travailler dans les mêmes conditions, comme le froid, la chaleur, la poussière, etc... De plus, il y a un réel manque d'information sur les performances des batteries et leur résistance sous des conditions extrêmes, notamment concernant la durée de vie ou le taux de décharge. Enfin, pour confectionner une batterie destinée à être intégrée dans un engin off-road, les fabricants de batteries, ou ceux qui sont en charge de leur intégration au sein de la chaîne de transmission, ont besoin de connaître le nombre de cycles de fonctionnement nécessaires pour réaliser un dimensionnement correct afin de limiter le coût de fabrication et des tests, informations généralement manquantes.

Par ailleurs, le principal frein à l'achat d'un engin électrique reste son coût élevé qui provient en grande partie du prix des batteries. Cependant, la Figure 20 montre que le prix des batteries li-ion a beaucoup baissé ces dernières années et va très probablement chuter encore dans les années à venir.

Figure 20 : Evolution du prix des batteries li-ion, entre 2010 et 2025

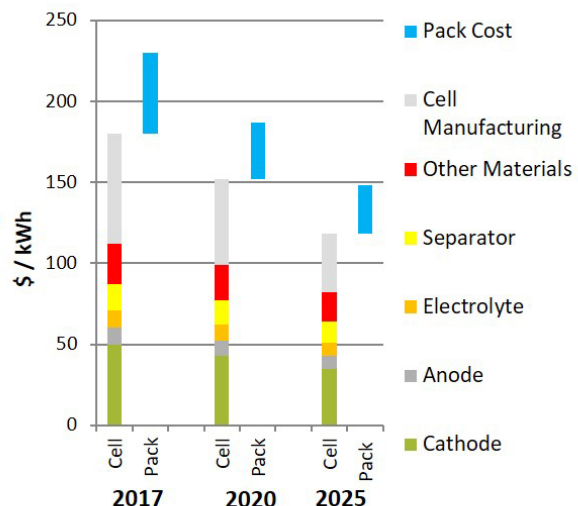
LI-ION BATTERY COST 2015-2025

LIB cell average cost (40 Ah pouch)
(EV design ; NMC cathode)



(1) Active materials only
Source: AVICENNE ENERGY 2018

LI-ION BATTERY PACK COST FOR EV



* For Production > 100 000 packs/year

En raison de la criticité des ressources nécessaires à la fabrication des batteries, se pose aussi la question du recyclage de ces dernières. Aujourd'hui, il semble que le processus de recyclage soit long et coûteux, mais le développement de cette filière semble nécessaire

pour pérenniser l'électrification et favoriser une économie circulaire. Malgré toutes ces problématiques qui freinent le développement d'engins électriques alimentés par des batteries, le contexte normatif et environnemental, ainsi que la baisse des prix font que les véhicules électriques vont se démocratiser, le marché devenant un marché de masse.

- **Supercapacités**

Les supercapacités se caractérisent par une densité de puissance très élevée, un temps de charge et de décharge très court, et peuvent subir plusieurs millions de cycles sans entraîner de dégradation. Ce stockage d'énergie électrique est ainsi plus réactif aux demandes de fortes puissances que des batteries, mais ne permet pas d'accumuler beaucoup d'énergie. En raison de ses propriétés, c'est un système de stockage particulièrement utilisé dans les véhicules hybrides, notamment pour récupérer de l'énergie lors du fonctionnement du véhicule, et pour le redistribuer instantanément lors d'un pic de puissance ultérieur. Les supercapacités peuvent être couplées à des batteries pour une meilleure gestion du stockage de l'énergie, la supercapacité fournissant de l'énergie instantanément en cas de forte demande de puissance, permettant à la batterie d'être moins sollicitée et ainsi de rallonger sa durée de vie. Cependant, la gestion électronique complexe de ces équipements rend le dispositif coûteux.

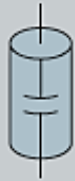
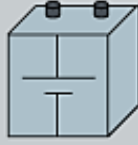


- **Accumulateurs hydrauliques**

Le rôle des accumulateurs hydrauliques est de stocker un certain volume de fluide sous pression pour le restituer en fonction des besoins. Ils sont aussi utilisés pour les commandes d'urgence (terminer un mouvement, actionner un frein, ...), ou pour amortir les chocs dans les démarrages des engins.

- **Comparatifs des systèmes de stockage**

La Figure 21 propose un comparatif de différents systèmes de stockage d'énergie, le terme « Condensateur double couche » correspondant aux supercapacités discutées ci-dessus. Les accumulateurs hydrauliques et les supercapacités ont globalement les mêmes propriétés : Ils permettent de stocker peu d'énergie, contrairement aux batteries, mais sont capables de fournir de fortes puissances en peu de temps. Ils conviennent donc aux systèmes hybrides. Finalement, le choix du système de stockage doit dépendre des performances visées du système énergétique intégré au véhicule.

Figure 21 : Comparaison de dispositifs de stockage d'énergie²⁰

Technologie	Electrique		Mécanique	Hydraulique
Stockage de l'énergie	Condensateur double couche 	Batterie au lithium 	Volant d'inertie 	Accumulateurs 
Densité énergétique	-	+	o	-
Densité de puissance	+	o	o	+
Vieillessement / perte de capacité	o	-	o	+
Sensibilité à la température	-	-	o	+
Décharge propre	-	o	-	+
Packaging	o	o	o	o
Rentabilité	-	o	o	+

²⁰ Hydac - accumulateurs dans la technologie hybride (document disponible sur internet)

b. Motorisations

- **Moteurs thermiques**

Il existe différentes technologies de motorisation thermique comme par exemple les moteurs à combustion interne de type allumage par compression ou commandé, des moteurs à combustion externe, et différents types de carburants comme le diesel, l'essence, l'éthanol, le GNV, le GPL, qu'ils soient issus de sources fossiles ou renouvelables. Les moteurs à allumage par compression, dits diesel, sont les moteurs les plus couramment utilisés dans le domaine du off-road. Un intérêt clé de motorisations thermiques est la très forte densité de puissance massique et volumique des carburants de type hydrocarbures qu'elles utilisent comme sources d'énergie. Cependant, leur rendement ne dépasse pas les 45% pour le moteur diesel, combiné à une génération de bruit et le rejet de polluants. De plus, un moteur thermique ne permet pas un couple élevé à très faible vitesse, son rendement est particulièrement mauvais à faible couple, et sa plage de vitesse est réduite. Une boîte de vitesse permet de corriger partiellement ces défauts et d'utiliser le moteur dans de meilleures conditions opératoires.

- **Moteurs électriques**

Les différentes technologies de machines électriques dans le domaine automobile sont les machines asynchrones, les machines synchrones à aimants permanents ou les machines synchrones à réluctance variable²¹. Le choix d'un moteur électrique pour certaines applications spécifiques a un effet important sur le comportement du système entier. Le choix des caractéristiques et le design d'un moteur électrique à intégrer dans le véhicule ne doivent pas être négligés. La motorisation électrique peut avoir deux fonctions : soit la machine électrique fonctionne comme un moteur pour propulser le véhicule, soit elle fonctionne en génératrice pour récupérer l'énergie mécanique (au freinage ou fournie par le moteur thermique dans le cas d'un véhicule hybride) et recharger la batterie. L'inconvénient majeur de cette technologie provient de la faible autonomie des systèmes de stockage de l'énergie électrique. En revanche, un moteur électrique possède un bien meilleur couple à bas régime, qui est le régime d'utilisation des engins off-road de façon générale, ainsi qu'un meilleur rendement. De plus, leur fonctionnement est silencieux et propre. C'est le couple qui importe pour la réalisation des travaux dans le domaine off-road, et cela explique pourquoi les engins avec une motorisation électrique ont besoin de moins de puissance pour effectuer les mêmes travaux qu'un engin thermique. La réduction est non négligeable, représentant entre 20 % et 40% de puissance en moins.

- **Moteurs hydrauliques**

Dans le domaine off-road, il est d'usage que l'entraînement des outils se fasse par l'intermédiaire d'un moteur hydraulique, adapté aux applications qui nécessitent un couple important et un espace réduit. Le moteur hydraulique est irremplaçable pour assurer des mouvements de rotation là où les solutions mécaniques atteignent leurs limites, et dans les conditions extrêmes (températures peu compatibles avec les solutions traditionnelles).

²¹ <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00782511/document>

c. Chaîne de transmission

La chaîne de transmission d'un véhicule englobe tous les organes participant à l'acheminement et à la transformation du mouvement de rotation du moteur aux roues motrices. Dans le domaine off-road, cela concerne aussi la transmission de puissance aux outils.

Dans une chaîne de transmission de véhicule thermique, la chaîne de transmission de la puissance délivrée par le moteur jusqu'aux roues passe par :

- L'embrayage
- La boîte de vitesses, qui adapte la vitesse de rotation et le couple moteur suivant les conditions de roulage
- L'arbre de transmission
- Le pont autobloquant ou différentiel dont la fonction principale est de différencier la vitesse de chaque roue

Dans la chaîne de transmission mécanique, on retrouve aussi le système de transmission à variation continue (CVT). C'est une alternative à la boîte de vitesses, et permet de s'affranchir des traditionnels passages de rapports. L'avantage principal est l'équilibre optimal entre le couple et la vitesse du moteur, ce qui permet au moteur de fonctionner aussi efficacement que possible à tout moment. Il arrive que les constructeurs l'intègrent dans un véhicule non routier, mais globalement ce système est coûteux et demande davantage d'opérations de maintenance.

En ce qui concerne les chaînes de transmission électriques, les réalisations actuelles des véhicules électriques s'inspirent très fortement des structures propres aux véhicules thermiques. Une chaîne de transmission électrique se compose classiquement d'un moteur électrique, d'un système électronique (alimentation et commande), d'un système de liaison mécanique (réducteur, différentiel et roues). Généralement, il n'y a pas besoin d'embrayage, ni de boîte de vitesses en raison des performances du moteur électrique capable de fournir du couple à très bas régime, tout en possédant une large plage de fonctionnement. En France, la société DINTEC est spécialisée dans le design et la production de chaînes de transmissions, électriques mais aussi hybrides, pour les constructeurs de machines off-road. Leur domaine d'application couvre l'ensemble des secteurs de cette étude, mais concerne aussi le domaine de la défense et des machines pour animations et spectacles.

V. Modèles existants et réalisations techniques

a. Electrification

- **Avantages de l'électrification**

Outre le fait de ne pas émettre de polluants lors de l'utilisation, un engin off-road électrique a d'autres avantages pour les utilisateurs, comparé à un véhicule thermique.

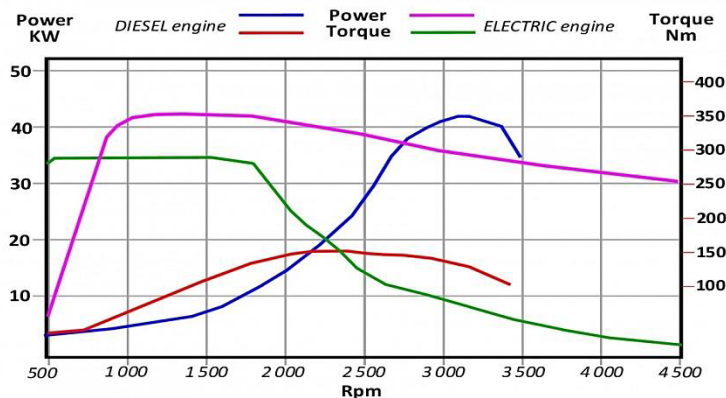
Tout d'abord, électrifier un engin permet de réduire la fréquence des opérations de maintenance. Cela s'explique par une meilleure fiabilité des systèmes électroniques, mais aussi par un nombre plus réduit de pièces mécaniques en mouvement et donc susceptibles de s'user. Il n'y a plus besoin de système de post-traitement, les transmissions sont électriques et remplacent, dans certains cas, les systèmes hydrauliques, annulant le besoin de vérification et de maintenance des fluides circulant dans la machine. Ce point est à nuancer, car à ce stade il n'est pas certain que la fiabilité des engins électriques soit meilleure, compte tenu du peu de retour d'expériences des utilisateurs de machines électriques.

En ce qui concerne le confort d'utilisation, l'engin électrique est beaucoup plus silencieux et génère moins de vibrations. La réduction des nuisances sonores est un gain non négligeable en termes de confort pour la personne qui manœuvre l'engin, mais aussi pour tous ceux qui travaillent à proximité. Cet avantage est plus ou moins valorisé selon les secteurs et les conditions d'utilisation de l'engin off-road. Bien que ce ne soit pas clairement une exigence exprimée par les éleveurs, ces derniers pourraient y voir une opportunité pour améliorer le bien-être des animaux d'élevage qui peuvent être perturbés par le bruit généré par les machines thermiques lors de la distribution de nourriture.

Un autre enjeu concernant l'électrification des engins automoteurs est la possibilité de récupération d'énergie. En effet, lorsque l'engin est en action, durant certaines opérations, comme le freinage, le véhicule produit de l'énergie cinétique qui est dissipée sous forme de chaleur dans le cas d'un véhicule tout thermique. Or, il est possible de récupérer une partie de cette énergie et de la conserver dans un système de stockage (batterie, supercapacité, accumulateur hydraulique).

La Figure 22 illustre les différences en termes de puissance et de couple en fonction de la vitesse de rotation entre un moteur thermique et un moteur électrique. L'électrification permet de bénéficier d'un couple élevé à bas régime, ce qui est une caractéristique particulièrement recherchée pour les engins off-road qui doivent réaliser des travaux demandant de fortes puissances quasiment à l'arrêt ou à de très faibles vitesses. Par exemple, dans l'agriculture, lors du travail du sol dans un champ, l'outil attelé au tracteur demande beaucoup de couple au moteur pour pouvoir remuer la terre, et ce, alors que le tracteur avance à moins de 5 km/h.

Figure 22 : Comparaison d'un moteur thermique et d'un moteur électrique concernant la puissance et couple en fonction du régime moteur²²



Enfin, directement en lien avec le point précédent, les systèmes électriques affichent généralement un bien meilleur rendement que les systèmes mécaniques. Certes, pour l'entraînement des outils, les systèmes hydrauliques sont plus simples, fiables et moins chers, mais utiliser une transmission électrique permet de bénéficier d'un rendement bien plus élevé. En effet, une transmission électrique est plus efficace en raison de la nervosité de la réponse du moteur électrique pour l'accélération et le freinage, entraînant une diminution du temps accordé à chaque aller-retour, notamment dans le cas de la manutention par exemple. Les machines électriques permettent de réaliser un gain en productivité, et donc d'optimiser le retour sur investissement.

- **Engins off-road électriques sur le marché**

Depuis un peu plus de 10 ans, l'électrification est un sujet de R&D dynamique dans le domaine des engins off-road. La fin des années 2010 a vu la sortie des premiers engins électriques, et le nombre de présentations de ces derniers a augmenté. Pourtant, l'idée de véhicules 100% électrique n'est pas nouvelle. Au début du XX^e siècle, plusieurs modèles ont été présentés au public. C'est l'accélération de l'industrialisation, l'avènement d'énergies fossiles bon marché et le besoin toujours croissant de puissance qui ont amené les constructeurs à se détourner des solutions électriques (mais aussi les limitations des systèmes de stockage d'énergie électrique). La plupart des engins électriques actuellement publiés dans la presse sont des prototypes, qui ne sont pas encore passés au stade de la fabrication industrielle. Cependant, cela donne une bonne indication des tendances du marché des engins à électrifier. Dépendant de la stratégie du constructeur, celui-ci peut opter : soit de s'appuyer sur un design classique d'engin thermique et remplacer les organes existants par des organes électriques, soit repenser l'intégralité de la conception de la chaîne de transmission pour l'électrifier.

Secteur agricole

Dans le domaine agricole, les principaux engins en tout électrique, en prototype ou déjà disponibles sur le marché, sont : le tracteur, le chargeur agricole et la mélangeuse automotrice.

²² <http://eclairsea.com/new/content/7-La-motorisation-electrique-pour-les-nuls>

Parmi les tracteurs électriques présents sur le marché, la Figure 23 montre le tracteur e100 Vario de Fendt. Fendt est une marque de tractoriste appartenant au groupe AGCO, qui possède aussi les marques Challenger, GSI, Masset Ferguson et Valtra. Le tracteur e100 Vario embarque un moteur électrique d'une puissance de 50kW, et les batteries ont une capacité de 100kWh, ce qui permet de disposer d'une autonomie de 4h environ²³. Le pack de batteries est disposé à l'avant du véhicule et pèse autour de 600 kg pour un volume de 0,3m³. La plupart des outils n'existant pas en tout électrique, le e100 Vario possède deux prises de force : une électrique et un autre standard avec une alimentation hydraulique usuelle. Conserver l'hydraulique était nécessaire pour que le tracteur soit compatible avec tous les types d'outils.

Figure 23 : Tracteur e100 Vario présenté par Fendt



Actuellement, le prototype de tracteur tout électrique le plus puissant a été présenté par la marque John Deere au Mondial des fournisseurs de l'agriculture et de l'élevage, le SIMA, de 2017. Il développe une puissance de 130 kW et possède deux moteurs électriques : l'un est utilisé pour la traction, l'autre pour l'arbre de prise de force et le système hydraulique. Les batteries ne permettent qu'une autonomie d'environ 1h en utilisation intensive, comme le travail du sol, et de 4h en utilisation de transport.²⁴ Mais avec le développement rapide des batteries, les constructeurs sont confiants que, dans quelques années, le tracteur pourra remplir une journée complète de travail, sans avoir besoin de recharger.

Enfin, Sabi Agri, une start-up française, a développé le tracteur électrique ALPO, d'une puissance de 18 kW et qui possède une autonomie de 8h. Ce tracteur est dédié principalement à la manutention agricole et à l'aide aux travaux manuels. Son design épuré, comme on peut le constater sur la Figure 24, fait que malgré le poids des batteries, le poids total est inférieur à celui d'un tracteur thermique de même puissance. La marque a aussi développé sa gamme et propose aujourd'hui un tracteur enjambeur électrique et un tracteur « tout terrain » d'une puissance de 37 kW. Tous les modèles garantissent 8h d'autonomie et sont globalement plus légers que les tracteurs similaires en thermique présents sur le marché.²⁵

²³ <https://www.fendt.com/fr/e100-vario.html>

²⁴ <https://www.pleinchamp.com/machinisme/actualites-machinisme/un-tracteur-tout-electrique-de-176-ch-pour-john-deere>

²⁵ <https://www.sabi-agri.com/>

Figure 24 : Tracteur électrique ALPO de Sabi Agri

Secteur des chantiers, mines et carrières

Parmi les véhicules du secteur de la construction et de l'extraction développés en version électrique (présents sur le marché ou présentés en prototype), on retrouve notamment le chargeur, le crible, le transporteur, la balayeuse, la foreuse, la chargeuse de chantier, le chargeur transporteur, le camion minier, le jumbo de forage et la pelle mécanique. Ce dernier véhicule est l'un des véhicules les plus vendus dans ce secteur, car il sert aux travaux de terrassement et d'excavation.

L'entreprise Mecalac, spécialisée dans la fabrication de pelles polyvalentes sur pneus et sur chenilles, a présenté cette année sa pelle électrique sur roues, nommée e12, dédiée aux chantiers urbains, cf. Figure 25. L'architecture du véhicule s'inspire grandement de son homologue thermique, la 12 MTX. La e12 est équipée de batteries lithium fer phosphate qui ont une capacité de 146 kWh et une autonomie annoncée de 8h. Ces batteries sont considérées comme ayant une plus grande cyclabilité et comporteraient moins de risque d'embrasement ou de fuite, comparées aux batteries lithium-ion. Les batteries alimentent deux moteurs : l'un dédié à la translation et l'autre à la rotation ainsi qu'aux mouvements du bras.²⁶

Figure 25 : Pelle électrique e12 de Mecalac

Concernant les chargeuses de chantier, l'entreprise Kramer a sorti une chargeuse sur pneus électriques, la 5055^e, cf. Figure 26. Cette chargeuse est dotée de deux moteurs électriques : l'un de 15 kW pour la transmission, l'autre pour ce système hydraulique, d'une

²⁶ <https://www.mecalac.com/fr/e12-pelle-sur-pneus-electrique.html>

puissance de 22 kW.²⁷ La batterie permet une autonomie de 5h. Les 4 roues sont directrices, ce qui lui permet d'évoluer dans des lieux fermés où il y a peu de possibilité de manœuvrer.

Figure 26 : Chargeuse de chantier électrique Kramer



Enfin, les balayeuses, de chantiers ou de rues, ont également été développées en version électrique. La marque Tennant a construit une balayeuse de rue électrique, la 500 ze, de 15 kW et garantissant 8h d'autonomie, montrée à la Figure 27. La 500ze est alimentée par des doubles packs batteries lithium-ion. Leur temps de recharge est de 4h, et le design du véhicule fait que celles-ci sont interchangeables.²⁸

Figure 27 : Balayeuse électrique 500 ze, Tennant



En résumé, dans ce secteur la plupart des engins électrifiés aujourd'hui sont de puissance inférieure à 100 kW, et certains ne sont pas en mesure de fonctionner durant une journée de travail complète. Cependant, avec l'amélioration de la densité énergétique et de la durée de vie des batteries, il est très probable que ces solutions soient amenées à être viables à horizon 2025.

²⁷ <https://www.kramer-online.com/fr/produit/model/5055e/>

²⁸ http://fr.tennantco.com/fr_fr/equipment/balayeuse-espaces-publics/balayeuse-de-rue-%C3%A9lectrique-green-machines/500ze#ItemSpecsDownloadsTab

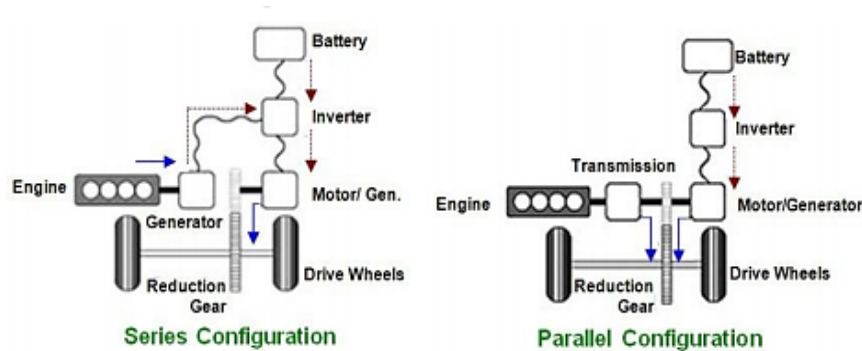
b. L'hybridation

L'hybridation repose sur la volonté de combiner intelligemment deux technologies (thermique et électrique ou hydraulique) pour que l'engin puisse opérer efficacement selon ses besoins en énergie et en puissance. L'objectif est de trouver un compromis entre une réduction de la consommation d'énergie, la réduction du rejet de polluants locaux, tout en conservant les exigences en termes de puissance et d'autonomie.

- **Hybridation dans le domaine off-road**

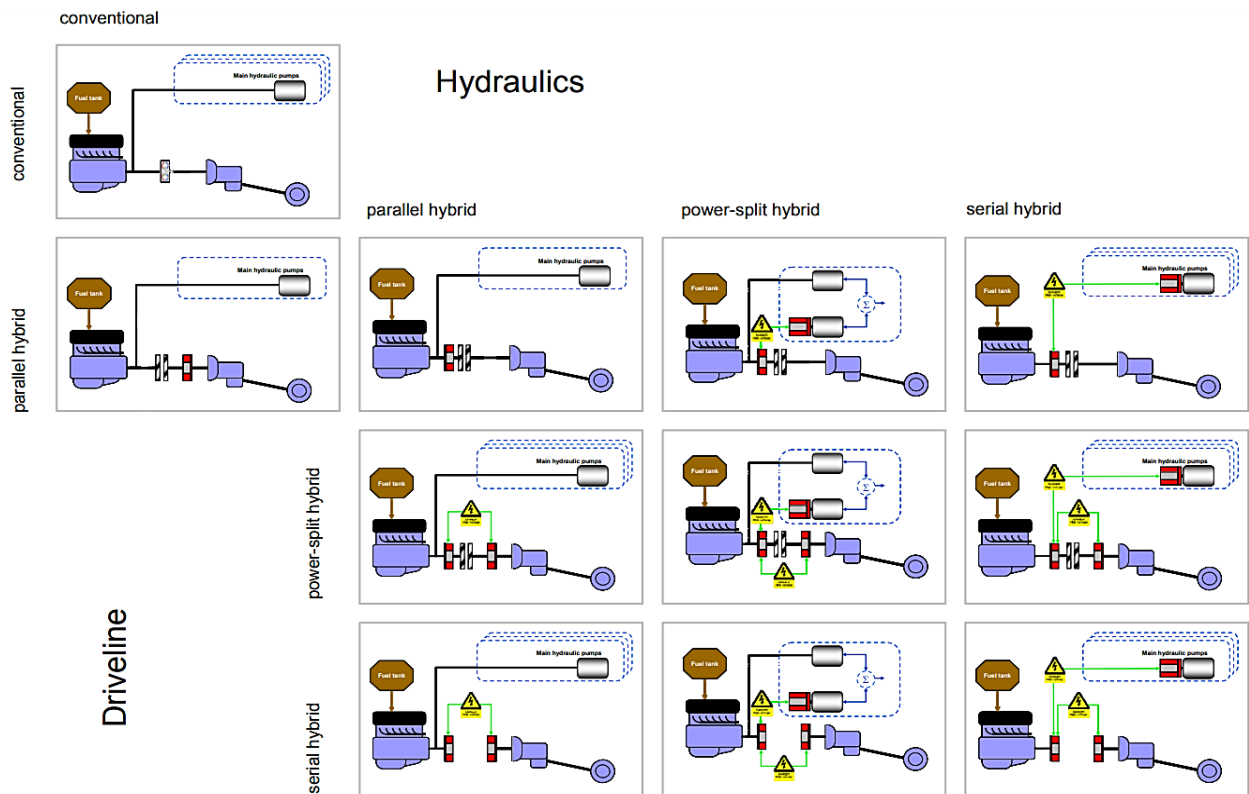
Le terme hybride dans le domaine off-road possède une signification plus complexe que dans le domaine automobile. En effet, pour la plupart des engins non routiers, le groupe motopropulseur (GMP) sert à alimenter non seulement les roues pour faire avancer le véhicule, mais aussi les outils pour réaliser les travaux nécessaires. Cela complexifie l'architecture de la chaîne de transmission qui s'éloigne de celles qui sont couramment utilisées dans le domaine automobile, illustrées à la Figure 28.

Figure 28 : Différents types d'architectures de véhicules automobiles hybrides²⁹



La Figure 29 présente différentes possibilités d'architectures hybrides pour une chargeuse sur roues. Sur l'axe horizontal, on trouve les architectures hybrides pour alimenter le système hydraulique, c'est-à-dire les outils, et sur l'axe vertical, celles pour l'entraînement des roues. Le système de stockage n'est pas représenté sur ce schéma. Les rectangles gris et rouges symbolisent les générateurs électriques.

²⁹ EVS29 Symposium Montréal, Québec, Canada, June 19-22, 2016 : Electric and hybrid electric non-road mobile machinery – present situation and future trends (disponible sur internet)

Figure 29 : Différentes architectures hybrides de chargeuses sur roues³⁰

Plus généralement, si on se concentre sur le domaine off-road, on peut qualifier d'hybride un véhicule qui possède deux sources différentes d'énergies, ou qui est capable de récupérer, stocker, et réutiliser de l'énergie. La Figure 30 présente une typologie des différents véhicules off-road présents sur le marché. Certains véhicules sont présentés comme étant des hybrides, parce que l'énergie est transmise de différentes manières, à la fois mécanique et électrique, mais ils ne possèdent qu'une seule source d'énergie. C'est le cas notamment de la plupart des engins très puissants utilisés dans les mines, la source d'énergie est thermique, mais la chaîne de transmission du véhicule est électrifiée afin d'améliorer le rendement énergétique. En effet, la consommation de tels engins est tellement importante que malgré le surcoût des composants électriques, cette solution les rend financièrement plus rentables. Dans certains engins, un système hydraulique est intégré, notamment pour l'entraînement des outils, mais stricto sensu ils ne peuvent pas être considérés comme des hybrides.

³⁰ <https://pdfs.semanticscholar.org/185a/c45d917107cecf67b06eca15b8f44695e54.pdf>

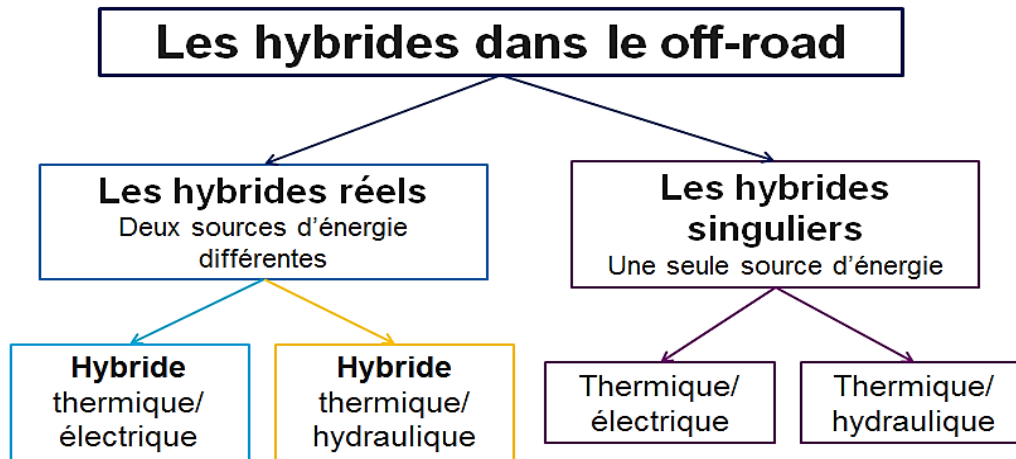
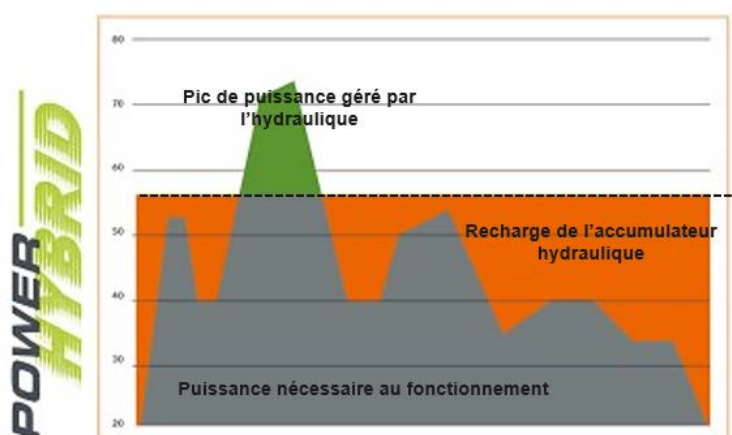


Figure 30 : Typologie des véhicules hybride dans le domaine off-road

- **Avantages de l'hybridation**

Rajouter un moteur électrique et un système de stockage dans un engin thermique permet d'avoir recours à un moteur thermique moins puissant. En effet, dans la plupart des engins hybrides, le moteur électrique ou hydraulique assiste le moteur thermique dans son fonctionnement, notamment afin de gérer les pics de charge. Par conséquent, le moteur thermique n'a pas à être dimensionné pour fournir la puissance maximale nécessaire, sachant que le second moteur peut fournir une partie de la puissance lors des pics de charge, comme on peut le voir sur la Figure 31, qui est un exemple d'un rouleau compresseur hybride thermique/hydraulique. Le moteur fonctionne ainsi sur une plage de puissance plus réduite que dans un véhicule tout thermique, il est de fait moins sollicité, et cela permet d'étendre sa durée de vie. Ainsi, les constructeurs peuvent choisir des moteurs moins puissants pour les intégrer au véhicule hybride, ce qui leur permet notamment de changer de catégorie au niveau des normes d'émission. Cette solution est financièrement avantageuse dans la mesure où plus le moteur est puissant, plus les systèmes de dépollution sont complexes et coûteux. Cela peut aussi permettre de faire des économies d'échelle en produisant davantage de moteurs de mêmes puissances. Par exemple, le rouleau compresseur hybride de la marque Hamm est la version hybride d'un rouleau compresseur thermique d'une puissance de 85 kW. Le moteur utilisé pour le système hybride développe une puissance de 55 kW, passant par conséquent en dessous de la barre des 56 kW selon les normes anti-pollution.

Figure 31 : Distribution de puissance du rouleau compresseur hybride Hamm avec entraînement Power Hybrid³¹



La stratégie généralement adoptée par les constructeurs est de rajouter le moteur électrique et le système de stockage à la chaîne de transmission déjà existante, en raison des coûts de R&D et du temps qu'impliquerait le besoin de repenser tout le GMP. Par ailleurs, les engins off-road sont utilisés pour réaliser des travaux, mais ne fonctionnent pas nécessairement en continu. Souvent, le moteur tourne, mais le véhicule n'est pas ou peu en mouvement. Par exemple, une chargeuse sur roues passe 40% du temps opérationnel en phase de ralenti³². Dans un engin thermique, éteindre le moteur entrainerait une perte de productivité en raison du temps nécessaire pour le redémarrer. Cependant, dans un véhicule hybride, la présence du générateur permettrait de couper le moteur thermique durant les phases de ralenti et de le redémarrer instantanément lors d'un besoin de puissance.

Les avantages de l'hybridation sont en partie similaires à ceux de l'électrification. Outre le coût supplémentaire qu'implique l'hybridation d'un engin, ces derniers combinent aussi les inconvénients des deux systèmes, thermique et électrique, et la question de la qualification pour la maintenance des systèmes électriques à haut voltage est toujours présente.

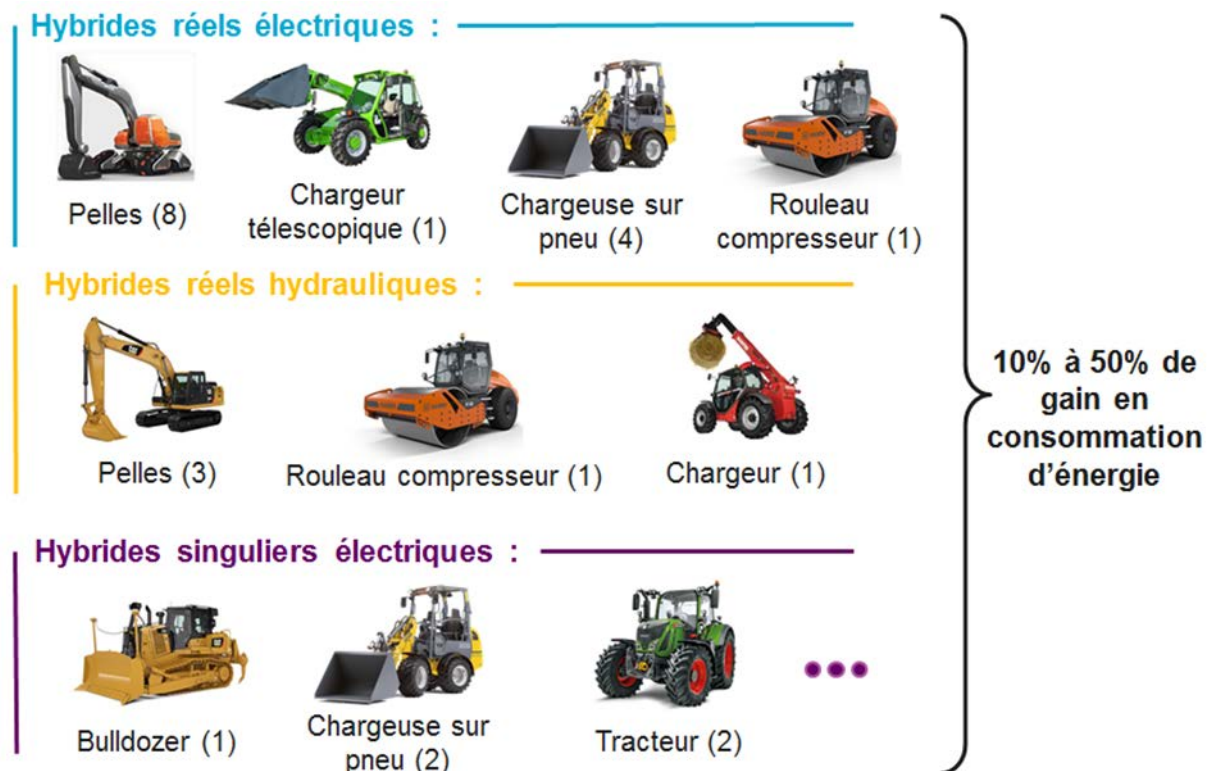
- **Engins off-road hybrides sur le marché**

La Figure 32 dresse une liste des engins hybrides présents sur le marché et des prototypes présentés par les constructeurs. Cette liste est non exhaustive, et se concentre en particulier sur les engins identifiés précédemment comme étant à potentiel d'hybridation.

³¹ <https://www.wirtgen-group.com/france/fr/actualites-medias/communiques-de-presse/wirtgen-group/communiques-de-presse-detail.159899.php>

³² <https://pdfs.semanticscholar.org/185a/c45d917107cecf67b06eca15b8f44695e54.pdf>

Figure 32 : Types et nombre d'engins off-road hybridés



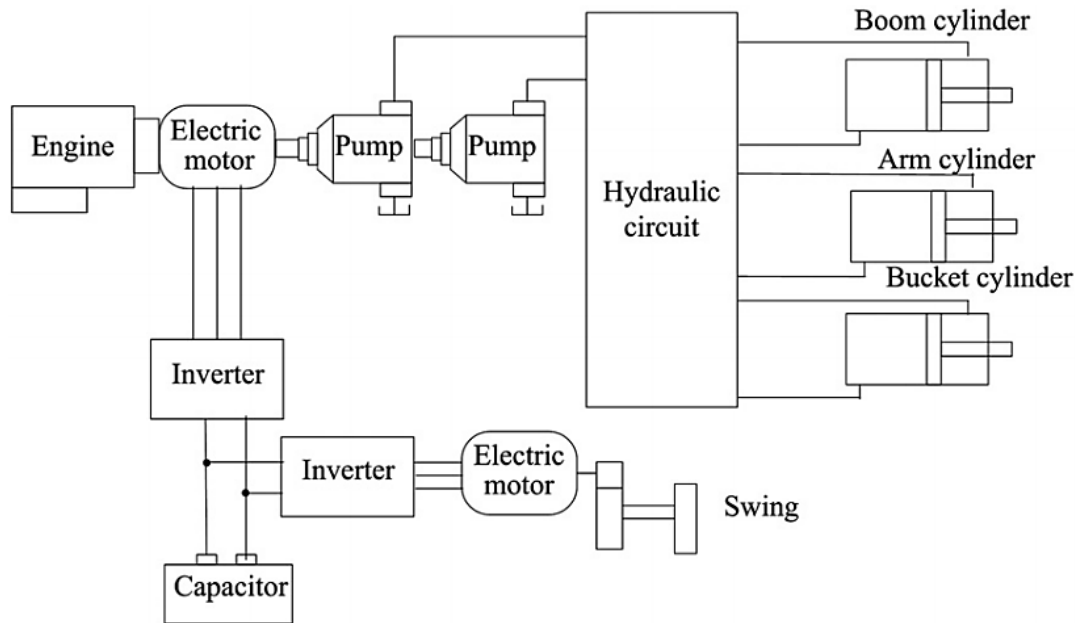
Les hybrides réels électriques

Les pelles mécaniques sont actuellement les véhicules les plus hybridés. En effet, elles possèdent un important potentiel de récupération d'énergie au niveau de la rotation de la tourelle. Le choix de la majorité des constructeurs est de dédier un générateur électrique uniquement à la mise en mouvement de la tourelle, et ce générateur permet également de récupérer une partie de l'énergie cinétique lors du freinage de celle-ci, et de la stocker sous forme électrique. Cette énergie peut être réutilisée par la suite lors de demandes de puissance pour la rotation de la tourelle, ou servir à alimenter les pompes hydrauliques actionnant le bras et le godet de la pelle. La pelle de chantier est un engin qui est peu amené à se déplacer, le potentiel de récupération d'énergie sur le moyen de locomotion est donc trop faible pour qu'un système de récupération soit mis en place.

Par exemple, le constructeur japonais Komatsu a développé et sorti sa première pelle hybride en 2007. D'une puissance de 103 kW, cet engin pèse 20 tonnes et est doté d'une supercapacité comme système de stockage d'énergie. La Figure 33 présente l'architecture de la chaîne de transmission de cette pelle. La tourelle est alimentée par un système hybride série et le système hydraulique en parallèle. Le moteur électrique proche du moteur thermique remplace le moteur hydraulique pour l'entraînement du bras. Selon le constructeur, le système hybride installé permettrait de réduire la consommation énergétique de 20% à 40%, selon l'utilisation, par rapport à un engin thermique similaire.

Figure 33 : Architecture de la chaîne de transmission de la pelle hybride Komatsu PC-200-8³³

T. Lin et al. / Automation in Construction 19 (2010) 11–19

**Fig. 4.** System outline of PC200-8 hybrid excavator.

Les hybrides réels hydrauliques

Avec le développement de l'électrique, les constructeurs misent davantage sur les hybrides électriques aujourd'hui. Les hybrides hydrauliques offrent pratiquement les mêmes avantages que les hybrides électriques en termes d'économie et de récupération d'énergie, de baisse du niveau sonore ainsi que de réduction des coûts en maintenance. Ils sont globalement moins chers à l'achat, mais ne permettent pas de bénéficier de la même réactivité que celle des systèmes électriques. En 2012, Caterpillar a fait le choix d'hybrider une pelleteuse avec un système hydraulique, car à l'époque ces derniers paraissaient plus fiables que les systèmes électriques. La Pelleteuse 336E H illustrée à la Figure 34 possède une puissance de 235 kW, et consomme 25% d'énergie en moins qu'une pelleteuse thermique de même puissance.³⁴

³³ <https://pdfs.semanticscholar.org/02c5/ab9ef616294d6b812e537a062dcda265ce2b.pdf>

³⁴ https://www.cat.com/fr_FR/news/machine-press-releases/cat-sup-174-sup-336ehydraulichybridexcavator delivers no compromise.html

Figure 34 : Pelle hydraulique hybride 336E H Caterpillar

Les hybrides singuliers

Dans le domaine off-road, la plupart des engins ont un système hydraulique pour l'entraînement des outils, car ces derniers permettent la transmission de forces et de couples élevés, nécessaires aux travaux de forte puissance. Mais ces véhicules ne sont pas considérés comme des hybrides. Cependant, certains engins « diesel-électrique », qui ont une chaîne de transmission électrique, mais sont alimentés uniquement par un moteur thermique, sont parfois présentés comme des hybrides. En termes d'architecture, on peut considérer qu'ils ont l'équivalent d'une architecture doublement en série, pour la traction ainsi que pour les outils, mais sans système de stockage d'énergie. Les constructeurs font ce choix de technologie pour améliorer le rendement énergétique de l'engin et ainsi réduire sa consommation d'énergie par rapport à un modèle conventionnel. La Figure 35 montre un exemple : la chargeuse sur roues 644k de John Deere, d'une puissance de 171 kW.

Figure 35 : Chargeuse sur roues 644k de John Deere

Conclusions et recommandations

a. Conclusions

L'électrification du domaine off-road permettra, à terme, certains bénéfices tels que la réduction du bruit et des vibrations pour le confort de l'utilisateur et du milieu environnant. Il permettra normalement de réduire les intervalles de temps entre deux maintenances, le coût en consommation d'énergie et la durée des tâches réalisées afin d'augmenter le retour sur investissement. De plus, il permettra selon la solution technologique envisagée de limiter les émissions polluantes. En contrepartie, les solutions électrifiées pâtiront d'un coût à l'achat plus élevé, devront prouver leur fiabilité dans des environnements extrêmes et assurer une maturité technologique suffisante pour approcher certains marchés. Enfin, le domaine est actuellement peu qualifié en main d'œuvre afin d'assurer la maintenance des appareils, ce qui pénalise son déploiement.










b. Entreprises cibles françaises

Suite à la présente étude des types d'engins off-road des constructeurs français des secteurs de l'agroéquipement et des équipements de chantier, mines et carrières, un croisement avec les engins à potentiel d'électrification a permis d'identifier des entreprises françaises qui pourraient potentiellement envisager (si ce n'est pas déjà le cas) d'électrifier leurs engins. Elles sont listées par secteur dans les deux tableaux ci-dessous.

Tableau 5 : Entreprises françaises du secteur des chantiers, mines et carrières pouvant être concernées par l'électrification d'engins off-road

	Véhicules à potentiel d'électrification			
	Balayeuse	Chargeuse	Foreuse	Rouleau compresseur
				
Entreprises identifiées				

Tableau 6 : Entreprises françaises du secteur agricole pouvant être concernées par l'électrification d'engins off-road

	Véhicules à potentiel d'électrification		
	Tracteurs viticoles	Chargeurs	Mélangeuses Automotrices
			
Entreprises identifiées	  		 

c. Recommandations

A l'issue de la présente étude, un certain nombre de recommandations peuvent être formulées afin de contribuer à favoriser l'émergence de solutions d'électrification des engins off-road, en distinguant 4 catégories principales :

Recherche et développement

- Favoriser la R&D sur les batteries de nouvelles générations
- Encourager toutes les initiatives visant à recycler les batteries (lithium ion en priorité)
- Concernant les normes anti-pollution, favoriser la création d'une procédure d'homologation pour les engins off-road hybrides
- Travaux visant à assurer une fiabilité et résistance suffisante des composants électriques pour les utilisations off-road

Leviers financiers et économiques

- Prévoir des incitations financières pour soutenir les utilisateurs des engins off-road dans leur volonté de passer à des engins plus économes énergétiquement et à émissions de polluants locaux réduits, voire nuls à travers leur électrification et hybridation
- Anticiper les besoins des engins électriques en termes d'infrastructures de recharge en encourageant des infrastructures adaptées et accessibles dans les différents secteurs concernés, et en particulier dans un contexte intra-urbain.
- Prévoir l'augmentation des besoins en électricité nécessaire pour couvrir des besoins croissants que l'on peut envisager dans les secteurs de l'off-road

Compétence et formation

- Former les techniciens à la maintenance des systèmes électriques et hybrides, en tenant compte des spécificités du secteur off-road

Communication

- Promouvoir les solutions électriques : favoriser la communication en faveur des engins électriques, en faisant ressortir leurs avantages par rapport aux solutions thermiques en termes de réduction de la consommation énergétique, de disparition d'émissions polluantes locales, de réduction des besoins et coûts de maintenance, et d'augmentation de la productivité
- Encourager les démonstrations / périodes d'essai d'engins off-road électrifiés par les utilisateurs finaux.
- Promouvoir les solutions électriques auprès des distributeurs (concessionnaires et loueurs) de véhicules off-road, afin qu'ils proposent des solutions électriques/hybrides dans leurs gammes de véhicules. Si c'est déjà le cas, les encourager à diversifier les catégories de véhicules électriques/hybrides proposés.
- Sensibiliser les pouvoirs publics, les mairies pour que les chantiers urbains soient plus respectueux de l'environnement



Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie
CVT - Consortium de Valorisation Thématique