

Finaliste Challenge de la veille 2024

Le Challenge de la veille est une compétition nationale de veille stratégique réunissant des étudiants en Information Numérique dans les Organisations.

À travers cette expérience, j'ai développé des compétences en veille stratégique, analyse comparative et présentation de résultats devant un jury de professionnels. Notre travail d'équipe nous a permis d'approfondir la question du choix technologique entre l'électrique et l'hydrogène pour les véhicules utilitaires de DANGEL.

[Site du challenge](#)

CHALLENGE DE LA VEILLE 2024

Quels sont les enjeux économiques et stratégiques liés à l'adaptation de la production de Dangel aux véhicules à énergie innovante tels que l'électrique et l'hydrogène ?

Colin Velsch, Lucas Branco, Mahé Djomo, Yanisse Belaid, Tom Martin



SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	3
I. L'électrique et l'hydrogène, les énergies de demain.....	4
A. État des lieux et analyse contextuelle de l'entreprise Dangel.....	4
B. Avancer différemment, comparaison des deux motorisations.....	5
II. Les enjeux de la transformation en tout-terrain.....	7
A. Adapter un véhicule électrique en 4x4.....	7
B. Adapter un véhicule hydrogène en 4x4.....	8
III. Faisabilité et application des solutions.....	9
A. Appliquer les solutions proposés à un modèle 4x4 électrique.....	9
B. Appliquer les solutions proposés à un modèle 4x4 hydrogène.....	10
CONCLUSION.....	11
ANNEXE 1 : Mots-clés et définition.....	11
ANNEXE 2.....	13
ANNEXE 3.....	14
ANNEXE 4.....	15
ANNEXE 5.....	16
ANNEXE 6.....	17
ANNEXE 7.....	20
ANNEXE 8.....	20

INTRODUCTION

L'évolution des technologies propulsant les véhicules vers une mobilité plus durable se concentre majoritairement sur deux solutions majeures : l'hydrogène et l'électricité. En effet, le secteur de la construction automobile est en constante évolution vers des solutions en adéquation avec les défis environnementaux.

En ce sens, les véhicules électriques se sont démocratisés durant les années 2010 et se sont imposés comme une alternative adéquate aux moteurs à combustion interne. Cette solution plus respectueuse de l'environnement permet une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre. Les véhicules propulsés par des batteries rechargeables n'émettent pas de gaz à effet de serre pendant leur utilisation.

D'autre part, l'un des principaux avantages des véhicules à hydrogène réside dans l'absence d'émission de CO₂ lors des trajets, ne produisant que de la vapeur d'eau comme sous-produit¹. De plus, ils offrent une autonomie et un temps de ravitaillement comparable à celui des véhicules thermiques.

Si ces deux possibilités offrent en théorie un modèle de mobilité alternative au thermique, elles sont au cœur de plusieurs problématiques, en termes de performances, de coût et de production. En effet, les méthodes de fabrication des batteries et la génération de l'hydrogène doivent encore faire leurs preuves quant à leurs bienfaits sur le bilan carbone.

On note que le développement de ces technologies s'est fait à deux vitesses. L'électrique a bénéficié d'une plus large audience politique et une opinion publique plus sensibilisée par l'intermédiaire des médias. Quant à l'hydrogène, il n'a pas fait état des mêmes enjeux car le développement de cette énergie s'est focalisé dans le secteur industriel et concerne les gros porteurs tels que le transport routier, ferroviaire et aéronautique.

Cependant, le marché du tout-terrain, dans lequel s'inscrit Dangel depuis plus de 40 ans², spécialiste de la transformation d'utilitaires en véhicules automobiles à transmission intégrale, a moins bénéficié de ces technologies. À l'exception de la version électrique 4x2 dite "Trek", que vous développez déjà dans vos ateliers.

Dans ce dossier, nous allons tenter d'analyser les solutions que proposent l'hydrogène et l'électrique dans le cadre d'un équipement performant pour une utilisation tout-terrain. Notre raisonnement s'articule autour d'une question centrale :

¹ h2-mobile.fr / 01 Mars 2023 / « Voiture hydrogène : quels avantages et quels inconvénients ? »

<https://www.h2-mobile.fr/dossiers/voiture-hydrogene-quels-avantages-quels-inconvenients/>

² dna.fr / Jouvin Bernard / 11 Mars 2023 / « Dangel : 504, 505, Partner... un 4X4 made in Alsace ! »

<https://www.dna.fr/magazine-automobile/2023/03/11/dangel-504-505-partner-un-4x4-made-in-alsace>

Quels sont les enjeux économiques et stratégiques liés à l'adaptation de la production de Dangel aux véhicules à énergie innovante tels que l'électrique et l'hydrogène ?

I. L'électrique et l'hydrogène, les énergies de demain

A. État des lieux et analyse contextuelle de l'entreprise Dangel

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à la position de votre entreprise sur le marché ainsi qu'à l'évolution de ce dernier. Vous êtes depuis longtemps leader sur le marché de la transformation de véhicules utilitaires en tout-terrain. Votre offre, destinée aux professionnels, doit être en mesure de s'adapter aux changements du marché. Jusqu'en 2010³, les voitures à moteur thermique représentaient la grande majorité du marché. Aujourd'hui, les acteurs de l'automobile, dans l'objectif de s'aligner aux politiques européennes en faveur de l'écologie, modifient leurs gammes, ils anticipent les habitudes de consommation ainsi que les restrictions légales. En effet, l'Union Européenne a validé l'arrêt de la mise en circulation des moteurs thermiques dans les véhicules neufs afin d'atteindre l'objectif européen de neutralité carbone en 2050. Il vous est donc nécessaire de vous adapter à cette nouvelle dynamique.

Cette mutation vers une mobilité verte, poussée par les institutions, amène les acteurs du secteur de l'automobile, dont vous êtes, à investir massivement dans leurs programmes de recherche et développement. Ces institutions et directives, aussi bien européennes (Clean Vehicle Directive, Renewable Energy Directive, Alternative fuels Infrastructure Directive - AFID) que françaises (CSF – Contrat Stratégique de Filière, plan national hydrogène, loi transition énergétique, ECV - Engagements pour la Croissance Verte, LOM - Loi d'Orientation des Mobilités), envisagent l'hydrogène et l'électrique comme des énergies propres permettant de souscrire aux nouveaux critères conduisant à la décarbonation progressive du marché des transports⁴.

De ce fait, on assiste à une augmentation du nombre d'immatriculations des véhicules électriques (particulier et utilitaire) lesquels s'élevaient à 192 438 en 2023, soit une hausse de 52,4 % par rapport à l'année précédente⁵. En termes d'équipement, la France s'est déjà dotée de plus de 100 000 bornes de recharge, l'objectif étant d'en compter 400 000 d'ici à 2030.

³ avere-France.org / « L'histoire du véhicule électrique ». <https://www.avere-france.org/lhistoire-du-vehicule-electrique/>.

⁴ pfa-auto.fr / Mai 2022 / « Mobilité Hydrogène. » https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2022/06/DT_Hydrogene_Pile-a-combustible_052022.pdf

⁵ ekwateur.fr / "Sarah" / 26 Octobre 2023 / « Combien de voitures électriques circulent en France en 2023 ? » <https://ekwateur.fr/blog/voiture-electrique/pourcentage-voiture-electrique-france-2023/>

En ce qui concerne l'infrastructure de recharge hydrogène, le territoire français dénombre actuellement 32 stations⁶, mais programme l'installation de 1000 stations d'ici 2030⁷. On mesure l'ambition de ce projet, quand on peut constater que 306 voitures à hydrogène ont été immatriculées en France sur l'année 2023⁸. L'électrique se démocratise, quant à l'hydrogène, nous en sommes aux prémices.

B. Avancer différemment, comparaison des deux motorisations

Les véhicules utilitaires, qu'ils soient électriques ou à hydrogène, impliquent d'évaluer certains paramètres : l'efficacité énergétique, l'autonomie, les aides gouvernementales, les coûts d'utilisation, et l'impact environnemental. Examinons attentivement les données relatives à ces deux technologies pour mieux comprendre leurs avantages et inconvénients respectifs.

Un véhicule hydrogène, pour 100 Watt utilisés à partir d'une énergie issue de l'éolien, aura un rendement énergétique de 30% à la fin du processus de fabrication, de transport et d'utilisation. À noter que la production d'hydrogène nécessite une utilisation considérable d'énergie pour aboutir à la fin de ce processus. À titre de comparaison, le bilan énergétique d'un véhicule électrique est favorable car le processus est simplifié et permet d'atteindre un rendement énergétique de 76%. En effet, la technologie de transformation de l'énergie est plus rapide que l'hydrogène, qui nécessite des transformations physiques à plusieurs étapes de la transformation.⁹

En ce qui concerne les coûts d'utilisation des deux types d'énergie, une voiture à hydrogène consommerait environ 1 kg/100 km, aboutissant donc à une dépense d'environ 11 €/100 km.¹⁰ Le coût de recharge d'une voiture électrique, quant à lui, varie selon le modèle du véhicule, la puissance de la prise ou de la borne à laquelle il est relié et le prix du kilowatt-heure. En moyenne, la recharge coûtera entre 1,5 et 5 € pour 100 km¹¹. En comparant les frais de ravitaillement énergétique, l'électrique apparaît manifestement plus abordable.

L'autonomie des batteries électriques est comprise entre 200 et 300 km.¹² L'hydrogène offre quant à lui une autonomie moyenne de 400 km.¹³ Sur ce point, les véhicules utilitaires hydrogène affichent un avantage indéniable sur les voitures électriques.

⁶ h2-mobile.fr / « Carte des stations à hydrogène en France. »

<https://www.h2-mobile.fr/stations-hydrogene/>

⁷ h2-mobile.fr / Schwoerer Philippe / 07 Février 2023 / « France : 1000 stations et 350 000 véhicules hydrogène en 2023. »

<https://www.h2-mobile.fr/actus/france-1000-stations-350000-vehicules-hydrogene-2030/>

⁸ h2-mobile.fr / Torregrossa Michaël / 03 Janvier 2024 / « En France, la voiture hydrogène reste dans l'ombre de l'électrique.

» <https://www.h2-mobile.fr/actus/ventes-immatriculations-voiture-hydrogene-france-2023/>

⁹ Cf Annexe 2

¹⁰ pastel.hal.science / Muller Élise / 30 juin 2023 / « Pleins gaz sur l'hydrogène : trajectoire socio technique du déploiement territorial de l'hydrogène en France entre 2010 et 2020 »

<https://pastel.hal.science/tel-04146867/document>

¹¹ particulier.edf.fr / 07 Aout 2023 / « Quel est le coût de la recharge d'une voiture électrique ? »

<https://particulier.edf.fr/fr>

¹² izi-by-edf.fr / M Pierre / 15 Novembre 2023 / « Quelle est l'autonomie d'un utilitaire électrique ? »

<https://izi-by-edf.fr/blog/autonomie-utilitaire-electrique/>

¹³ h2-mobile.fr / « Utilitaire à hydrogène liste des modèles commercialisés et à venir selon h2-mobile.fr »

<https://www.h2-mobile.fr/vehicules/utilitaire-hydrogene/>

De surcroît, le temps de recharge est un atout majeur de ce type de véhicule, puisque le temps de chargement est compris entre 3 et 5 minutes.¹⁴ En revanche, les véhicules électriques affichent un temps de charge lente de 4 à 8 heures et entre 1 à 2 heures pour la charge rapide. Ces délais sont corrélés à la puissance de la borne. Notons que l'ensemble des véhicules utilitaires électriques ne sont pas compatibles avec les bornes de recharge rapide.¹⁵

Sur le plan écologique, les calculs du cabinet Deloitte indiquent que l'empreinte carbone d'une voiture à hydrogène varie entre 130 g et 230 g de CO₂/km, alors que pour la voiture électrique se situe entre 160 g et 250 g de CO₂/km. À titre d'information, une voiture à combustion (essence ou diesel) oscille entre 180 g et 270 g. Cette disparité s'explique en grande partie par la phase de production des batteries, avec l'extraction de lithium et de métaux rares qui demande une quantité significative d'énergie et ressources. Il convient de souligner que ces chiffres dépendent largement de la manière dont l'électricité est générée, Deloitte se base sur le mix énergétique mondial actuel, principalement alimenté par des énergies fossiles (62 % en 2019). En revanche, lorsque l'électricité provient de sources telles que l'éolien, le solaire, ou le nucléaire, le bilan carbone est nettement plus favorable à la voiture électrique.¹⁶

Les investissements des constructeurs automobiles du monde entier pour la voiture électrique atteindront 616 milliards de dollars entre 2023 et 2027¹⁷. D'ici 2030, les pays européens engageront d'importants investissements dans le domaine de l'hydrogène, avec des sommes allant jusqu'à 10 milliards d'euros pour l'Allemagne, 9,2 milliards d'euros en Espagne, 9 milliards d'euros aux Pays-Bas ainsi que 7,2 milliards en France.¹⁸ Ces chiffres prouvent une tendance économique orientée vers l'électrique.

En ce qui concerne les coûts totaux de possession (TCO)¹⁹ des véhicules électriques et à hydrogène, nous avons pris l'exemple du Peugeot E-Expert, un véhicule électrique, ainsi que de son alternative à hydrogène, le Peugeot E-Expert Hydrogène, tous deux étant des partenaires de votre entreprise. Nous avons opté pour cette solution en raison du partenariat existant avec Peugeot, qui propose une version électrique ainsi qu'une alternative à hydrogène. En conclusion de cette analyse TCO et de ses résultats, le coût total s'élève à environ 41 557,49 euros pour le Peugeot E-Expert, tandis que pour le Peugeot E-Expert Hydrogène, le coût total atteint 118 759,38 euros. En somme, les coûts totaux de possession indiquent clairement une différence significative entre le Peugeot E-Expert et son homologue à hydrogène, avec des implications importantes pour la prise de décision en matière de choix de véhicules au sein de votre entreprise.

¹⁴ lejournel.cnrs.fr / Bettayeb Kheira / 08 Mars 2017 / « Les défis de la voiture à hydrogène »

<https://lejournel.cnrs.fr/articles/les-defis-de-la-voiture-a-hydrogene>

¹⁵ chargeguru.com / Titeux, Julia / « Véhicule utilitaire électrique : pourquoi et comment bien le choisir ? 18-05-2022 »

<https://chargeguru.com/fr/fiches-pratiques/choisir-vehicule-utilitaire-electrique/#:~:text=Tous%20les%20v%C3%A9hicules%20utilitaires%20%C3%A9lectriques,par%20le%20point%20de%20charge.>

¹⁶ Cf Annexe 4

¹⁷ alixpartners.com / 26 Juin 2023 / « 2023 Global Automotive Outlook »

<https://www.alixpartners.com/media-center/press-releases/global-automotive-outlook-2023/>

¹⁸ Cf Annexe 5

¹⁹ Cf Annexe 6

II. Les enjeux de la transformation en tout-terrain

A. Adapter un véhicule électrique en 4x4

Transformer efficacement un véhicule électrique 2 roues motrices en un modèle 4x4 tout-terrain, est un enjeu mécanique, technique et un défi d'ingénierie. En effet l'ajout d'une transmission intégrale, similaire aux gammes thermiques est impossible sur un moteur électrique. Nous expliquons cette incapacité à travers différentes contraintes.

Premièrement, l'ajout de 2 roues supplémentaire augmente la puissance devant être délivrée par le moteur. Les mécaniques de transmissions augmentent les frictions et résistances exercées sur le moteur nécessitant ainsi une consommation énergétique accrue et des performances amoindries. Cette problématique prend de l'ampleur au vu du cadre d'utilisation des véhicules que vous produisez, les milieux "off-road" sont généralement vallonnés et semés d'embûches, sollicitant d'autant plus la motrice.

Mais l'handicap principal à retenir de la répartition de la force d'un seul moteur sur 4 roues est la non désolidarisation de ces dernières. La transmission reliant l'essieu avant à l'essieu arrière, condamne ainsi l'ensemble des roues motrices à être solidaire les une des autres. Elles ne sont pas libres de leur rotation, de leur désynchronisation ou encore de leur vitesse de roulage. Par exemple, une roue coincée dans une ornière peut condamner l'ensemble du véhicule à une immobilisation.

Afin de palier à ces problématiques, il est possible d'ajouter un moteur électrique sur l'essieu en étant dépourvu menant ainsi à un moteur par essieu²⁰. Cette configuration présente plusieurs avantages significatifs, allant au-delà d'une simple augmentation de la traction. La répartition indépendante de la puissance entre les essieux permet une gestion plus précise des performances du véhicule. Les systèmes de contrôle électronique sophistiqués peuvent ajuster instantanément la puissance fournie à chaque roue en fonction des conditions de conduite, améliorant ainsi la stabilité, la tenue de route et la maniabilité.²¹

Dans un second temps, à l'image de Hyundai et Kia, il est envisageable de concevoir un système de roue-moteur²² attribuant un moteur à chaque roue, tout en conservant le moteur monté sur le châssis, la roue accueillant simplement un réducteur dans son moyeu. Cette idée promet de nombreux avantages.²³ Le premier réside naturellement dans le gain d'espace, avec un plancher parfaitement plat, particulièrement avantageux pour un véhicule utilitaire. Il en va de même pour la

²⁰ Truckinginfo.com / Park Jim / 16 Janvier 2019 / « Dumping the Driveshaft on Electric Vehicles. »
<https://www.truckinginfo.com/323115/dumping-the-driveshaft-on-electric-vehicles>

²¹ tesla.com / Jeffrey Brian Straubel / 21 Septembre 2015 / « Tesla All Wheel Drive (Dual Motor) Power and Torque Specifications » https://www.tesla.com/fr_fr/blog/tesla-all-wheel-drive-dual-motor-power-and-torque-specifications

²² hyundaimotorgroup.com / 04 Décembre 2023 / « The Universal Wheel Drive System, a paradigm shift in drive systems »
<https://www.hyundaimotorgroup.com/story/CONT000000000125025>

²³ cf annexe 7

conduite. Le rapprochement entre la roue et le moteur permet non seulement de limiter les pertes énergétiques (au bénéfice de la consommation et donc de l'autonomie), mais également d'abaisser une nouvelle fois le centre de gravité, optimisant ainsi la réactivité et la fidélité du comportement.²⁴

B. Adapter un véhicule hydrogène en 4x4

Le développement des véhicules tout-terrain à hydrogène n'est pas abouti, cependant il est possible d'en dégager deux pistes potentielles. D'une part, les véhicules équipés d'une pile à combustible, qui fonctionnent essentiellement de la même manière qu'un véhicule entièrement électrique.²⁵ L'hydrogène, une fois transformé physiquement à travers la pile à combustible, alimente un moteur électrique. D'un autre côté, les modèles hydrogène dotés d'un moteur à combustion adoptent un mode de fonctionnement final similaire à celui d'un véhicule thermique. En 2007, BMW a été le premier constructeur à tester un moteur à combustion interne à hydrogène avec une Série 7.²⁶ Cependant, le projet du constructeur allemand a été abandonné en raison de l'autonomie limitée de cette configuration. D'autre part, les modèles à hydrogène disponibles sur le marché, qui sont principalement basés sur des piles à combustible. Subséquemment, ces moteurs ont un fonctionnement spécial. En effet, cette pile à combustible présente à l'entrée du moteur, transforme l'hydrogène en électricité, dans le but final d'alimenter la batterie. En bref, l'énergie est hydrogène, mais la batterie est électrique. Comme expliqué précédemment, l'aménagement d'un utilitaire électrique nécessite un travail mécanique lors de l'ajout d'un moteur sur les essieux. Ainsi, adapter un véhicule purement hydrogène n'est pas possible dans un futur proche, cependant, s'appuyer sur l'électrique avec une pile à combustible l'est, mais nécessite les mêmes infrastructures que l'électrique.

²⁴ gocar.be / David Leclercq / 15 Décembre 2023 / « Les moteurs-roues électriques de Hyundai/Kia vont-ils révolutionner l'automobile ? » <https://gocar.be/fr/actu-auto/electrique/>

²⁵ mobiliteverte.engie.fr / 17 Janvier 2023 / « Voiture à hydrogène : voici tous ses avantages et inconvénients » <https://mobiliteverte.engie.fr/conseils-et-actualites/transition-energetique/>.

²⁶ Hydrogentoday.info / Meillaud Laurent / 26 Juin 2023 / « Pourquoi BMW ne reviendra pas dans le moteur à hydrogène » <https://hydrogentoday.info/bmw-moteur-hydrogene/>

III. Faisabilité et application des solutions

A. Appliquer les solutions proposés à un modèle 4x4 électrique

Dans le cadre d'un équipement 4x4 d'utilitaires professionnels, la solution électrique semble la moins adaptée. En effet, afin d'offrir les meilleures performances possibles en tenant compte des coûts de cette transition progressive vers l'énergie électrique, il est nécessaire d'établir un plan de faisabilité.

Les utilitaires électriques disponibles à l'achat sont équipés de moteurs à traction disposés à l'avant des véhicules, ainsi il dirige uniformément l'avant du véhicule. Dans le cadre d'un équipement adapté à l'utilisation tout terrain, il est conseillé de diviser la puissance totale. Ce processus implique d'implanter deux moteurs électriques répartis sur les essieux avant et arrière afin de répartir équitablement la puissance liée aux roues. Ainsi, cette solution offre une performance parfaite et technologiquement accessible. En novembre 2019, le constructeur américain Tesla a présenté le "Cybertruck"²⁷, un véhicule électrique tout-terrain équipé de quatre roues motrices, un véritable précurseur de par la technologie présente dans l'habitacle, mais aussi les performances routières. En effet, le "Cybertruck" est doté d'une autonomie de près de 550 km, il est amphibie, se recharge en moins de trente minutes et est construit en verre blindé. Côté batterie, ce véhicule utilise deux moteurs, un par essieu, qui lui permettent une mobilité performante dans tous les environnements. Ce Pick-Up utilitaire avant-gardiste est un succès, puisque le nombre de précommandes s'élève aujourd'hui à deux millions.

Comme analysé précédemment, la faisabilité de l'aménagement de véhicules utilitaires électriques paraît la moins adaptée aux capacités matérielles et humaines de Dangel.

L'implantation d'un autre moteur impliquerait donc un travail technique qui touche donc à la mécanique. Deux plans d'action sont donc possibles: une formation de vos employés vers de la mécanique, ou une campagne de recrutement vers des techniciens spécialisés dans les moteurs électriques.

Cette transition de technologies implique inévitablement une modification de votre chaîne de production, une adaptation des outils utilisés ainsi qu'un achat de bornes de rechargement électriques. En clair, la transition vers l'électrique fait appel à des technologies nouvelles, coûteuses en ressources humaines²⁸, outils et recherche, qui semblent compliquées à réaliser dans un futur proche, pour autant nous vous déconseillons de ne pas tourner le dos définitivement à cette alternative.

²⁷ Tesla.com / « Présentation du CyberTruck »

https://www.tesla.com/fr_fr/cybertruck

²⁸ Indeed.com / « Emplois : Reparation Moteurs Electriques »

<https://fr.indeed.com/q-reparation-moteurs-electriques-emplois.html?vjk=ec8827947c56ec44>

B. Appliquer les solutions proposés à un modèle 4x4 hydrogène

La famille regroupant la gamme des véhicules à hydrogène n'est donc pas à considérer en tant qu'ensemble. Contextualisons que les véhicules à hydrogène se séparent en deux catégories. Cette séparation, bien que significative et primordiale, est souvent relayée au second plan lorsque le terme est utilisé. Une confusion est donc souvent de mise pour un public non averti.

Premièrement les véhicules à moteur à hydrogène, à l'image des moteurs à allumage commandé, type moteur thermique à essence, ces derniers utilisent l'hydrogène en tant que combustible. L'hydrogène pénètre dans les cylindres afin de produire une explosion et entraîner l'ensemble de la chaîne de propulsion habituelle.

L'enjeu est tourné vers un avenir sans émission. Aujourd'hui, votre chaîne de transformation est adaptée à la modification de véhicules thermique. Comme mis en exergue précédemment, l'adaptation de votre activité en vue des nouvelles mobilités, nécessite une révision des techniques. Le développement de voitures à moteur à hydrogène pourrait s'avérer être une aubaine quant à la base thermique de ce modèle.

L'hydrogène crée deux alternatives nettes axées sur la motorisation. Tout d'abord, le moteur à hydrogène équipé d'une pile à combustible transforme l'hydrogène en énergie électrique, stockée dans la batterie. Dans ce cas, l'hydrogène et l'électrique ne font qu'un dans un véhicule, mais il est donc nécessaire de procéder à des innovations technologiques similaires à un aménagement de véhicule électrique, comme vu précédemment.

D'un point de vue faisabilité, l'autre alternative que nous avons analysée semble la plus économique, car elle ressemble en tous points au fonctionnement d'une voiture thermique. En effet, les moteurs thermiques à combustion hydrogène sont en cours de développement, après que Toyota présente le concept-car "SUV Corolla Cross H2 Concept" en 2022²⁹. Ce SUV, équipé d'un moteur Turbo 3 cylindres 1.6l, utilise le moteur technique de la "GR Corolla", une voiture thermique de la même marque. La firme japonaise indique avoir réalisé *"40 % du chemin qui mène à la commercialisation de produits tels que la Corolla Cross H2 Concept"*³⁰.

Ce SUV peut donc utiliser le fonctionnement mécanique d'un moteur thermique, en utilisant l'hydrogène comme combustible. Même si les tests semblent concluants, cette technologie se doit d'être développée davantage, puisqu'il n'existe pas d'offre de modèle sur le marché.

Ainsi, le système à combustion semble économiquement et techniquement plus viable, cependant il n'est pas encore commercialisé, mais est en cours de développement.

Nous vous conseillons donc de suivre avec attention les avancées technologiques de cette branche pour envisager, à long terme, une redirection vers des utilitaires hydrogènes.

²⁹ auto-infos.fr / Marty Frédéric / 06/12/2022 / « Toyota croit fermement au moteur thermique à hydrogène » <https://www.auto-infos.fr/article/toyota-croit-fermement-au-moteur-thermique-a-hydrogene.261416>

³⁰ turbo.fr / Verbrugghe-Delchambre Thomas / 07 Décembre 2022 / « Hydrogène : Toyota s'y aventure encore avec le concept-car Corolla Cross H2 » <https://www.turbo.fr/toyota/corolla/actualites-auto/hydrogene-toyota-sy-aventure-encore-avec-le-concept-car-corolla-cross-h2-188367>

CONCLUSION

Les enjeux de transition liés aux défis environnementaux sont au centre des préoccupations sociétales. En tant que leader de l'équipement tout-terrain, Dangel se doit de rester à l'avant-garde des avancées technologiques développées dans le domaine de l'automobile afin de proposer des solutions adaptées à l'air du temps. La transition pour l'entreprise se caractérise par des enjeux à différentes échelles. L'électrique et l'hydrogène sont deux énergies différentes dès leur méthode de fabrication, qui nécessite un aménagement significatif au sein de l'entreprise. Dangel doit donc choisir une de ces deux alternatives car utiliser les deux dans un futur proche semble irréalisable. L'électrique bénéficie d'avancées technologiques bien plus évoluées que l'hydrogène en vertu de sa mise en œuvre plus précoce et équipe un panel de véhicules bien plus large. Pour autant, le monde du 4x4 à moins connu ces avancées et le marché du véhicule tout-terrain électrique ne propose pas beaucoup de modèles. Ainsi, pour équiper un utilitaire en quatre roues motrices dans un futur proche, il convient de se doter de technologies adaptées, et d'aménager ses locaux et faire évoluer ses capacités humaines, ce qui nécessite une levée de fonds conséquente dans des délais restreints.

L'hydrogène ne fait pas état des mêmes enjeux car le développement de cette énergie s'est focalisé sur les gros porteurs tels que les trains³¹ et les avions³². L'hydrogène utilisé dans les premières voitures pose des soucis de stockage, ce qui ralentit considérablement les avancées techniques. Toutefois, Dangel peut s'appuyer sur le moteur à pile à combustible³³ qui alimente un circuit électrique. Ainsi, les aménagements prévus pour les véhicules électriques permettraient à l'entreprise d'utiliser les mêmes infrastructures pour traiter deux énergies. Cependant, à terme, les moteurs hydrogène à combustion correspondent à la meilleure solution car ils ne nécessitent pas d'aménagement de l'usine, et ressemblent en tout point au fonctionnement d'un véhicule thermique. Cette solution n'est aujourd'hui commercialisée dans le monde de l'utilitaire, cependant elle est vouée à se développer dans un futur plus lointain.

Dans un futur proche, les véhicules électriques représentent la meilleure alternative pour équiper les utilitaires professionnels, mais elles nécessitent des outils technologiques et humains pour adapter la chaîne de production. Il en revient à Dangel d'établir un budget précis en corrélation avec le TCO de cette énergie, mais une évolution technologique des ateliers est inévitable.

Le développement de l'hydrogène à combustion caractérise la meilleure alternative sur le long terme pour des raisons de budget car cette alternative peut être adaptée aux ateliers que vous possédez déjà. Il est donc capital pour Dangel de rester aux nouvelles des avancées technologiques dans cette industrie tournée vers le futur.

³¹ [gouvernement.fr / 07 Septembre 2021 / « Le train français à hydrogène sur les rails »](https://www.gouvernement.fr/actualite/le-train-francais-a-hydrogene-sur-les-rails)

³² [airbus.com / 24 Juin 2021 / « ZEROe - Towards the world's first hydrogen-powered commercial aircraft »](https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe)
<https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>

³³ [renaultgroup.com / 13 Octobre 2023 / « Comment fonctionne un véhicule à hydrogène ? »](https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/comment-fonctionne-un-vehicule-a-hydrogene/)
<https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/comment-fonctionne-un-vehicule-a-hydrogene/>

ANNEXE 1 : Mots-clés et définition

Véhicule utilitaire : Qualifie un véhicule capable d'assurer des fonctions très différentes.

VUL : Véhicule utilitaire léger **Hydrogène** : Élément chimique de numéro atomique 1 et de

Véhicule électrique : Une voiture électrique est une automobile mue par un ou plusieurs moteurs électriques, généralement alimentés par une batterie d'accumulateurs voire une pile à hydrogène.

Véhicule à hydrogène : Moyen de transport qui utilise une transformation chimique du dihydrogène comme énergie de propulsion. En particulier, on appelle voiture à hydrogène un véhicule à propulsion électrique muni d'une pile à combustible utilisant le plus souvent l'hydrogène comme combustible réducteur.

Pile à combustible : Une pile à combustible est un générateur électrochimique produisant une tension électrique grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air.

FFCEV : Véhicule à pile à combustible full power, permet un usage polyvalent, alimenté exclusivement par un réseau de distribution d'H₂.

FCREEV : Range extender, alimenté aussi bien en hydrogène qu'en électricité, permet un usage urbain et périurbain intensif, pour des flottes de type VU (par exemple activité de taxi)

Mid-power : Permet un usage polyvalent, alimenté à la fois par un réseau de distribution d'H₂ et rechargeable sur le réseau électrique 1, avec un dimensionnement du système fuel cell intermédiaire entre le « range extender » et le « full power ».

GNV : Gaz naturel vert **GNL** : Gaz naturel liquéfié **GPL** : Gaz de pétrole liquéfié

Hydrogène gris : Hydrogène produit par vaporeformage du méthane (95 % de l'hydrogène produit dans le monde est gris)

Hydrogène bleu : Produit par vaporeformage du méthane, comme pour le gris, mais avec en plus du captage et un stockage du CO₂.

Hydrogène turquoise : Variante de l'hydrogène bleu qui est, lui aussi, produit à partir de méthane fossile mais par pyrolyse et avec un système de captage de CO₂ solide.

Hydrogène brun : Produit par gazéification de lignite. C'est une variété de charbon qui contient un pourcentage d'oxygène et d'hydrogène considérablement plus élevé que le charbon noir

Hydrogène noir : Produit de la même façon que le brun mais à partir de charbon.

Hydrogène vert : Produit par électrolyse de l'eau, l'électricité utilisée étant issue d'énergies renouvelables, le processus ne rejette que de l'oxygène dans l'atmosphère

Hydrogène jaune : Electrolyse de l'eau mais à partir d'électricité nucléaire

Vaporeformage : Procédé de production de gaz de synthèse riche en hydrogène

Pyrolyse : Décomposition chimique d'un composé organique par une augmentation importante de sa température pour obtenir d'autres produits (gaz et matière) qu'il ne contenait pas

Gazéification : Processus à la frontière entre la pyrolyse et la combustion. Celui-ci permet de convertir des matières carbonées ou organiques en un gaz de synthèse combustible (souvent appelé « syngas » ou « syngaz »), composé majoritairement de monoxyde de carbone (CO) et de

dihydrogène (H₂), contrairement à la combustion dont les produits majoritaires sont le dioxyde de carbone (CO₂) et l'eau (H₂O).

Electrolyse : Procédé électrolytique qui décompose l'eau en dioxygène et dihydrogène gazeux grâce à un courant électrique

OEM : Un fabricant d'équipement d'origine (OEM) fabrique des composants pour les produits d'une autre entreprise. Un composant OEM peut être une pièce, un sous-système ou un logiciel.

TCO : Total Cost of Ownership (coût global de possession).

Roadmaps : Représentation graphique simplifiée permettant de communiquer et de partager efficacement une intention stratégique afin de mobiliser, d'aligner et de coordonner les efforts des parties prenantes pour atteindre un ou plusieurs objectifs. Plans R&D et investissements.

Sphères publiques européennes :

CVD : Clean Vehicle Directive

RED : Renewable Energy Directive

AFID : Alternative fuels

IPCEI : Important Projects for Common European Interest.

ECH2A : European Clean Hydrogen Alliance, une structure de gouvernance de la commission européenne.

Sphères publiques françaises :

CSF : Contrat Stratégique de Filière, plan national hydrogène, loi transition énergétique.

CNH : Conseil National de l'Hydrogène

Plan national hydrogène

Loi transition énergétique

ECV : Engagements pour la Croissance Verte

LOM : Loi d'Orientation des Mobilités

ANNEXE 2

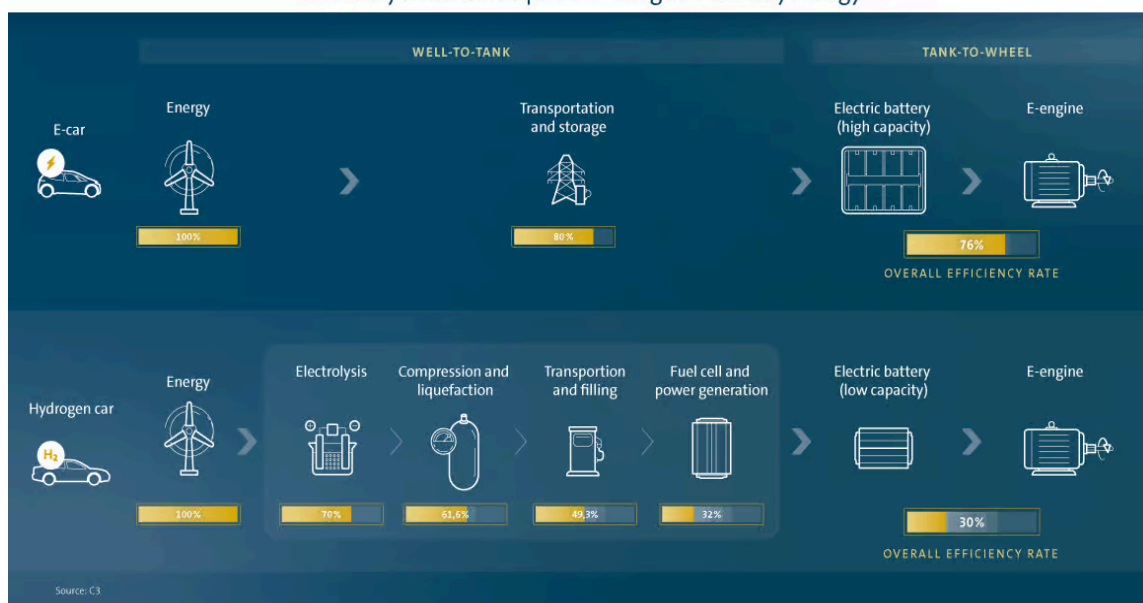
L'infographie ci-dessous³⁴ résume les rendements énergétiques pour la production et l'utilisation de véhicules à hydrogène et électriques, basée sur une consommation de 100 Watts. Pour un véhicule à hydrogène, le rendement énergétique global, incluant la fabrication, le transport et l'utilisation, est de 30%. Ceci est comparé à un rendement énergétique de 76% pour un véhicule électrique, où le processus est simplifié et la technologie de transformation de l'énergie est plus rapide. La production d'hydrogène nécessite des étapes chimiques multiples, contribuant à un rendement inférieur par rapport à la technologie électrique.

³⁴ futura-sciences.com / Deluzarche Céline / 08 Octobre 2022 / Voiture électrique contre voiture à hydrogène : laquelle est plus écologique ?

« <https://www.futura-sciences.com/tech/questions-reponses/voiture-electrique-voiture-electrique-voiture-hydrogene-laquelle-plus-ecologique-16206/> »

HYDROGEN AND ELECTRIC DRIVE

Efficiency rates in comparison using eco-friendly energy



ANNEXE 3

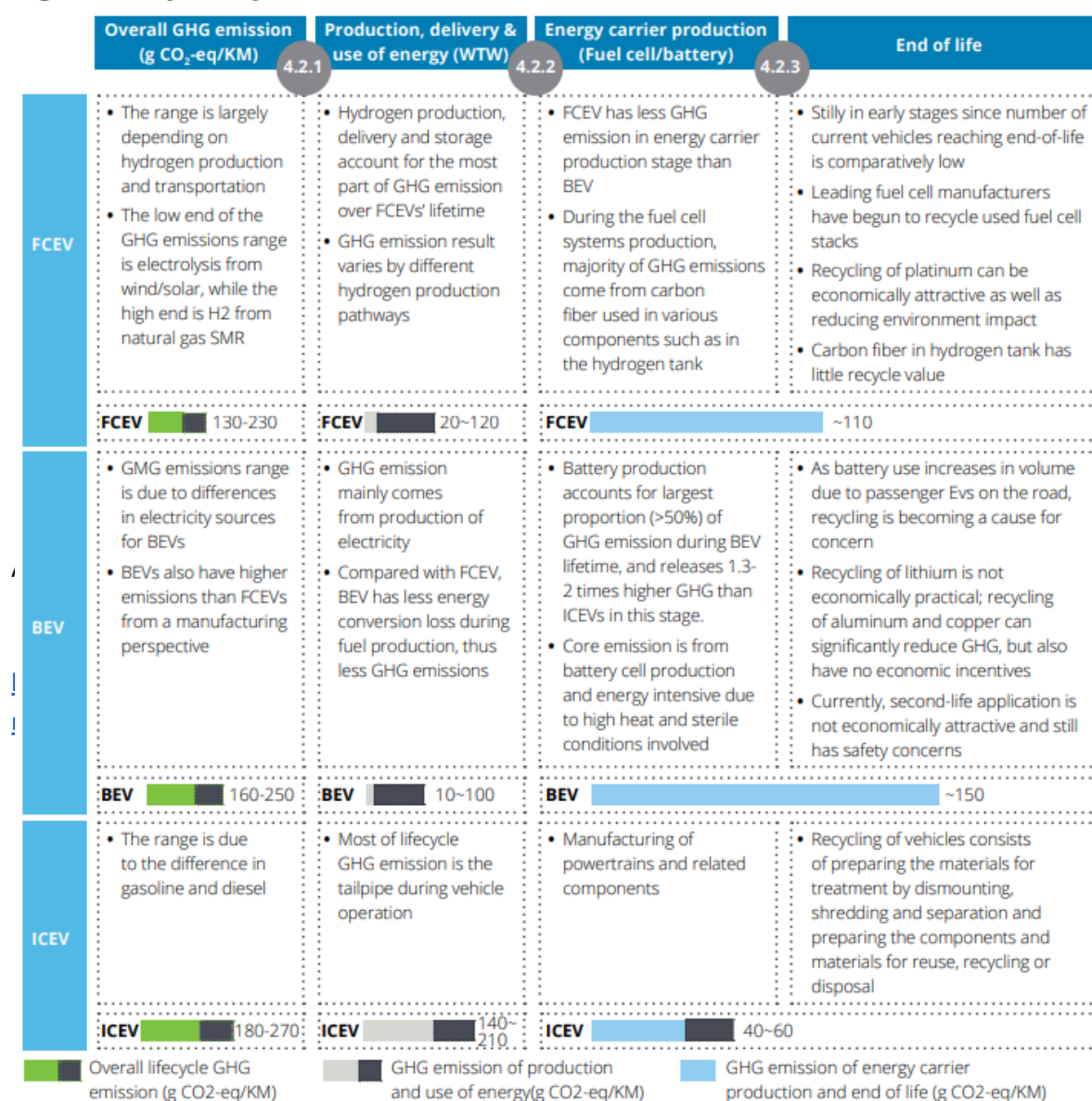
Cette annexe facilite la comparaison des trois modèles en termes de poids, vitesse maximale, émissions de CO₂ et prix, aidant à comparer les performances du véhicule à hydrogène et l'électrique.³⁵

	Poids	Vitesse maximum	Consommation	Emission de Co2	Prix
Citroën Jumpy	1616 kg	180 km/h	5.9l/100km	184g/ km	36 720€
Citroën E-Jumpy	1835 kg	160 km/h	/	0/100 km	36 450€
Citroën E-Jumpy Hydrogen	1 937 Kg	110 km/h	/	0/100km	116 000€

³⁵ [professionnel.citroen.fr / « Citroën ë-jumpy et citroën jumpy »](https://professionnel.citroen.fr/vehicules/jumpy-e-jumpy.html)
<https://professionnel.citroen.fr/vehicules/jumpy-e-jumpy.html>

ANNEXE 4

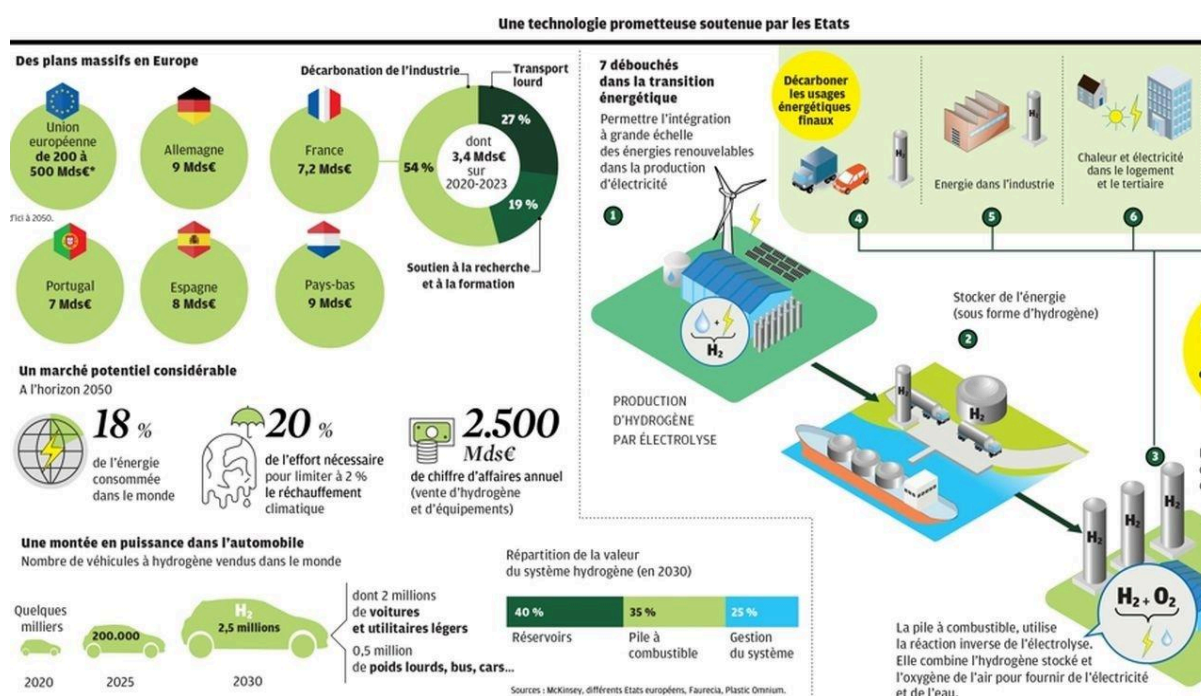
L'image ci-dessous ³⁶ résume les émissions de CO₂ liées à différentes technologies de véhicules, selon une étude du cabinet Deloitte. Le bilan carbone de la voiture à hydrogène est estimé entre 130 et 230 g de CO₂ par km, comparé à 160 à 250 g pour la voiture électrique et 180 à 270 g pour une voiture à combustion (essence ou diesel). La différence s'explique en partie par la production des batteries, qui nécessite l'extraction de lithium et de métaux rares, une activité énergivore. Cependant, le résultat dépend également de la manière dont l'électricité est produite, avec des émissions plus faibles lorsque l'électricité provient de sources telles que l'éolien, le solaire ou le nucléaire. Deloitte se base sur le mix énergétique actuel, dominé en grande partie par les énergies fossiles (62 % en 2019).



³⁶ deloitte.com / 2020 / « Fueling the Future of Mobility, Hydrogen and fuel cell solutions for transportation »
<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>

ANNEXE 5

L'image ci-dessous³⁷ résume les investissements majeurs prévus par les pays européens dans le domaine de l'hydrogène d'ici à 2030, selon des annonces significatives. L'Allemagne s'engage avec une enveloppe de 10 milliards d'euros, suivie par l'Espagne avec 9,2 milliards d'euros, les Pays-Bas avec 9 milliards d'euros, et la France, également avec une contribution de 9 milliards d'euros. Ces investissements démontrent un engagement collectif en faveur du développement de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique, soulignant l'importance stratégique accordée à cette technologie au cours de la prochaine décennie.



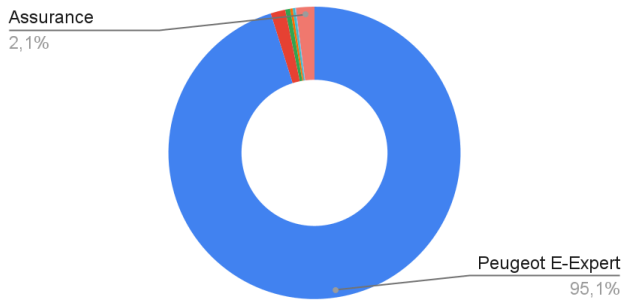
³⁷ [investir.lesechos.fr / 26 Mai 2021 / « Une pluie de milliards pour l'hydrogène vert »](https://investir.lesechos.fr/26-Mai-2021/-/Une-pluie-de-milliards-pour-lhydrogene-vert)

<https://investir.lesechos.fr/investir-responsable/environnement/une-pluie-de-milliards-pour-lhydrogene-vert-1849560>

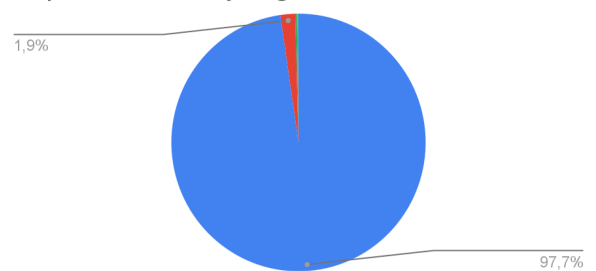
ANNEXE 6

+ cdlv 2024 - TCO

Répartition TCO Electrique



Répartition TCO Hydrogène



Pour calculer le TCO: nous avons réalisé la formule suivante :

$$TCO=CA+CE+CEnt+CAss-SI$$

CA signifie le prix d'achat.

CEnt = coût d'entretien.

CE = coût de l'énergie.

CAss = le coût d'assurance.

SI = Incitatifs et Subventions.

Il y'a une donnée que nous disposons de base c'est le prix d'achat pour le véhicule électrique utilitaire, nous avons choisi pour cela le Peugeot E Expert et son alternative hydrogène Peugeot E-Expert Hydrogène .

(1)=électrique

(2)=hydrogène

CA(1) = 43320 €³⁸

CA(2) = 116000 €³⁹

Avant de pouvoir calculer les autres données nous avons pris la moyenne qu'un véhicule utilitaire parcourt par an on arrive donc à une moyenne de 16 474km/an.

³⁸ professionnel.peugeot.fr / « Peugeot expert. Exigeant, comme vous »

<https://professionnel.peugeot.fr/nos-vehicules-professionnels/expert.html>

³⁹ professionnel.peugeot.fr / « Peugeot expert. Exigeant, comme vous »

<https://professionnel.peugeot.fr/nos-vehicules-professionnels/expert.html>

Pour ce qui est de Peugeot E-Expert on a :

Autonomie approximative 230km

Capacité de la batterie de 50kw/h

Prix moyen du kilowatt/heure en France en 2024 est de 0.207euros⁴⁰

Prix moyen de la recharge complète est de 10.35 euros

Pour savoir le tarif annuel de la recharge, nous cherchons à savoir le nombre de recharge moyen donc : $16474/230 = 71,63$ €

Nombre de recharge annuel en moyenne pour un véhicule utilitaire legend en france : 71.63

Il nous reste donc à faire un produit en croix pour connaître

$71,63 \times 10,35 = 741,37$ € = CE(1)

Prix d'un pneu égal à 100 euros

Prix de la main d'oeuvre pour le montage d'un pneu : 10 euros

16 474km/an -> changement des pneus tous les 29 000 km environ pour une voiture électrique⁴¹

Soit un changement tous les $(29000/16474 = 1,76)$ (1.76 année = 1 an et 9 mois $(1.76-1=0.76)$ $(0.76 \times 12/100 \text{ env} = 9 \text{ soit } 9 \text{ mois}))$

Prix d'un pneu égal à 100 euros ,Prix de la main d'oeuvre pour le montage d'un pneu : 10 euros

Au total : 440 euros par an

On peut donc faire un produit en croix, donc $440 \times 12 / 21 = 251,43$ € en moyenne pour un changement de pneus.

Le prix d'un contrôle technique pour le Peugeot e-Expert selon Fixter est de 74.88 euros.

$74,88 / 2 = 37,44$ euros en moyenne par an pour un contrôle technique.

Selon plusieurs comparateurs de prix (vroomly, aramisAuto) en région Bordelaise le prix moyen pour le changement des plaquettes de freins sur un un Peugeot E-Expert est de 241.74euros.

$241,74/2 = 120,87$ euros

Ce changement devant être effectué tous les deux ans selon Charge-in le montant annuel est porté à 120.87 euros.⁴²

Le changement d'amortisseur est à réaliser en moyenne tous les 80 000 kilomètres,

on fait donc un produit en croix

$16\,474 \times 740 / 80\,000 = 152,38$ euros de changement d'amortisseur tous les ans.⁴³

Pour ce qui est de l'assurance on a repris notre peugeot expert avec une simulation voir les images ci-dessous :

⁴⁰ selectra.info / Servigne Chloé / 12 Janvier 2024 / « Prix du kWh : tarif du kWh d'électricité en France en 2024 »
<https://selectra.info/energie/electricite/prix>

⁴¹ epyx.co.uk / Holroyde Natasha / Octobre 2023 / « Fleet data shows that EV tyres are lasting 6,350 miles fewer than petrol or diesel »
<https://www.epyx.co.uk/2023/09/26/fleet-data-shows-that-ev-tyres-are-lasting-6350-miles-fewer-than-petrol-or-diesel>

⁴² charge-in.fr / Rousseau Laurena / 06 Juin 2023 / « Comment entretenir sa voiture électrique ? »
<https://charge-in.fr/blog/comment-entretenir-sa-voiture-electrique/#:~:text=Dans%20le%20cadre%20l'entretien,4%20ans%20de%20roulage%20environ>

⁴³ vroomly.com / « Changer les Plaquettes de Frein Peugeot Partner : Prix et Devis en ligne »
<https://www.vroomly.com/vehicules/peugeot/partner-camionnette/changement-des-plaquettes-de-frein-avant/#:~:text=En%20moyenne%20le%20prix%20du,du%20mod%C3%A8le%20C3%A0%20l'autre>

10 000 km

Le véhicule est utilisé

☒ Presque tous les jours

☐ 3 à 4 jours par semaine

☐ Moins d'une fois par semaine

☐ Le week-end et les vacances

Combien de temps avez-vous gardé votre dernière voiture ?

S'il s'agit de votre 1ère voiture, indiquez depuis quand vous l'avez.

3 ans

Qui est titulaire de la carte grise ?

☐ Moi (le conducteur principal)

☐ Moi et mon conjoint

☐ Mon conjoint

☐ Mes parents

☐ Les parents de mon conjoint

☒ Une société

croissants et de façon impartiale. • Ajouter un véhicule

Liste des offres non exhaustive et référencement non payant.

Affichage ☒ Simple ☐ Détaillé **Prix** ☒ Par an ☐ Par mois

Aon

Formule Tous risques
934 € /an
Frais de dossier inclus

Plus de détails

☐ Comparer les offres

Être rappelé par l'assureur

On a donc un coût de l'assurance de 934 €/an. En ce qui concerne l'hydrogène, il est, selon nous, impossible de le calculer pour l'instant. Nous avons contacté plusieurs assureurs, mais ils ne souhaitent pas assurer le véhicule.

Pour le véhicule électrique, on a 13,6 € pour 100 km d'autonomie. Avec une autonomie de 400 km, cela donne $13,6 \times 4 = 54$ €. Ensuite, en prenant en compte le coût total sur une distance de 16474 km ($16474 \times 54 / 400$), on obtient 2224 €.

En ce qui concerne les subventions, le véhicule à hydrogène n'en dispose pas, car il dépasse les 47 500 €. En revanche, pour le e-Partner, il bénéficie de 4000 € de subvention

$$CA(1) = 43320 \text{ €}$$

$$CE(1) = 741,37 \text{ €}$$

$$CEnt(1) \text{ et } (2) = 251,43 \text{ € (changement des pneus)} + 120,87 \text{ € (changement des plaquettes de frein)} + 152,38 \text{ € (Changement des amortisseurs)} + 37,44 \text{ € (contrôle technique)} = 562,12 \text{ euros}$$

$$CAss(1) = 934 \text{ €}$$

$$SI(1) = 4000$$

$$CAss(2) = x$$

$$CA(2) = 116\,000$$

$$CE(2) = 54 \text{ €}$$

$$SI(2) = 0$$

On obtient :

$TCO(1) = CA(1) + CE(1) + CEnt(1) + CAss(1) - SI(1) = 43\,320 + 741,37 + 562,12 + 934 - 4000 = 41\,557,49$
euros

$TCO(2) = CA(1) + CE(1) + CEnt(1) + CAss(1) - SI(1) = 116\,000 + 2224 + 562,12 + x - 0 = 118\,759,38 + x$

Pour le véhicule électrique, on obtient un TCO de 41 557,49 euros.

Concernant le véhicule hydrogène, on a un TCO de 118 759,38 + x (coût de l'assurance).

ANNEXE 7

<https://www.youtube.com/watch?v=Nd6C0y8xc20>

ANNEXE 8

Nous avons rencontré monsieur Christian Lucas ingénieur mécanicien retraité, ancien directeur du parc automobile de Bordeaux Métropole. Il est actuellement directeur de l'association Mobil'Eco.

Vidéo montée :

<https://youtu.be/xUK-soB3XoM?si=rfgwcBhsQxmAxmMqG>

Vidéo partie 1 (non montée) :

<https://youtu.be/sYeGX051lvY?si=hceM5xZ1Px5tABD9>

Vidéo partie 2 (non montée) :

<https://www.youtube.com/watch?v=uXGLkGZMzeQ>