



Rapport Final

École Centrale De Lille

Deux Litres au Cent Kilomètres



30 janvier 2023

Alice Dupont-Franklin
Antony Davi
François Tamba
Ignacio Perez
Mateo Auza
Mathis Leroy
Maxime Retureau
Timothée Chailley

Contexte	3
Rappel du projet technique	4
PESTEL	5
Profil et besoins/contraintes des potentiels acheteurs	6
Demande des clients	7
Fabricants	8
Pile à combustible	10
Réservoir à Hydrogène	12
Batterie	12
Moteur triphasé	13
Revendeurs	14
Disponibilité de l'hydrogène en tant que combustible	15
Coût carbone de production	17
Ressources nécessaire	17
Ventes : méthodes de calcul	19
La méthode des points extrêmes	19
La méthode des points moyens	20
La méthode des moindres carrés	20
La méthode de lissage exponentiel	21
La méthode de régression et de corrélation	21
Comparaison des méthodes	22
Coûts et prix du marché	24
Contribution de chacun	25
Partie Technique	25
Analyse mécanique	25
Equations de mouvement	25
I. Etude de chaque élément	27
1. Pile à combustible (PAC)	27
1.1 Fonctionnement théorique de la pile à combustible pour notre véhicule	27
1.2 Modélisation de la pile à combustible sous Matlab/Simulink	29
1.3 Bond Graph de la pile à combustible	38
2. Batterie	38
2.1 Fonctionnement théorique de la batterie pour notre véhicule	38
2.2 Schéma de fonctionnement sous Matlab/Simulink	40
2.3 Simulation sous Matlab/Simulink	41

2.4 Analyse des paramètres	43
3.Moteur	47
3.1 Contrôle de la tension et de la fréquence	47
3.2 Contrôle de la température et équilibrage du rotor	47
3.3 Choix des matériaux	49
3.4 Optimisation Matlab	49
4.Convertisseur DC/DC	50
5. Refroidissement	53
6.Transmission	57
II. Etude du véhicule dans son ensemble	57
1. Architecture Globale	57
2. Répartition des forces	63
2.1 Modèle du véhicule	63
2.2 Forces aérodynamiques	64
2.3 Étude des limites	67
3. Etude sur le cycle NEDC	73
1.1. Profil du cycle étudié.	76
2. Sécurité et articles annexes du véhicule	85
2.1. Les systèmes d'aide à la conduite	85
2.2. Les réservoirs d'hydrogène	87
Conclusions	88
Bibliographie	90

Contexte

Dans le cadre de l'électif d'intégration Deux Litres aux Cent Kilomètres, 8 étudiants de l'école Centrale de Lille ont pour objectif de dimensionner et de proposer une mise sur le marché d'un véhicule consommant moins de deux litres de carburant - ou équivalent en autre énergie primaire - pour parcourir une distance de cent kilomètres.

Pour cela, ils ont pu compter sur l'expérience des enseignants chercheurs de l'école Centrale de Lille et sur les nombreuses ressources numériques et bibliographiques disponibles. L'équipe d'étudiant s'est donc répartie sur les parties technique et marketing pour mener à bien le projet.

Pour répondre à cette problématique du 2L/100km, le choix s'est porté sur un véhicule utilitaire léger basé sur le modèle Stellantis. Cette voiture hybride à pile hydrogène a un moteur AC de 100 kw. La voiture a un châssis similaire à une Mercedes-Benz Sprinter. Elle possède de plus des technologies innovantes permettant de faire le plein en 3 min, une autonomie supérieure à 400 km et une capacité similaire à un mini-van.

La mise sur le marché d'un tel véhicule, novateur et innovant technologiquement, doit s'adapter à un environnement exigeant et à un marché qui évolue sans cesse à cause de contraintes politiques, économiques et environnementales. Pour cela, et afin de répondre au mieux au besoin des consommateurs, il semble nécessaire et obligatoire de réaliser une étude marketing pour que le nouveau véhicule puisse s'insérer progressivement sur le marché automobile.

Ainsi, un cahier des charges a donc été établi pour définir le profil de la voiture. Ensuite, une analyse PESTEL nous a donc permis d'étudier les différents enjeux économiques, politiques, etc pour en tirer une conclusion. Les potentiels acheteurs ont donc été ciblés pour répondre à leur demande et prévoir un potentiel marché sur les prochaines années.

Rappel du projet technique

Critère	Exigence
Système de pile à combustible	Puissance de 40 à 60 kW Rendement de 40 à 60 %
Batterie	Capacité de 10 à 15 kWh Puissance de 25 - 40 kW
Système de gestion de l'alimentation	Gérer efficacement la répartition de l'énergie entre le système de pile à combustible et la batterie Garantir une efficacité et des performances maximales
Châssis	Robuste et durable Capable de supporter le poids des systèmes de pile à combustible et de la batterie
Groupe motopropulseur	Fiable et efficace Puissance de 60 à 150 kW
Freins et suspension	Fiable et efficace est essentiel pour assurer un fonctionnement sûr et fluide du véhicule de livraison dans un environnement urbain
Systèmes d'assistance à la conduite	Avertissement de sortie de voie Régulateur de vitesse adaptatif Freinage d'urgence automatique
Autonomie	Supérieure à 400 km
Vitesse	Vitesse max de 130 km/h
Capacité	Chargement équivalent à la moitié du poids de la voiture
Rechargement	3 minutes dans une station hydrogène
Départ à froid	Éviter d'attendre le temps de chauffe de la pile grâce à la batterie
Prix	Accessible pour des multinationales

PESTEL

	FAIT	CONCLUSION
Politique	Politique de réduction des émissions carbone financée par l'Etat. Certificat Crit'Air.	Intéressant pour une entreprise car cela réduit les coûts
Écologique	Le secteur des transports représente 31% des émissions de gaz à effet de serre. Des solutions non polluantes existent , mais présentent avantages comme inconvénient.	Le secteur des transports = l'un des plus polluants (donc mener des actions). Le véhicule à hydrogène permettrait de réduire ces émissions drastiquement.
Social	La voiture est le moyen de locomotion le plus utilisé pour les livraisons et passer à des véhicules respectueux de l'environnement améliore l'image de marque.	Réelle envie pour les sociétés de livraison d'investir dans un parc automobile à hydrogène.
Technologique	L'électrique est plus accessible, l'hybridation explose et la pile à hydrogène se développe.	Nous pouvons saisir l'opportunité d'un marché en pleine expansion.
Économique	Le niveau de vie est plus élevé dans les villes. Le prix de l'essence et du diésel augmente Aujourd'hui , le prix de l'hydrogène et du diesel sont équivalents.	Utilisation d'un autre carburant → hydrogène
Légal	Norme Euro 7: émission de NOx < 0.4g/kWh Règlement 224-15-11 faible émissions < 50 gCO2/ km	Trouver des alternatives pour respecter ces normes

Profil et besoins/constraints des potentiels acheteurs

Contexte

Le véhicule dimensionné par notre équipe est un véhicule utilitaire de transport ou de livraison.

Il est en mesure de transporter jusqu'à des objets de la taille de meubles, en terme d'ordre de grandeur.

Il constitue donc un véhicule de choix pour des entreprises assurant des services de transport ou de livraisons en ville notamment. L'épidémie de Coronavirus a rendu ce service de livraison encore plus important aux yeux des clients particuliers qui peuvent donc rester chez eux. Nos clients potentiels sont donc des entreprises de transport et livraisons. On peut donner à titre d'exemple des entreprises comme Amazon, La Poste ou encore Auchan. En effet, ces entreprises vont devoir continuer de livrer des biens même quand, en 2035, les voitures thermiques ne seront plus autorisées.

Afin de continuer leur activité, celles-ci devront financer des véhicules innovants et plus respectueux de l'environnement : c'est ici que notre véhicule entre en jeu et apporte une solution à ces entreprises.



Figure 1 : véhicule de transport proposé



Figure 2 : exemples d'entreprises clientes

Avantages

Technologies innovantes permettant de

- Faire le plein en 3 minutes
- >400 km d'autonomie
- Même capacité qu'un mini-van.
- Départ à froid.

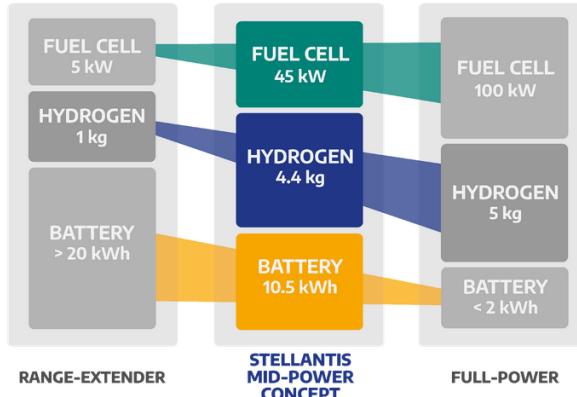


Figure 3 : Concept innovant

Le concept mid-power adapté à nos conditions d'utilisation démarque fortement ce véhicule des véhicules électriques.

En effet , il permet d'obtenir une autonomie comparable aux véhicules diesel tout en proposant un système de recharge bien plus rapide.

Utilisation

Le nombre d'heures qu'un véhicule de livraison parcourt au cours d'une année peut varier considérablement en fonction de plusieurs facteurs, tels que le type de service de livraison effectué, l'emplacement du véhicule, la taille de la flotte et l'efficacité des itinéraires de livraison.

Par exemple, un véhicule de livraison pour un service de livraison de colis peut rouler plusieurs heures par jour, 5 à 6 jours par semaine, et prendre quelques jours de congé pour l'entretien, tandis qu'un véhicule de livraison pour un service de livraison de gros œuvre peut ne rouler que quelques heures et ce 2 à 3 jours par semaine.

En général, le nombre total d'heures parcourues par un véhicule de livraison dans une année peut aller **de 2000 à 10 000 heures**, selon les spécificités du service de livraison et l'efficacité des itinéraires de livraison.

Il est important d'en être conscient afin d'estimer le prix de maintenance.

Demande des clients

Amazon possède 100 000 camions dont 10 000 électriques en 2023. Sachant que les moteurs thermiques seront interdits d'ici 2035, leur demande va donc s'accroître et notre profil de véhicule colle tout à fait avec la demande du client. Un conducteur de courtes distances conduit environ 350 km/jour comparées à 1050 km/jour pour de longues distances. Sur Paris, plus de 200 000 colis sont livrés chaque jour ce qui constitue donc à des milliers de km roulés chaque jour et des émissions de CO₂. Nos véhicules avec un moteur hybride à pile d'hydrogène est donc envisageable pour des raisons écologiques.

La Poste quant à elle possède 27 000 véhicules en 2023 dont 7 000 voitures électriques. L'entreprise planifie d'en acheter 15 000 d'ici 2025 seulement alors que le marché prévisionnel est en hausse. D'autres potentiels clients dans la même dynamique de fonctionnement sont les entreprises de logistique et de livraisons. De plus, des entreprises pharmaceutiques comme CERP ont une flotte de 750 véhicules à essence en 2023 et sont donc ciblables pour nos véhicules hybrides à pile d'hydrogène. Plus précisément, nous ciblons sur les 5,8 millions de véhicules utilitaires légers en circulation la part de 59% réservée à un usage professionnel. En effet, le diagramme ci-dessous tiré de Vehicules-Utilitaires.fr [9] montre que la majorité de ces véhicules utilitaires légers sont utilisés par des entreprises à 90%.

90% Entreprises
 9% Administrations
 0.5% Associations
 0.5% Auto-Entrepreneurs

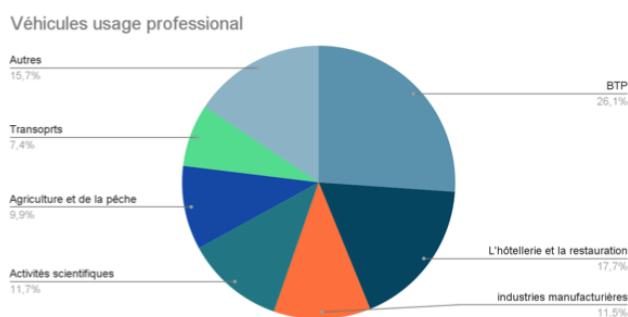


Figure 4 : Demande des clients

Fabricants

Fabricants pour les véhicules hydrogène actuels.

Dans cette partie, nous allons aborder les relations entre les fabricants automobiles. Il existe de nombreux groupes de pays différents et qui investissent sur des technologies variées. Les véhicules produits sont la marque d'une concurrence toujours plus accrue dans ce secteur. L'innovation est la marque des entreprises qui parviennent à rester dans la compétition pour la fabrication des véhicules et la comparaison avec les véhicules hybrides classiques vient donc appuyer ici une fabrication potentielle de nos véhicules par les constructeurs automobiles. Il s'agit d'une tendance mais la mise sur le marché et la fabrication de nos véhicules pourraient se dérouler différemment en fonction des ressources disponibles pour notre véhicule précis.

Avant tout, il convient de replacer la fabrication des véhicules hybrides dans un contexte plus global. Pour comprendre pourquoi certaines entreprises investissent sur les technologies hybrides, il faut connaître les principaux constructeurs automobiles.

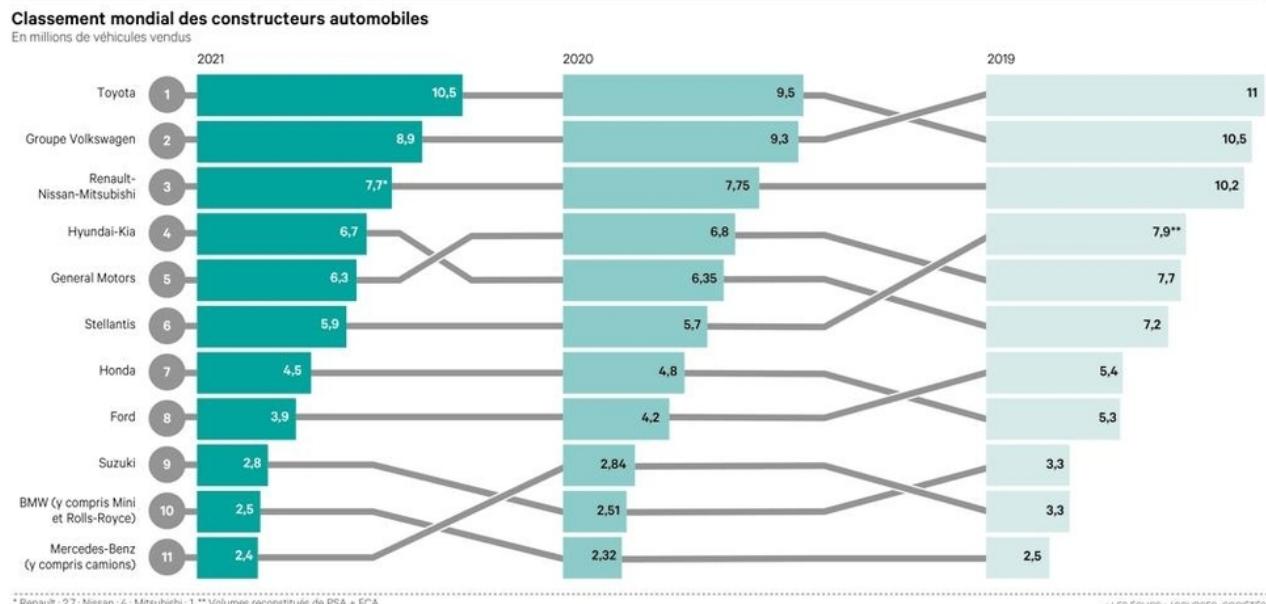


Figure 5 : classement mondial des constructeurs automobiles de 2019 à 2021 (en nombre de véhicules vendus)

Sur la figure ci-dessus, on constate que certaines entreprises restent dans le haut du classement durant plusieurs années consécutives. On peut citer notamment Toyota, Honda, BMW, Ford...

Etudions maintenant plus en détail qui sont les principaux fabricants automobiles dans la gamme hybride.

Le marché du véhicule hybride se compose principalement de fabricants appartenant au classement des constructeurs les plus populaires. On peut citer notamment Toyota, Nissan, Honda, BYD, Mitsubishi, BMW et Ford qui dominent très largement le domaine de l'hybride.



Figure 6 : fabricants dominants du secteur de l'hybride

Par ailleurs, il est intéressant de constater que certaines entreprises utilisent cette domination comme argument commercial. En effet, Toyota se définit elle-même comme le leader de l'hybride.

Pour comprendre comment Toyota a su obtenir cette place de leader, la compréhension de leur note de stratégie, et en particulier l'analyse de leur matrice SWOT, sont des outils intéressants.

Tout d'abord, selon Toyota, toutes les voitures se valent. Autrement dit, le marché est hyperconcurrentiel, il sera très difficile de sortir du lot avec une voiture classique aujourd'hui, du moins aux yeux des clients particuliers. Il faut donc se focaliser assez peu sur l'aspect visuel et pratique du véhicule car ce ne sont plus des éléments qui permettent de faire la différence.

En outre, c'est un marché où il y a peu d'entrants. Très peu de nouveaux fabricants arrivent sur le marché. Donc selon Toyota, la concurrence viendrait surtout des fabricants déjà existants sur le marché. Les méthodes choisies par les concurrents et les investissements technologiques, comme les véhicules hybrides, peuvent aider à prendre des parts de marché à la concurrence. L'expérience des fabricants est donc un facteur clé.

Par ailleurs, les fabricants doivent prendre en compte les besoins des clients, de ceux qui vont acheter leurs véhicules. Les fabricants ont compris qu'un véhicule qui plaît au client est un véhicule vendu. Dans sa note de stratégie, Toyota explique que la dépendance des fabricants auprès des clients est de plus en plus forte. Il faut savoir rester à l'écoute des besoins et des envies des consommateurs. Les exigences actuelles des clients sont souvent liées à la nécessité d'avoir des véhicules plus "propres". Ainsi, il apparaît complètement logique que Toyota ait développé son modèle hybride depuis plusieurs années maintenant. Malheureusement, pour certains fabricants, le coût des véhicules hybrides reste encore un peu plus élevé que sur certaines voitures thermiques.

Enfin, deux autres facteurs influent sur la mode des véhicules hybrides et peuvent encourager le développement de cette gamme de véhicules pour les fabricants. D'une part, les technologies innovantes comme l'hybride permettent de faire face aux pressions gouvernementales qui cherchent à réduire la fabrication des véhicules thermiques pour des considérations environnementales. D'autre part, investir sur l'hybride permet de contourner les fluctuations des énergies fossiles, comme le pétrole.

Pile à combustible

Pour notre pile à combustible, nous nous sommes orientés vers une marque française : Symbio. Nous optons pour la gamme la moins chère et adaptée aux besoins de l'utilisateur.

Par des analyses du profil de conduite, une pile de 40 kW suffit.

Il y a plusieurs fabricants :

1. Symbio
2. Plug Power
3. Ballard Power Systems
4. Hydrogenics
5. FuelCell Energy

Le choix de cette pile par rapport aux autres fabricants se fait sur plusieurs critère :

- Production locale : Symbio est une marque française, ce qui est un avantage économique et environnemental.
- Conception compacte : la conception compacte du StackPack 40 facilite son intégration dans un véhicule de livraison et économise de l'espace.
- Puissance de sortie élevée : Avec une puissance de sortie de 40 watts, StackPack 40 pourrait être en mesure de répondre aux besoins en énergie d'un véhicule de livraison.
- Durabilité : Les systèmes de pile à combustible en général sont connus pour leur fiabilité et leur durabilité, et le StackPack 40 peut également offrir ces avantages.

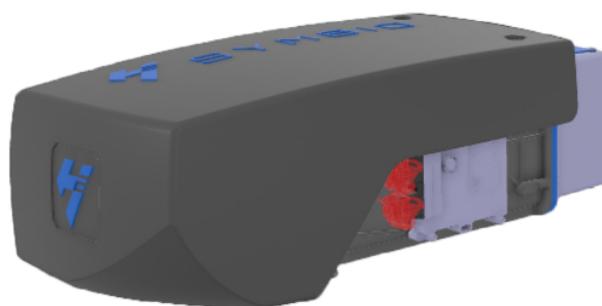


Figure 7 : pile a hydrogène

Prix : Environ 40 000 euros avec une durabilité de 7000 heures. Il convient alors d'un système optimisé qui active la pile à combustible lors des phases adaptées(périphérique) et sollicite la batterie lors des trajets en ville.

Pour une sollicitation tel que livraison de colis , on estime ainsi la durée de vie de la pile entre **1 an et demi et 2 ans maximum.**

Il est difficile de prédire dans quelle mesure le prix des piles à combustible pourrait diminuer au fil du temps, car cela dépendra de divers facteurs, notamment l'adoption de la technologie des piles à combustible, la croissance de l'infrastructure de l'hydrogène et les progrès des procédés de fabrication.

Cependant, ces dernières années, le prix des piles à combustible a diminué en raison des progrès technologiques et de l'augmentation de la production, ce qui a entraîné des économies d'échelle et une baisse des coûts. Certains experts prédisent que le coût des piles à combustible continuera de baisser dans les années à venir à mesure que la demande de véhicules à pile à combustible et d'autres applications continuera de croître.

Ils estiment une baisse des coûts de 50% d'ici à 2030.

Réservoir à Hydrogène

Les réservoirs à hydrogène varient beaucoup par leur utilisation. Le réservoir qui est mis sur notre véhicule se doit d'être sûr et résistant aux fuites, aux chocs et aux incendies pour éviter tout danger pour les passagers et les utilisateurs pour ainsi respecter les normes et lois en vigueur. Il doit être aussi assez léger pour ne pas surcharger le véhicule mais doit être assez volumineux pour stocker une quantité d'hydrogène pour une autonomie adéquate. Le choix de conception d'un réservoir est alors un compromis entre ces différents facteurs et le coût de production.

Selon une étude de l'association des constructeurs automobiles européens de 2019, les coûts de production de réservoir à hydrogène pour véhicules étaient estimés entre 50 et 100 € par kilo d'hydrogène stocké.

L'hydrogène est stocké majoritairement à 700 bar, à cette pression il possède une masse volumique de 42 kg/m³ contre 0.09 kg/m³ à pression atmosphérique. Ainsi on peut stocker dans un réservoir de 125 L, 5 kg d'hydrogène ce qui correspond environ à 500 km.

Les principaux fabricants de réservoir à hydrogène sont :

1. Hexagon Purus
2. Toyota pour ses propres véhicules
3. Linde
4. ITM Power
5. Air Liquide
6. Plastic Omnium

Nous avons choisi de nous orienter vers Air Liquide qui a de l'expérience dans le domaine de l'hydrogène et d'autres gaz que cela soit dans le stockage ou la production. Il est aussi présent dans le monde entier et plus particulièrement en Europe.

Ils sont également en train de développer des solutions de stockage d'hydrogène innovant comme l'hydrogène solide ou plus prometteur l'hydrogène liquide avec leur partenariat avec Faurecia.

Ce réservoir stockera l'hydrogène à une température de -252.87 °C et une pression de 1 013 bar ce qui permettra de stocker les 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de seulement 75 L. Ces réservoirs sont actuellement en phase de prototype, ils seront développés en 2025 puis déployés pour une mise sur le marché en 2027.

Batterie

Notre véhicule de livraison à une pile à combustible de 40 kW avec une autonomie de 400 km et circule en ville. Une batterie lithium-ion de grande capacité serait probablement un choix approprié. **Les batteries lithium-ion sont couramment utilisées dans les véhicules à pile à combustible en raison de leur haute densité d'énergie, qui offre un bon équilibre entre poids, taille et capacité.**

Lors du choix d'une batterie pour un véhicule de livraison à pile à combustible répondant à ces exigences, il est également important de prendre en compte d'autres facteurs tels que la sécurité, la durabilité et la facilité d'intégration avec la pile à combustible et d'autres systèmes du véhicule. De plus, les exigences spécifiques à la conduite en ville, telles que les arrêts et les départs et la nécessité d'une accélération rapide, peuvent avoir une incidence sur le choix de la batterie.

Nous optons pour une batterie de 90 kW , de capacité de 10.5 kWh, durable et sûre.

Les différents fabricants sont alors :

1. Panasonic
2. LG Chem
3. Tesla
4. CATL
5. BYD

Le fabricant retenu est un producteur moins connu : Automotive Cells Company , déjà opérationnel à Bruges (Bordeaux), et à Nersac, France (Nouvelle Aquitaine). Leur première Gigafactory est en cours de construction à Billy-Berclau Douvrin, Hauts-de-France.

- Leur centre de recherche et développement permet de s'assurer d'avoir des batteries à la pointe de la technologie actuelle.
- La production est environnementalement souhaitable plutôt que d'importer les produits d'un autre continent.
- Leurs puissants partenaires leur permettent de maintenir des prix accessibles.
- Ils sont spécialisés uniquement dans le domaine des batteries de véhicules.

Prix : Environ 8000 euros.



Figure 8 : logo ACC

Moteur triphasé

Le véhicule utilise un moteur triphasé de 136 Hp (100 kW) avec un couple maximal de 300 Nm à 3674 rpm et un voltage d'opération de 400V.

Ce moteur permet à la voiture de générer 0 émissions de carbone au moment de fonctionnement.

Le moteur triphasé est utilisé en différentes voitures et en industrie pour la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. Et son principe de fonctionnement est le même que celui d'un autre moteur électrique.

Le moteur permet une vitesse maximale de 130 km/h pour une voiture de 3.5 tonnes.

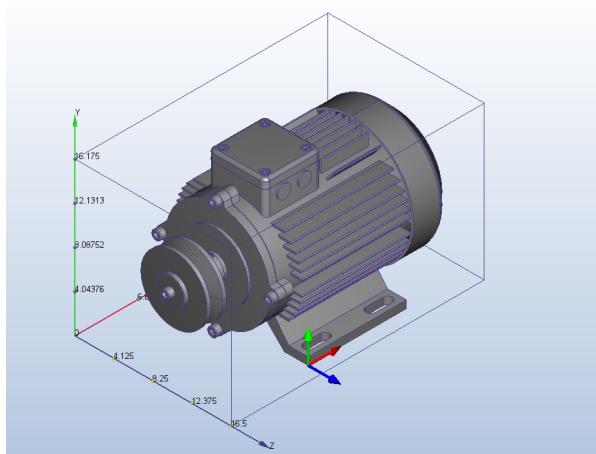


Figure 9 : Moteur AC 100 kW

Le moteur est utilisé pour le groupe stellantis, est est celui d'une Citroën ë-BERLINGO. Aussi le moteur triphasé de 100 kW est utilisé dans les voitures électriques de Toyota, Dacia, Renault, Fiat, MG, Peugeot, Nissan, Mazda, Kia, Cupra, Opel, et autres.

Il existent différents producteurs de moteurs triphasés, cependant les producteurs plus importants en France sont :

- 3X MOTION TECHNOLOGIES CO.,LTD.
- AB SHOT TECNICS
- ABB Motors Drives and Power Electronics
- ABM Greiffenberger Antriebstechnik GmbH

Le prix moyen d'un moteur triphasé de 100 kW est de 5000 euros

Revendeurs

Les principaux revendeurs de véhicule de livraison à pile combustible sont :

1. Toyota avec FedEx
2. Hyundai avec DHL
3. Nikola
4. Isuzu (Pile à combustible Honda)
5. Daimler
6. Stellantis

Sachant que l'on s'oriente vers les entreprises, il y a deux alternatives possibles. Elles peuvent soit directement acheter des véhicules pour leur flotte, ce qui est utilisé par les plus grosses entreprises de livraison pour bénéficier de tarifs avantageux en achetant en masse soit faire un leasing c'est-à-dire un contrat de location sur 3 ou 5 ans. On se rend alors compte que la concession n'est ciblé que pour les particuliers et n'est donc pas intéressante pour nous dans un premier temps. Elle pourra l'être dans un second temps pour assurer à des véhicules qui auraient déjà été loués sous contrat plusieurs fois leur fin de vie.

Il faudrait donc traiter directement avec les entreprises pour passer des contrats ou alors s'associer à des revendeurs déjà existants pour bénéficier d'une plus grande force commerciale.

Notre revendeur privilégié serait alors stellantis car celui-ci présente tout de même plusieurs avantages :

Stellantis, qui est déjà un regroupement de plusieurs marques, avec sa vaste portée et son expérience dans l'industrie automobile, pourrait être en mesure de fournir une large gamme de véhicules et de services d'assistance, y compris des véhicules de livraison à pile à combustible.

Nous pourrions donc étoffer son offre de prestation tout en bénéficiant de son réseau. Sachant que les piles à combustion ont une durée de vie estimée à 2 ans, on pourra alors imaginer mettre en place des contrats de location sur cette durée et pouvoir ainsi changer la PAC entre deux locations pour assurer une parfaite performance du véhicule.

Disponibilité de l'hydrogène en tant que combustible

Le nombre de stations de ravitaillement en hydrogène augmente progressivement à mesure que la demande de véhicules à pile à combustible augmente, et des efforts supplémentaires sont déployés pour développer l'infrastructure de l'hydrogène dans le pays. Ces efforts devront être importants afin d'éventuellement rattraper l'essence car on compte aujourd'hui plus de 11 000 stations essence en France, ce qu'en fait de très loin le carburant le plus accessible.

Le gouvernement français s'est fixé pour objectif d'avoir 100 stations de ravitaillement en hydrogène d'ici 2023, ce qui devrait stimuler le développement de l'infrastructure de ravitaillement en hydrogène dans le pays. De plus, les investissements du secteur privé, y compris les constructeurs automobiles, les sociétés énergétiques et les fournisseurs d'hydrogène, jouent également un rôle important dans la croissance des stations hydrogène en France. C'est pourquoi le développement des véhicules utilitaires légers de livraison est particulièrement intéressant. En effet, si un acteur majeur de la livraison tel que Amazon se lance dans l'hydrogène, ils auront les moyens pour construire leurs propres stations de recharge, que ce soit dans leurs entrepôts ou alors des stations accessibles à tous. Cela aura comme effet d'améliorer la distribution d'hydrogène sur le territoire et donc on peut imaginer une accélération du développement de cette ressource y compris pour les particuliers, comme un effet de cascade. Cependant, la vitesse de croissance dépendra de plusieurs facteurs, notamment les avancées technologiques, les réductions de coûts et la disponibilité des financements.

En effet, aujourd'hui le stockage et le transport de l'hydrogène restent un frein car coûteux en énergie du fait de la haute pression nécessaire. Cependant, il serait intéressant de développer les technologies en faveur de l'hydrogène compte tenu de son potentiel énergétique très fort : il dispose d'une densité énergétique massique 3 fois plus élevée que le gazole par exemple (1 kg d'hydrogène permet une autonomie de 100km).

L'hydrogène est actuellement un gaz industriel important : 75 millions de tonnes sont fournies annuellement à l'industrie chimique, près de 45% pour le raffinage pétrolier (désulfuration), presque autant pour la production d'ammoniac et d'engrais azotés, environ 10% pour les industries alimentaires, électroniques et métallurgiques et enfin près de 1% pour la propulsion spatiale des fusées par combustion d'hydrogène et d'oxygène liquides.

La France produit près d'un million de tonnes d'H₂ par an, soit 1,5% de la production mondiale (contre de l'ordre de 10 Mt par an pour les États-Unis ou la Chine)

Les prix de production de l'hydrogène sont étroitement liés avec ceux de l'électricité et aujourd'hui le prix du kilo se situe entre 10 et 12€ avec les techniques utilisées actuellement. Reste à prendre en compte le prix du transport au du stockage.

Pour les courtes et moyennes distances, les solutions privilégiées sont le transport par camion et par pipeline. Pour le transport par remorque, le prix se situe entre 0,5 et 1,5€ par kilo d'hydrogène sur les distance inférieures à 400 km. Pour les distances supérieures, on préfèrera les pipelines qui permettent de réduire ce coût jusqu'à 0,2€ par kilo.



Figure 10 : Transportation de hydrogene



Figure 11 : stockage d'hydrogène

Plusieurs techniques de stockage existent mais celle qui nous intéresse le plus pour les stations de recharge est celle en réservoirs haute pression. Ces réservoirs montent jusqu'à 700 bars et se remplissent à l'aide de l'hydrogène gazeux transporté dans les camions remorque.

Coût carbone de production

En termes de production, actuellement la majeure partie de l'hydrogène est produite par vapoforage, il s'agit d'une technique peu coûteuse mais qui rejette une quantité importante de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Afin de rendre cette production plus propre, il existe 3 alternatives : l'électrolyse alcaline de l'eau, l'électrolyse P.E.M. et l'électrolyse à haute température. L'électrolyse alcaline de l'eau a l'inconvénient d'être chère mais elle est réalisée à des températures et pression modérées (80 à 160° et 3 à 30 bars). Elle possède également un très bon rendement (entre 80 et 92%). L'électrolyse P.E.M. est encore plus coûteuse, mais elle possède un rendement meilleur. Quant à la dernière forme d'électrolyse, elle a fait l'objet de nombreuses recherches dans les années 2010 car elle pourrait représenter une bonne solution pour la production d'hydrogène en réduisant les émissions de carbone grâce à un rendement encore plus élevé (plus proche des 90%) car les conditions sont optimisées lors de la production.

Ces deux méthodes ont leurs avantages et leurs inconvénients, et le choix de la méthode dépendra de facteurs tels que la disponibilité des ressources, le coût et l'impact environnemental. Par exemple, le coût de l'hydrogène produit par reformage est aux alentours de 1,5€/kg contre 6€/kg pour l'hydrogène produit par électrolyse, on comprend donc clairement pourquoi aujourd'hui la méthode la plus favorisée est celle par reformage. Cependant cette méthode possède un terrible coût carbone puisque à chaque étape de la production une grande quantité de CO₂ est relâchée : conversion du CO issu du reformeur, combustion de fuel pour la production de vapeur et pour l'apport énergétique dans le reformeur. Au final, on estime que pour chaque tonne d'hydrogène produite c'est environ 12 tonnes de CO₂ qui sont relâchées dans l'atmosphère.

Le gouvernement et l'industrie français investissent activement dans la recherche et le développement de méthodes de production d'hydrogène propres afin de réduire l'empreinte carbone de la production d'hydrogène et d'assurer la durabilité à long terme de l'industrie de l'hydrogène.

Ressources nécessaire

Batterie

Il y a actuellement suffisamment de lithium pour produire des batteries pour véhicules, mais la disponibilité du lithium pourrait devenir préoccupante à mesure que la demande de véhicules électriques et de systèmes de stockage d'énergie augmente. Les efforts pour assurer la durabilité de l'industrie du lithium, y compris le développement de pratiques de production responsables et le recyclage et la réutilisation des batteries, sont en cours.

Ainsi , nous avons opté pour une solution sollicitant des batteries de type véhicule hybride qui ont un impact environnemental bien inférieur à celui des véhicules électriques. De plus , l'aspect utilitaire est non négligeable. En effet, ces biens ne sont pas destinés aux particuliers mais bien à un marché réduit ce qui limitera l'impact sur le stock de matière

première disponible. Enfin , jongler entre pile à combustible et batterie dans leur zone de confort permettra d'augmenter drastiquement la durée de vie des deux éléments.

Pile à combustible

Les matières premières sont généralement abondantes et facilement disponibles. Les principaux composants d'une pile à combustible comprennent l'assemblage d'électrodes à membrane (MEA), les plaques bipolaires et les champs d'écoulement.

Le MEA se compose d'une membrane échangeuse de protons (PEM), de catalyseurs et d'une couche de diffusion de gaz. Le PEM est généralement constitué d'un polymère d'acide perfluorosulfonique, et les catalyseurs sont généralement constitués de platine ou d'autres métaux précieux. Ces matériaux sont largement disponibles, mais leur coût élevé est l'un des principaux défis auxquels est confrontée la commercialisation de la technologie des piles à combustible.

Les plaques bipolaires sont généralement constituées d'acier inoxydable, de composites de carbone ou d'autres alliages métalliques et sont largement disponibles. Les champs d'écoulement sont généralement faits de plastique ou d'autres matériaux légers, et sont également largement disponibles.

En résumé, les matières premières pour les empilements de piles à combustible sont généralement abondantes et facilement disponibles, mais le coût élevé de certains matériaux, tels que les catalyseurs, est un défi pour la commercialisation de la technologie des piles à combustible. Les efforts visant à réduire le coût des piles à combustible et à accroître leur compétitivité par rapport aux autres technologies de production d'électricité sont en cours.

Hydrogène en tant que matière première

C'est l'élément le plus abondant de l'univers, représentant environ 75% de sa matière élémentaire en poids. L'hydrogène est également abondant sur Terre et peut être trouvé dans l'eau, les hydrocarbures et d'autres composés organiques.

Cependant, l'hydrogène n'existe pas naturellement sous sa forme élémentaire sur Terre et doit être produit par divers processus tels que le reformage à la vapeur du gaz naturel, l'électrolyse de l'eau ou des processus biologiques comme nous l'avons vu.

L'hydrogène est largement disponible sur Terre, mais sa production peut avoir un impact significatif sur l'environnement et les systèmes énergétiques mondiaux, et des pratiques de production responsables sont nécessaires pour assurer sa durabilité à long terme.

En revanche , à contrario du pétrole , ce n'est pas considéré comme une ressource fossile ce qui en fait un investissement durable.

Ventes : méthodes de calcul

Ils existent différentes méthodes pour calculer les ventes dans la prochaine période, et ils sont basés sur l'historique des ventes des années dernières.

Comme le marché qu'il vise est un marché qui est en cours de développement, on utilise l'historique de ventes de voitures utilitaires légères en France, ainsi qu'une comparaison des voitures à hydrogène en Europe. Avec ces deux informations, on peut interpréter et approcher la tendance la plus proche à la réalité si notre marché est la période 2023. Aussi c'est important de considérer les facteurs politiques et légaux du transport en France, donc ça peut avoir un impact positif sur notre produit.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Annee	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ventes	407500	419000	439200	461000	458900	372500	412300	425600	384100	367300	371600	378800	410100	438700	459100	478000	430200	516240

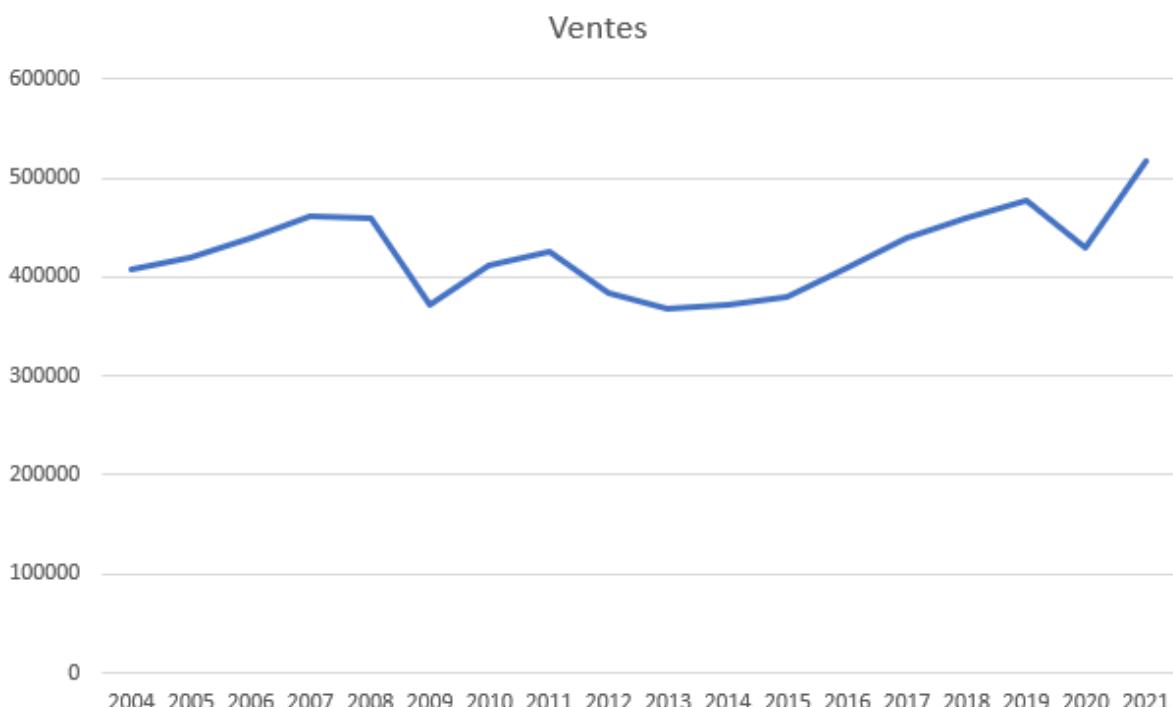


Figure 12 : graphique des ventes de voitures utilitaires en france.

La méthode des points extrêmes

Elle consiste à relier par une droite les deux points les plus extrêmes. Elle peut être utile pour visualiser l'évolution du CA ou du volume de ventes, mais également pour définir l'un des deux indicateurs, voire les deux.

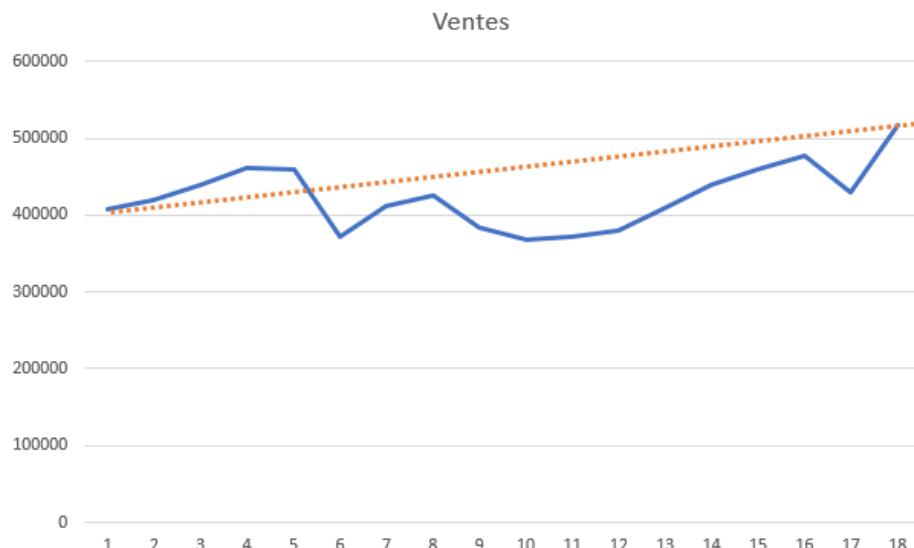


Figure 13 : graphique des données avec méthode des points extrêmes

L'équation de la recte est : $Y = 6396.47X + 401103.5294$

La méthode des points moyens

La méthode de Mayer consiste à découper la série de données en deux sous-séries, ce qui permet de tenir compte de tous les points de la série.

On calcule ensuite le point moyen de chaque sous-série avant de déterminer l'équation de la droite d'ajustement qui passe par ces deux points moyens.

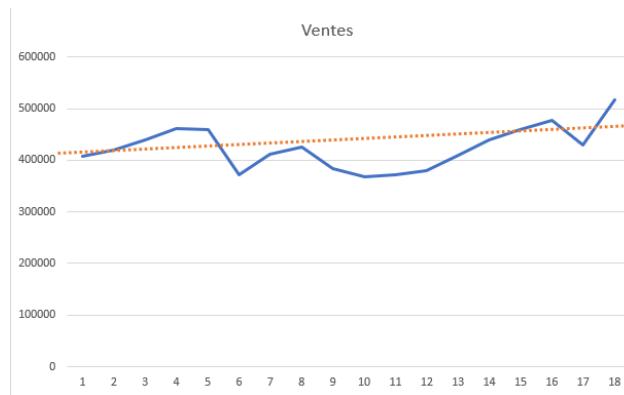


Figure 14 : graphique des données avec méthode des points moyens

L'équation de la recte est : $Y = 863.456X + 415693.8272$

La méthode des moindres carrés

Y est le volume de ventes ; X est l'année recherchée pour les prévisions, à laquelle on soustrait la moyenne des années ; a est la somme des $x \cdot y$, laquelle est divisée par la somme des x^2 ; b est déterminé en soustrayant à la moyenne des volumes (ou des chiffres d'affaires) la valeur de a multipliée par la moyenne des années.

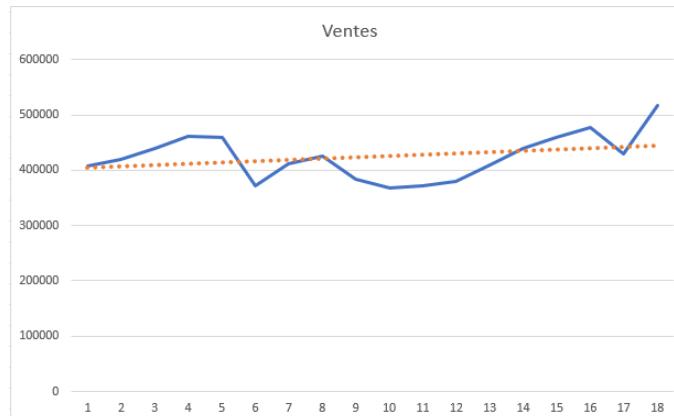


Figure 15 : graphique des données avec méthode des moindres carrés

L'équation de la recte est : $y = 2306,7x + 401983$

Cette méthode prendra en compte un nombre R corrective, pour approcher le mieux l'équation en considérant l'erreur.

La méthode de lissage exponentiel

Le lissage exponentiel n'est pas la méthode de calcul de prévision des ventes la plus utilisée.

Le lissage exponentiel donne un poids plus important aux données les plus récentes, grâce au calcul d'un coefficient de pondération.

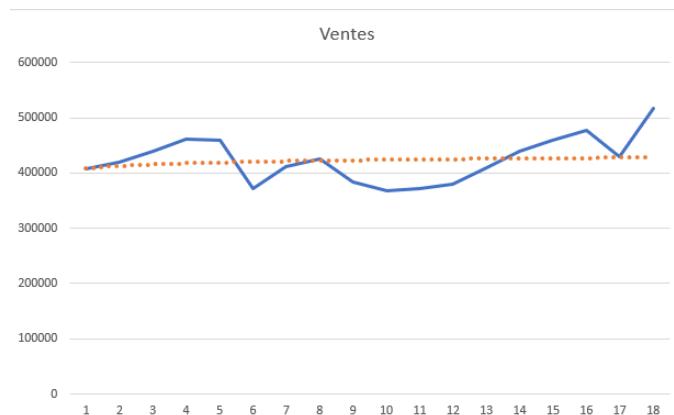


Figure 16 : graphique des données avec la méthode de lissage exponentiel

$$y = 408183x^{0.0165}$$

La méthode de régression et de corrélation

La régression multiple permet d'analyser la relation entre une variable dépendante (chiffre d'affaires ou volume de ventes) et plusieurs autres variables indépendantes. Étant donnée la

précision du calcul, il s'agit de l'une des méthodes les plus utilisées par les entreprises souhaitant prévoir les ventes d'un produit ou de plusieurs produits.

Pour mieux apprécier le niveau de qualité de la prévision par la méthode de régression, il faut mesurer le coefficient de corrélation. La corrélation exprime l'intensité de la liaison entre les variables étudiées. La formule du coefficient de corrélation, plutôt complexe à vue d'œil, met en relation les variables étudiées et leurs moyennes respectives. Le coefficient est compris entre 1 et -1 : lorsqu'il est proche de l'une des deux extrémités, la prévision des ventes est alors d'autant plus précise et fiable.

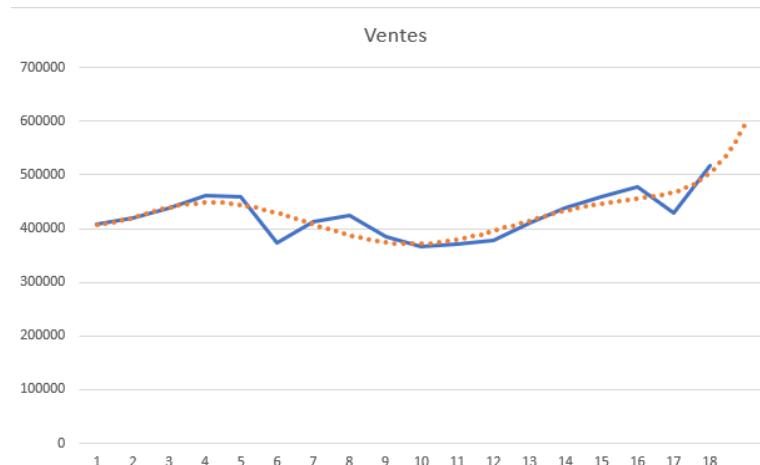


Figure 17 : graphique des données avec la méthode de régression

L'équation polynomial de la fonction est

$$y = 0,9163x^6 - 51,588x^5 + 1084,3x^4 - 10285x^3 + 41779x^2 - 55178x + 430592$$

Cette méthode permet de lier toutes les données par une courbe, cependant, il peut s'optimiser avec la corrélation de variables.

Comparaison des méthodes

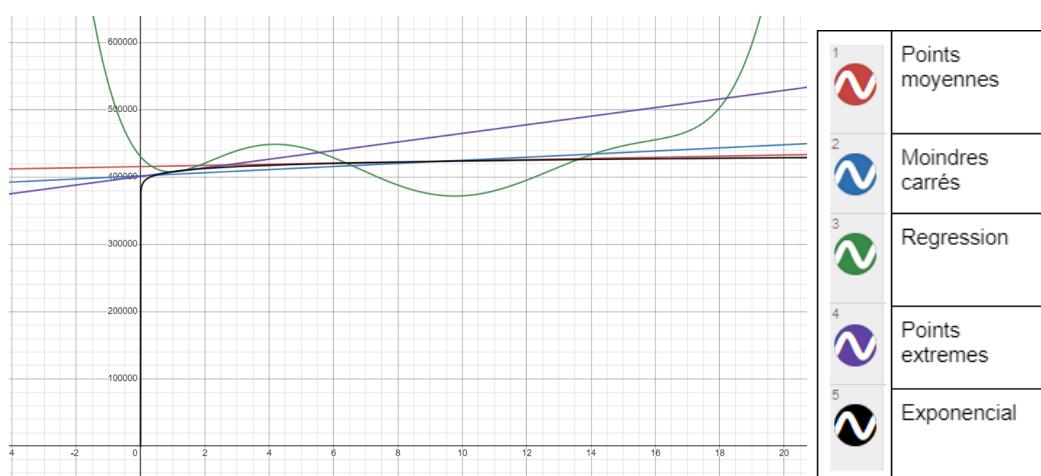


Figure 18 : graphique des différentes méthodes d'analyse

Si on analyse les différents points obtenues dans le période 19, le plus probable c'est la méthode de régression ainsi que les points extrêmes à un résultat accordé aux possibles ventes.

Car la méthode de régression est la plus proche de la réalité, si on considère une comparaison avec l'augmentation de ventes de voitures à hydrogène dans les dernières années, on a décidé d'évaluer avec un polynome carré.

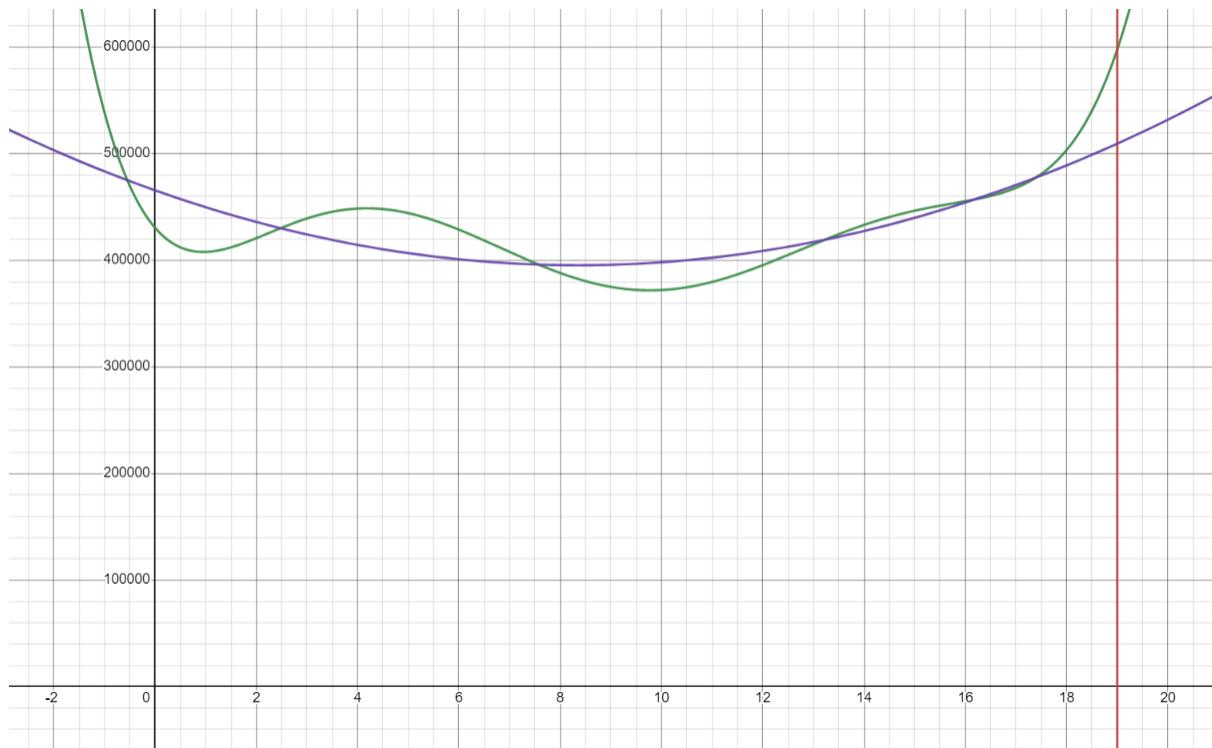


Figure 19 : graphique des modèles d'analyse de régression lineal

C'est important de considérer que les prévisions sont pas garantis, cependant avec un estimation dans le période 19 (2022) avec la méthode de régression linéaire on prévoit des ventes de 509 353 utilitaires dans l'année, avec un possible incrémentation visé pour l'augmentation des ventes de voitures à hydrogène.

Donc le modèle de vente suit la courbe suivante : $y = 1006.5x^2 - 16818x + 465731$

Coûts et prix du marché

Démocratisation de la pile à combustible :

Actuellement, il n'existe pas de véritables études qui sont en mesure de quantifier l'impact de la démocratisation des piles à combustibles sur le prix de ces dernières. Cependant sur les dix dernières années le prix a drastiquement chuté d'environ 70 à 80 %, ce qui nous permet d'espérer sans trop de craintes que cette courbe suive encore une tendance descendante sur les prochaines décennies.

Prix actuel :

Composant	Pile à combustible	Batterie	Moteur
Prix	40 000	8000	5000

Prix entretien :

Changement tous les 2 ans de la PC : 40 000 euros.

Changement tous les 3 ans de la batterie : 8000 euros.

Coût en consommation Hydrogène

Avec l'avancée actuelle des technologies, un véhicule hydrogène est capable de rouler 100 km avec 1 kilo d'hydrogène. La capacité d'un réservoir de véhicule utilitaire léger roulant au diesel est aux alentours de 90 L, avec une consommation moyenne de 8,5L au 100km pour une utilisation urbaine comme notre camion de livraison (données du Peugeot Boxer). Ce qui lui confère une autonomie théorique d'un peu plus de 1000 km. La même autonomie est théoriquement atteignable avec 10 kg d'hydrogène, ce qui est supérieur aux réservoirs actuellement utilisés dans ce type de véhicule. On utilise en effet des réservoirs de 5 à 7kg pour des questions d'encombrement afin de ne pas réduire l'espace utile. Cela permet tout de même une autonomie suffisante entre 500 et 700 km qui couvre les besoins journaliers d'un livreur moyennes distances.

En termes de prix, pour un plein de diesel aujourd'hui, un réservoir de 90L coûte 180€ et pour 10 kg d'hydrogène, on peut compter 120€. Le prix de l'hydrogène étant certainement amené à baisser dans les prochaines années, on peut estimer que cette ressource deviendra vraiment économiquement avantageuse.

Coût en taxe

Pour les véhicules des entreprises, il existe une taxe spécifique : la taxe sur les véhicules de société qui se compose de deux sous-parties. Une sous-partie concerne les émissions de

CO₂ et l'autre concerne les autres polluants atmosphériques. Les véhicules utilisant l'hydrogène ont pour avantage d'être entièrement exonérés de cette taxe contrairement aux véhicules thermiques classiques.

En outre, les véhicules nouvellement immatriculés doivent généralement payer une taxe d'immatriculation. Toutefois, depuis 2020, cette taxe ne concerne plus les véhicules utilisant l'hydrogène : ils sont exonérés de cette taxe et bénéficient donc d'un avantage par rapport aux véhicules thermiques.

Contribution de chacun en marketing

Membre de l'équipe	PESTEL	Ventes	Valeurs (couts)	Demande (clients)	Fabricants	Demande	Fournisseurs	Prix de vente (marché)	Revendeurs
Alice Dupont-Franklin		1		1			1	1	
Antony Davi	1	1	1		1				
François Tamba	1			1			1	1	
Ignacio Perez			1		1	1		1	1
Mateo Auza	1		1			1	1		1
Mathis Leroy		1	1				1	1	
Maxime Retureau		1		1	1	1			1
Timothée Chailley	1			1	1	1			1

Partie Technique

Contribution de chacun en partie technique

Lien vers le trello : <https://trello.com/b/o72EWcHA/projet>

Analyse mécanique

Équations de mouvement

Pour l'obtention des équations nous donnant la force que doit fournir le moteur plusieurs facteurs vont entrer en jeu :

- La force de propulsion du train arrière et du train avant du véhicule qui est fourni par le moteur
- La force de roulement du train arrière et avant
- La force de gravitation qui agit sur le véhicule
- La force de résistance aérodynamique qui s'applique lorsque le véhicule est en mouvement
- La force de résistance du sol

On va donc appliquer le premier principe de la dynamique au véhicule et on va venir le projeter sur l'axe de la route (appelé x) dans lequel circule le véhicule, on va également négliger la portée. Ce qui nous donne :

$$m_v \frac{dv}{dx} = F_{tav} + F_{tar} - (F_{rtav} + F_{rtar} + F_g + F_{aéro})$$

avec :

- m_v la masse du véhicule
- $\frac{dv}{dx}$ l'accélération du véhicule
- F_{tav} et F_{tar} étant respectivement la force de traction du train avant et de propulsion du train arrière
- F_{rtav} et F_{rtar} étant respectivement la force de roulement du train avant et du train arrière
- F_g la force de gravitation sur le véhicule égale à $m_v * g * \sin(\alpha)$ avec α l'angle avec l'horizontal (si on a une pente par exemple).
- $F_{aéro}$ la force aérodynamique de la voiture

On va également supposer que le véhicule est une traction ce qui rassemble les deux forces de tractions en une unique force. De même, on va faire l'hypothèse d'un véhicule uniformément chargé pour simplifier les calculs (sachant que dans la réalité les pneus arrière auront plus de poids et donc seront plus chargés).

On a donc $F_r = c * m_v * g$ où $c = 0.005 + \frac{1}{\text{Pression des pneus}} * (0.01 + 0.0095 * (\frac{v}{100})^2)$

Pour la force aérodynamique on a : $F_{aéro} = \frac{1}{2} * (C_d A * \rho * v^2)$ avec C_d : le coefficient de traînée de notre véhicule A, A l'aire frontale de notre véhicule, rho la densité de l'air et v la vitesse de notre véhicule.

On peut donc en déduire la puissance nécessaire pour notre véhicule qui est :

$$\text{Puissance nécessaire} = F_{tr} * v_{pneus} = (m_v * \frac{dv}{dx} + F_r + F_{aéro} + F_g) * v_{pneus}$$

Pour une accélération de 1.736 m/s-2 (0 à 100 en 16 secondes) et une vitesse de 50 km/h, une masse de 3 tonnes (chargé) sur une route plate on a :

- $m_v * \frac{dv}{dx} = 5208 \text{ N}$
- $F_r = 232.39N$

• $F_{aero} = 199.76N$

On remarque déjà ici que c'est la phase d'accélération qui demande le plus de puissance. Si on considère que l'on a un rendement de 80 %, on a alors :

Puissance nécessaire = 98 kW

I. Etude de chaque élément

1. Pile à combustible (PAC)

1.1 Fonctionnement théorique de la pile à combustible pour notre véhicule

Le fonctionnement de notre véhicule repose sur l'utilisation conjointe d'une pile à combustible et d'une batterie. Ces deux éléments sont très importants dans l'architecture du système dans la mesure où ce sont eux qui alimentent le moteur de notre voiture.

Étudions maintenant le fonctionnement théorique d'une pile à combustible.

Le but de la pile à combustible est de transformer de l'énergie chimique en énergie électrique utile pour soit alimenter le moteur électrique du véhicule soit recharger la batterie du véhicule.

Une pile à combustible est constituée de centaines de cellules semblables siège de réactions chimiques. Chaque cellule peut donc être vue comme une sous-unité de la pile à combustible. Une cellule se compose d'une anode, d'une cathode et d'un électrolyte (liquide séparant les deux électrodes).

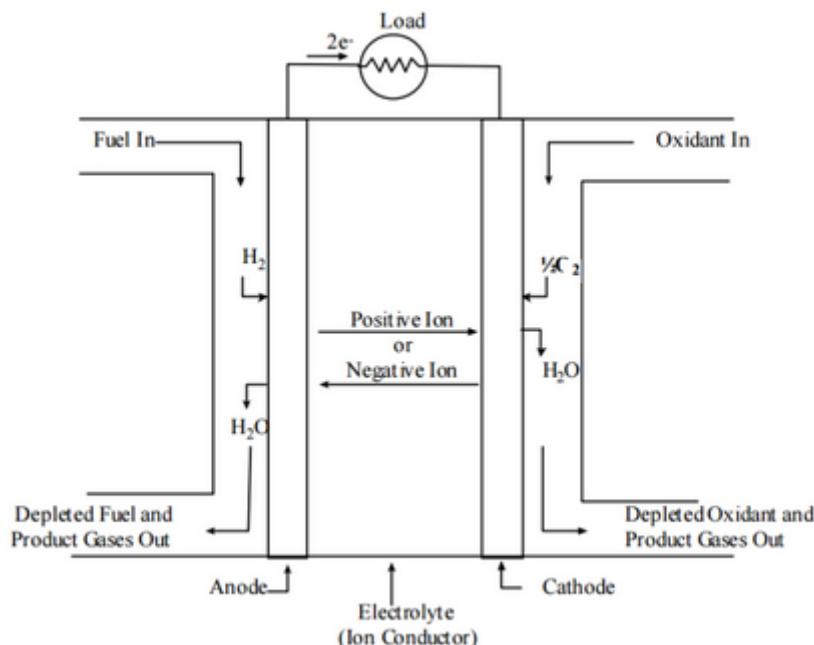


Figure 20 : Cellule d'une pile à combustible.

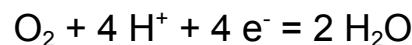
Le combustible (généralement hydrogène) est introduit dans le compartiment anodique de la pile à combustible, tandis que l'air ou l'oxygène est introduit dans le côté cathodique de la pile.

Les réactifs sont donc l'hydrogène et l'oxygène. Les produits de la réaction sont donc des molécules d'eau et de l'énergie thermique.

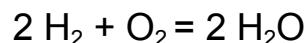
Réaction d'oxydation à l'anode :



Réaction de réduction à la cathode :



Réaction globale de fonctionnement de la PAC :



Il convient de souligner que, contrairement aux moteurs à combustion interne, dans lesquels le combustible est mélangé à l'air et brûlé, dans une pile à combustible, il y a séparation du combustible et de l'oxydant, sans combustion du combustible.

Par ailleurs, dans des cas autres que celui de notre véhicule, des piles à combustible peuvent exister avec un autre combustible que l'hydrogène.

En outre, il convient de distinguer deux modes de fonctionnement pour la pile à combustible. Selon les conditions de circulation et les paramètres de vitesse, accélération etc, il serait plus judicieux d'utiliser la pile à combustible ou la batterie. La pile à combustible est intéressante pour alimenter le moteur électrique uniquement lorsque celle-ci parvient à délivrer une tension constante en sortie. Lorsque ce n'est pas le cas, elle sert à recharger la batterie. La batterie servant, elle, à alimenter le moteur électrique. Ainsi, la pile à combustible est systématiquement en cours d'utilisation lorsque le véhicule est en marche. Soit elle alimente le moteur directement, soit elle recharge la batterie.

Les avantages d'une telle pile à combustible sont les rejets qu'elle produit. En effet, de l'eau et de la chaleur sont de faibles polluants. Toutefois, ceci reste à relativiser car son utilisation requiert l'utilisation conjointe d'une batterie qui peut être polluante et non valorisée en fin de vie. Par ailleurs, il convient de regarder la provenance de l'hydrogène. Selon les méthodes de production de cet hydrogène, son utilisation est plus ou moins viable environnementalement.

Les conditions d'utilisation d'une pile à combustible dans le secteur des véhicules sont assez variables. Notamment, les températures de fonctionnement des PAC varient entre 50 et 200°C.

La puissance délivrée en sortie varie entre 0.1 et 500 kW. La tension de sortie pour une cellule est d'environ 0.7 V à 0.8 V. Donc pour 400 cellules, on obtient une tension de sortie autour de 320 V.

Le rendement d'une pile à combustible est environ de 50 à 70% (rendement entre l'énergie chimique apportée par l'hydrogène et l'énergie électrique de sortie) mais si l'on prend en compte la production de l'hydrogène, ce rendement diminue. Il faut utiliser de l'énergie électrique pour réaliser l'hydrolyse et produire de l'hydrogène. Le rendement total est donc de 30 à 50%.

1.2 Modélisation de la pile à combustible sous Matlab/Simulink

a) Schéma de fonctionnement Matlab

Ci-dessous le schéma de fonctionnement de la pile à combustible sous Matlab/Simulink.

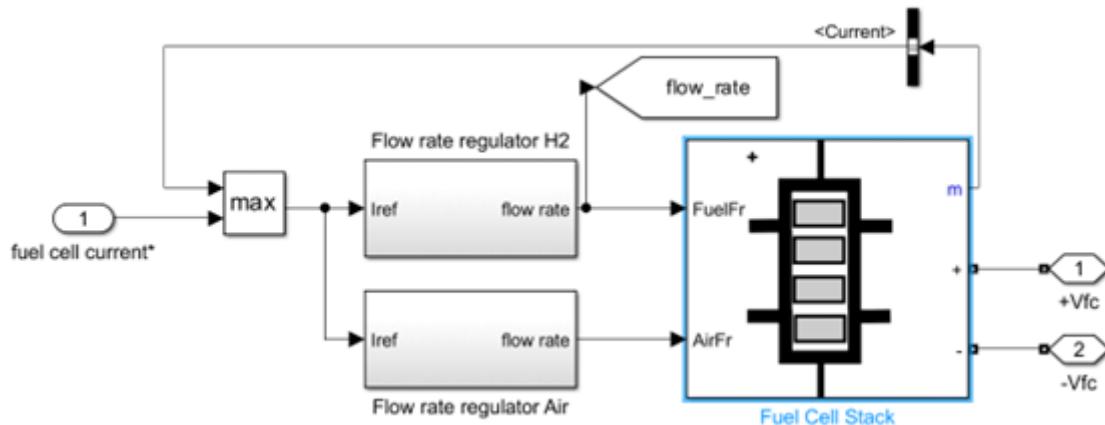


Figure 21 : Pile à combustible sous Simulink.

b) Simulations Matlab :

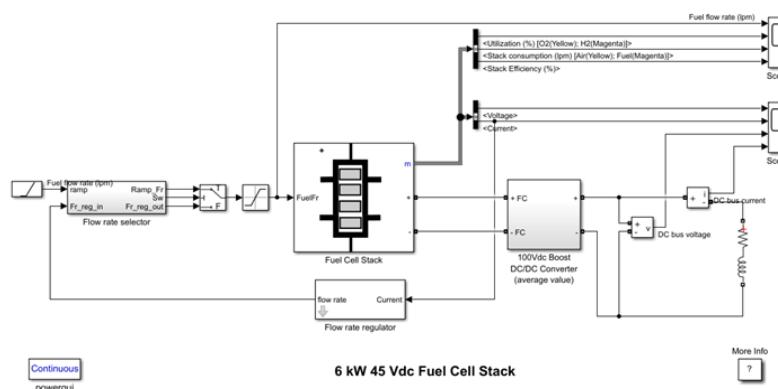


Figure 22 : Schéma de la PAC pour exploiter les résultats en sortie de la PAC.

En entrée, on choisit une rampe dont la pente pourra varier selon les simulations.



Figure 23 : Evolution de la tension et du courant en sortie de la PA : observation d'un régime dynamique puis d'un régime statique.

Le graphique ci-dessus représente la simulation d'un courant de sortie et la tension de sortie pour une PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) à 50 kW et 625 Vdc. Le régime dynamique correspond à la mise en route de la PAC et le statique correspond au fonctionnement après un temps de mise en route, c'est le fonctionnement régulier.

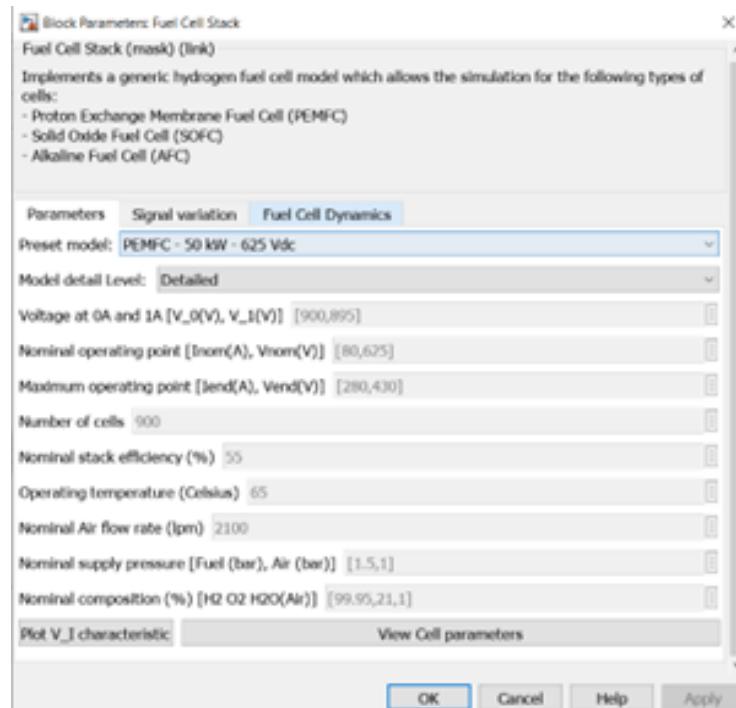


Figure 24 : Paramètres choisis pour la simulation du fonctionnement de la PAC. On prend le cas de 900 cellules.

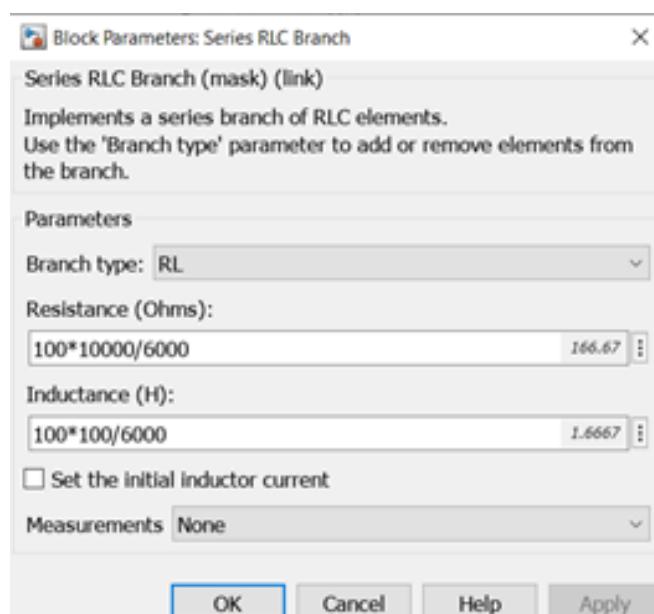


Figure 25 : Valeurs de la charge en sortie.

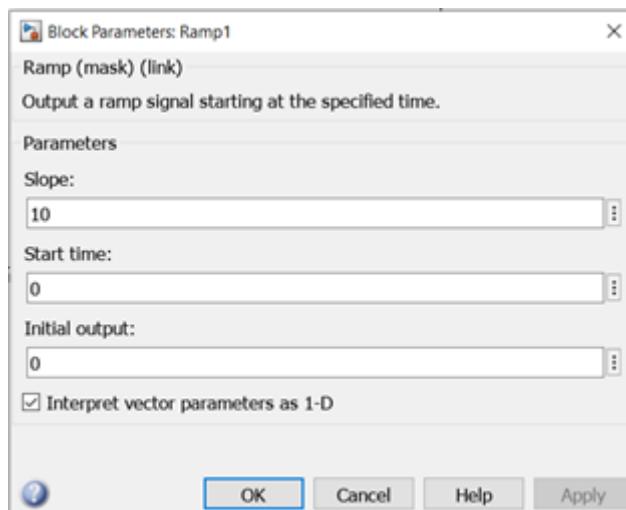


Figure 26 : Valeurs de la pente de la rampe en entrée.

Regardons maintenant les résultats obtenus pour les paramètres des figures ci-dessus :

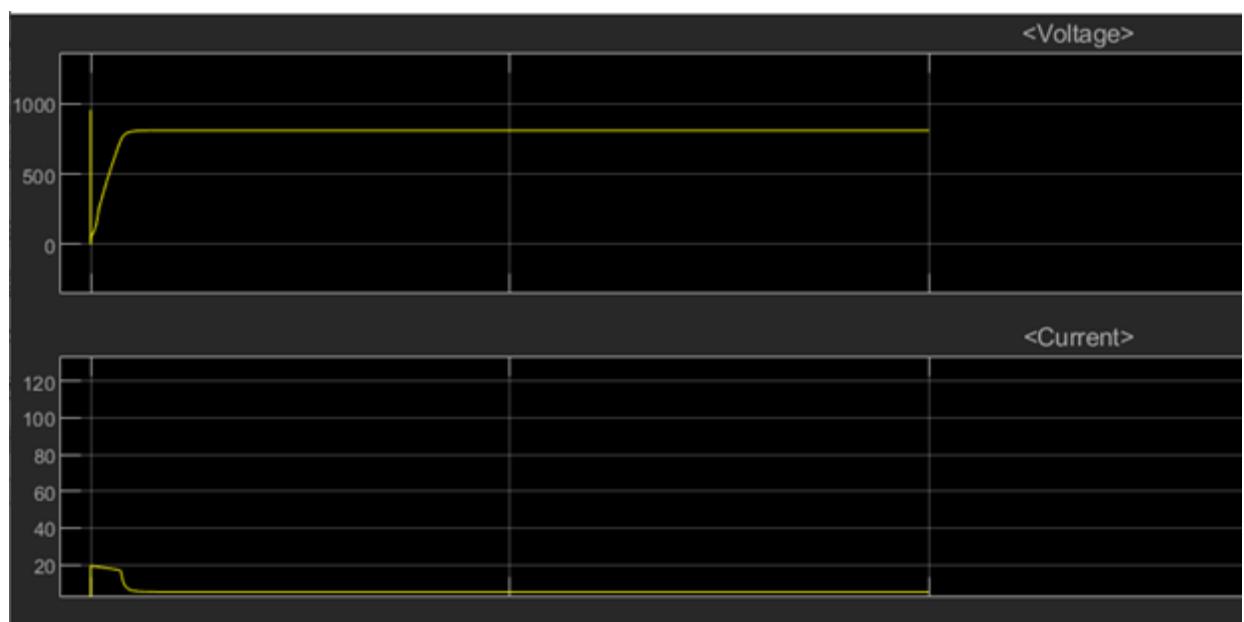


Figure 27 : Tension et courant de sortie.



Figure 28 : Fuel flow rate et stack efficiency.

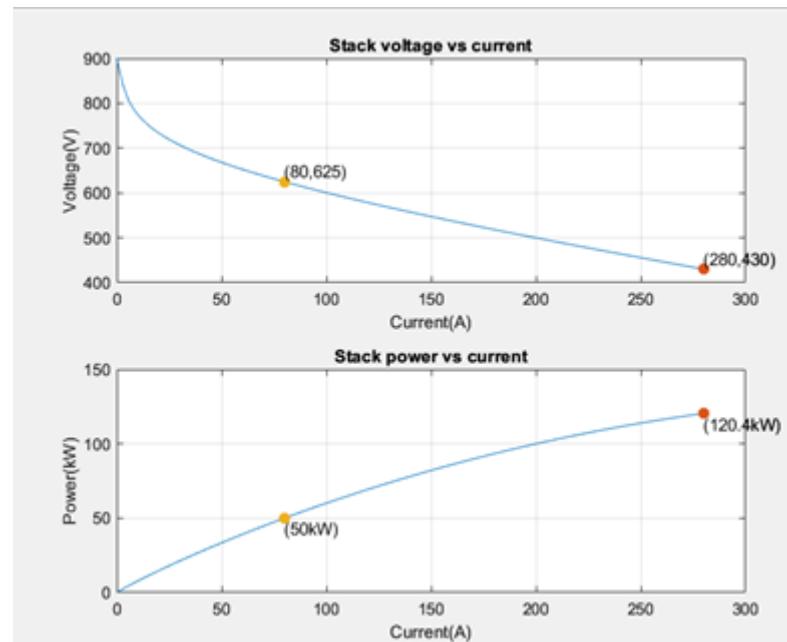


Figure 29 : Caractéristiques en fonction du courant.

De ces simulations et par analyses graphiques, nous pouvons observer que :

- La tension de sortie est constante et égale à 800V.
- le courant de sortie est constant et a une valeur proche de la constante nulle.
- l'efficacité du système est constante aux environs de 70%.
- le flow rate est constant.

Par ailleurs, nous avons obtenu les caractéristiques tension/intensité et stackpower/intensité pour les valeurs de paramètres choisis.

- c) Influence de la charge sur la sortie intensité et tension selon les valeurs de la charge (résistance)

- $R = 0.01667 \Omega$:

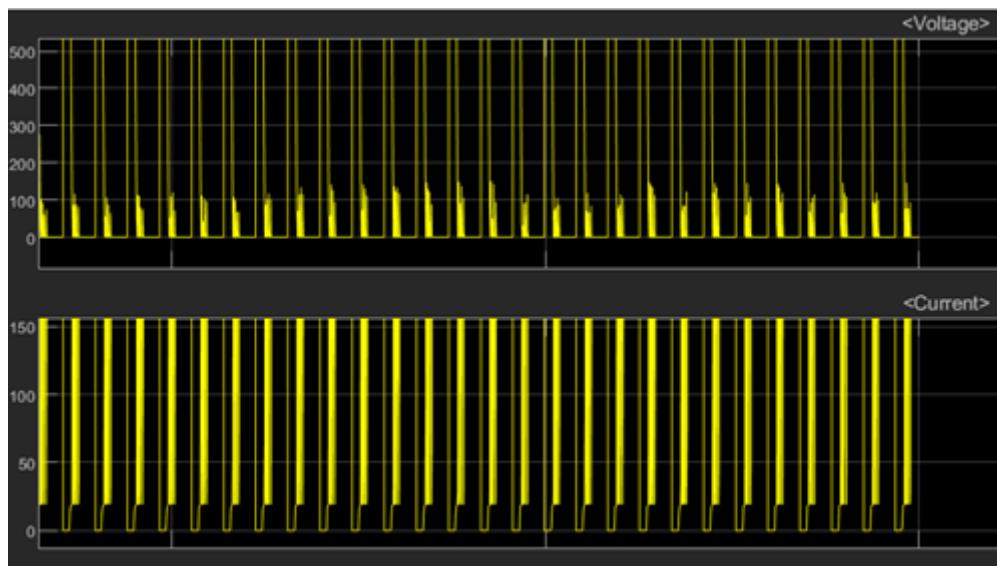


Figure 30 : Tension et intensité pour $R = 0.01667 \Omega$.

- $R = 1.667 \Omega$:

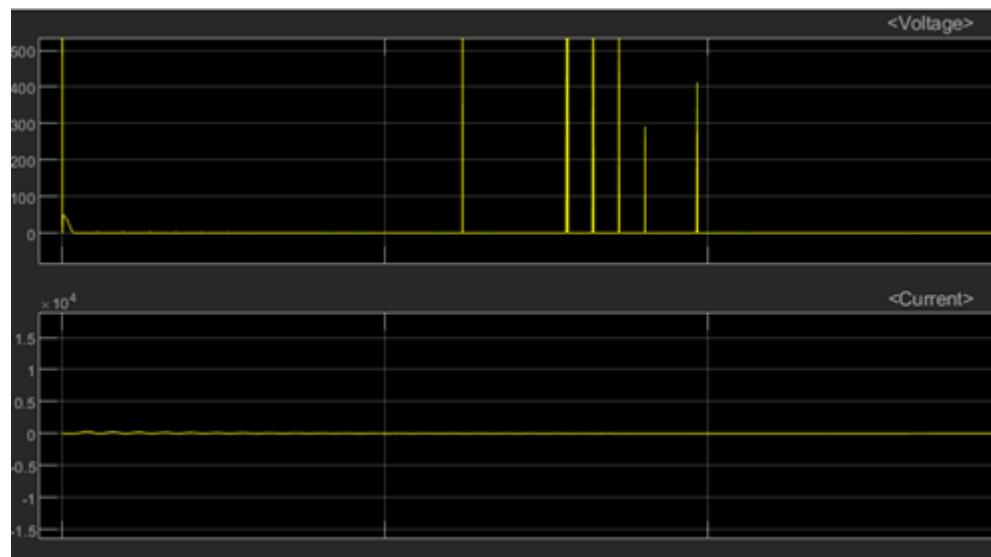


Figure 31 : Tension et intensité pour $R = 1.667 \Omega$.

• $R = 166.667 \Omega$:

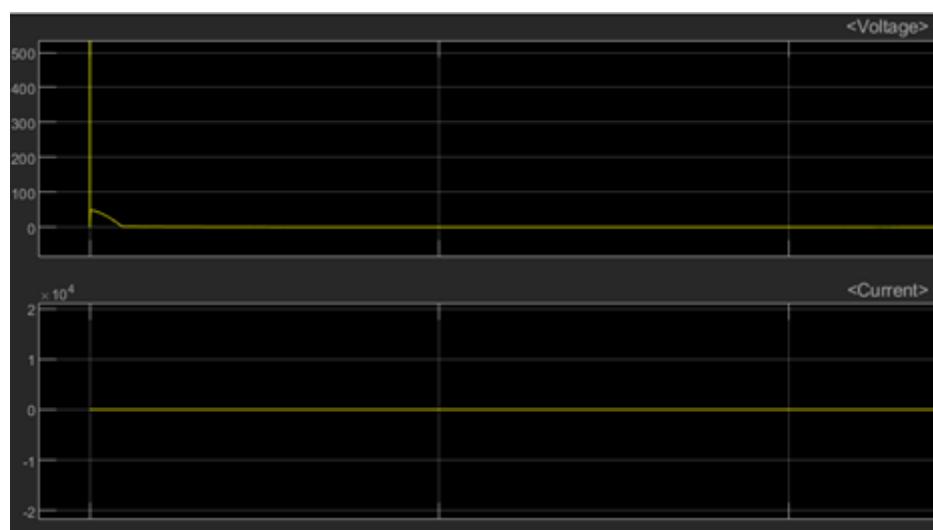


Figure 32 : Tension et intensité pour $R = 166.667 \Omega$.

• $R = 16\,666,667 \Omega$:

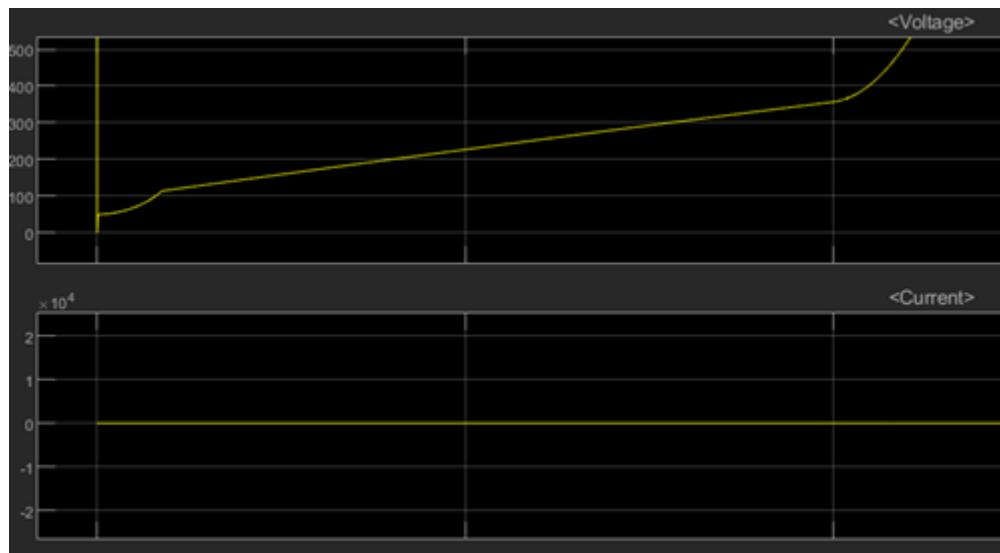


Figure 33 : Tension et intensité pour $R = 16\,666.667 \Omega$.

Après avoir testé pour différentes valeurs de résistance (valeur de la charge), on constate qu'il y a une influence significative sur les paramètres de sortie.

En effet, pour la tension, on passe d'un système sinusoïdal, ou du moins périodique, à un signal avec quelques pics à un signal constant nul à un signal qui diverge au fur et à mesure de l'augmentation de la valeur de la résistance.

Pour le courant, on passe rapidement d'un signal périodique à un signal très atténué, on constate quelques oscillations de faible intensité sur les premières secondes de la simulation puis le signal est constant avec la valeur nulle lorsque la résistance augmente.

d) Influence de la pente sur l'efficacité de la PAC

- Slope = 1 :

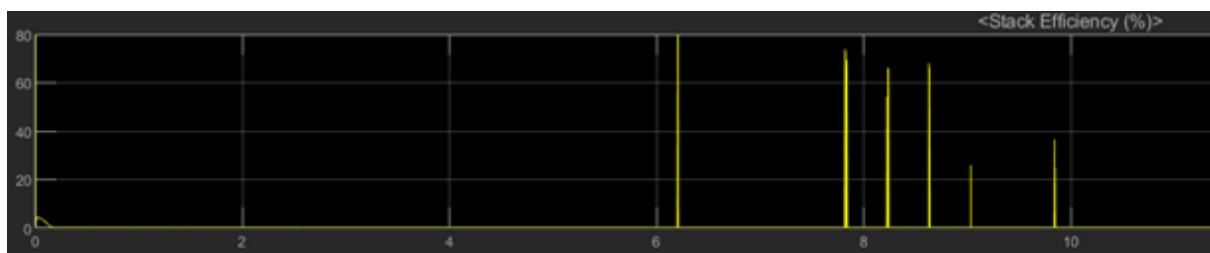


Figure 34 : Efficacité pour pente de 1.

- Slope = 5 :



Figure 35 : Efficacité pour pente de 5.

Slope = 10 :

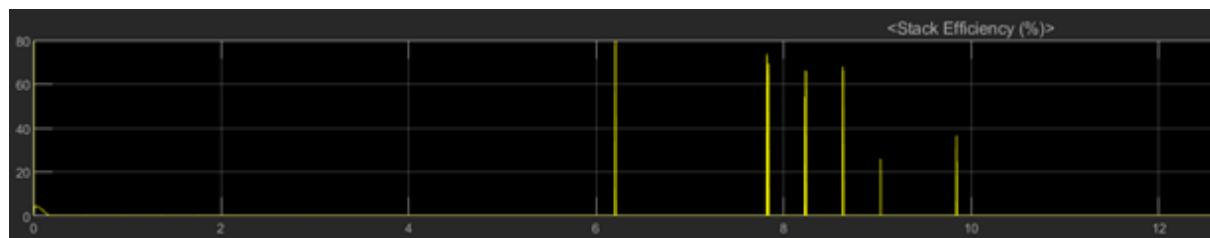


Figure 36 : Efficacité pour pente de 10.

Slope = 100 :

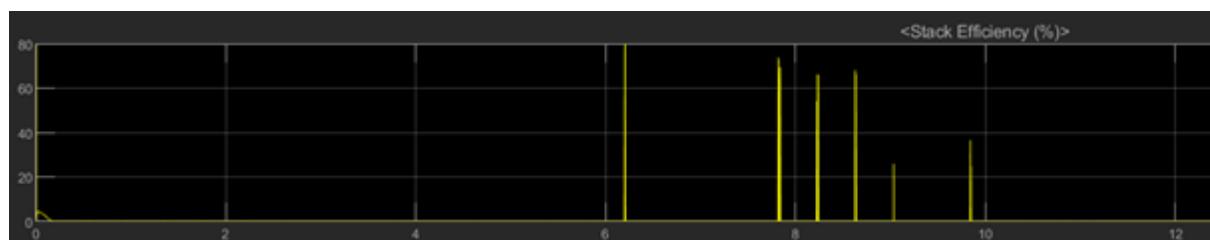


Figure 37 : Efficacité pour pente de 100.

Après plusieurs simulations en faisant varier la valeur de la pente de la rampe en entrée, il semblerait que ce paramètre n'ait pas ou très peu d'influence sur l'efficacité de la PAC. En effet, les courbes obtenues présentent toutes des pics similaires.

1.3 Bond Graph de la pile à combustible

Le schéma Bond Graph de la pile à combustible ci-dessous issu d'une thèse. On note une alimentation en hydrogène à l'anode. Dans le cas d'une simulation de la voiture globale, nous pourrions reproduire ce schéma Bond Graph sous 20-Sim.

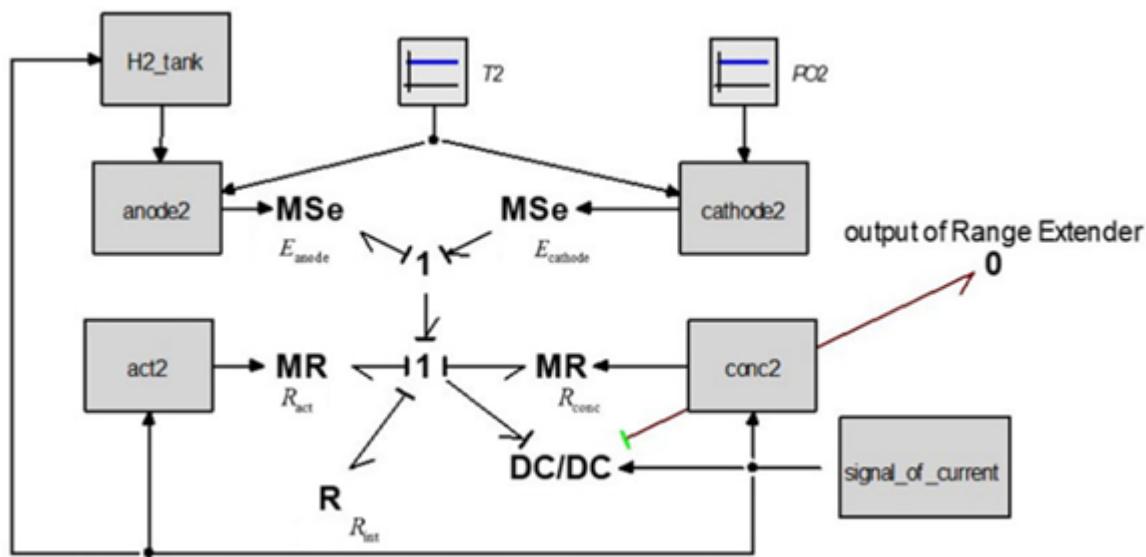


Figure 38 : Schéma Bond Graph d'une pile à combustible

2. Batterie

2.1 Fonctionnement théorique de la batterie pour notre véhicule

Les paramètres du circuit peuvent être modifiés pour représenter un type de batterie spécifique et ses caractéristiques de décharge. Une courbe de décharge typique se compose de trois sections.

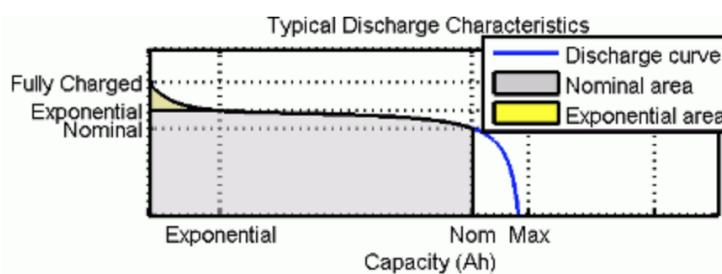


Figure 39 : Courbe de décharge typique

La première section représente la chute de tension exponentielle lorsque la batterie est chargée. La largeur de la chute dépend du type de batterie. La deuxième section représente la charge qui peut être extraite de la batterie jusqu'à ce que la tension tombe en dessous de la tension nominale de la batterie. Enfin, la troisième section représente la décharge totale de la batterie, lorsque la tension chute rapidement.

Lorsque le courant de la batterie est négatif, la batterie se recharge en suivant une caractéristique de charge.

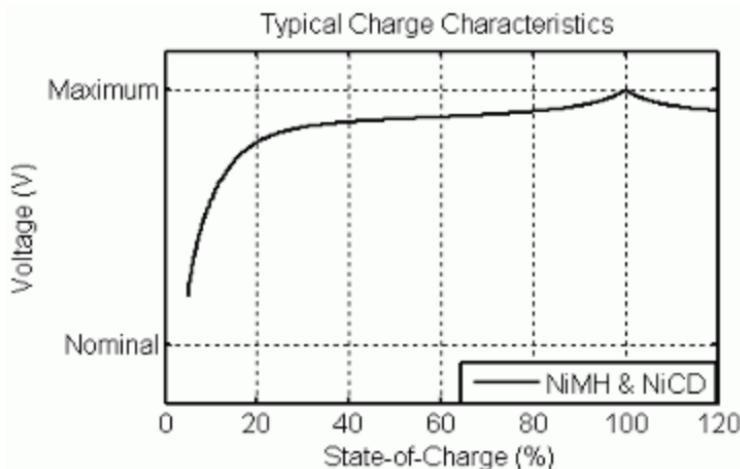


Figure 40 : Courbe Tension/SOC - NiMH

L'état de charge (SOC) d'une batterie est une mesure de la charge de la batterie, exprimée en pourcentage de la charge complète. La profondeur de décharge (DOD) est le complément numérique du SOC, tel que $DOD = 100\% - SOC$.

Par exemple, si le SOC est de :

- 100% - La batterie est entièrement chargée et le DOD est de 0%.
- 75% - La batterie est chargée aux 3/4 et le DOD est de 25%.
- 50% - La batterie est à moitié chargée et le DOD est de 50%.
- 0% - La batterie n'est pas chargée et le DOD est de 100%.

Pour les types de batteries nickel-cadmium et nickel-métal-hydrure, le modèle utilise ces équations.

- Discharge Model ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1}\left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0\right)$$

- Charge Model ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{|it| + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1}\left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s}\right).$$

Avec comme paramètres :

- EBatt est la tension non linéaire, en V
- E0 est la tension constante, en V
- Exp(s) est la dynamique de la zone exponentielle, en V
- K est la constante de polarisation en V/Ah ou la résistance de polarisation en Ohms
- i^* est la dynamique du courant à basse fréquence, en A
- i est le courant de la batterie, en A
- Q est la capacité maximale de la batterie, en Ah
- A est la tension exponentielle, en V
- B est la capacité exponentielle, en Ah-1
- Sel(s) représente le mode de la batterie
 - $Sel(s) = 0$ pendant la décharge de la batterie
 - $Sel(s) = 1$ pendant la charge de la batterie

2.2 Schéma de fonctionnement sous Matlab/Simulink

Le bloc Batterie met en œuvre un modèle dynamique générique qui représente les types les plus courants de batteries rechargeables.

Cette figure montre le circuit équivalent que le bloc modélise.

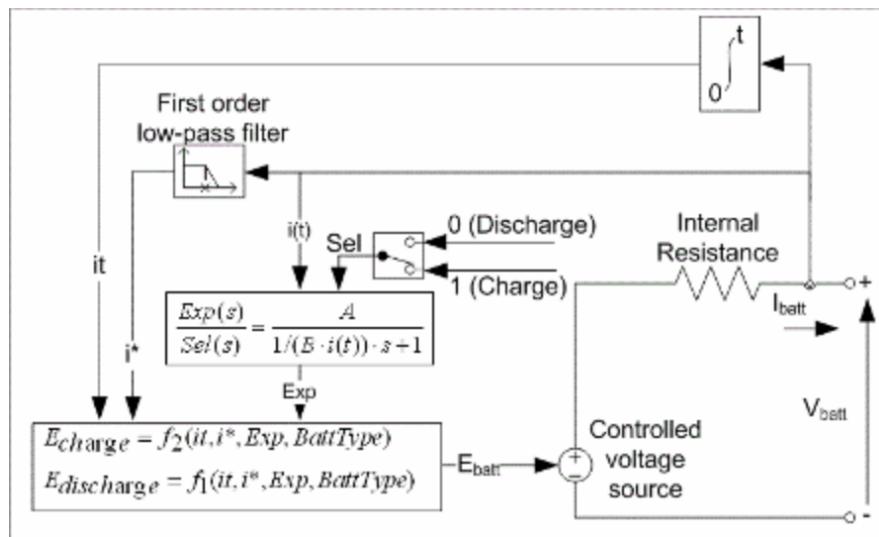


Figure 41 : Batterie - modèle équivalent - sous Simulink.

2.3 Simulation sous Matlab/Simulink

Ni-MH Battery Model

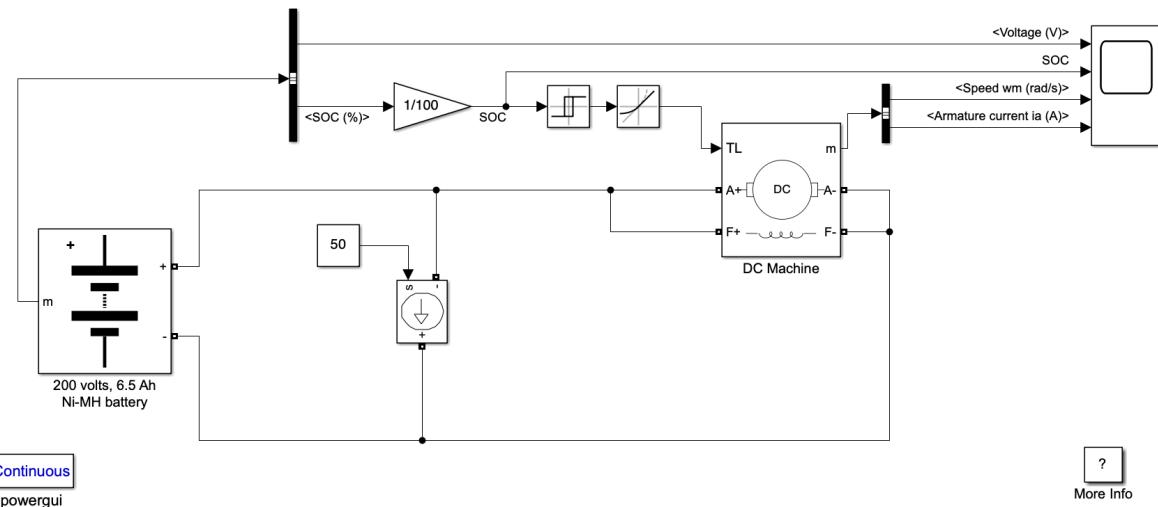


Figure 42 : Schéma de la batterie pour exploiter les résultats en sortie.

À $t = 0$ s, la machine à courant continu est démarrée avec la puissance de la batterie. La vitesse augmente à 120 rad/s. La batterie est également déchargée par la charge CC constante de 50 ampères. À $t = 280$ s, le SOC tombe en dessous de 40%. Un couple mécanique de -200 Nm est appliqué à la machine pour qu'elle agisse comme un générateur et fournit un courant de 100 A. Par conséquent, 50 A vont à la charge et 50 A servent à recharger la batterie. À $t = 500$ s, le SOC dépasse 80 %. Le couple mécanique est supprimé et la machine fonctionne librement. Et le cycle redémarre.

La batterie est connectée à une charge constante de 50 A. La machine à courant continu est connectée en parallèle avec la charge et fonctionne avec un couple à vide. Lorsque l'état de charge de la batterie est inférieur à 0,4 (40 %), un couple de charge négatif de 200 Nm est appliqué à la machine qui agit alors comme un générateur pour recharger la batterie. Lorsque le SOC dépasse 80 %, le couple de charge est supprimé et seule la batterie alimente la charge de 50 A.

Les signaux de tension de la batterie, de SOC, de vitesse du moteur et de courant du moteur sont disponibles à la sortie du bloc.

On a ci-dessous les paramètres de la batterie et de la machine DC.

Implements a generic battery model for most popular battery types. Temperature and aging (due to cycling) effects can be specified for Lithium-Ion battery type.

	Parameters	Discharge
Type:	Nickel-Metal-Hydride	...
Nominal voltage (V)	200	...
Rated capacity (Ah)	6.5	...
Initial state-of-charge (%)	100	...
Battery response time (s)	30	...

Figure 43 : Paramètres batterie

Implements a (wound-field or permanent magnet) DC machine. For the wound-field DC machine, access is provided to the field connections so that the machine can be used as a separately excited, shunt-connected or a series-connected DC machine.

	Configuration	Parameters	Advanced
Armature resistance and inductance [Ra (ohms) La (H)]	[0.4832 0.0067]
Field resistance and inductance [Rf (ohms) Lf (H)]	[84.91 13.39] [84.91,...]
Field-armature mutual inductance Laf (H)	0.7096
Total inertia J (kg.m ²)	0.2053
Viscous friction coefficient Bm (N.m.s)	0.007032
Coulomb friction torque Tf (N.m)	0
Initial speed (rad/s)	0

Figure 44 : Paramètres Machine DC

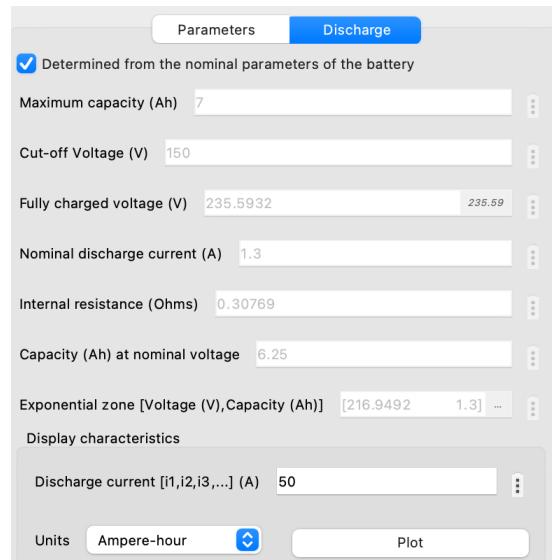


Figure 45 : Paramètres décharge batterie

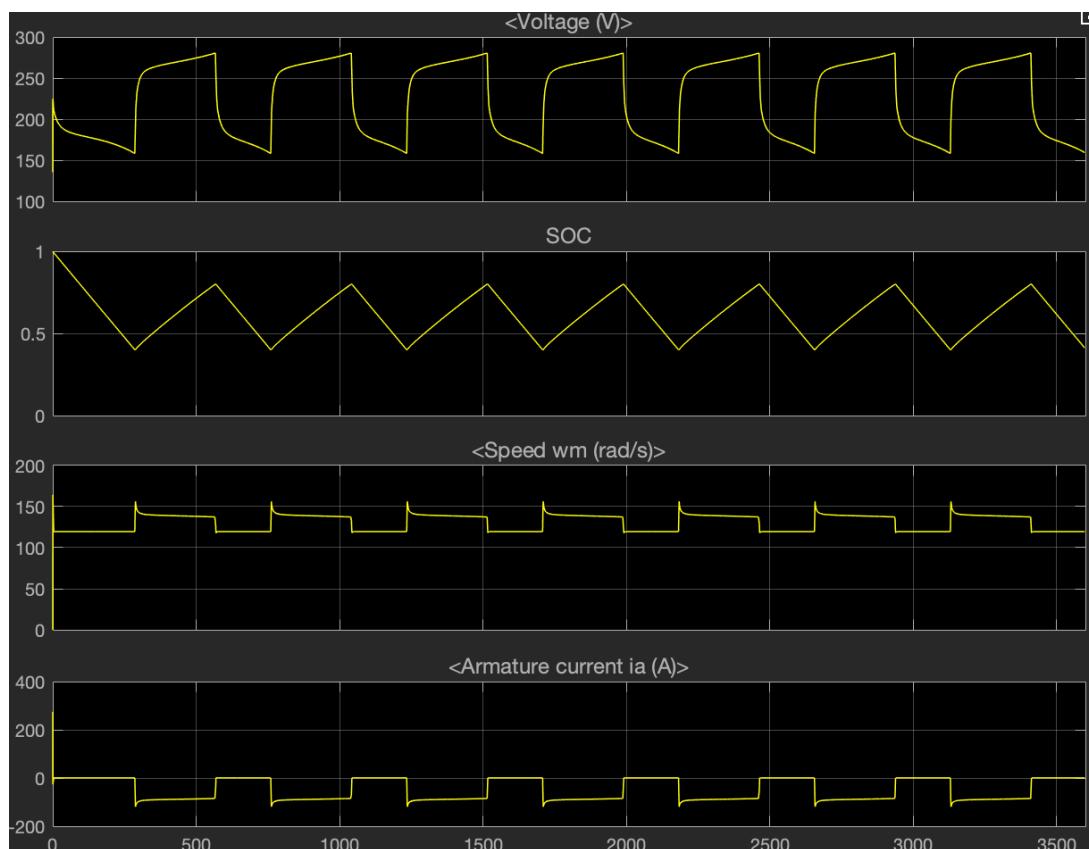


Figure 46 : Courbes Tension, SOC, Vitesse de rotation, Courant

2.4 Analyse des paramètres

2.4.1 Variation de la tension nominale

On va faire varier la tension nominale pour voir son influence sur les paramètres de sortie.

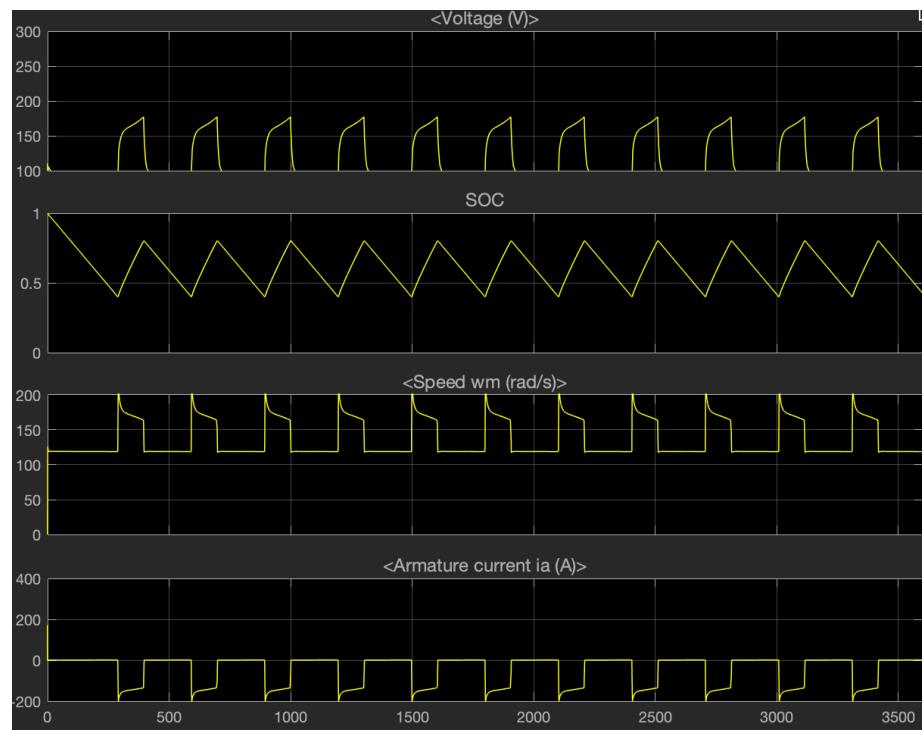


Figure 47 : Courbes Tension, SOC, Vitesse de rotation, Courant
Tension nominale de 100V

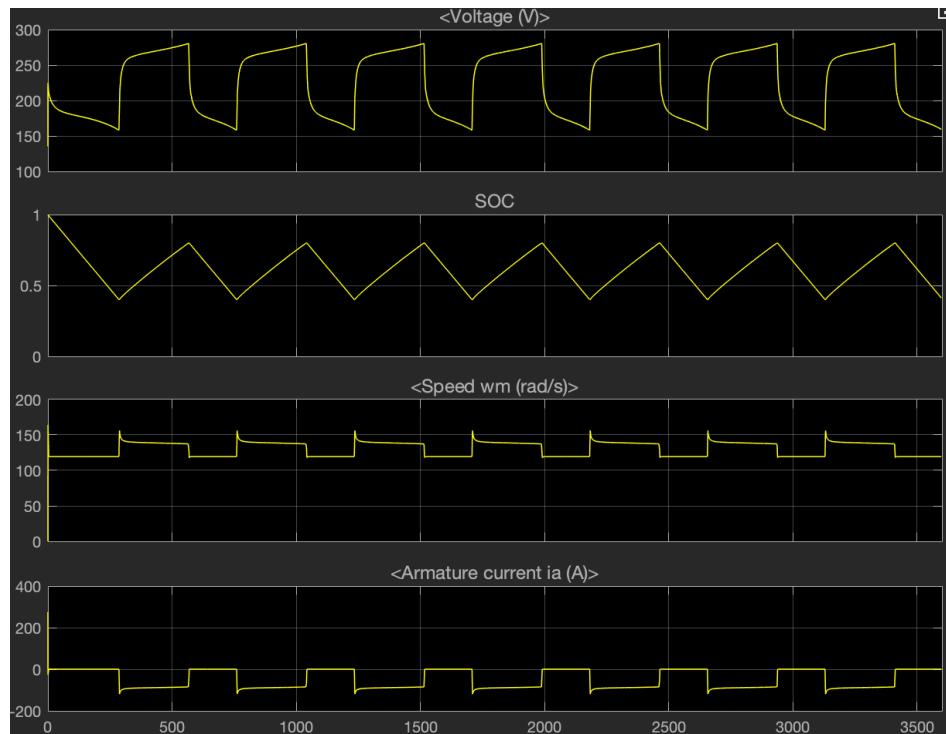
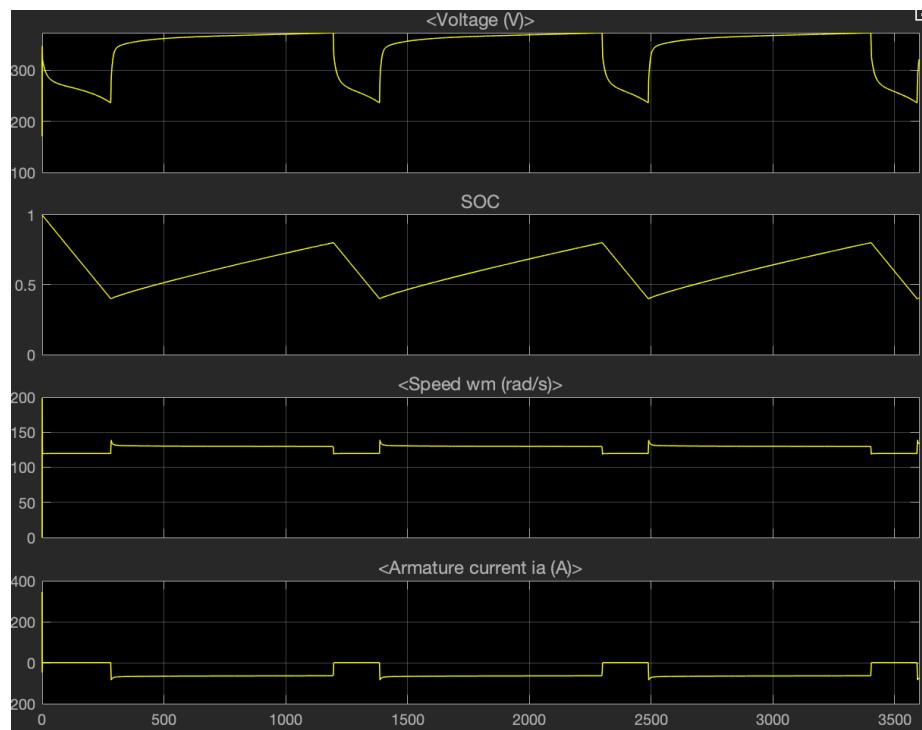


Figure 48 : Courbes Tension, SOC, Vitesse de rotation, Courant
Tension nominale de 200V



*Figure 49 : Courbes Tension, SOC, Vitesse de rotation, Courant
Tension nominale de 300V*

Les cycles sont d'une plus longue durée comme la tension nominale est plus grande. Les valeurs des paramètres sont pour le coup similaires.

2.4.1 Variation de la SOC

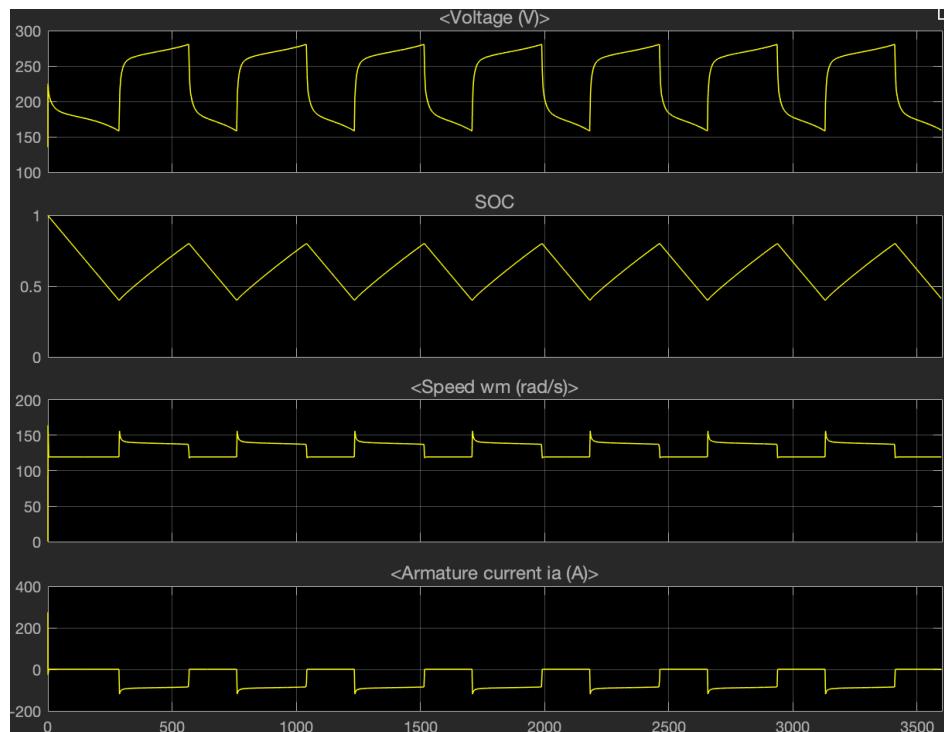


Figure 50 : Courbes Tension, SOC, Vitesse de rotation, Courant
SOC de 100%

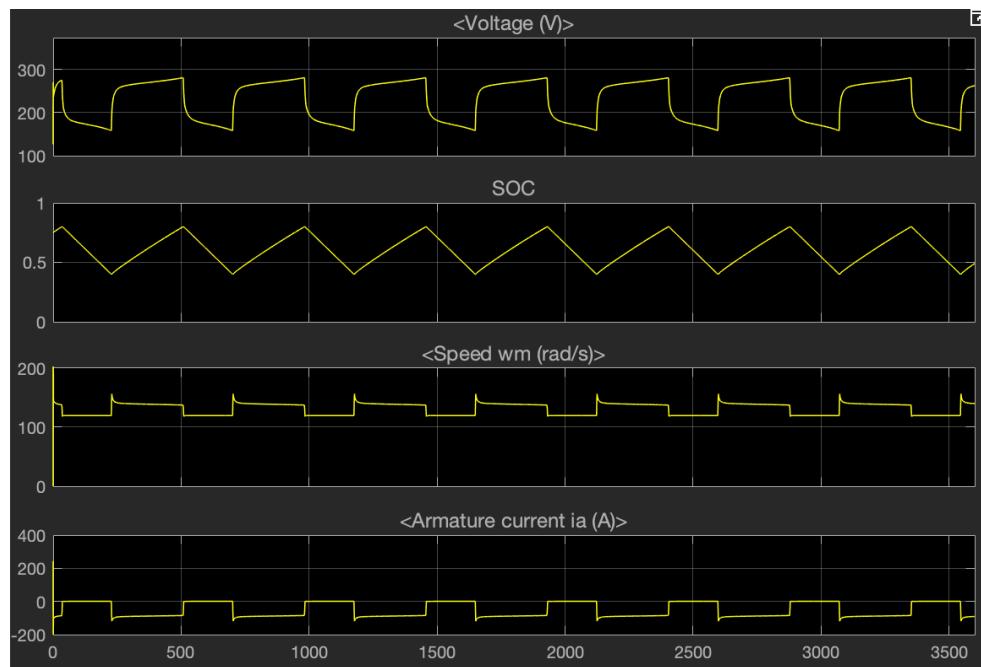


Figure 51 : Courbes Tension, SOC, Vitesse de rotation, Courant
SOC de 75%

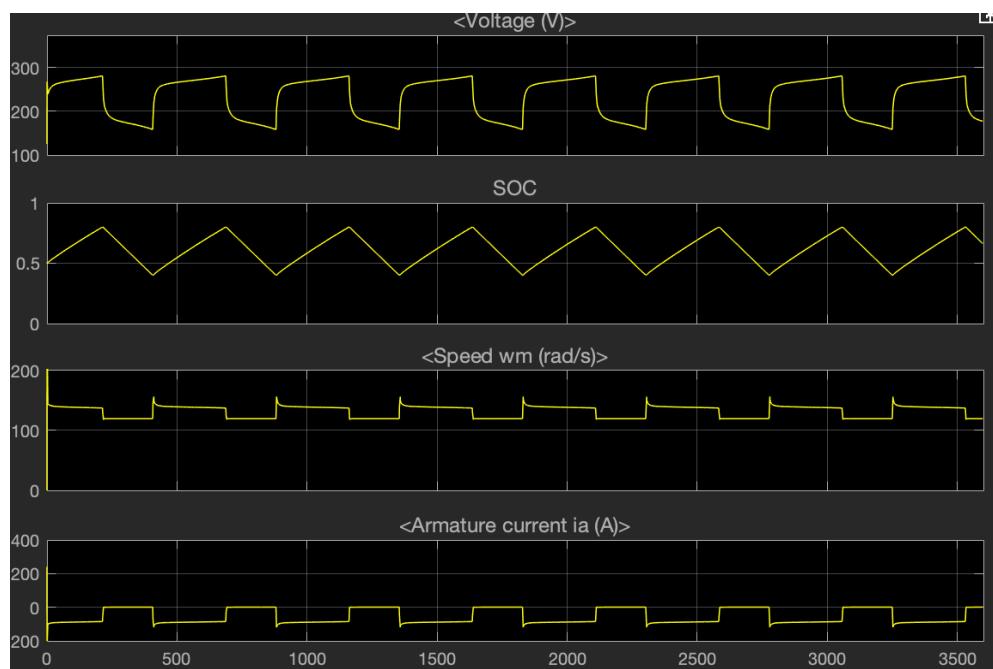


Figure 52 : Courbes Tension, SOC, Vitesse de rotation, Courant
SOC de 50%

Quand la SOC n'est pas chargée complètement, on constate que la tension maximale lors des cycles est plus faible.

3. Moteur

Le véhicule utilise un moteur triphasé de 136 Hp (100 kW) avec un couple maximal de 300 Nm à 3674 rpm et un voltage d'opération de 400V.

Ce moteur permet à la voiture de générer 0 émissions de carbone au moment de fonctionnement.

Le moteur triphasé est utilisé en différentes voitures et en industrie pour la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. Et son principe de fonctionnement est le même que celui d'un autre moteur électrique.

Le moteur permet une vitesse maximale de 130 km/h pour une voiture de 3.5 tonnes

Il existe plusieurs façons d'optimiser un moteur triphasé de courant alternatif :

- Contrôle de la tension et de la fréquence: en ajustant la tension et la fréquence d'alimentation, il est possible d'optimiser la performance du moteur en termes de couple et de puissance.
- Contrôle de la température: en surveillant la température du moteur, nous pouvons éviter la surchauffe et améliorer la durabilité du moteur.
- Équilibrage du rotor: en équilibrant le rotor, on peut réduire les vibrations et les bruits du moteur, ce qui améliore également la durabilité.
- Maintenance préventive: en effectuant une maintenance régulière, vous pouvez prolonger la durée de vie du moteur en détectant et en corrigeant les problèmes potentiels à un stade précoce.
- Choix approprié des matériaux: en choisissant les bons matériaux pour les composants du moteur, vous pouvez améliorer la résistance à la corrosion et à la dégradation, ce qui améliore également la durabilité.

3.1 Contrôle de la tension et de la fréquence

Pour contrôler la tension et la fréquence du moteur, on utilise plusieurs facteurs. D'abord, on utilise des variateurs de fréquence. Les variateurs de fréquence (VFD) sont des dispositifs électroniques qui peuvent ajuster la fréquence d'alimentation du moteur en temps réel. Cela permet de contrôler la vitesse et la puissance du moteur. Donc, réduire les pertes dans certaines situations et mieux distribuer la puissance. Celui-ci est utile surtout avec les changements des pentes en route.

Ensuite, on utilise les transformateurs. Les transformateurs peuvent être utilisés pour ajuster la tension d'alimentation du moteur. Les transformateurs nous permettent de lier les différents dispositifs dans la chaîne électrique ; soit le chemin de la pile à hydrogène jusqu'à la recharge pour freinage. Cependant, cette méthode n'affectera pas la fréquence d'alimentation. Cependant, pour cela on utilise les régulateurs de tension.

Les régulateurs de tension peuvent être utilisés pour maintenir la tension d'alimentation constante, indépendamment des variations de la tension d'alimentation générale.

3.2 Contrôle de la température et équilibrage du rotor

Pour le contrôle de la température, c'est important de garder une température réduite pour éviter les pertes en conduction électrique, cependant permettre le bon fonctionnement mécanique du moteur.

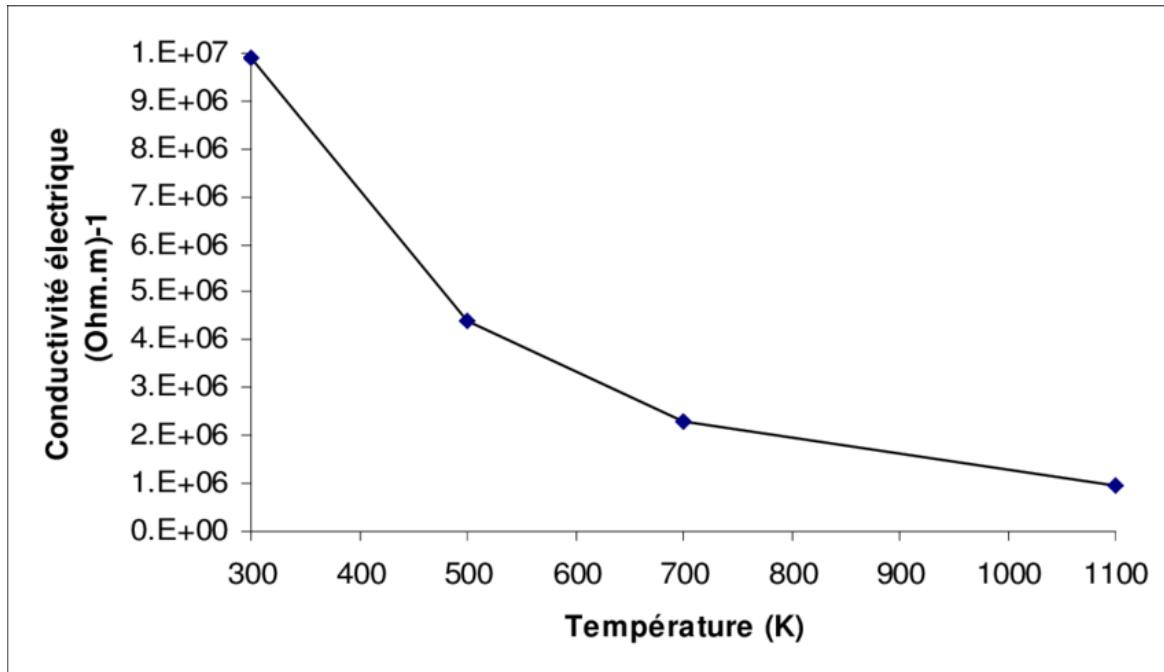


Figure 53 : courbe conductivité thermique température d'un moteur AC a fort couplage

Comme on peut remarquer sur la figure, la conduction électrique du système d'alimentation du moteur est réduite en fonction de l'augmentation de la température. Cette courbe était tracée par expériences en utilisant un moteur AC à faible et à fort couplage. Donc on observe que pour réduire les pertes est important d'éviter l'augmentation de température.

On a simulé le fonctionnement du moteur pour observer les endroits où la température augmentait le plus. Voici les résultats :

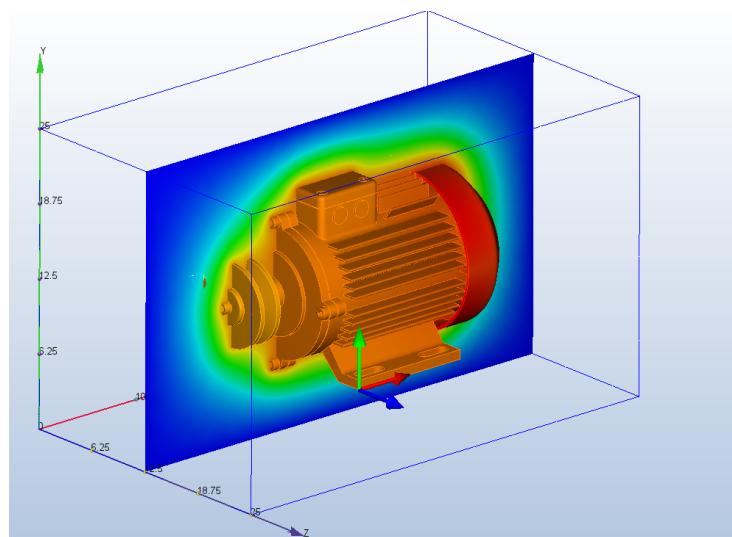


Figure 54 : AUGmentation de température d'un moteur AC en fonctionnement

On peut remarquer que la zone de chauffage est la partie où on a l'induction et le courant, donc ça serait intéressant de la positionner sur la prise d'air pour réduire la température au moment de fonctionnement.

3.3 Choix des matériaux

Pour le choix de matériaux, il est possible d'analyser différents paramètres. Dans le cadre de ce projet, on est resté avec un moteur fabriqué par un fournisseur. Cependant, avec le logiciel Granta et les propriétés suivantes, est possible de créer une graphique des matériaux pour les différentes parties et d'améliorer les propriétés en considérant d'autres facteurs comme le prix et le cahier de charges de la voiture.

- **Conductivité électrique** : Les matériaux conducteurs tels que l'aluminium et le cuivre sont couramment utilisés pour les enroulements du stator et du rotor du moteur.
- **Résistance à la chaleur** : Les matériaux qui peuvent résister à des températures élevées, tels que les alliages d'aluminium, sont généralement utilisés pour les composants du moteur qui génèrent de la chaleur.
- **Résistance à la corrosion** : Les matériaux qui résistent à la corrosion, tels que les alliages en acier inoxydable, peuvent être utilisés pour les parties exposées à des environnements corrosifs.
- **Légereté** : Les matériaux légers tels que l'aluminium et le magnésium peuvent être utilisés pour réduire le poids total du moteur, ce qui améliore l'efficacité énergétique de la voiture.
- **Durabilité** : Les matériaux durables tels que les alliages d'acier à haute résistance peuvent être utilisés pour les parties du moteur soumises à des charges mécaniques importantes, telles que les poulies et les engrenages.

3.4 Optimisation Matlab

Finalement, on a utilisé le code de Matlab fourni par Mr. Gillon pour simuler les trois configurations analysées sur le TP en cours, avec l'objectif de sélectionner celui qui était plus proche à nos besoins.

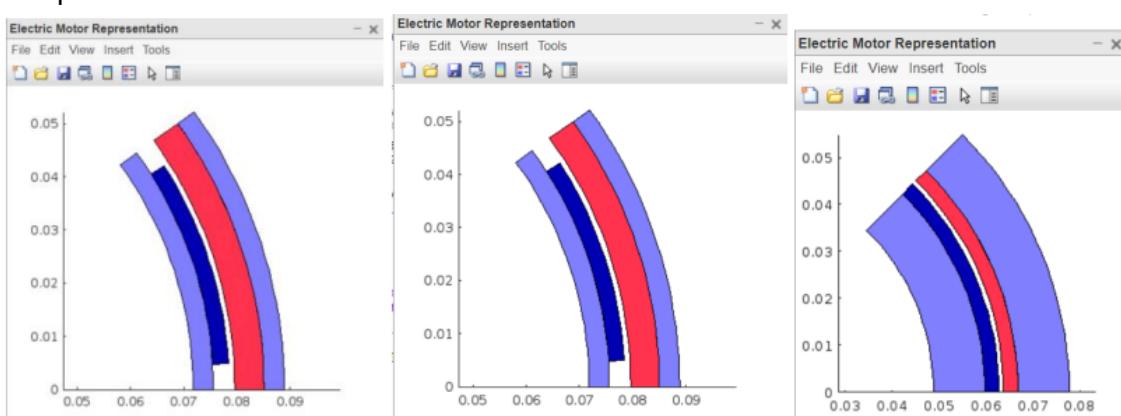


Figure 55 : différents possibles configurations d'un moteur optimal

Pour notre voiture, la troisième option représente une optimisation envisageable. Celui car dans le troisième format profit, on a une minimisation des pertes par effet joule. Même si la taille et les coûts du moteur augmentent, notre but principal est de réduire les pertes.

4. Convertisseur DC/DC

Le convertisseur va pour notre véhicule avoir comme principal intérêt le contrôle de la tension continue de la batterie, en l'augmentant ou en la diminuant en fonction du système et de la puissance nécessaire.

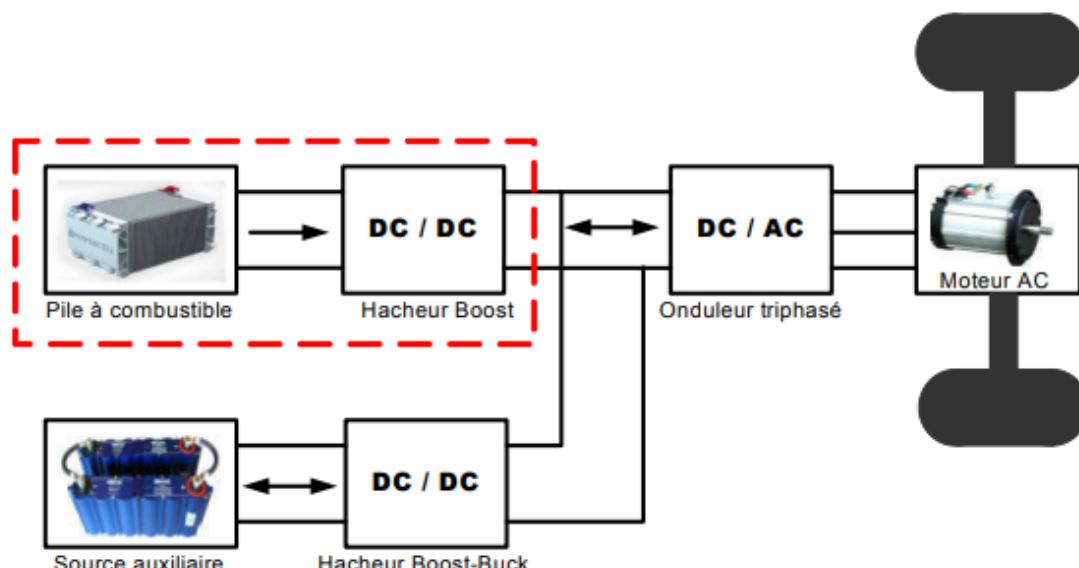


Figure 56 : Structure énergétique d'une Véhicule électrique à pile à combustible

Dans une chaîne de traction d'un véhicule hybride, l'utilisation d'un système d'adaptation entre les sources d'alimentation et la charge qui peut être un moteur à courant alternatif ou une machine à courant continu est nécessaire. Ce système est un convertisseur d'électronique de puissance qui doit conditionner et gérer l'énergie via un Bus continu. Ainsi, ce dernier peut être fixe ou variable suivant le cahier des charges et le mode de fonctionnement du système.

A) Aspect théorique

Il existe ainsi deux types de convertisseur DC/DC :

- Convertisseurs DC/DC isolés
- Convertisseurs DC/DC non-isolés

1) Convertisseur DC/DC isolés

Dans la plupart des applications, il est souhaitable d'utiliser un transformateur pour obtenir une isolation entre l'entrée et la sortie du convertisseur.

Voici 2 exemples de configurations de base de circuit pour les convertisseurs DC/DC isolés :

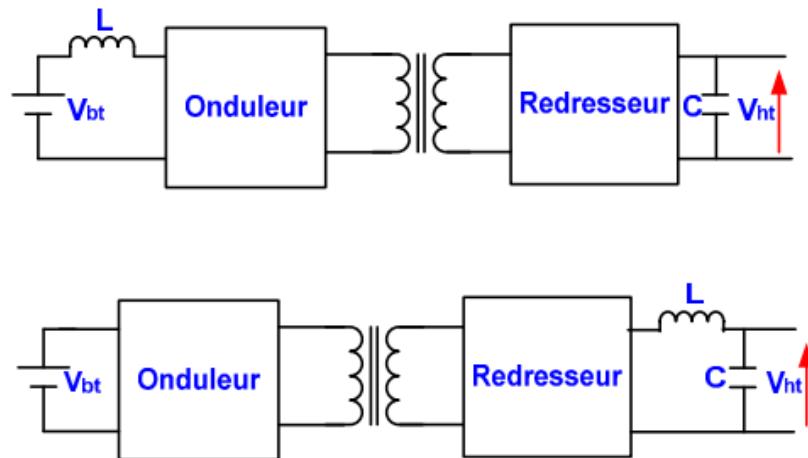


Figure 57 : Configurations de base du convertisseur DC-DC isolé

L'inductance qui sert de source de courant peut être placée sur les côtés basse ou haute tension. Placer l'inductance du côté basse tension nécessite un composant magnétique porteur d'un grand courant. Placer l'inductance du côté haute tension nécessite un dispositif semi-conducteur haute tension. Il est également possible d'intégrer cette inductance dans l'inductance de fuite du transformateur.

Le convertisseur push-pull indiqué sur la figure ci-dessous est l'une des topologies adaptées aux applications des piles à combustible. Ce convertisseur convient aux applications basses tensions à faible consommation. Son principal inconvénient est qu'il gère deux fois la tension d'entrée. À cette fin, un dispositif à haute tension (MOSFET ou IGBT) est nécessaire. Dans ce cas, il y aura des pertes de conduction élevées dues à une chute de tension de conduction élevée et, par conséquent, à un faible rendement.

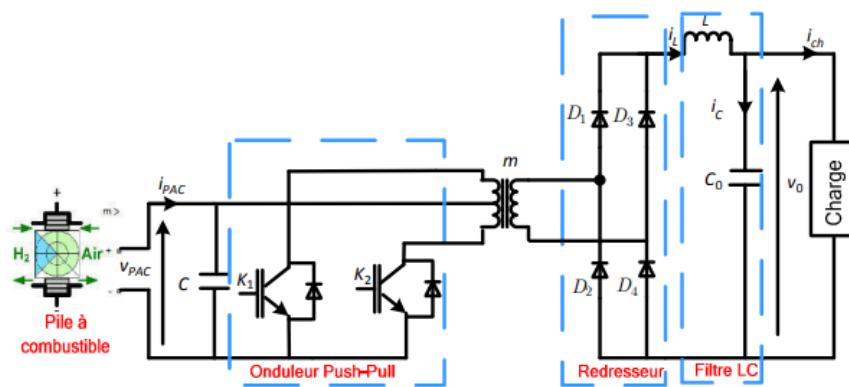


Figure 58 : Convertisseur DC-DC push-pull isolé

2) Convertisseurs DC/DC non-isolés

Les convertisseurs non isolés sont utilisés dans des applications pour augmenter la tension. Plusieurs topologies DC/DC Boost sont proposées afin d'améliorer l'efficacité, le gain de tension, et la capacité de manipulation de puissance.

La topologie qui se révèle être la plus adaptée aujourd'hui est la topologie nommée convertisseur flottant-dualBoost (FDB), que l'on retrouve ci-dessous.

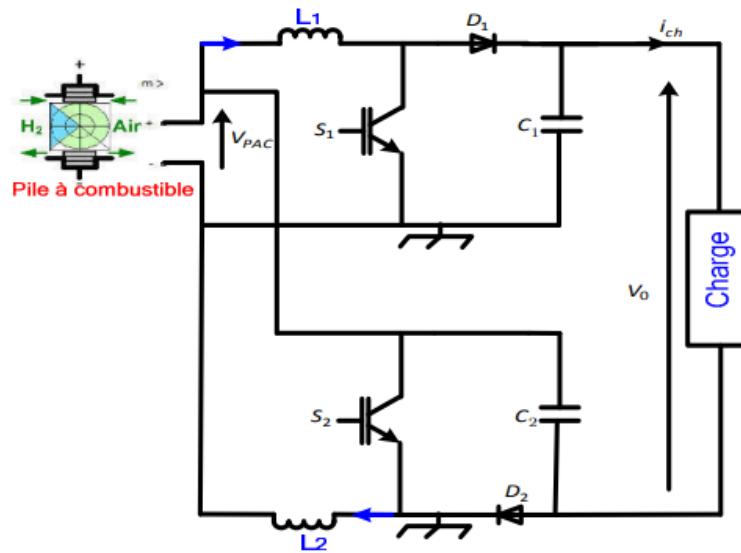


Figure 59 : Convertisseur double boost Flottant(FDB)

Dans les faits de nombreuses topologies différentes peuvent être dérivées du convertisseur FDB, les deux principales étant en premier le convertisseur double boost double entrelacé flottant (FDIDB) et en second le boost-double étage double amplification flottant (FDBDSB).

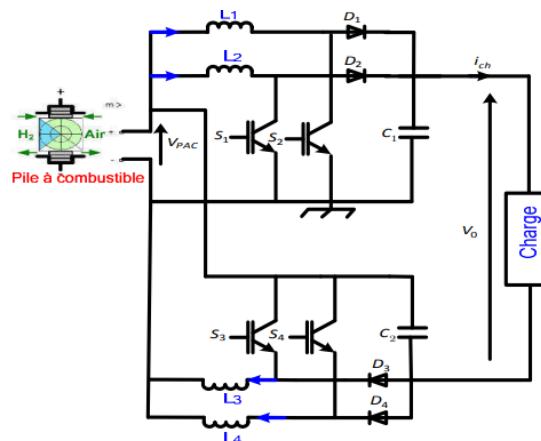


Figure 60 : Convertisseur double Boost flottant double entrelacé (FDIDB)

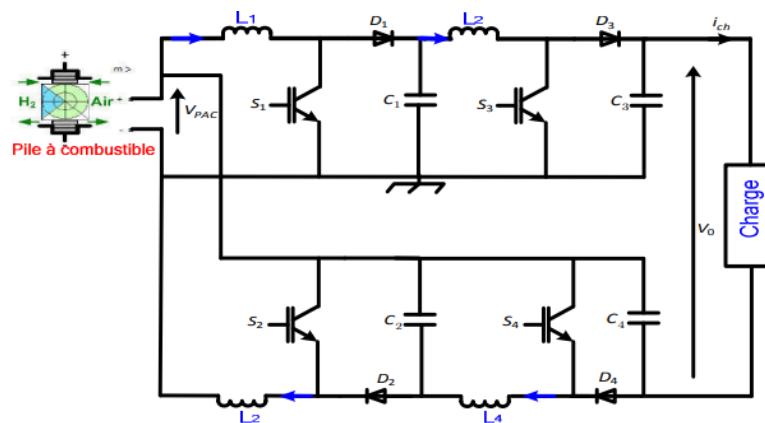


Figure 61 : Convertisseur Boost-double étage double amplification flottant (FDBDSB)

$$\text{Le gain en tension de la topologie FDIDB est : } \frac{V_0}{V_{PAC}} = \frac{1+d}{1-d}$$

$$\text{Et quant à la topologie FDBDSB, le gain de tension est : } \frac{V_0}{V_{PAC}} = \frac{2}{(1-d_1)(1-d_2)} - 1$$

5. Refroidissement

Il y a dans notre véhicule plusieurs éléments qui vont nécessiter un refroidissement :

- La batterie qui doit être maintenu autour de 20 °C +/- 5 °C
- La pile à combustible qui doit être maintenu autour de 65 °C +/- 20 °C
- Le moteur qui doit être maintenu autour de 100 °C +/- 30 °C

Tous ces éléments vont générer de la chaleur par effet Joule dû au courant qui les traverse ainsi que leur résistance interne. La puissance dissipée par effet Joule est égale à RI².

La batterie a une résistance interne de 0.207 Ohm tandis que la pile à combustible a une résistance interne de 0.66404 Ohm sachant que le courant dans les deux est de maximum 280 Ampères et est en moyenne 100 A. On a donc une puissance dégagée de maximale de 52 kW pour la PAC et 16 kW pour la batterie, et la puissance nominale est alors de 4 kW pour la PAC et 1.3 kW pour la batterie.

Sachant que l'échappement de chaleur n'est pas le même à tout instant avec les accélérations, nous avons décidé de coupler les deux systèmes de refroidissement classique, le refroidissement à air et le refroidissement par fluide. Ainsi le refroidissement à air va pouvoir refroidir les composants à tout moment et lors des phases (l'accélération) où la température augmentera, un circuit de fluide de refroidissement va venir appuyer le

premier système. On aura également un système pour venir réchauffer les composants lors du démarrage du véhicule s'il y en a besoin.

Sachant que les 3 composants n'ont pas la même température de fonctionnement, les systèmes de refroidissement de chacun seront différents.

On va venir simuler l'évolution de la température autour de la batterie qui est la partie la plus sensible pour valider notre modèle.

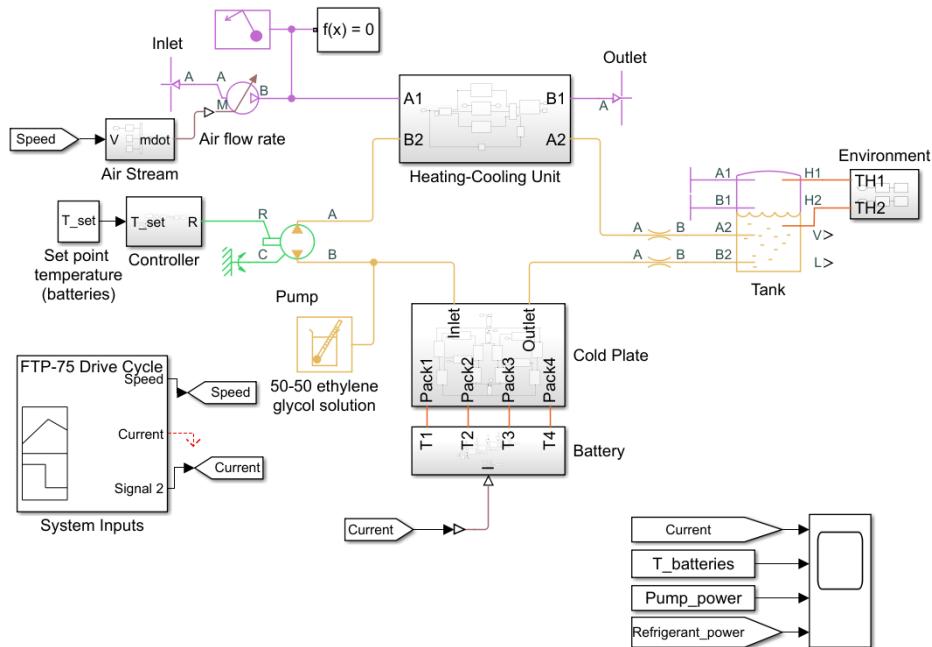


Figure 62 : Schéma général d'une unité de refroidissement

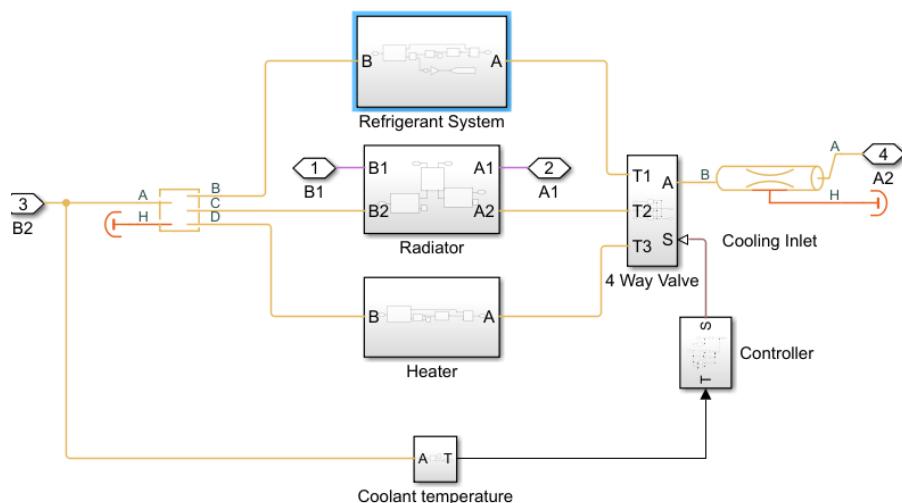


Figure 63 : Schéma des 3 systèmes couplés

On voit que si l'on met une température initiale de 80 °C sur les batteries, la pompe du liquide de refroidissement se met tout de suite en route jusqu'à ce que les batteries retrouvent une température idéale.

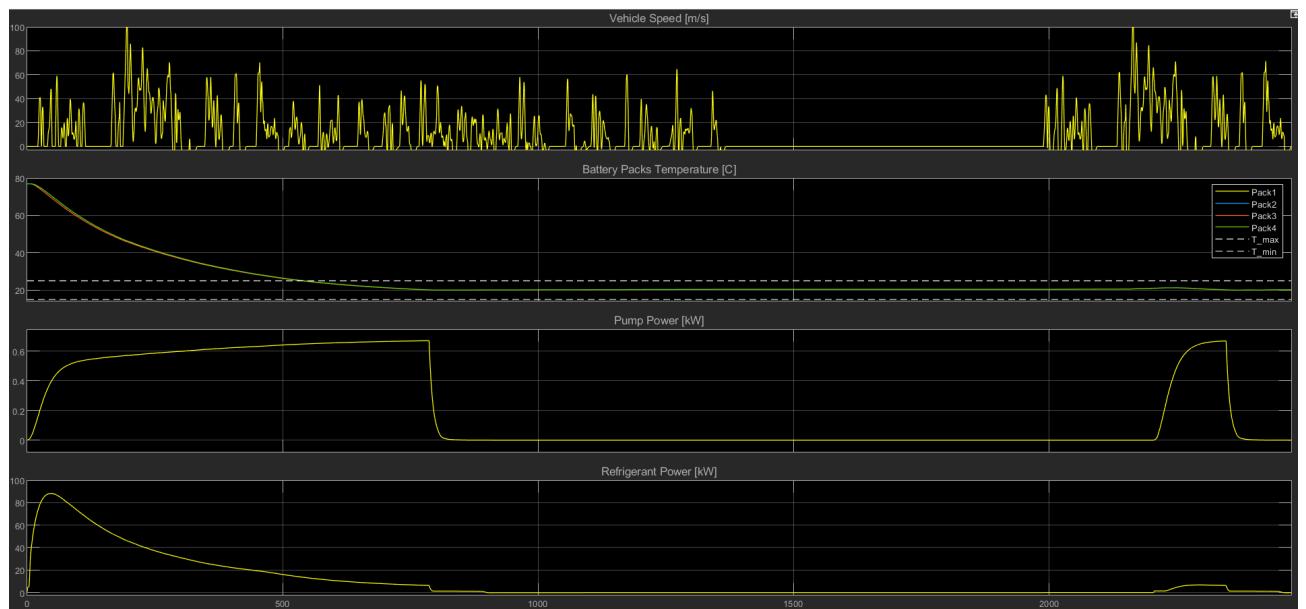


Figure 64 : Evolution de la température des batteries

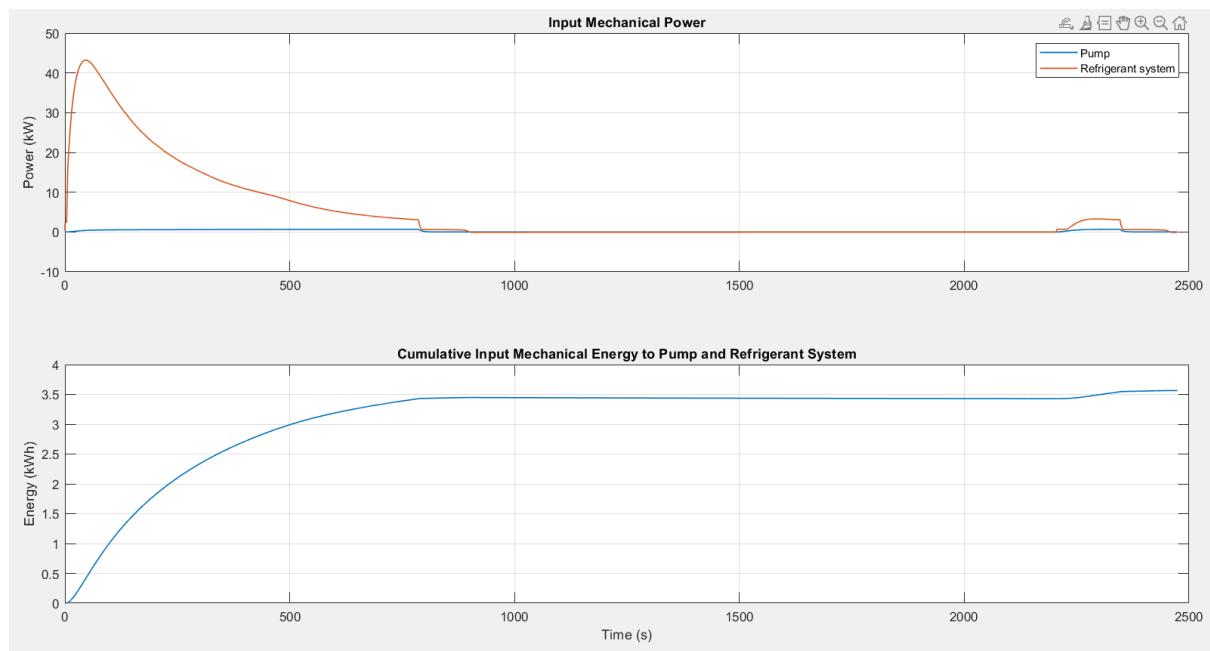


Figure 65 : Puissance consommé par les systèmes réfrigérants

On peut voir que la puissance qui est consommée par les systèmes de refroidissement ne doit pas être négligée même si en régime permanent elle reste faible.

Cette fois, prenons le pire des cas si le courant parcourant la batterie est toujours de 100 A, ce qui correspond à une phase d'accélération constante.

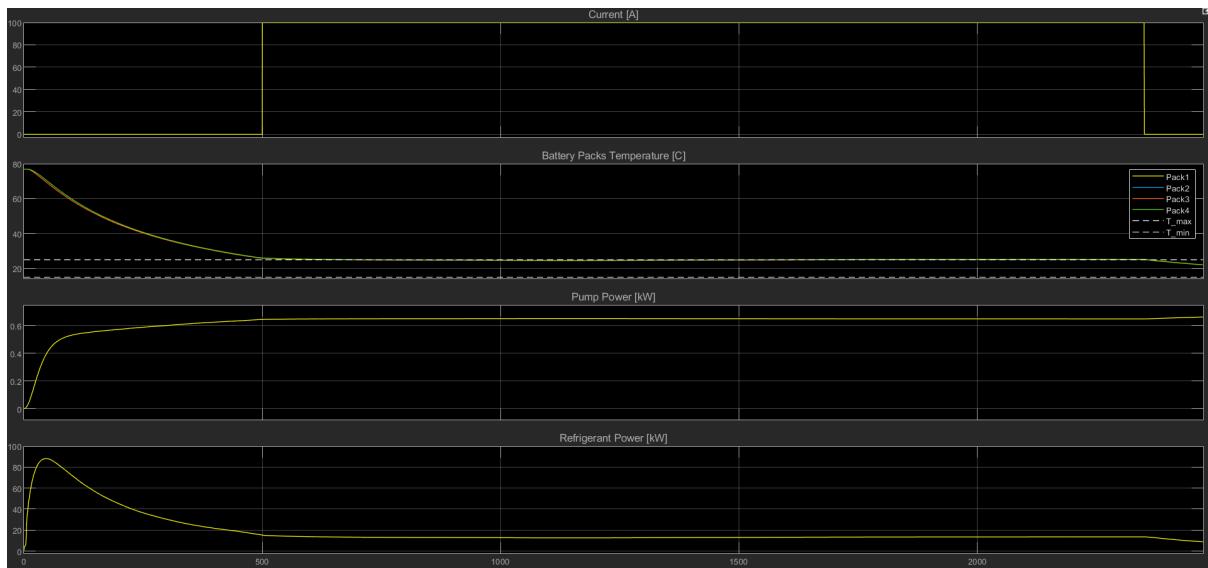


Figure 66 : Evolution de la température des batteries dans le pire des cas

On voit ici que la température se stabilise autour de la valeur convenue comme maximum avec la puissance de la pompe et du réfrigérant qui reste quasiment constante après avoir diminué la température dans le domaine acceptable ce qui montre bien que ce système peut supporter cet apport d'énergie.

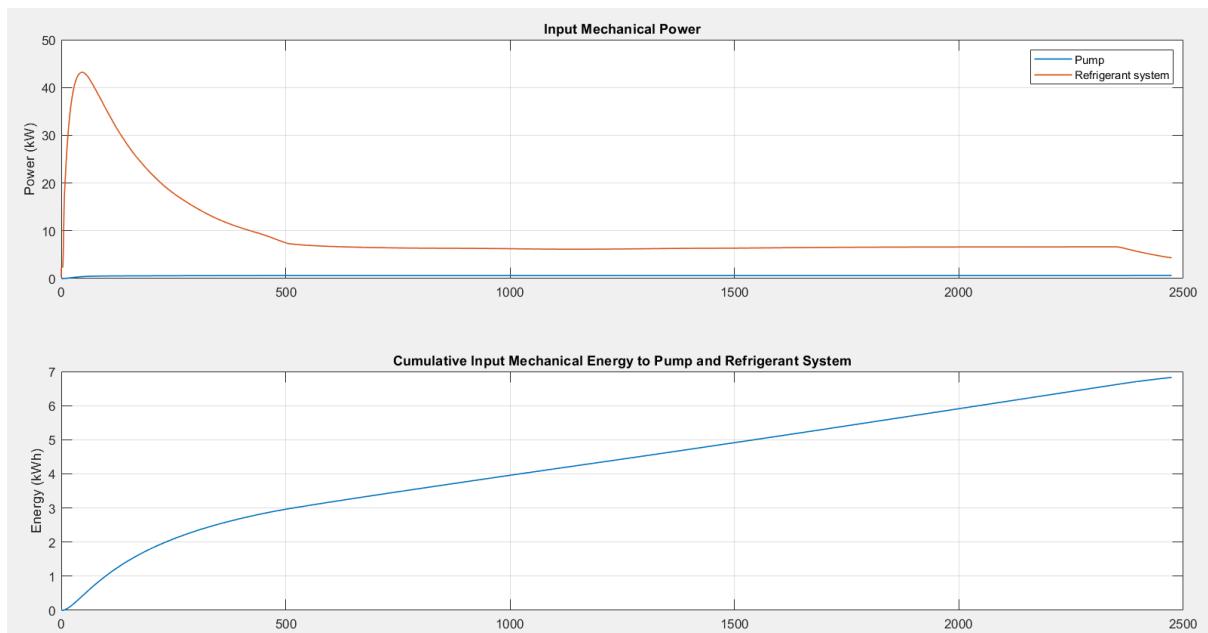


Figure 67 : Puissance consommé par les systèmes réfrigérants dans le pire des cas

On voit ici que la puissance consommée est bien plus importante que dans le cas précédent mais elle reste raisonnable.

Il en va de même pour la PAC et le moteur qui vont avoir une puissance consommé dans le même ordre de grandeur car même si il génère plus de chaleur, la puissance dissipé avec le

radiateur est plus grande sachant que leur température de fonctionnement est plus élevée donc le différentiel de température avec l'air ambiant sera plus grand.

Sachant que on peut aussi récupérer la chaleur produite par les batteries pour chauffer l'habitacle si besoin étant donnée la similitude des températures pour économiser de l'énergie.

6. Transmission

La partie transmission a été convenue à être réalisé par Ignacio. Aussi acceptée par Ignacio. Cependant, il n'y a aucune information disponible. [Lundi 6 février 2:15 am]

II. Etude du véhicule dans son ensemble

1. Architecture Globale

Basée sur deux sources [1] et [2] matlab ainsi que les différents cours :
Le véhicule contient l'architecture suivante :

- Un système de gestion des puissances à distribuer :

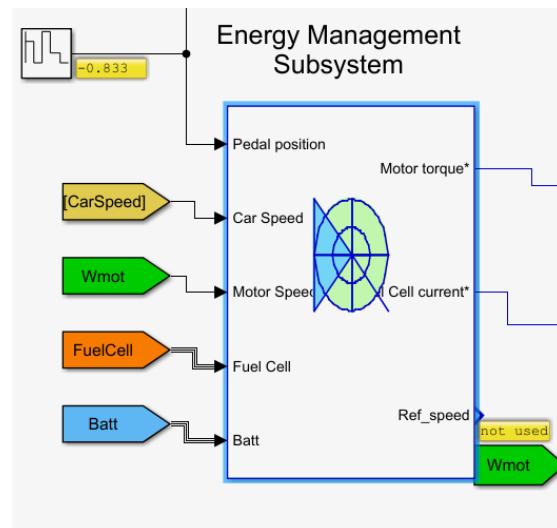


Figure 68 : Système de gestion des puissances

Il permet de gérer la répartition des puissances à fournir entre pile à combustible et batterie.

Dans celui-ci on retrouve alors :

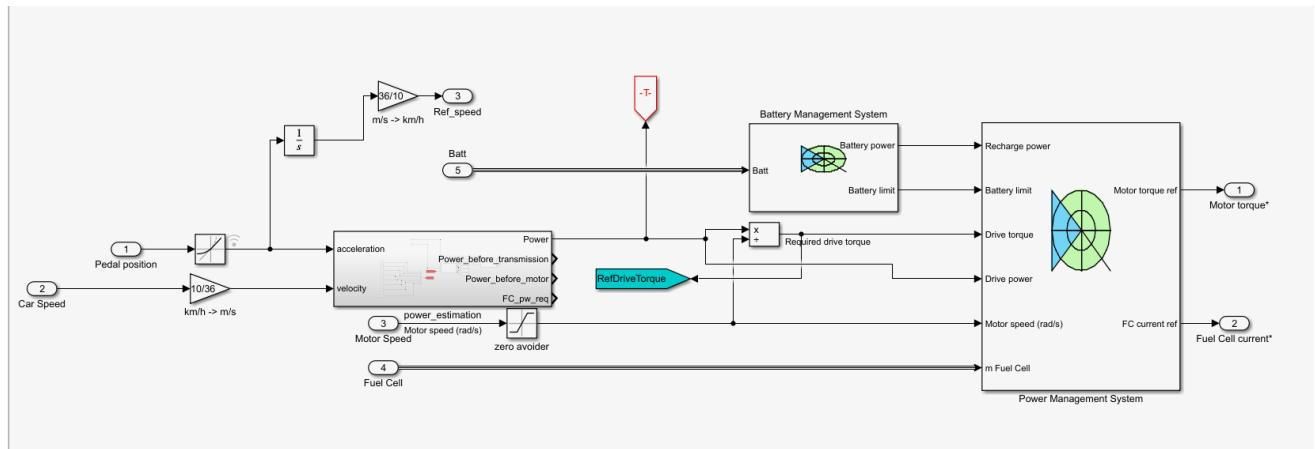


Figure 69 : Système de gestion des puissances

A partir de l'accélération et de la vitesse, on détermine la puissance à fournir pour ensuite obtenir le couple idéal.

Au niveau du calcul de la puissance , on prend en paramètre ce qui est précisé dans la partie théorique :

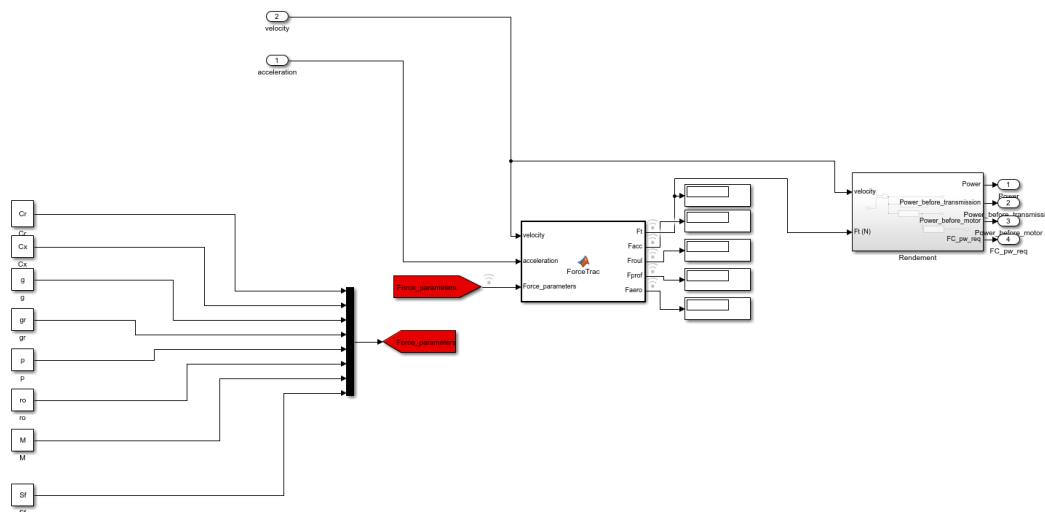


Figure 70 : Système de calcul de la puissance , méthode de Monsieur Gillon

On évalue alors la puissance en sortie , somme de Facc,Faero, Froul et Fprof.

Concernant le système de gestion de batterie, le principe est assez simple , en fonction de l'état de charge et de la puissance fournie à la batterie , on calcule la puissance que la batterie peut fournir de son côté:

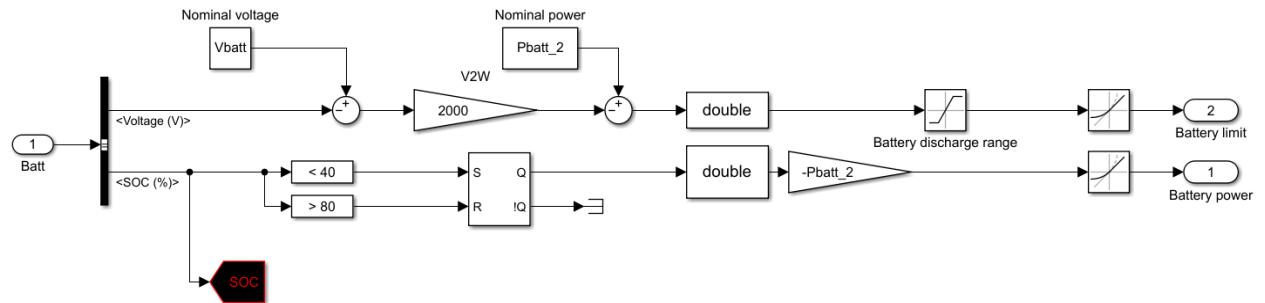


Figure 71 : Système de gestion de batterie

Ceci dépend de la tension nominale de la batterie ainsi que de la puissance nominale qu'elle peut fournir. Dans la simulation , on prend une batterie de puissance de 2.5 kw avec une tension de 288 V.

- Si la SOC est inférieure à 40 % , on part sur l'optique que si la FC le peut , celle-ci recharge la batterie jusqu'à 80%, dans tous les cas la batterie n'aidera pas la FC.
- Si la SOC est supérieure à 40% , alors la batterie aide la FC jusqu'à descendre en dessous des 40%.

Concernant l'obtention du courant à fournir à notre pile à combustible (FC) , ainsi que le couple de référence que le moteur doit fournir , ceci est connu dans le bloc d'après.

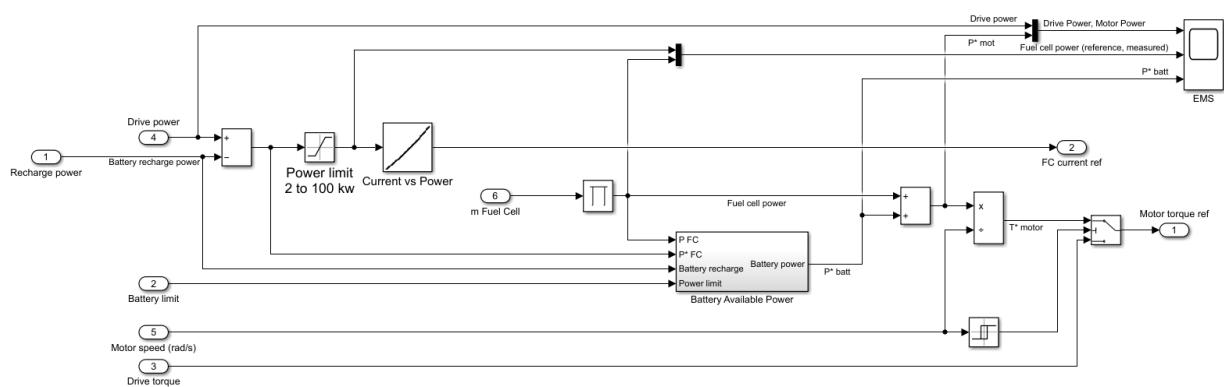


Figure 72 : Obtention du couple de référence et de l'intensité de référence

Ainsi , on connaît la puissance à la roue, puissance que doit fournir le moteur dans le cas idéal, celle-ci est drive power. On la compare à celle disponible par la batterie puis on récupère alors la puissance que doit fournir la pile à combustible. A l'aide d'une table , on obtient à partir de la puissance le courant nécessaire de la PAC et d'un autre côté on divise la somme de P_{FC} et P_{batt}^* (puissance de référence de la batterie) par la vitesse de rotation du moteur pour obtenir son couple de référence.

Connaissant alors le courant idéal de la pile à combustible ainsi que le couple adéquat , on peut entraîner notre système de propulsion sachant la vitesse de rotation moteur:

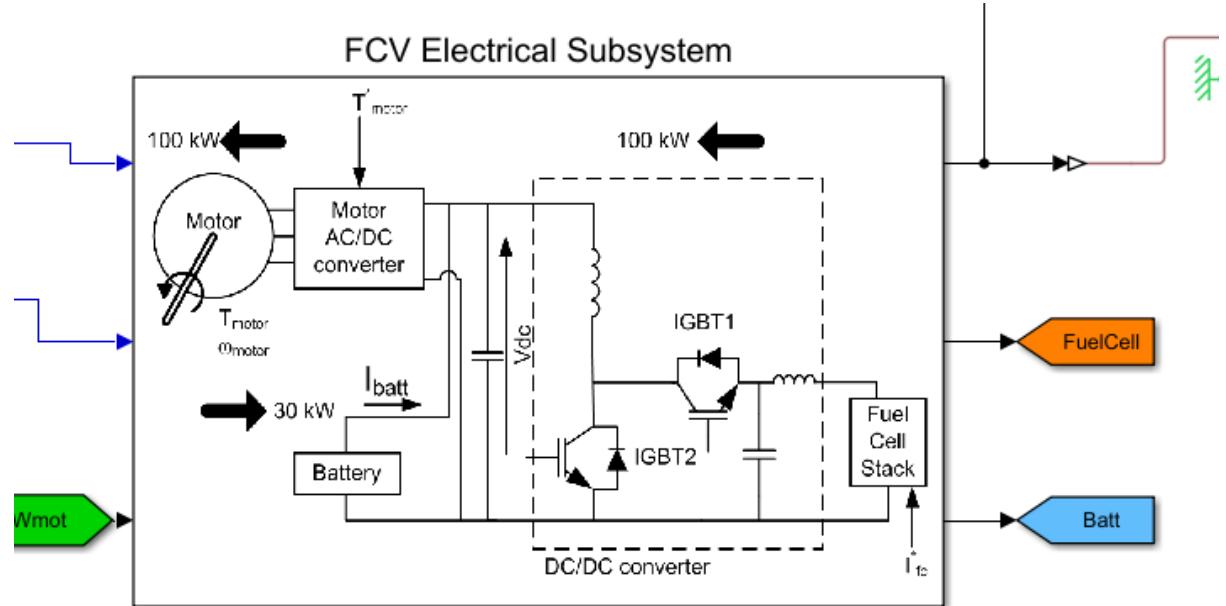


Figure 73 : Système de transmission de puissance

Voici alors l'intérieur du système :

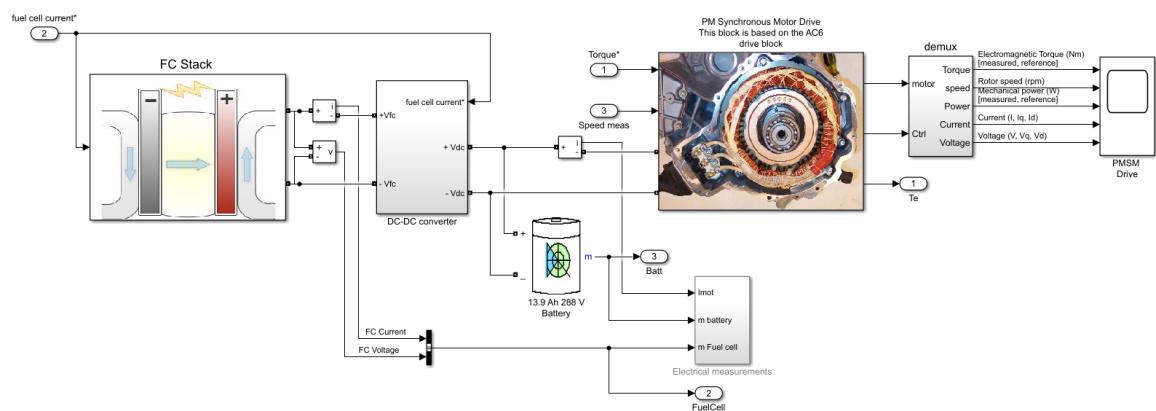


Figure 74 : Système de transmission de puissance

Le moteur fonctionne avec une tension nominale entre 250 et 300 V, le transformateur DC-DC convertit alors la tension fournie par la FC stack de 400 cellules avec une tension nominale entre 400 et 300 V.

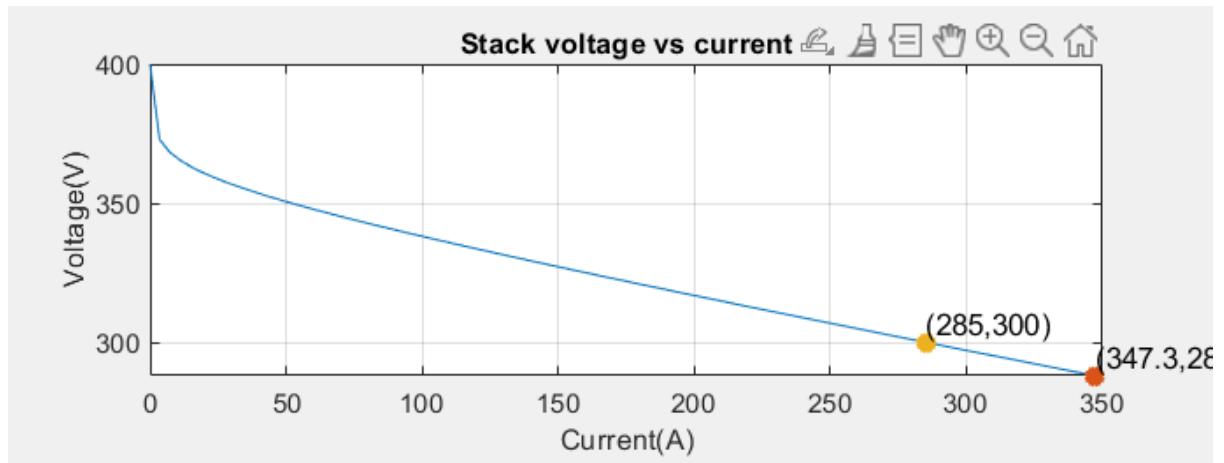


Figure 75 : tension vs courant dans la PAC

La batterie vient compléter les chutes de tension et d'intensité pour fournir au moteur le couple nécessaire lors des phases d'accélération.

On obtient en sortie le couple réel ainsi que les puissances réelles.

On transmet alors le couple en sortie au système de transmission où on récupère en la vitesse de rotation moteur ainsi que la vitesse actuelle de la voiture qu'on injecte par la suite dans le système de gestion d'énergie et ainsi de suite:

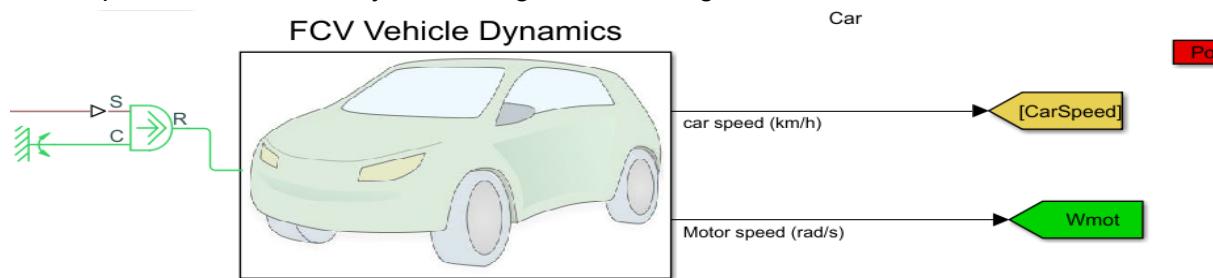


Figure 76 : Entrées d'informations dynamiques du système

Voici notre système de transmission :

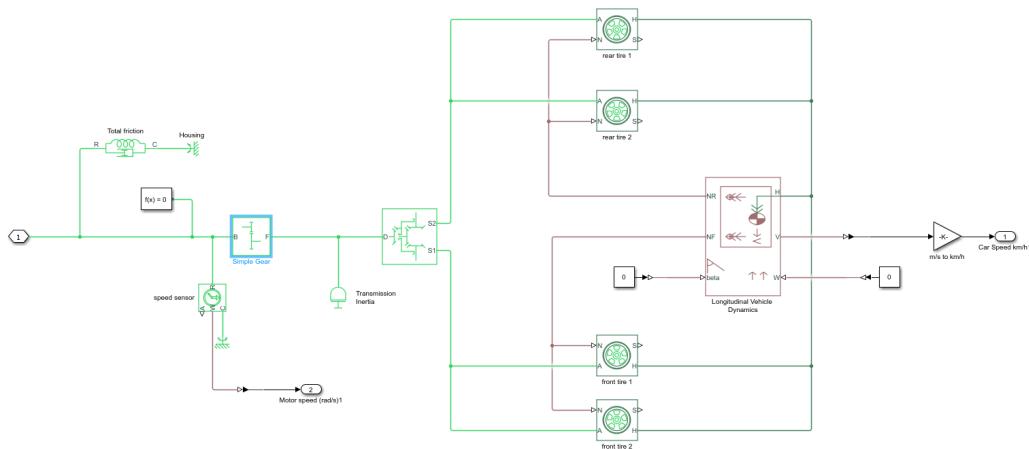


Figure 77 : Système de transmission

Il est constitué d'une vitesse , d'un différentiel ,et d'une perte énergétique négligée.

On récupère alors les données via un autre bloc:

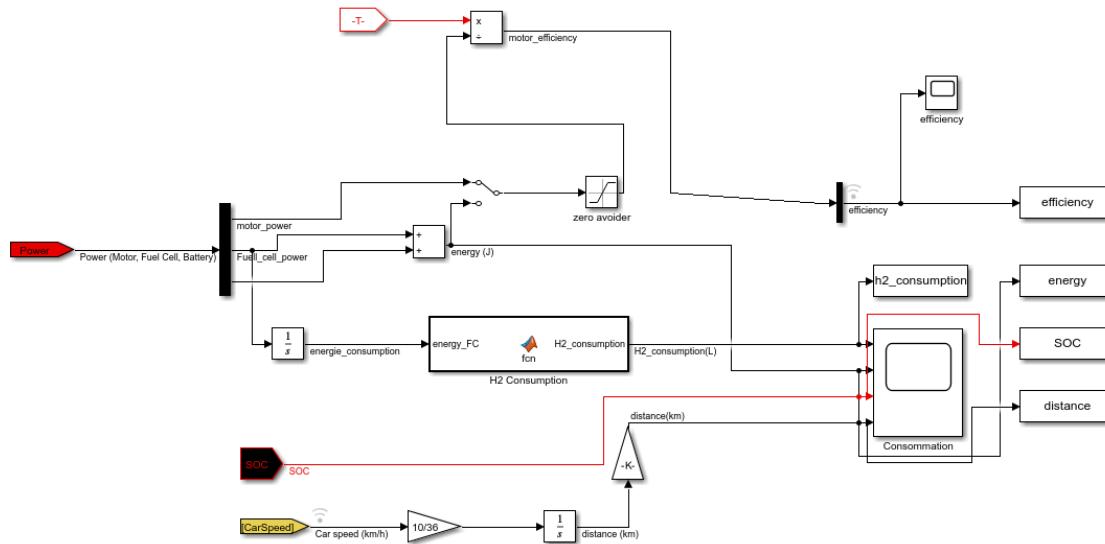


Figure 78 : Système de récupération de données

Celui-ci évalue l'état de charge de la batterie , la consommation d'hydrogène , l'énergie dépensée et plus encore.

- L'objectif d'une telle modélisation est avant tout d'évaluer les performances du véhicule sans pour autant asservir en vitesse et alors trouver les défauts notamment de puissance batterie et moteur qui ne seraient pas au rendez vous.
- Également , d'avoir un visuel réaliste de l'efficacité d'un système hybride batterie/pile à combustible avec un système de transmission élaboré.

Bibliographie :

Partie gestion de l'énergie [1] : Thèse de master , Université de Californie , Joseph Kenneth Smithson Bell : [Design and Control of a Hydrogen Fuel Cell Vehicle \(escholarship.org\)](https://escholarship.org/uc/item/2qj1t34w)

Noyau du système électronique et mécanique: Pierre Mercier (2023). Fuel Cell Vehicle (FCV) [2] :

<https://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33309-fuel-cell-vehicle-fcv-power-train>

2. Répartition des forces

2.1 Modèle du véhicule

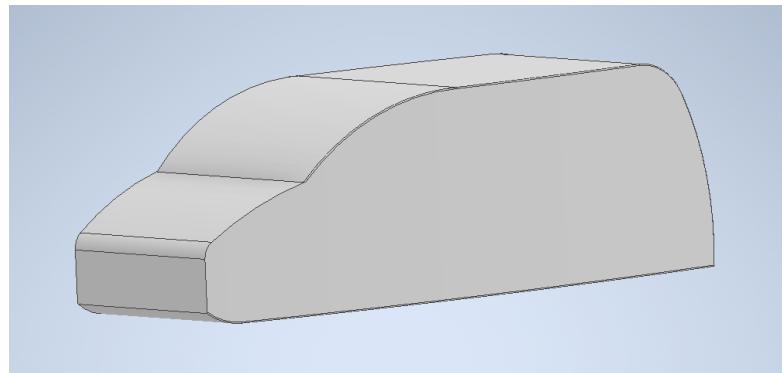


Figure 79 : Modèle finale de la voiture

Avec le logiciel Autodesk Inventor, on a développé un modèle de VUL (Véhicule Utilitaire Léger) qui a été amélioré constamment pour réussir à avoir le meilleur rapport entre taille, capacité de charge et réduction de force de traînée.

La voiture finale a les dimensions marquées sur la figure ci-dessus. La distance entre portes est de 1.904 m^2 , et la capacité de charge est de 8 m^3 . Le poids sans charge est de 2000 kg à vide, avec une charge maximale de 1 tonne. Donc le poids maximal de la voiture est de 3.5 tonnes.

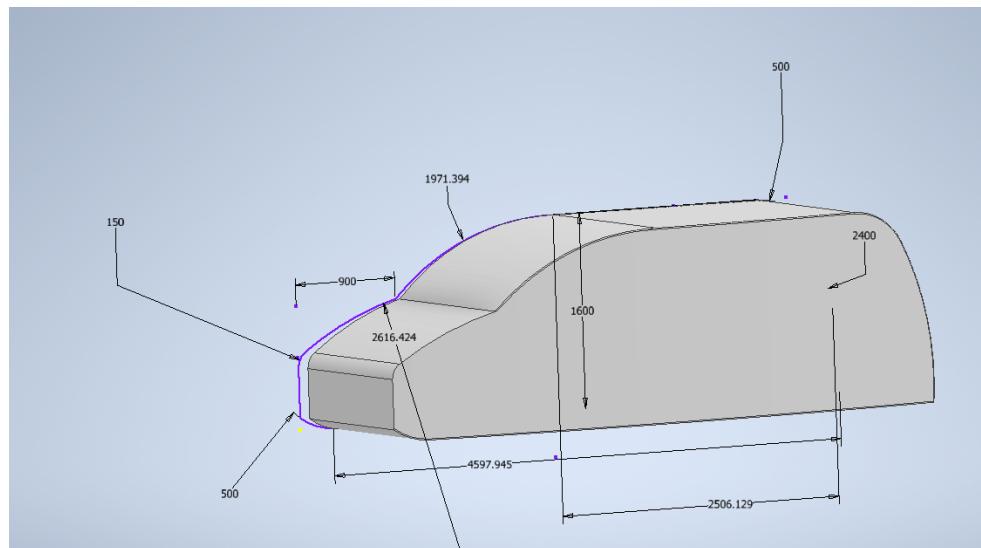


Figure 80 : Dimensions de la voiture

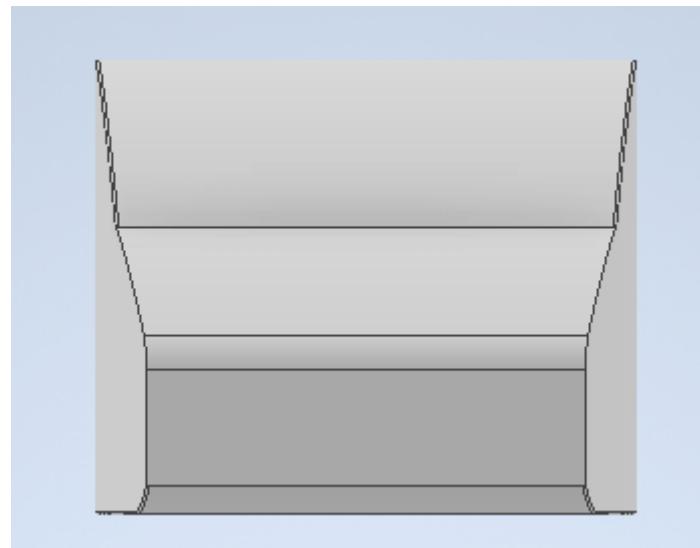


Figure 81 : Vue frontale de la voiture

2.2 Forces aérodynamiques

On a fait une étude aérodynamique de la voiture. Après plusieurs itérations, on a réussi à minimiser les forces de traînée avec des modifications sur le modèle initial. D'abord, on a réduit la taille de la voiture, ainsi que l'ajout de surfaces plus courbes à la place des plans frontales qui augmentent la force de traînée.

Voici quelques figures des résultats de la dernière itération

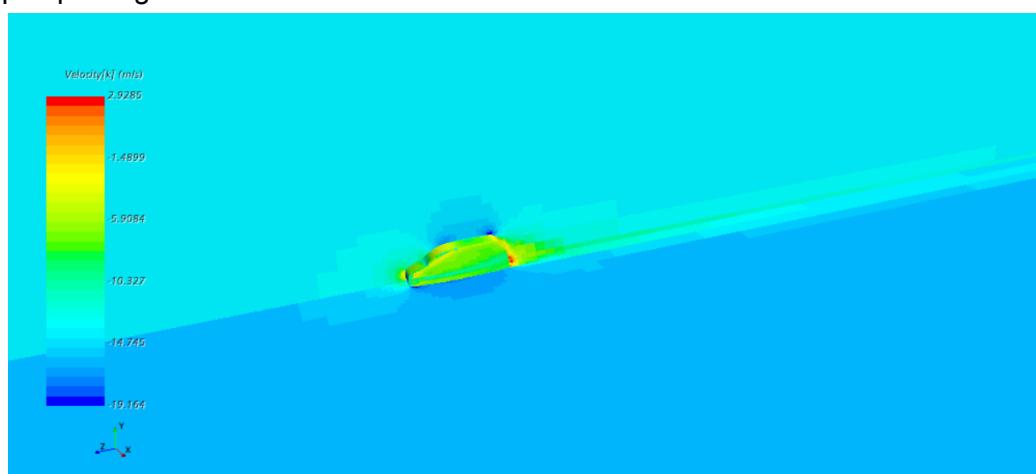


Figure 82 : Iteration du modèle final sur Star CCM+

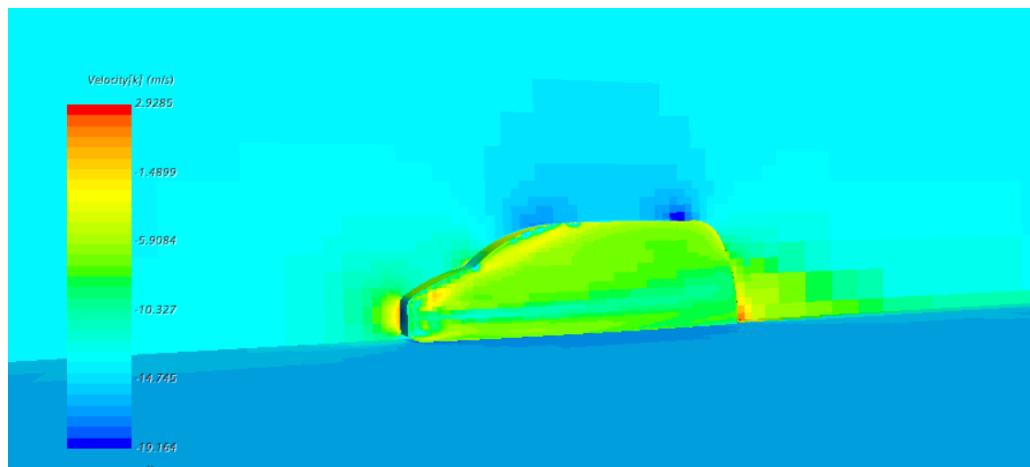


Figure 83 : Vitesse sur l'axe K

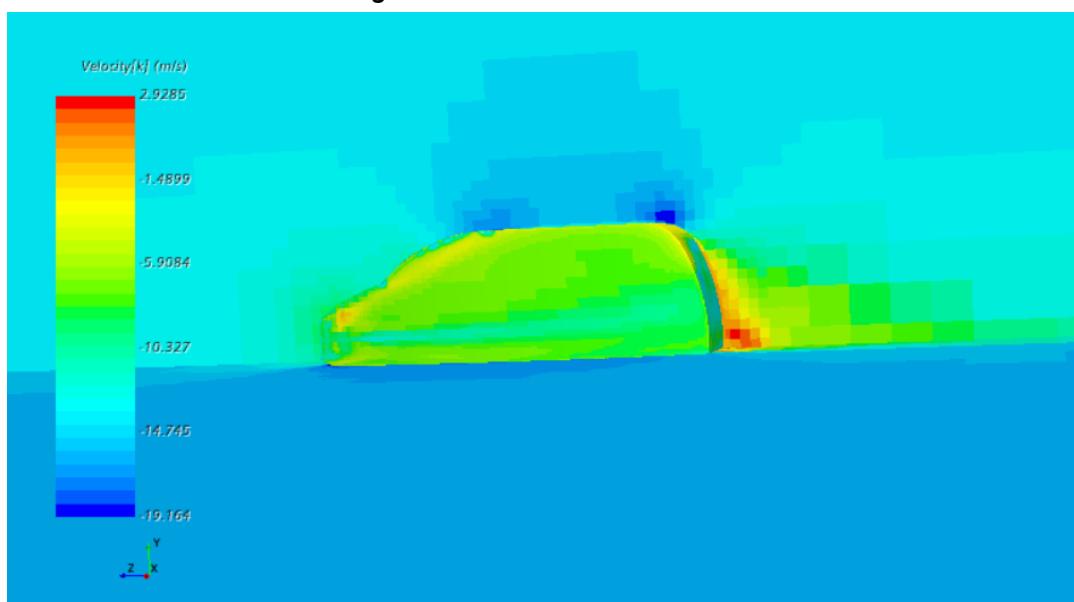


Figure 84 : Vitesse sur l'axe K, écoulement

Summary

Total area, 339614, cm ²
TOTAL FX, 0.490324, Newton
TOTAL FY, -1.29719, Newton
TOTAL FZ, -200.986, Newton
Center of Force about X-Axis (Y-Z), 103.866, -422.699, cm
Center of Force about Y-Axis (X-Z), 67.6608, 27332.9, cm
Center of Force about Z-Axis (X-Y), 94.2985, 58.4645, cm

Figure 85 : Tableau de résultats des forces.

Avec les valeurs trouvées dans la simulation, on peut calculer le coefficient de traînée.

$$C_x * A = \frac{2*200.986 N}{1.205 * 13.888^2} = 1.720851 m^2$$

Si on compare les coefficients de traînée avec la littérature, on peut remarquer que le coefficient a été réduit de 0.60 à 0.56, et que la surface de contact est moindre que celui de la concurrence. Les forces des traînées seront mineures.

2.4 Impact des forces en fonction de la vitesse

Pour la modélisation , nous avons utilisé les constantes suivante :

gr	0.2656
g	9.81
M	2000 Kg (non chargé)
p	0 (pente nulle)
ro	1.23
Cx	0.56 (Voir précédemment)
Cr	0.013 (Pression standard)
r	0.25

Figure 86 : Tableau des constantes.

Avec un tel poids et à faible vitesse , la force d'accélération qui prend l'ascendant lors du cycle NEDC , celui qui est le plus pertinent dans l'étude de notre véhicule :

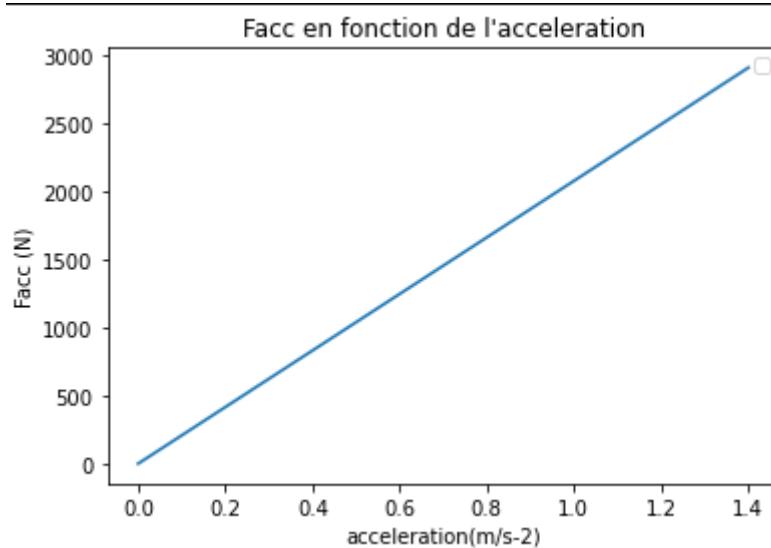


Figure 87 :Force d'accélération

La force aérodynamique quant à elle donne :

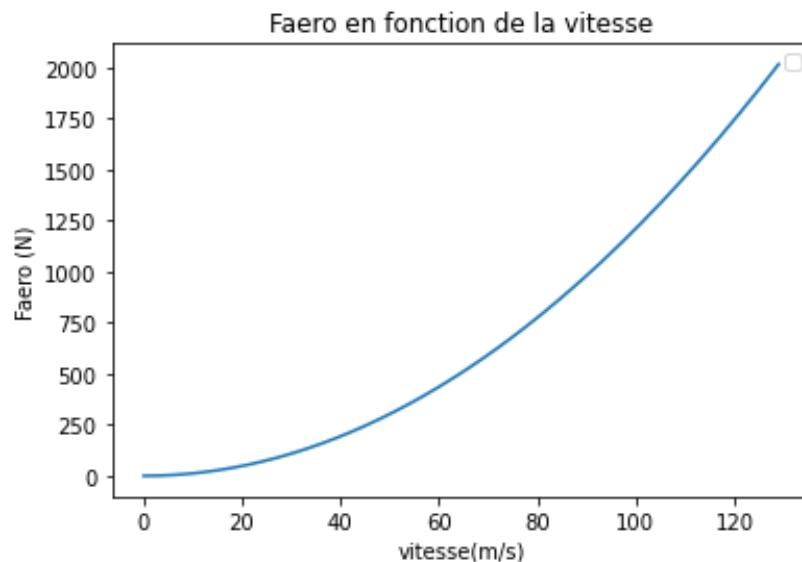


Figure 88 :Force aérodynamique

Ainsi , elle vient concurrencer la force d'accélération à partir des 70 km/h , voilà pourquoi l'optimisation du coefficient de trainée reste tout de même intéressante notamment lors des trajets sur périphérique.

La force de pente en revanche n'est pas à prendre à la légère , et une circulation en milieu pentu peut être compromise :

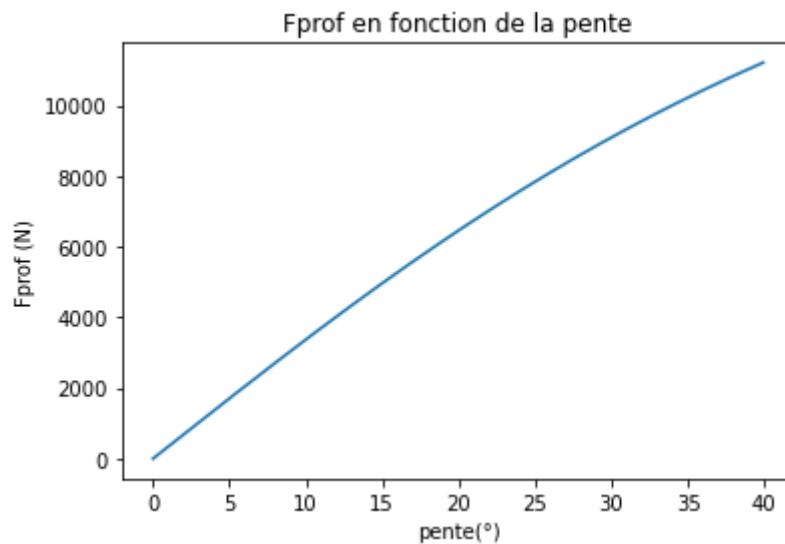


Figure 89 :Force en fonction de la pente

La force de roulement est en revanche négligeable passé les premiers km/h , de seulement 7 N.

2.3 Étude des limites

Puissance moteur assez faible , puissance batterie également.

Nous avons effectué plusieurs test pour évaluer la pertinence de nos choix , notre ensemble PAC + batterie est bloqué à 125 kw de puissance alors , pour une accélération maximale on obtient les courbes suivantes :

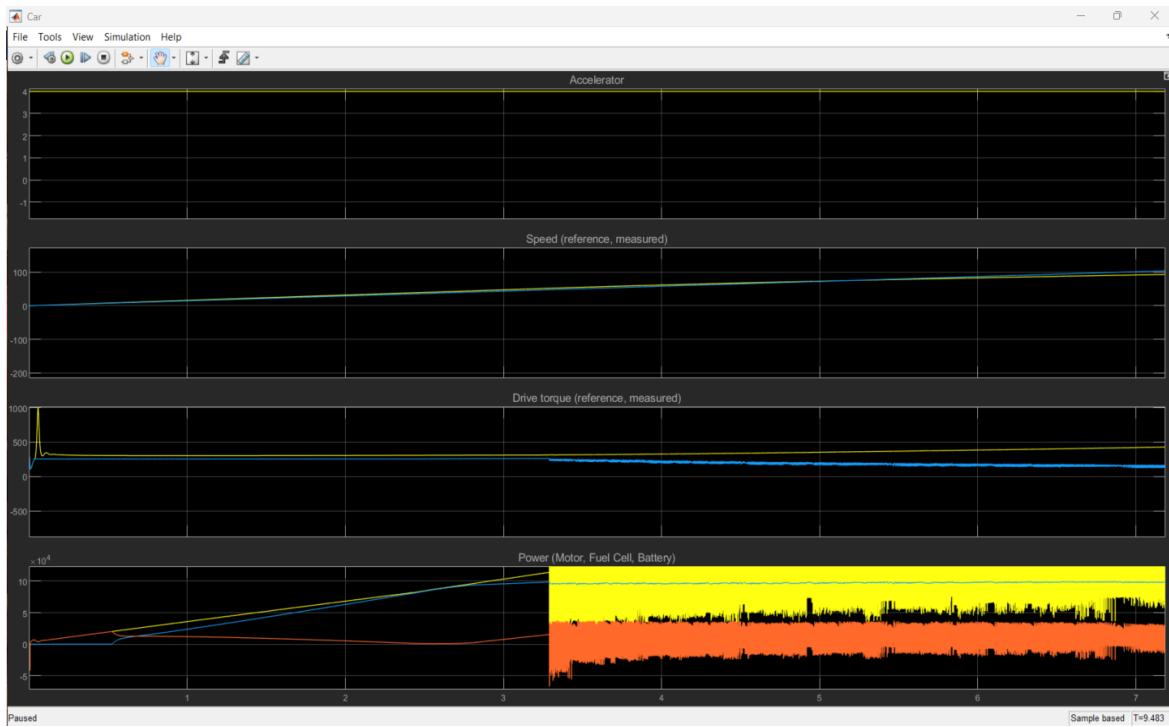


Figure 90 : Accélération, vitesse, couple et puissance

On remarque que lorsque la puissance requise excède les 125 kw , la puissance ne suit plus et le véhicule ne peut plus excéder la vitesse en question .

En revanche, la PAC montre ses preuves avant cette barre fatidique en s'aidant de la batterie pour compenser : couple moteur réel et de référence se confondent.

Ainsi , le dimensionnement est correct pour une accélération à 4 m/s² maximum jusqu'à une vitesse de 90 km/h atteinte en seulement 6 secondes.

Dans la figure suivante on peut voir l' effet que produit ce dépassement en puissance sur la puissance moteur :

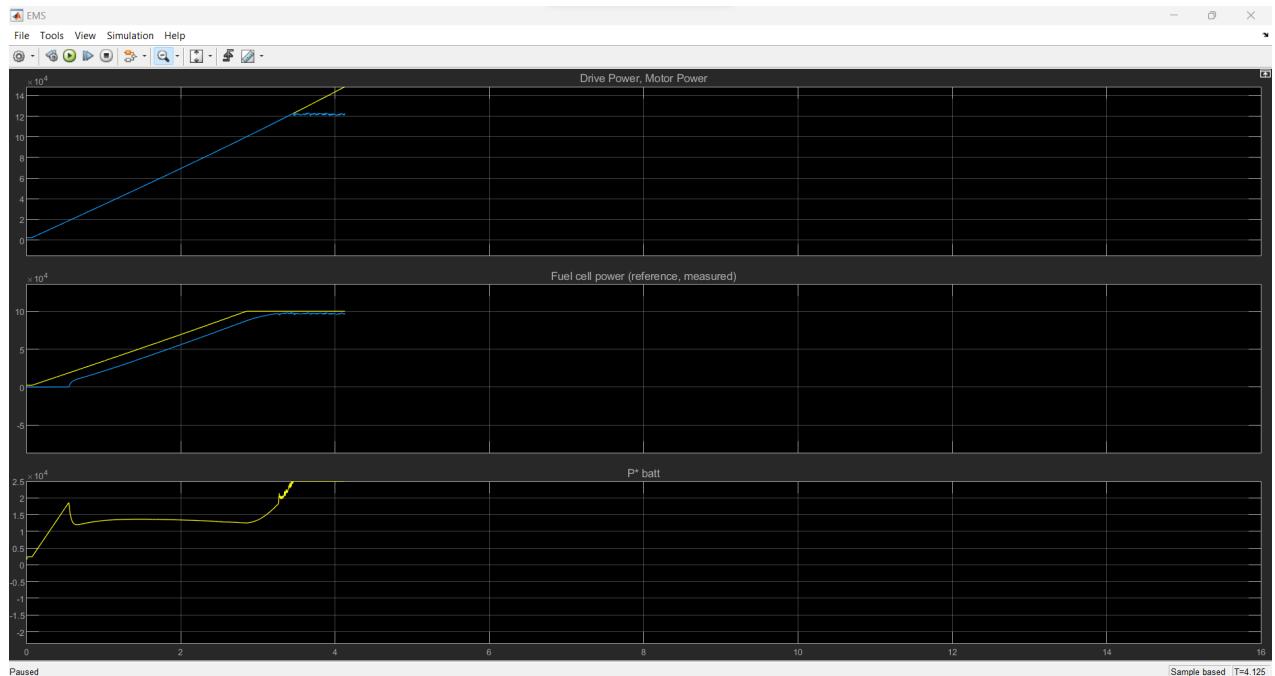


Figure 91 : Puissance du moteur, du pile et batterie

On voit bien la puissance de la batterie qui soutient la puissance de la PAC pour convenir à la demande moteur et qui ensuite atteint un seuil. Dans cet optique , nous avons alors décidé d'augmenter la puissance fournie par la batterie à 40 kW plutôt que 25 kw pour atteindre les 130 km/h comme souhaité avec une accélération raisonnable :

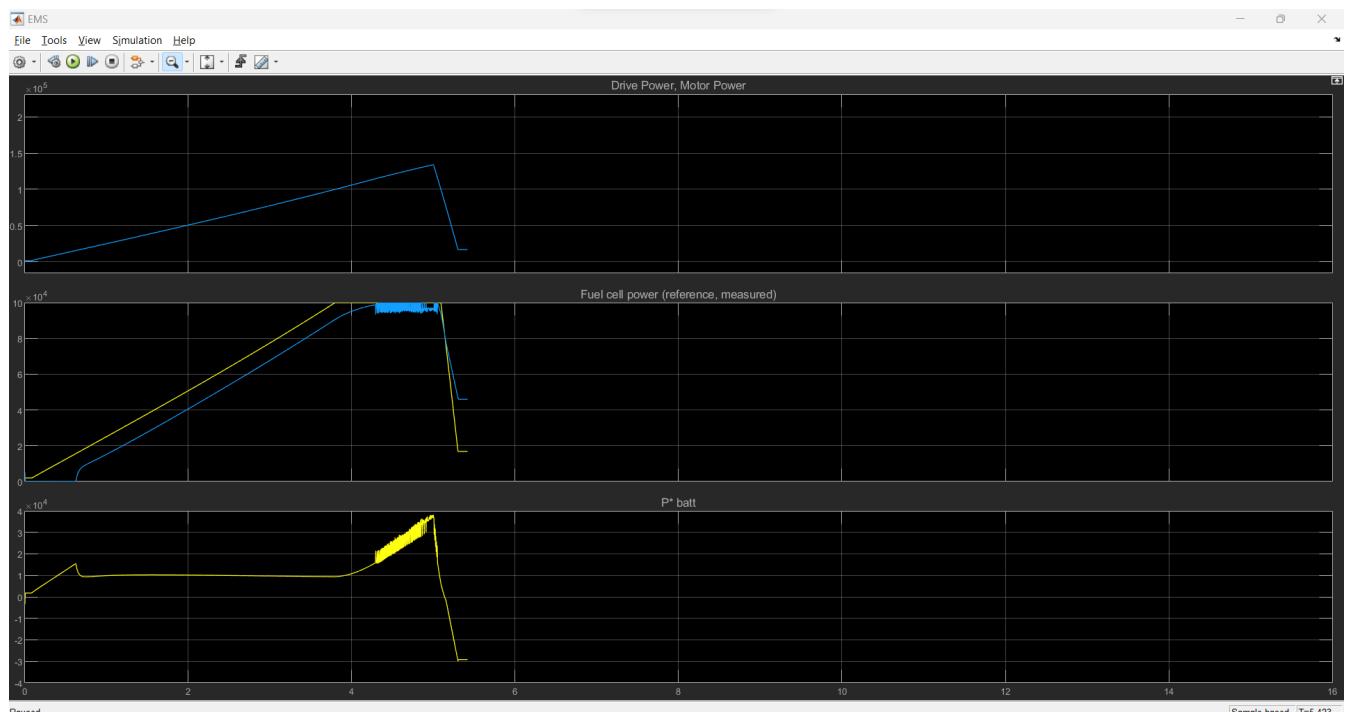


Figure 92 : Puissance du moteur, du pile et batterie en accélération

Dans ce cas, c'est le moteur qui ne suit plus et cela nécessite alors un moteur plus puissant qui ne soit pas limité à 130 kw et un couple moteur de 250 Nm.

Augmenter la puissance moteur revient à augmenter le prix du système ainsi que sa consommation , ce choix n'est alors pas forcément judicieux et on préféra limiter l'accélération par la suite pour éviter d'atteindre cette zone de saturation .

Nécessité d'une batterie

La PAC doit chauffer d'une part certes , mais d'autres part fait preuve de mauvaise performance quand il s'agit de changement drastique en puissance à fournir :

Si on démarre sans aide de batterie, la vitesse souhaité lors de la phase d'accélération sera atteinte avec un certain retard :

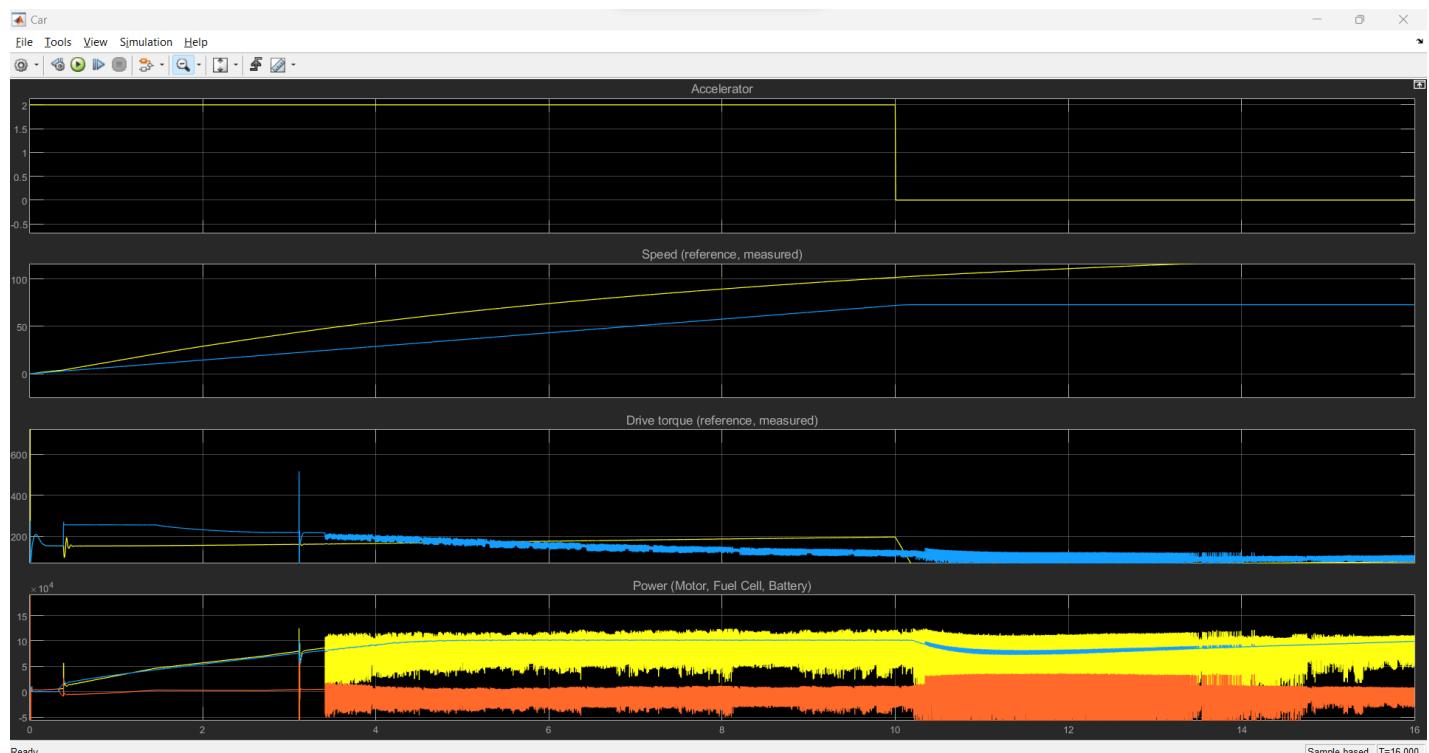
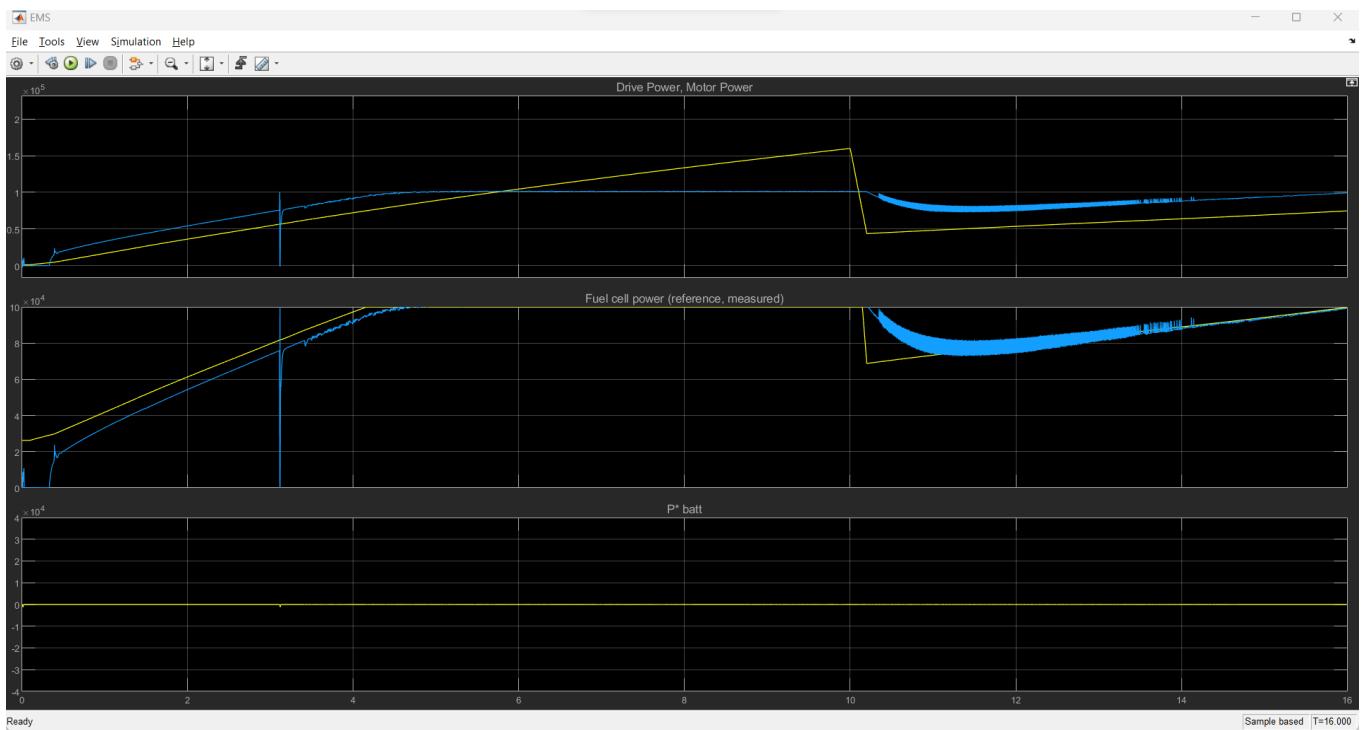


Figure 93 : Accélération, vitesse, couple et puissance avec la pile uniquement en fonctionnement

La puissance de la batterie est nulle (courbe orange) , le couple moteur fournit lors des premiers kilomètres (courbe bleue) est alors très faible en comparaison de ce qui est demandé (courbe jaune) .

Voici le profil des puissances fournies de plus près :

Figure 94 : Puissance du moteur, du pile et batterie quand la pile à hydrogène est uniquement en fonctionnement



- On voit bien que le démarrage et la phase de saturation (100 kW) de la PAC sont des zones où la batterie est nécessaire car le moteur n'a pas les ressources suffisantes pour atteindre la puissance demandée.
- On comprend alors l'enjeu d'une batterie et la nécessité de bien la dimensionner afin d'être optimale lors des phases d'accélération mais également d'avoir une capacité suffisante pour supporter les phases de mise en route.

Efficacité :

Nous avons choisi de quantifier l'efficacité du système afin de connaître les plages de fonctionnements adaptées du véhicule et d'adapter en conséquence l'apport en puissance de la batterie pour obtenir le meilleur rendement.

Concernant le rendement moteur , cela concorde avec la théorie :

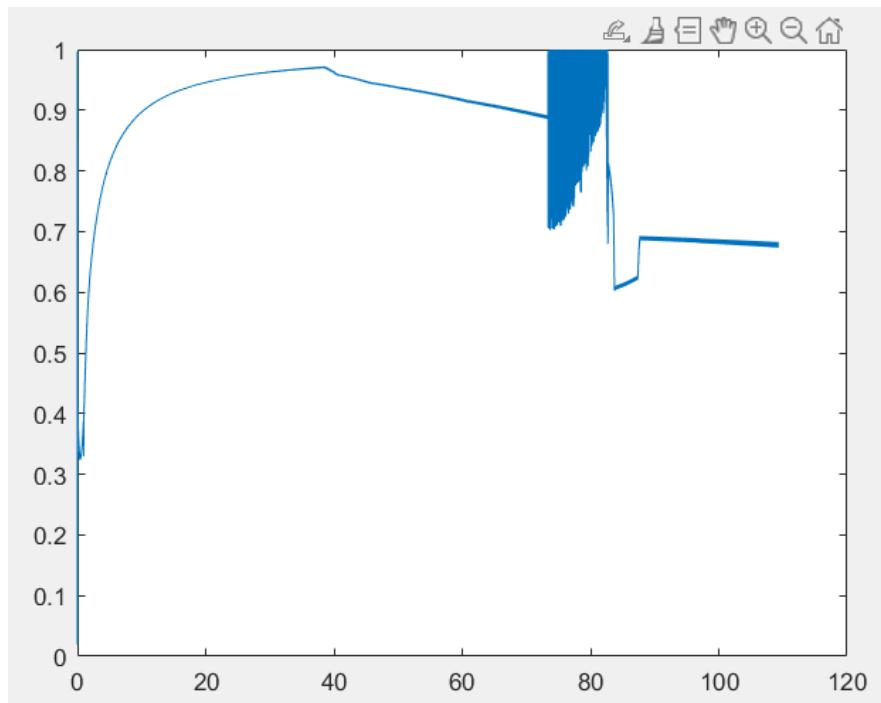


Figure 95 : Rendement du moteur

Voici le rendement moteur en fonction de la vitesse , son rendement optimal étant dans les 50 km/h , ce moteur convient alors pour les circulations en ville , ce qui est le plus souvent le cas.

Finalement , bien que peu puissant, il s'avère correctement dimensionné dans le cadre de son utilisation , jusqu'à 70 km/h. Son rendement baisse drastiquement passé cette vitesse.

Concernant le rendement PAC + Batterie , voici le profil :

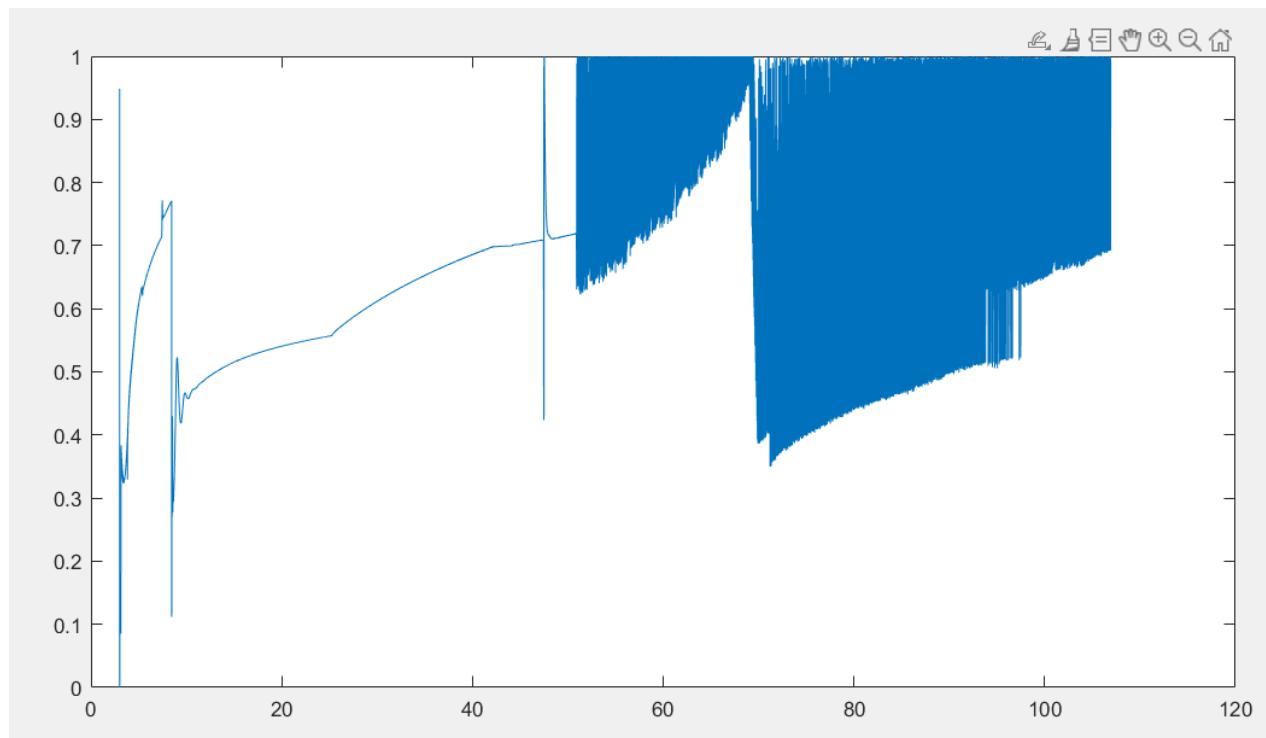


Figure 96 : Rendement PAC + Batterie

Ainsi , le rendement est optimal pour une plage de vitesse entre 20 et 60 km/h ce qui concorde avec le moteur choisi ayant des rendements optimaux dans ces mêmes plages. Passé 70 km/h , le rendement diminue drastiquement , et n'est pas adapté à cette situation.

Finalement , le choix de nos éléments convient au profil de vitesse envisagé, en ville aux alentours de 20 à 60 km/h.

3. Etude sur le cycle NEDC

Cycle NEDC, asservissement en vitesse :

Afin d'évaluer les performances de notre voiture, nous allons lui appliquer un cycle de vitesse. Pour cela , nous allons asservir sa vitesse afin que celle-ci suive le profil souhaité contrairement à précédemment.

Voici alors la modification dans le gestionnaire d'énergie :

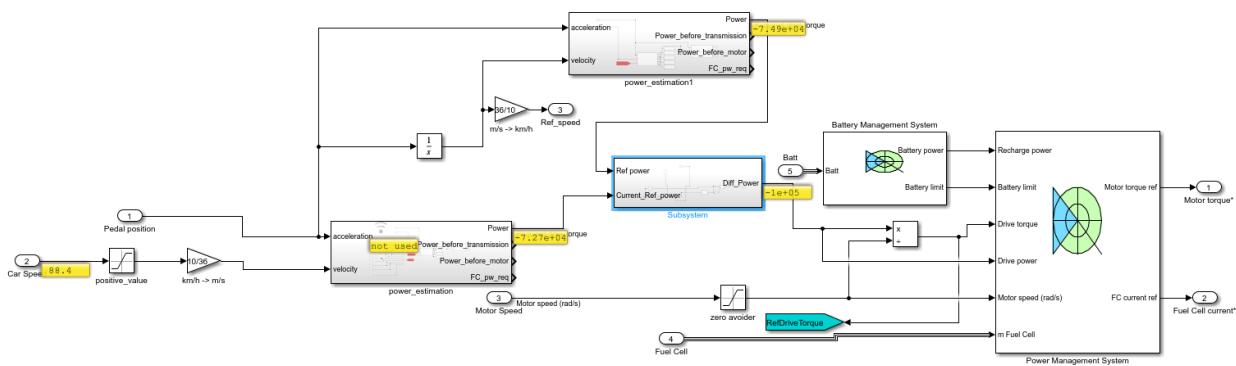


Figure 97 : Gestionnaire d'énergie modifié

Ainsi , on compare puissance de référence avec la puissance nécessaire pour atteindre la vitesse souhaitée , le code est accessible sur le github associé :

<https://github.com/k0ratty/2LC>

Dans le bloc de comparaison des puissances (vitesse actuelle vs vitesse souhaité) on trouve :

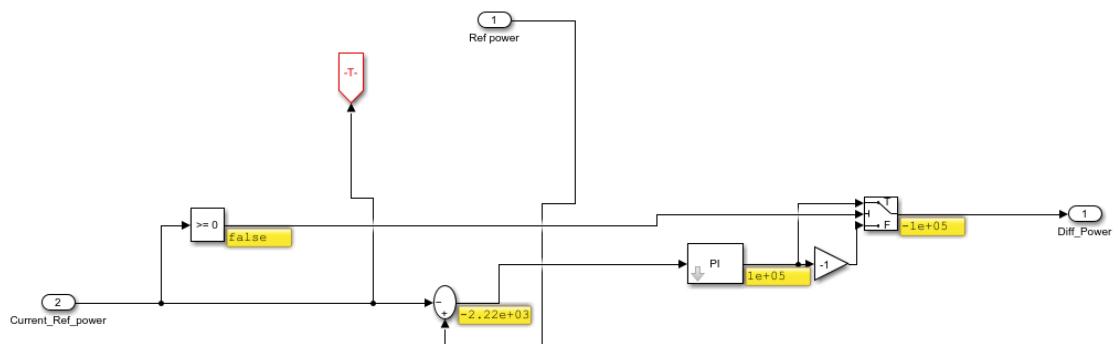


Figure 98 : bloc d'asservissement des puissances

Ainsi , si il y a accélération , la différence de puissance est nécessairement positive en sortie, et négative dans le cas contraire.

Le modèle intègre un correcteur PI qu'il convient de bien dimensionner au risque d'avoir des saturations non voulues.

Voici un exemple de la réponse en vitesse si le correcteur a des bornes de sorties trop ample (150 kW) :

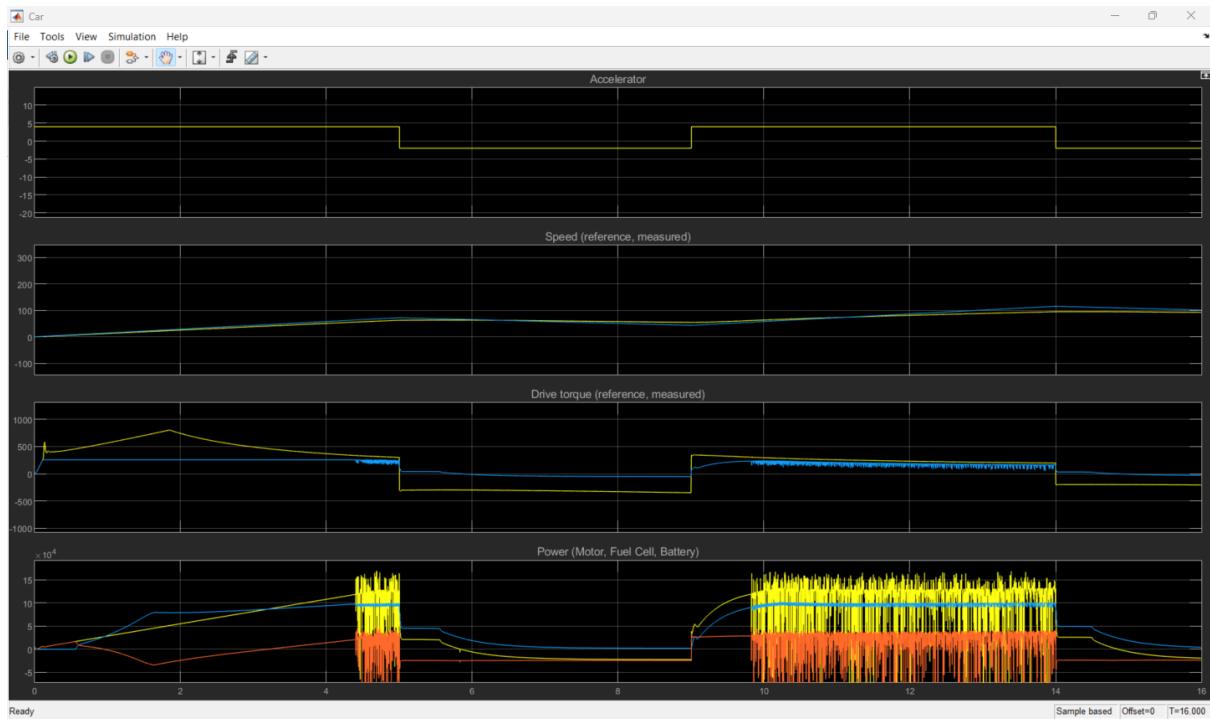


Figure 99 : Accélération, vitesse, torque et puissance pour 150 kW

Au contraire, voici la réponse pour des bornes de 100 kW, il n'y a alors plus de saturation :

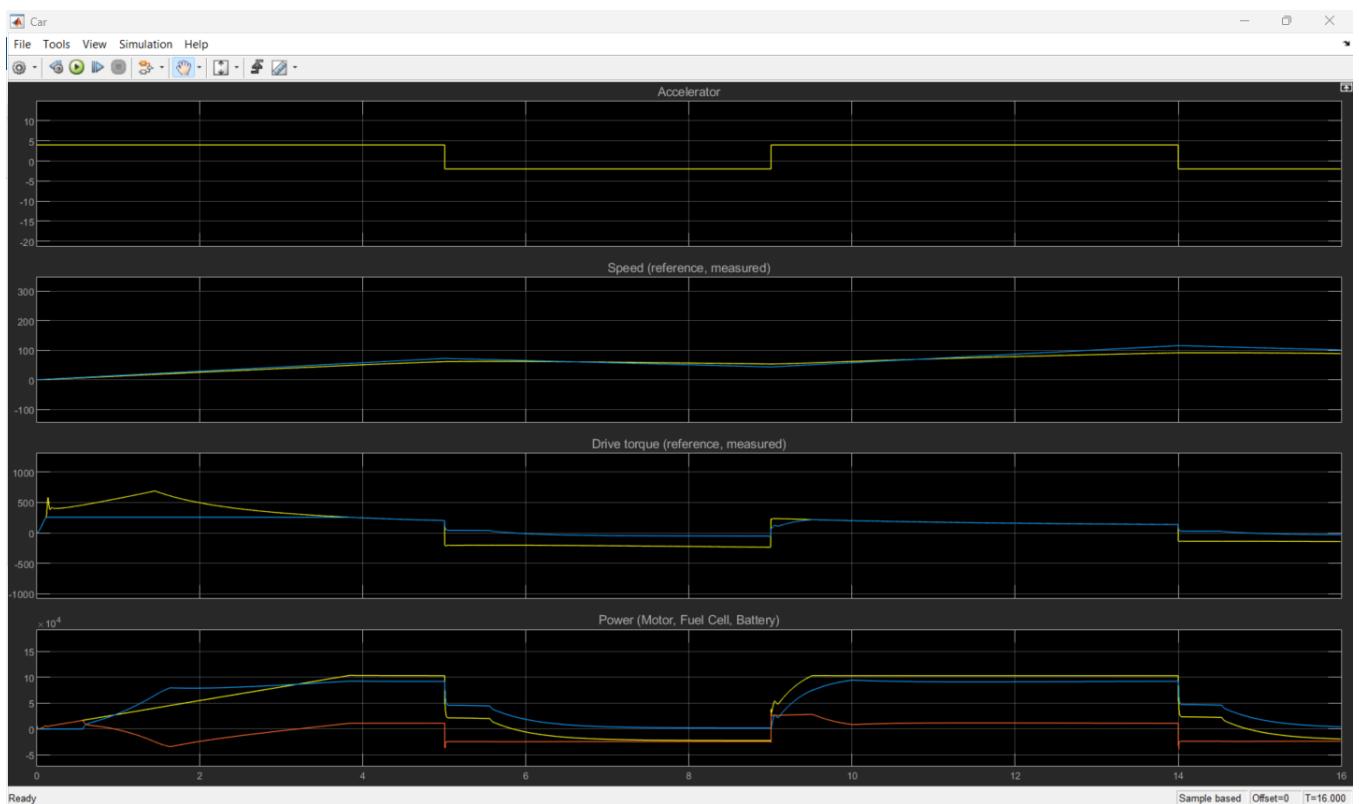
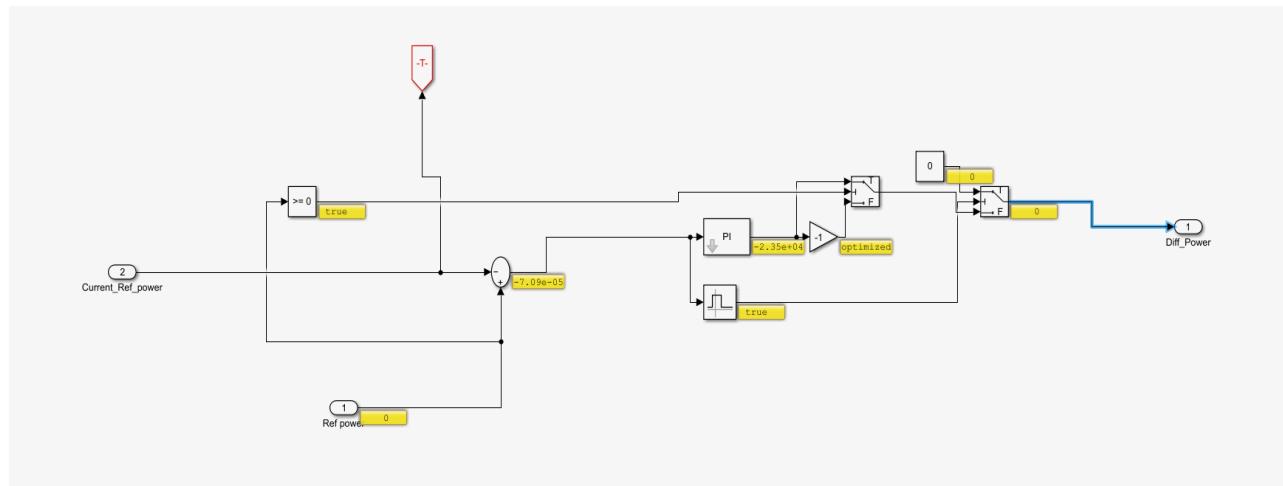


Figure 100 : Accélération, vitesse, torque et puissance pour 100 kW

Après multiples essais , le bloc d'asservissement en puissance à été légèrement modifié pour traiter les cas particuliers (vitesse nulle , décelération ...) et devient enfin :



Nous appliquons maintenant le cycle NEDC à notre véhicule et analysons les résultats obtenus.

1.1. Profil du cycle étudié.

Tout d'abord voici le profil du cycle étudié:

Ce cycle s'établit sur 1175 secondes , le profil de vitesse étant en km/h :

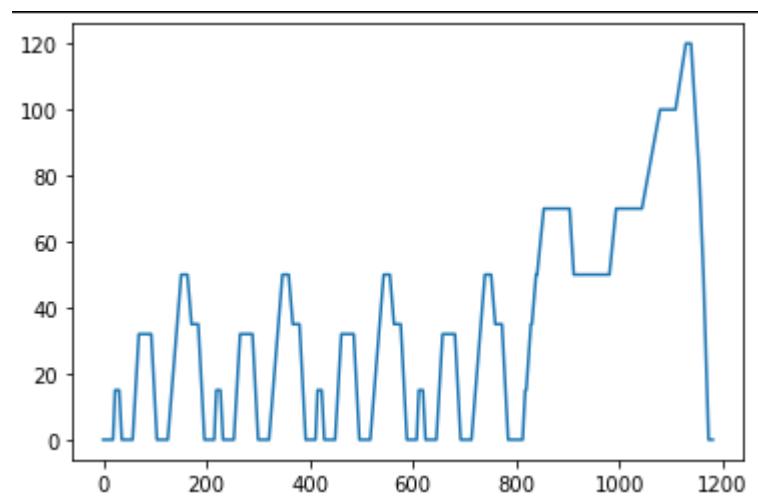


Figure 101 : Profil du cycle (vitesse en km/h)

L'accélération est alors assez faible au cours du temps :

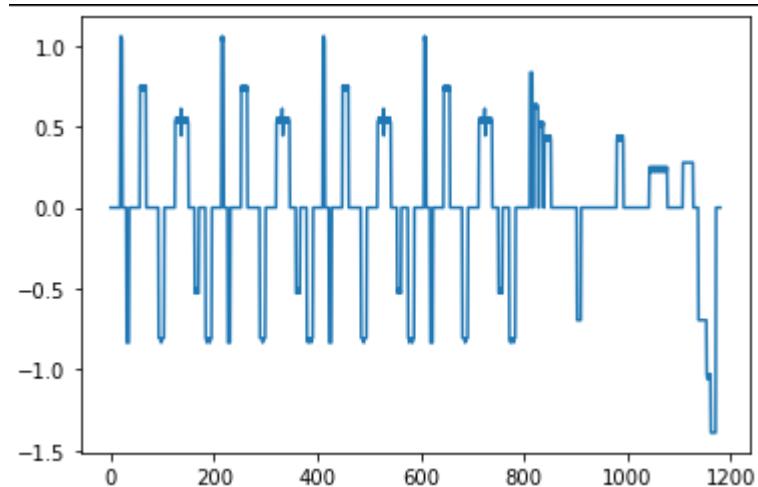
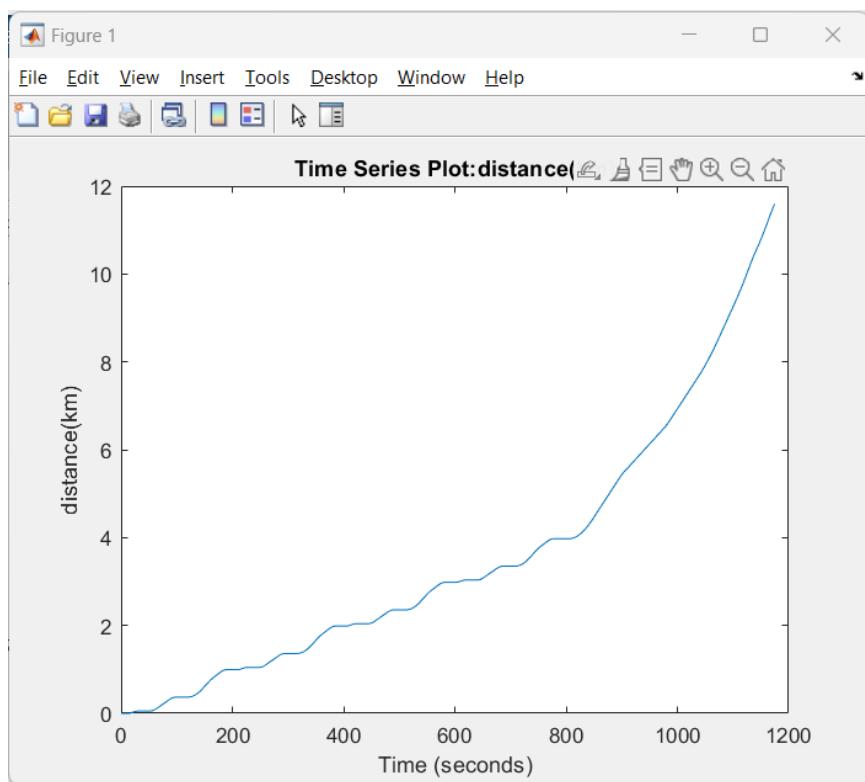


Figure 102 : Profil d'accélération du cycle

La distance totale étant de :11.6 Km (dans notre cas, voir après pourquoi)



Ainsi, c'est un cycle à faible vitesse et adaptée à la conduite en ville avec une phase d'accélération à la fin.

1.2. Résultat de l'asservissement en vitesse.

On obtient alors l'asservissement en vitesse avec les puissances respectives suivantes de chaque éléments.

Voici les puissances références et réelle de la PAC et celle de la batterie au cours du cycle

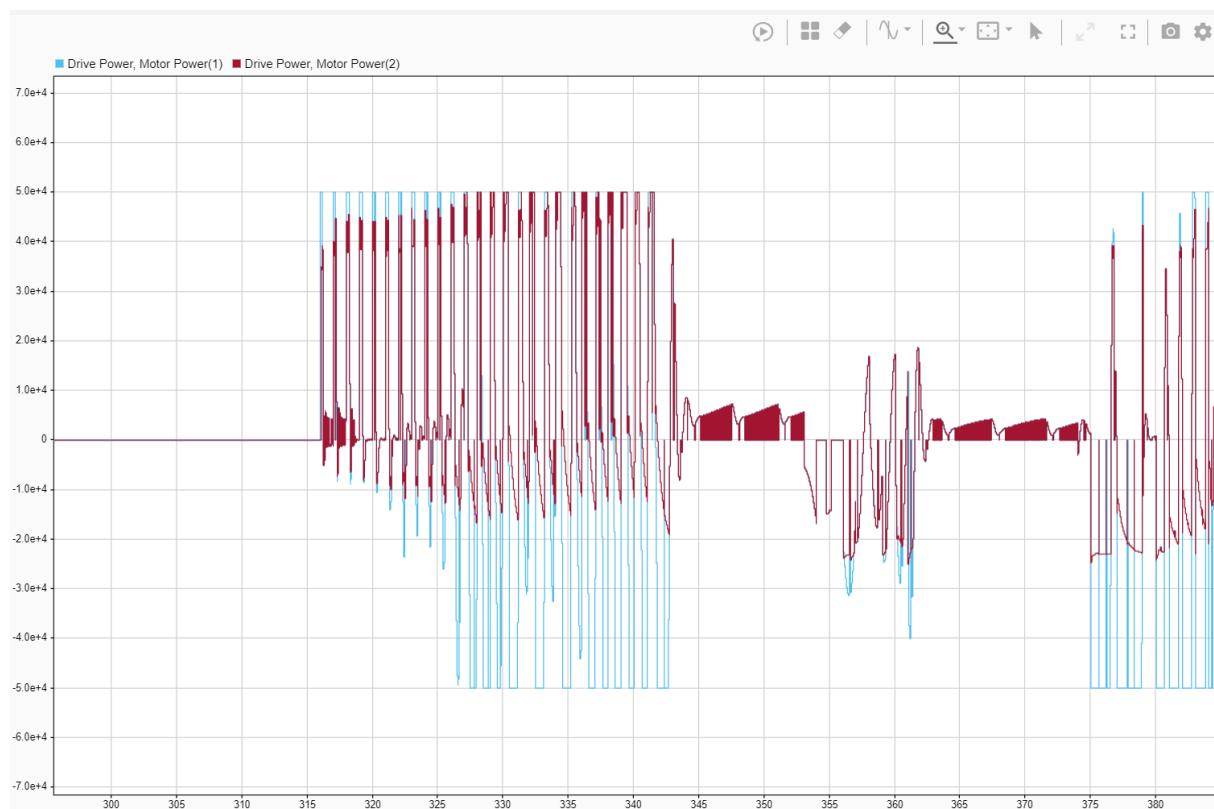


Ainsi, la batterie vient aider lors des pics de consommation et recharge lors des phases constantes.

En zoomant sur un interval et en ajoutant la puissance moteur , on voit bien la PAC qui alimente le moteur et la batterie pour la recharger :



Voici la comparaison entre puissance de référence et puissance réelle du moteur lors d'un cycle (zoomé ,extrait de 60 secondes) en ville :

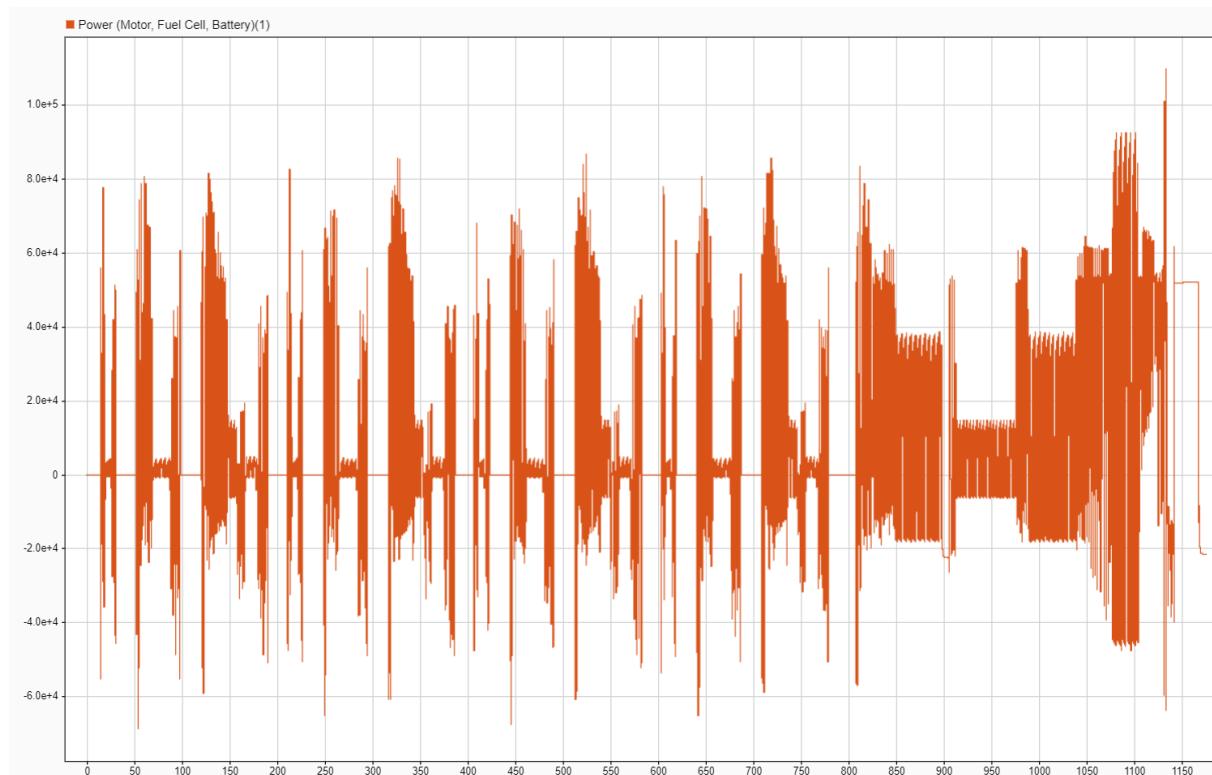


Ainsi , l'asservissement est correct lors des phases d'accélération mais moins bon lorsque le couple est négatif , ce qui montre une difficulté du système à asservir lors de décélérations.

La superposition des deux couples (référence / réel) tout au long du cycle donne:

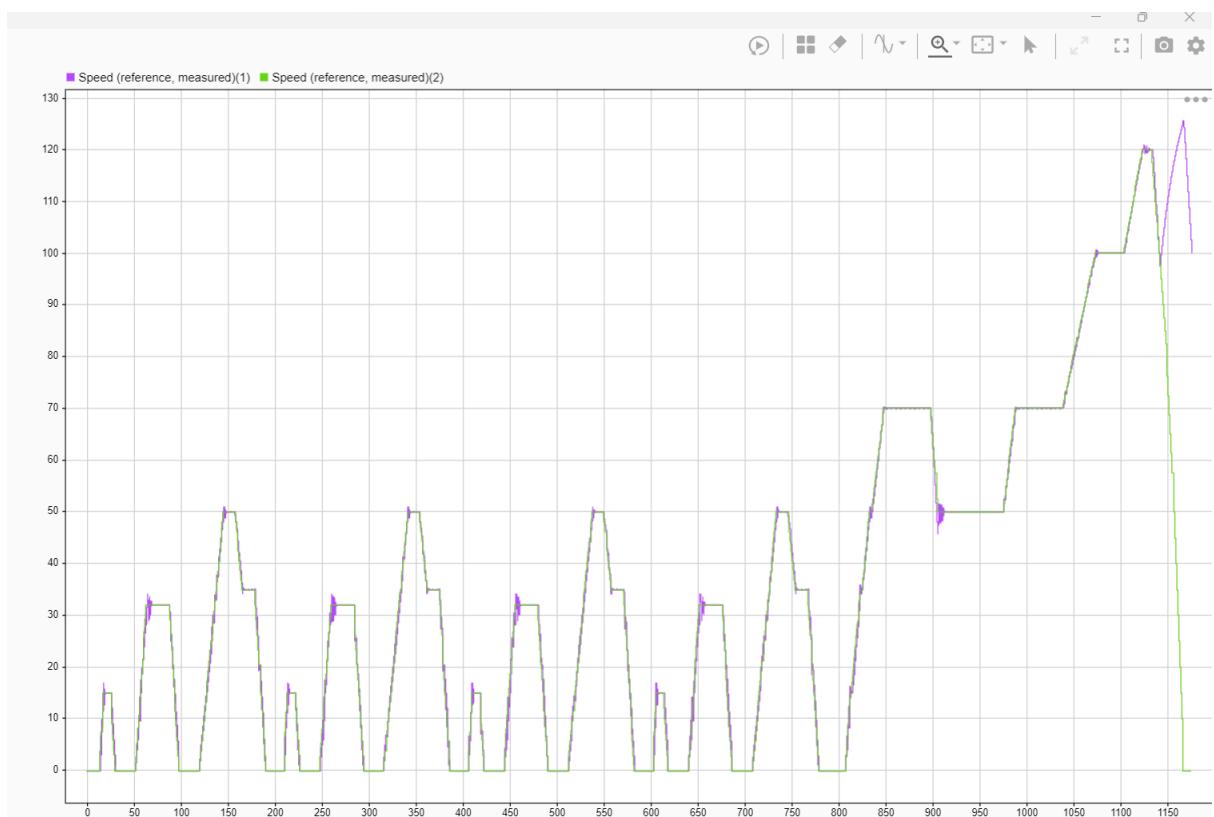


Ce qui est cohérent avec ce qui est attendu. Enfin , regardons la puissance moteur lors du cycle dans son intégralité :



Là encore, la puissance réelle concorde avec ce qui est attendu.

Voici l'asservissement en vitesse associé à la fin de la simulation :



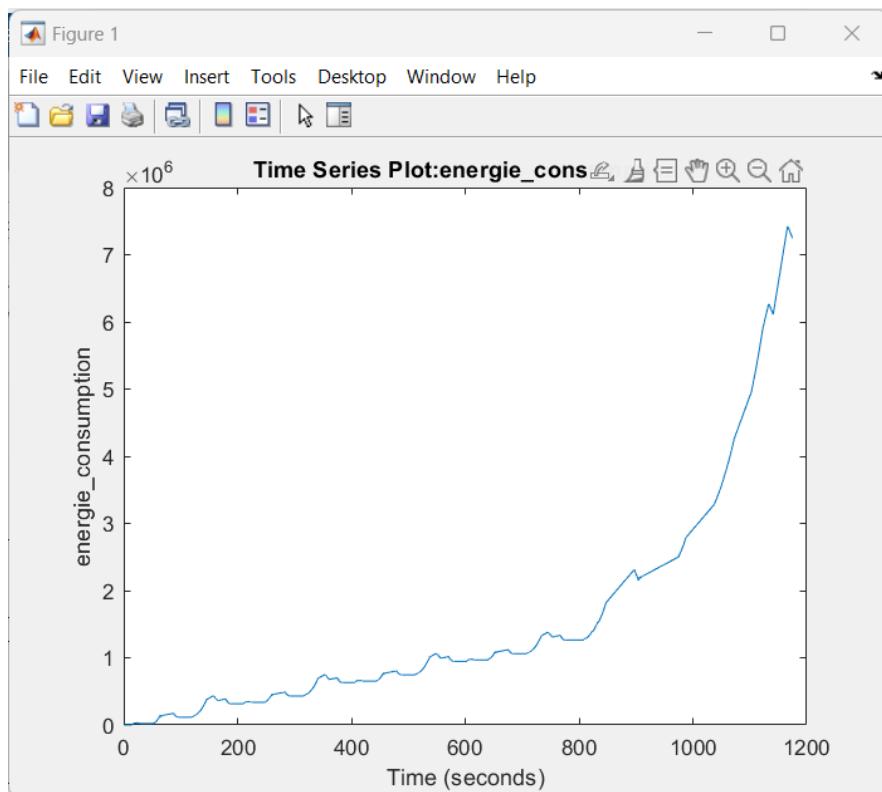
Globalement , l'asservissement est réussi et les résultats par la suite valables (vert: idéal, violet : réel) , petit problème à la fin lors de la décélération ce qui augmente légèrement la consommation et la distance sur le cycle (*plus de courbes sont disponibles sur le github*).

1.3. Résultat de la consommation en hydrogène et d'énergie.

Connaissant l'énergie consommée par la pile à combustible , il est facile de déterminer en kg puis en litre (pour 700 bar) la consommation au cours du cycle.

```
%calculate the hydrogen consumption in grams, knowing that that the energy
density of
%hydrogen is 142MJ/kg which is equal to 142,000J/g
H2_consumption = energy_FC./142000;
H2_consumption = H2_consumption /1000; % to Kg
H2_consumption = H2_consumption*(1000/42); %to L at 700 bar
```

La production d'énergie (batterie + pile à combustible) en fonction du temps est donnée ci - après :



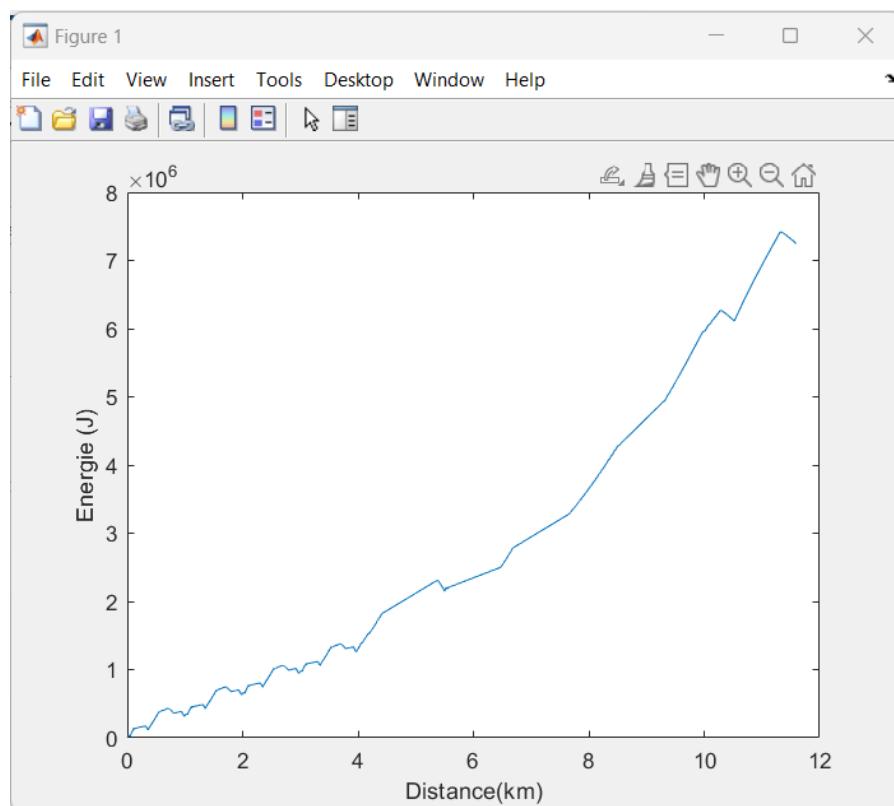
On obtient une consommation finale de 3.56 Litres d'hydrogène environ et un équivalent de 21.23 MJ à la fin du cycle , soit pour 11.6 km.

On obtient au 100 km , une consommation de 30.68 litres au 100 et un équivalent de 183 MJ au 100 Km soit un équivalent de 5.44 L/100 essence . C'est une consommation relativement faible pour un véhicule de ce poids , à titre de comparaison , la moyenne des véhicules utilitaires légers est de 9 L/100km.

Cependant, on voit bien que c'est la dernière phase d'accélération qui augmente de manière exponentielle la consommation ,puisque nous sortons de la plage de vitesse adaptée. Pour autant , le véhicule s'adapte et consomme finalement moins qu'en ville où la pile recharge également la batterie !

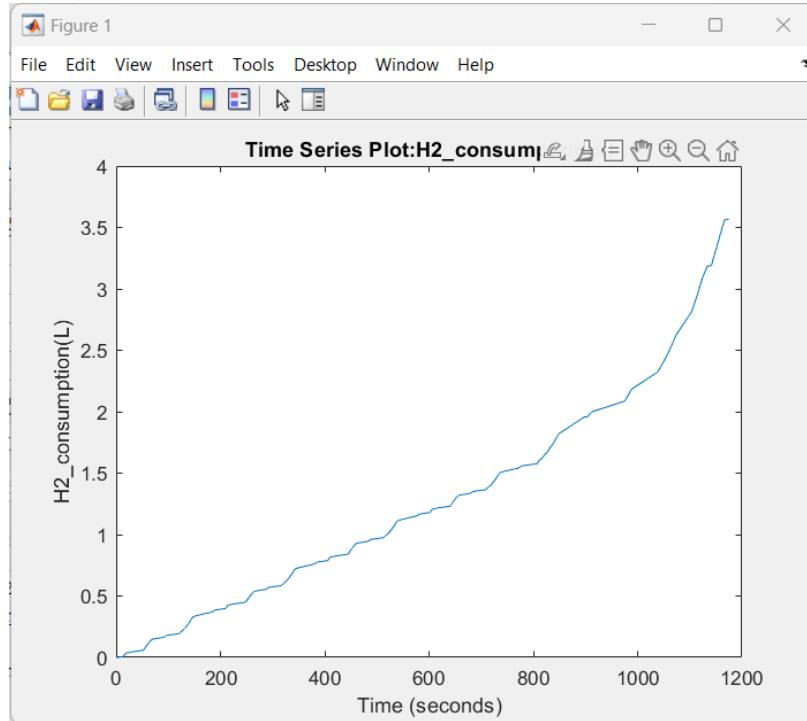
Ainsi , avant la phase d'accélération , donc en ville (temps 800 secondes) ,l'énergie consommée est de 1.75 L d'H² pour 4 Km soit 43.85 L au 100 d'où 261 MJ pour 100 km donc un équivalent essence de 7.78 L/100 ce qui est toujours en dessous de la moyenne.

Ceci se confirme par le profil énergétique produit en fonction du kilométrage :

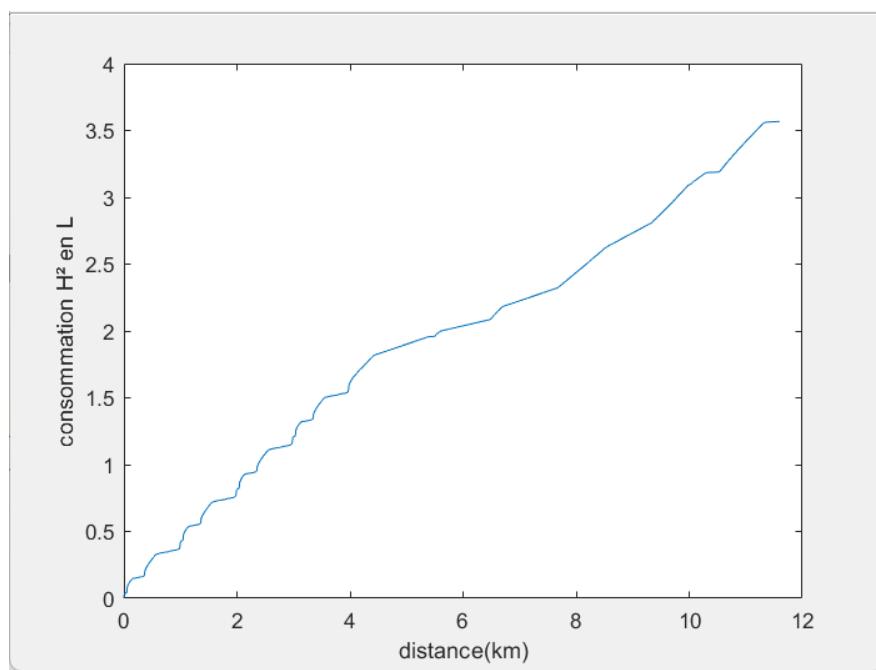


La voiture produit certe beaucoup d'énergie, cependant en regardant la consommation en hydrogène, celle-ci varie peu.

Le profil de consommation en hydrogène associé au cours du cycle est alors au cours du temps :



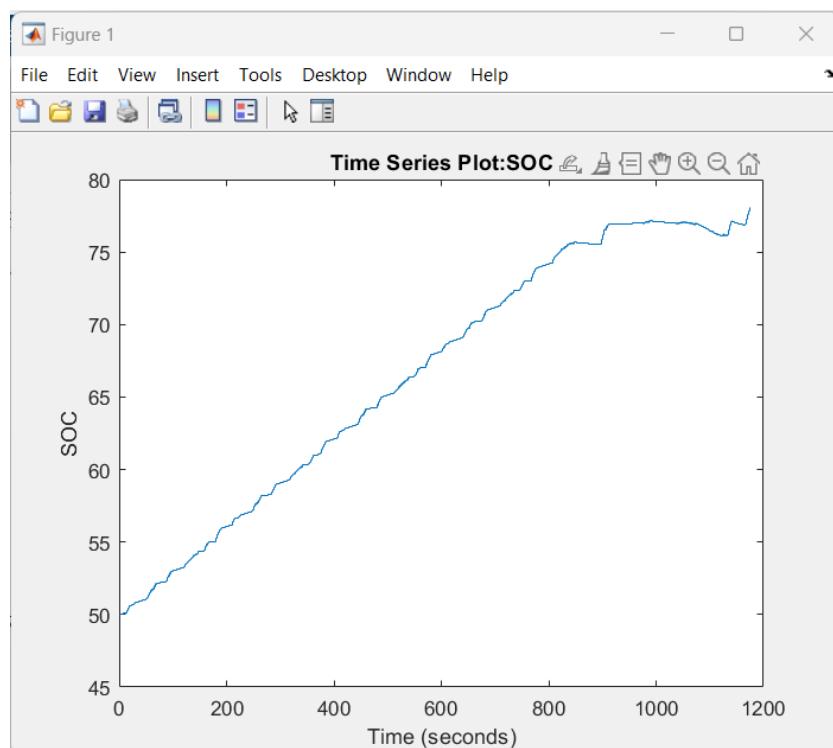
Ce qui en fonction du kilométrage donne :



On voit bien que la consommation reste relativement constante , c'est tout l'objectif de la batterie qui aspire à soit aider la PAC , soit être rechargée , mais dans tout les cas à éviter les trop grande variation de débit en hydrogène pour atteindre une efficacité maximale et également les trop grande vitesse (>110 km/h).

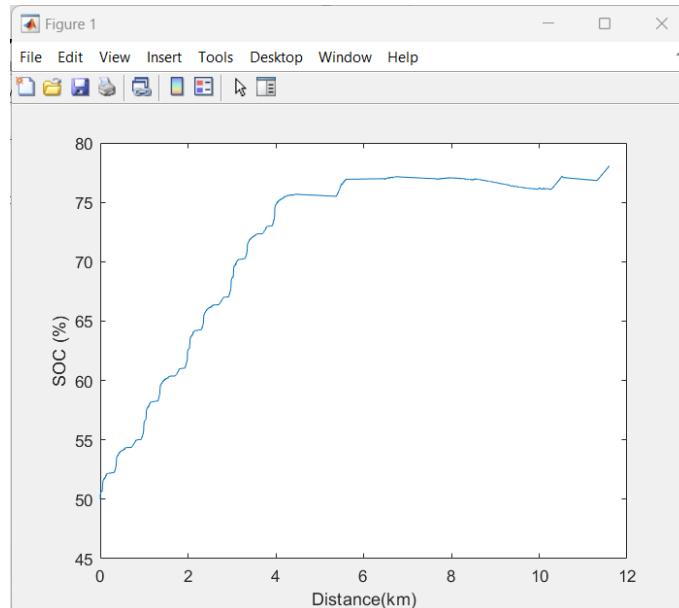
2. Évolution de l'état de charge de la batterie en fonction de la distance en km.

L'évolution de l'état de charge de la batterie au cours du temps est :



On voit bien que la batterie aide lors des phases d'accélération mais est en constante charge globalement. Ainsi , le véhicule ne tombera jamais en rade de batterie lors d'un cycle NEDC et pourra démarrer à froid sans soucis.

Ce qui en fonction du kilométrage donne :



La batterie aide alors par phase d'accélération lors d'un circuit en ville mais est continuellement rechargée, elle aide constamment lors de la phase à haute vitesse.

En conclusion , grâce à une optimisation de la consommation en hydrogène soutenue par une batterie lithium-ion nous sommes capables de minimiser l'énergie consommée , surtout en ville. Cependant le rendement est très limité lors des pointes de vitesses (> 80 km/h).

3. Sécurité et articles annexes du véhicule

3.1. Les systèmes d'aide à la conduite

Notre véhicule sera équipé d'une batterie auxiliaire de 12V comme la plupart des véhicules actuels pour alimenter les systèmes électroniques. Nous avons choisi d'ajouter des systèmes d'aides à la conduite afin de rendre notre utilitaire le plus sûr possible et d'améliorer la sécurité des utilisateurs. Parmis toutes les options disponibles aujourd'hui, nous nous sommes concentrés sur 3 systèmes :

- **L'avertisseur de sortie de voie** : grâce à une caméra placée près du rétroviseur intérieur qui détecte les marquages au sol, le conducteur est averti lors d'un changement de voie sans clignotant. Ce système permet de rendre la conduite plus sûre en évitant les collisions dues à une faute d'inattention du conducteur. L'installation de ce système sur un véhicule compatible qui ne le possède pas de série coûte en moyenne quelques centaines d'euros en garage ou concessionnaire.

- **Le régulateur de vitesse adaptatif** : ce système permet non seulement de maintenir une vitesse de croisière constante mais également de calculer et conserver une distance de sécurité avec le véhicule précédent. Ce système repose sur un radar ou un laser placé à l'avant du véhicule. Il peut être utilisé à partir de 30 km/h, ce qui le rend pertinent pour notre véhicule de livraison en ville. Ce système permet également de freiner le véhicule mais n'est pas entièrement suffisant pour réaliser un éventuel freinage d'urgence. C'est pourquoi nous avons choisi d'ajouter un système de freinage d'urgence automatique. Ce système très perfectionné technologiquement est assez cher, il faut compter entre 1200 et 2000 euros pour l'intégrer sur un véhicule.

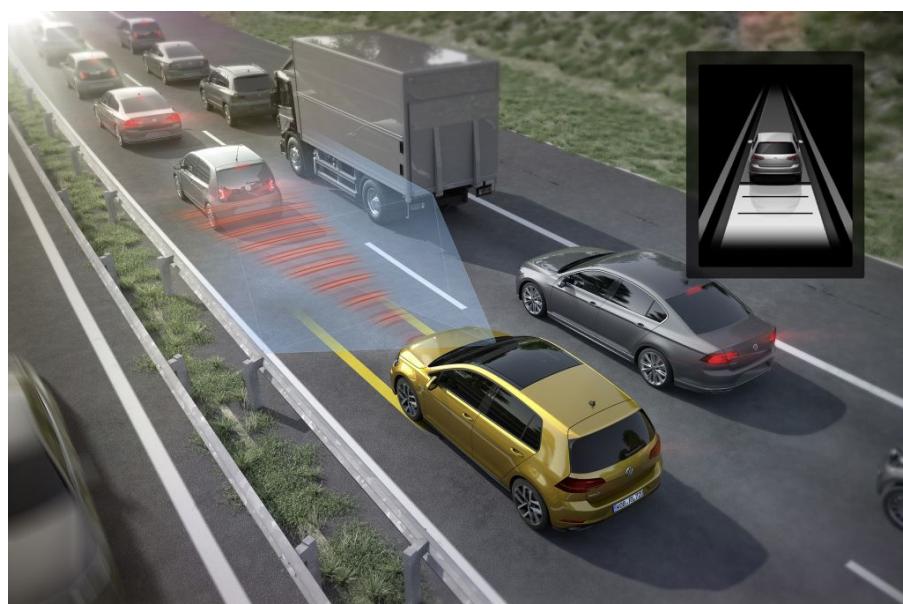


Figure : représentation du système de régulation dynamique de la vitesse

- **Le système de freinage d'urgence autonome** : il se base sur le même radar que le régulateur de vitesse, mais c'est au niveau du calculateur que tout se joue. Les nouvelles technologies que nous avons choisi d'intégrer à notre véhicule permettent un contrôle dynamique du frein, ce qui permet d'augmenter la sécurité et éviter les collisions dues à un freinage trop brutal. Nous avons également choisi d'améliorer encore ce système grâce à la caméra déjà présente pour l'avertisseur de sortie de voie. En effet, celle-ci sera également utilisée pour détecter les piétons qui représentent un danger conséquent lors des déplacements urbains que notre véhicule sera amené à réaliser (ceux-ci ne sont pas détectables par le radar qui ne capte que le véhicule précédent ou les gros obstacles). Cela permettra de réduire considérablement les accidents car selon l'organisme américain de sécurité routière, le NHTSA, ¾ des collisions en ville sont causées par un freinage tardif.

Ainsi, d'après le règlement CEE-ONU de juillet 2020, ce système permet dans le cas d'un freinage voiture-voiture un impact avec une vitesse de 35km/h pour une vitesse initiale de 60 km/h et le freinage se déclenche entre 10 et 60 km/h et dans le cas d'un freinage voiture-piéton un impact avec une vitesse de 45 km/h pour une vitesse initiale de 60km/h et le freinage se déclenche entre 20 et 60 km/h.

3.2. Les réservoirs d'hydrogène

Les véhicules à hydrogène sont souvent considérés comme dangereux, à risque d'explosion car l'hydrogène est stocké à des pressions très élevées dans les réservoirs (700 bars). Il est donc nécessaire de porter une attention particulière à ce point pour que les consommateurs ne soient pas réticents à l'achat.

Le premier élément de sécurité présent sur les réservoirs à hydrogène est un capteur de pression qui va détecter toute anomalie dans le réservoir pour en avertir le conducteur et/ou régler le souci. De plus, les réservoirs choisis sont testés dans des conditions extrêmes afin de garantir une sécurité maximale. Ils possèdent plusieurs épaisseurs de matériaux renforcés.



Figure : capteurs de pression

Puisque les plages d'inflammation et de détonation sont particulièrement vastes avec l'hydrogène, les moyens maximums sont pris pour empêcher les fuites, y compris en cas d'accident du véhicule. C'est l'objectif numéro 1 des constructeurs en matière de sécurité des véhicules fonctionnant avec ce produit. Il leur faut cependant envisager une libération accidentelle ou volontaire (en cas d'incendie du véhicule) du gaz qui doit pouvoir s'échapper de l'engin sans créer de dégâts supplémentaires. C'est pour cela que les réservoirs sont équipés de soupapes de sécurité, de multiples vannes et d'un système de ventilation qui dirige le gaz à l'extérieur du véhicule en cas d'accident.

Conclusions

Les véhicules consomment une grande quantité d'énergie, ce qui peut entraîner une augmentation de la pollution de l'air et de l'effet de serre. La réduction de la consommation d'énergie peut aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre et les autres types de pollution, ce qui est bénéfique pour l'environnement.

Les véhicules consomment également une grande quantité d'essence ou d'énergie électrique, ce qui peut entraîner des coûts importants pour les propriétaires de véhicules. La réduction de la consommation d'énergie peut aider à réduire les coûts d'utilisation des véhicules, ce qui est bénéfique pour les propriétaires de véhicules.

En plus, les véhicules consomment une grande quantité d'énergie produite par des sources de combustibles fossiles telles que le pétrole. La réduction de la consommation d'énergie peut aider à réduire la dépendance envers ces sources d'énergie, ce qui est bénéfique pour la sécurité énergétique et la stabilité économique.

Finalement, la quantité d'énergie consommée par une voiture peut entraîner une usure accélérée des composants du moteur et d'autres composants du véhicule. La réduction de la consommation d'énergie peut aider à prolonger la durée de vie du véhicule, ce qui est bénéfique pour les propriétaires de véhicules.

Les véhicules à hydrogène présentent plusieurs avantages qui justifient leur importance pour l'avenir :

- Zéro émission : Les véhicules à hydrogène ne rejettent que de l'eau, ce qui les rend exempts de tout type de pollution atmosphérique. Cela peut aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre et les autres types de pollution qui peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement et la santé.
- Indépendance énergétique : L'hydrogène peut être produit à partir de différentes sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire, éolienne et géothermique, ce qui peut aider à réduire la dépendance envers les sources de combustibles fossiles telles que le pétrole.
- Autonomie : Les véhicules à hydrogène peuvent parcourir de longues distances sans recharger, ce qui les rend plus pratiques pour les conducteurs que les véhicules électriques qui nécessitent une recharge fréquente.
- Réduction des coûts : Les coûts associés à la production d'hydrogène sont en baisse, ce qui peut rendre les véhicules à hydrogène plus abordables pour les consommateurs.

Cependant, le développement et la mise en place d'infrastructures de distribution d'hydrogène restent un défi majeur pour le développement des véhicules à hydrogène. De plus, la production d'hydrogène peut encore être coûteuse et peut impliquer des émissions de gaz à effet de serre si elle est produite à partir de sources d'énergie non renouvelables.

En conclusion, les véhicules à hydrogène présentent des avantages en termes de zéro émission, d'indépendance énergétique, d'autonomie et de réduction des coûts, ce qui en fait un avenir prometteur pour le secteur automobile. Cependant, le développement d'infrastructures fiables et écologiques pour la production et la distribution d'hydrogène reste un défi important à relever mais c'est un domaine en proie à l'innovation en ce moment comme l'alliance de Stellantis à Engie pour fournir de l'hydrogène à ces clients ou le premier train à hydrogène qui est en expérimentation.

- Concernant notre modèle , nous avons opté pour un dimensionnement modeste qui ne permettra pas au véhicule de faire de longue distance à grande vitesse.

- Avec un moteur de 130 kw , une batterie de 25 kw et une PAC de 100 kw au maximum des performances, le véhicule peut tout de même atteindre les 130 km/h et fonctionne de manière optimale dans les plages de vitesse entre 20 et 100 km/h.
- L'avantage des véhicules à propulsion électrique étant également une accélération honorable de 0 à 90 km/h en 6 secondes.
- Sa consommation est optimisée par une batterie qui aide alors la PAC lorsque celle-ci ne peut pas changer sa production de puissance dans l'intervalle de temps qu'on lui impose (phase d'accélération) mais sert également pour éviter les surconsommations lors des vitesses faibles (< 20 km/h) .
- Nous avons vu qu'en revanche , la consommation en H² étant maintenue constante, rouler en ville consomme plus que rouler à des vitesses constantes plus élevées.
- Enfin , un tel choix s'explique également pour le prix , choisir un moteur plus puissant ainsi qu'une batterie plus puissante peut s'avérer coûteux. Le prix d'une PAC étant aujourd'hui excessif , il convient de limiter les coûts sur d'autres aspects.

Il aurait été souhaitable de faire une étude en côte et une étude complètement chargé , mais le temps d'une simulation étant relativement long , cela sera gardé pour la présentation finale.

La simulation est recevable comme on l'a montré.

Non chargé , hors pente on obtient selon le cycle NEDC :

Une consommation en H² de 30.68 litres au 100 et un équivalent de 5.44 L/100 essence.

En ville :

7.78 L/100 km essence soit 43.85 L/100 km d'hydrogène sous 700 bar.

Sachant notre réservoir de 125 L, on obtient alors dans le cadre du cycle NEDC , une autonomie de 407 km , ce qui est conforme au cahier des charges.

Bibliographie

- [1] Caradisiac.com, « Classement des constructeurs : la donne a changé », Caradisiac.com.
<https://www.caradisiac.com/classement-des-constructeurs-la-donne-a-change-194901.htm> (consulté le 22 janvier 2023).
- [2] R. Baut, « Fin des voitures thermiques en 2035 : ce que les constructeurs ont obtenu pour polluer plus », Numerama, 28 octobre 2022.
<https://www.numerama.com/vroom/1165282-fin-des-voitures-thermiques-en-2035-ce-que-les-constructeurs-ont-obtenu-pour-polluer-plus.html> (consulté le 22 janvier 2023).
- [3] « Liste d'automobiles hybrides électriques », Wikipédia. 7 novembre 2022. Consulté le: 22 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur:
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Liste_d%27automobiles_hybrides_%C3%A9lectriques&oldid=198461631
- [4] « Top 10 des meilleures voitures hybrides en 2022 », Vroomly.
<https://www.vroomly.com/blog/top-10-des-meilleures-voitures-hybrides/> (consulté le 22 janvier 2023).
- [5] A.-C. Laugier, « Top 10 des meilleures voitures hybrides rechargeables 2022/2023 », Blog Vivacar.fr, 5 août 2022. <https://blog.vivacar.fr/meilleure-voiture-hybride/> (consulté le 22 janvier 2023).
- [6] « Ventes voitures neuves. Le top 20 des hybrides en 2022 ».
<https://www.largus.fr/actualite-automobile/ventes-voitures-neuves-le-top-20-des-hybrides-en-2022-30001731.html> (consulté le 22 janvier 2023).
- [7] « Voitures hybrides et hybrides rechargeables 2023 : modèles, prix, autonomie », Auto moto : magazine auto et moto, 4 janvier 2023.
<https://www.auto-moto.com/green/voitures-hybrides-rechargeables-modeles-marche-prix-autonomie-audi-bmw-lexus-mercedes-peugeot-porsche-toyota-volvo-76932.html> (consulté le 22 janvier 2023).
- [8] «How Much Does It Cost To Manufacture A Car» Replicarclub magazine, janvier 2023. <https://www.replicarclub.com/how-much-does-it-cost-to-manufacture-a-car/>
- [9] «Qui sont les utilisateurs de véhicules utilitaires ?» Laurent HORWITZ, Véhicules utilitaires France, Roubaix, France. 2011
<https://www.vehicule-utilitaires.fr/utilisateurs-vehicules-utilitaires/#:~:text=Parmi%20ces%20entreprises%2C%20on%20peut,extractives%20repr%C3%A9sentent%2011%25%20du%20total>
- [10] “Pourquoi l’hydrogène est émetteur de CO2 ?”, Didier DALMAZZONE, Polytechnique insights, Juillet 2021
[https://www.polytechnique-insights.com/dossiers/energie/lhydrogene-vert-doit-encore-faire-ses-preuves/pourquoi-lhydrogene-est-emetteur-de-co2/#:~:text=Pour%20chaque%20tonne%20d'hydrog%C3%A8ne,d%C3%A9cisif%20en%20mat%C3%A8re%20de%20co%C3%BBts.](https://www.polytechnique-insights.com/dossiers/energie/lhydrogene-vert-doit-encore-faire-ses-preuves/pourquoi-lhydrogene-est-emetteur-de-co2/#:~:text=Pour%20chaque%20tonne%20d'hydrog%C3%A8ne,d%C3%A9cisif%20en%20mat%C3%A8re%20de%20co%C3%BBts)
- [11] “Rapport plan de déploiement de l’hydrogène pour la transition écologique”
<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Rapport%20H2%20MTES%20CEA%200106.pdf>
- [12] “Production de l’hydrogène”,
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/production-de-lhydrogene>
- [13] “Stockage et transport de l’hydrogène”
<https://leonard.vinci.com/transport-et-stockage-dhydrogene/>

- [14] "Fuel Cell Price to Drop 70-80% as Production Volume Scales"
https://blog.ballard.com/fuel-cell-price-drop?fbclid=IwAR0Yxzk9MadaHJkrZJ4YhXv0XSNDGeRWW_QY51yPM2K4SwMVKVvYhxQlvQ
- [15] "Mobilité hydrogène pour les poids lourds"
<https://www.airliquide.com/fr/histoires/hydrogene/mobilite-hydrogene-pour-les-poids-lourds-air-liquide-et-faurecia-collaborent-sur-la-solution-liquide>
- [16] Incitations fiscales pour les véhicules hybrides
<https://www.avere-france.org/incitations-fiscales/>
- [17] J. Bell, « Design and Control of a Hydrogen Fuel Cell Vehicle », UC Irvine, 2016. Consulté le: 5 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://escholarship.org/uc/item/5jg115q0>
- [18] K. Song, Y. Wang, C. An, X. Hongjie, et Y. Ding, « Design and Validation of Energy Management Strategy for Extended-Range Fuel Cell Electric Vehicle Using Bond Graph Method », Energies, vol. 14, p. 380, janv. 2021, doi: 10.3390/en14020380.
- [19] « Fonctionnement de la voiture à hydrogène (pile à combustible) ». <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1563-voiture-a-hydrogene-fonctionnement.php> (consulté le 5 février 2023).
- [20] « Pile à combustible », Wikipédia. 1 janvier 2023. Consulté le: 5 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Pile_%C3%A0_combustible&oldid=200044853
- [21] « Pile à combustible: fonctionnement, avantages et inconvénients ». <https://www.h2-mobile.fr/dossiers/pile-combustible-fonctionnement-avantages-inconvenients/> (consulté le 5 février 2023).