



Projet P2PROPULS

Transport ferroviaire de fret entre Marseille et Rotterdam

Auteurs :

Théophile BRUN
Julien CHANAL
Martin LEGRAND
Maxime LEON-MIR
Elouan MADIC
Arthur SAVINO
Mathis TURQUET
Maxime VITTOZ

Encadrants :

Georges SALAMEH
Matisse LESAGE

Table des matières

1	Présentation du projet et hypothèses	1
1.1	Solutions de propulsion étudiées	1
1.2	Caractéristiques du trajet	1
1.3	Caractéristiques du convoi à tracter	3
2	Analyse d'un trajet existant entre Marseille et Rotterdam	5
2.1	Bilan carbone du trajet existant	5
2.2	Coût financier du trajet existant	5
3	Etude des différentes technologies proposées	8
3.1	Diesel et biocarburant	8
3.1.1	Diesel et bioéthanol	8
3.1.2	Hybridation diesel-batteries	14
3.2	Batteries	16
3.2.1	Hypothèses de calculs	16
3.2.1.1	Coût	17
3.2.1.2	Émissions de gaz à effet de serre	17
3.2.2	Technologie Lithium-titanium-oxyde (LTO)	18
3.2.3	Technologie Li-ion	20
3.2.4	Comparaison	22
3.3	Hybridation hydrogène	24
3.3.1	Stratégie d'hybridation	24
3.3.1.1	Stratégie globale	24
3.3.1.2	Dimensionnement de la batterie	24
3.3.1.3	Dimensionnement de la pile à combustible	25
3.3.2	Simulation GT-Power	26
3.3.2.1	Hypothèses	26
3.3.2.2	Simulations	27
3.3.3	Émissions, coût et recharge	29
3.3.3.1	Dimensionnement du réservoir d'hydrogène	29
3.3.3.2	Coût	29
3.3.3.3	Émissions carbone	30
4	Synthèse des résultats	31
4.1	Diesel	31
4.2	Batteries	31
4.3	Hybridation hydrogène	32
4.4	Résultats	33

Chapitre 1

Présentation du projet et hypothèses

L'objectif de ce projet est de faire une analyse sur la décarbonation du transport de fret entre deux villes identifiées (Marseille et Rotterdam) en comparant 4 moyens de transport différents : ferroviaire, routier, fluvial et maritime. Dans ce rapport, nous traiterons du transport ferroviaire de fret. La quantité de fret à transporter est de 2833 tonnes, ce qui correspond à 100 conteneurs EVP (équivalent vingt pieds). Les dimensions d'un conteneur EVP sont les suivantes [1] :

Caractéristiques des conteneurs EVP	
Masse à vide (kg)	2 150
Masse charge utile (kg)	28 330
Volume (m^3)	33
Longueur (m)	6.1
Largeur (m)	2.44
Hauteur (m)	2.59

FIGURE 1.1 – Tableau récapitulatif des caractéristiques d'un conteneur EVP

Le réseau ferroviaire est assez développé en France et en Europe et une partie importante des voies est électrifiée. Il serait donc possible de n'emprunter que des voies électrifiées pour réduire les émissions du transport. Cependant, dans le cadre de ce projet, nous considérerons que les voies ne peuvent être électrifiées à plus de 30%.

1.1 Solutions de propulsion étudiées

Pour essayer de réduire l'empreinte carbone, le prix et la durée du trajet, nous allons étudier différentes technologies pour la propulsion du train. Nous allons étudier différentes sources d'énergie pour la propulsion : le diesel, l'électricité (sur batteries) et une hybridation entre hydrogène et batteries. Il s'agira ensuite de trouver le meilleur compromis entre les variables d'intérêts qui sont le coût, les émissions et le temps de trajet.

Pour pouvoir établir un comparatif entre ces différentes technologies de propulsion, il nous faut poser un cadre pour le convoi à tracter par la locomotive ainsi que fixer un trajet de référence.

1.2 Caractéristiques du trajet

Le départ du trajet se fait au niveau du port de Marseille pour arriver à la zone de triage du port de Rotterdam. Pour trouver le meilleur itinéraire à suivre, nous utilisons les corridors de fret donnés par SNCF réseau illustrés sur la carte suivante [2] :

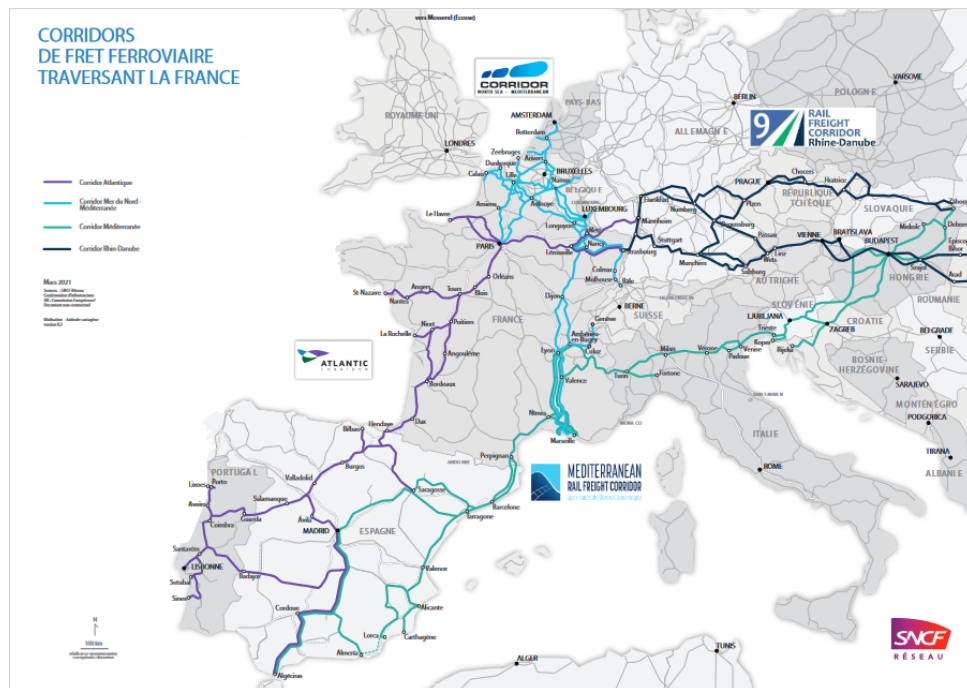


FIGURE 1.2 – Carte des corridors de fret en Europe de l'Ouest

Dans un but d'optimisation, nous avons pris en compte plusieurs critères pour choisir le trajet à suivre. Tout d'abord, nous avons essayé de choisir le trajet le plus court en distance pour aller de Marseille à Rotterdam. De plus, nous avons pris en compte les vitesses maximales de chaque voie ferrée pour ne pas perturber le trafic de passager. En effet, les trains de fret ont une vitesse maximale d'environ 100 km/h. Il faut donc choisir des voies ferrées dont la vitesse maximale est proche de celle des trains de fret pour ne pas trop perturber les autres trains.

Pour connaître toutes les caractéristiques de chaque ligne, nous avons utilisé le site openrailwaymap [3]. Ce site nous a aussi permis d'établir la carte suivante qui résume le trajet que nous allons emprunter :

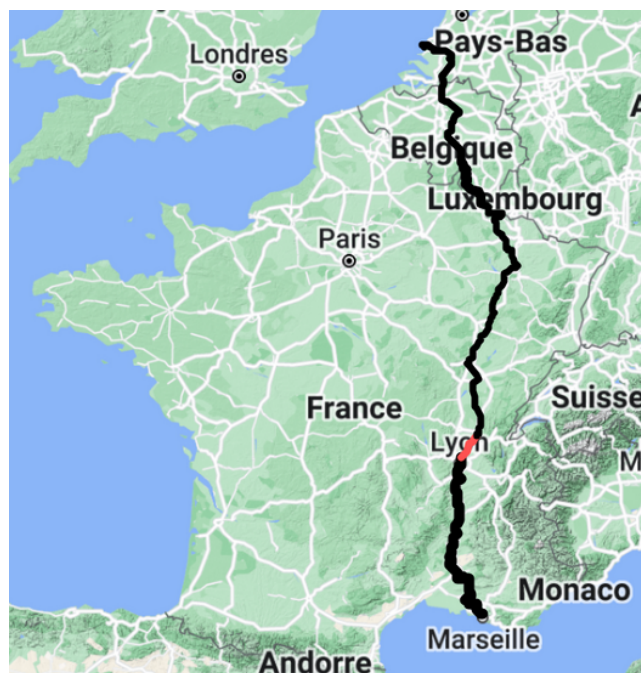


FIGURE 1.3 – Trajet choisi pour faire Marseille-Rotterdam

Le trajet choisi utilise le corridor Mer du Nord - Méditerranée. Sa longueur totale est de 1315 km dont seulement 3.6 % n'est pas électrifiée (part non électrifiée visible en rouge sur la carte 1.3). On peut aussi noter que tout le long du trajet, l'écartement des rails est de 1435 mm. Il n'est alors pas nécessaire de changer de train.

1.3 Caractéristiques du convoi à tracter

Dans cette partie, nous allons fixer les dimensions et caractéristiques du convoi : nombre de wagons, nombre de conteneurs, longueur etc.

Pour ce trajet, la législation impose une longueur maximale pour le convoi de 750m en France [4] et de 650m en Belgique [5] et aux Pays Bas [6]. Si on se réserve 50m pour une voire deux locomotives (longueur moyenne d'une locomotive de fret de 15m), il nous reste 600m pour mettre des wagons pour transporter les conteneurs. Pour pouvoir complètement fixé le problème, il faut se fixer un wagon sur lesquels nous allons transporter les conteneurs (appelé wagon plat) et dont nous connaissons les caractéristiques (masse, longueur etc.). Pour cela, il existe de nombreux types de wagons plats différents allant du double essieux à 4 essieux voire plus. Un document économique [7] nous permet de déterminer le prix d'un wagon en fonction de son nombre d'essieux :

	Wagon 2 essieux	Wagon 4 essieux
Nombre de conteneurs par wagon (en longueur)	1	2
Charge utile maximale par wagon (kg)	20 000	66 000
Prix du wagon à la location pour faire 1315 km (€)	5174	7391

TABLE 1.1 – Tableau comparatif du coût de wagon plat avec 2 et 4 essieux

Étant donné que l'on peut mettre deux conteneurs sur le wagon quatre essieux, il est plus rentable économiquement de prendre celui-ci. En effet, le coût par conteneur est donc d'environ 3700€, ce qui réduit les coûts en comparaison avec un wagon double essieux. Nous choisissons donc d'utiliser des wagons quatre essieux et nous prenons comme référence le wagon 48' container flat wagon Sgmmns de la marque Wascosa. Les caractéristiques de ce wagon [8] sont données ci dessous :

Longueur (m)	Masse à vide (tonnes)	Charge utile (tonnes)
15.98	16	66

TABLE 1.2 – Caractéristiques d'un wagon 48' container flat wagon Sgmmns type C

Nous pouvons maintenant déterminer le nombre de wagons que nous pouvons emporter : $\frac{600}{15.98} = 37.5$ soit un maximum de 37 wagon de ce type. Ainsi, il est impossible de mettre 50 wagons pour transporter les 100 conteneurs en un seul convoi. Nous allons donc faire au minimum deux convois. Nous choisissons de faire que deux convois et pas plus pour minimiser les coûts de revenu total. Chacun de ces convois n'aura que 25 wagons pour mieux répartir le nombre de conteneurs et donc la masse entre chaque convoi.

Pour finir de fixer les caractéristiques du convoi, il nous faut déterminer la locomotive qui va tracter le convoi. Nous allons donc calculer la puissance nécessaire pour faire avancer ce convoi sachant que la vitesse maximale autorisée pour le fret est de 100 km/h. Nous choisissons de fixer la vitesse du convoi à 70 km/h. Cette vitesse peut sembler faible mais il faut prendre en compte qu'un TER français circule en moyenne à 83 km/h [9], de ce point de vue cette hypothèse semble alors raisonnable. Prendre une vitesse de 30 km/h en dessous de la limitation permet aussi de limiter la puissance nécessaire et surtout cela limite la consommation énergétique. Pour finir, il nous faut fixer un modèle de locomotive. Nous prendrons, comme référence de locomotive la BB60000 qui est la plus utilisée pour le transport de fret aujourd'hui.

Pour calculer la puissance nous allons prendre en compte la résistance à l'avancement du train.

La loi générale pour la résistance à l'avancement d'un train est la suivante [10] :

- Pour la locomotive : $RAV_{loco} = 6,5M_s + 130N_e + 0,1M_sV + 0,3V^2$
 - Pour les wagons : $RAV_{wagon} = 12M_s + 0,09M_sV + 0,0044V^2$
- où M_s est la masse en tonnes, N_e le nombre d'essieux, et V la vitesse en km/h

Pour notre train, nous prendrons une masse totale pour les wagons de 1924 tonnes et une masse par locomotive de 76 tonnes. Le nombre d'essieux sur la BB60000 est de 4 et la vitesse maximale est de 70 km/h.

Pour le convoi sans locomotive, nous trouvons une puissance de 1,49 MW en continu et avec les locomotives une puissance totale de 1,57MW. Ce chiffre nous permet de justifier le choix des locomotives BB60000 qui développent 860kW de puissance continu. Ainsi avec deux locomotives par convoi, nous pouvons satisfaire les besoins de puissance.

Pour résumé cette partie, nous proposons un tableau récapitulatif ci dessous :

Longueur du convoi	430 m
Masse du convoi	2076 t
Vitesse du convoi	70 km/h
Distance à parcourir	1315 km
Temps de trajet	18 h 47 min
Nombre de wagons	25
Nombre de locomotives	2
Puissance nécessaire en continu	1.57 MW
Energie nécessaire pour le trajet	29.5 MWh

TABLE 1.3 – Récapitulatif des caractéristiques du convoi

Chapitre 2

Analyse d'un trajet existant entre Marseille et Rotterdam

2.1 Bilan carbone du trajet existant

Pour calculer le bilan carbone d'un trajet, nous allons nous affranchir du coût environnemental de la production des locomotives et des wagons car cette donnée est commune à tous les moyens de propulsion. Pour calculer la quantité de CO_2e émise par trajet pour une propulsion au diesel, nous allons utiliser un des rapports de l'ADEME [11]. Dans ce rapport, nous trouvons les valeurs suivantes pour un trajet de fret en train :

- Coût carbone en France : $0,0268kgCO_2e/(km \cdot t)$
- Coût carbone en Belgique : $0,0214kgCO_2e/(km \cdot t)$
- Coût carbone aux Pays-Bas : $0,0291kgCO_2e/(km \cdot t)$

Comme nous l'avons vu précédemment à la partie 1.2 (page 1), la masse totale de notre train est de 2076 tonnes et nous parcourons 1315 km. Grâce à la carte figure 1.3, nous pouvons lire les distances parcourues par le train dans chaque pays. Le train parcourt 897 km en France, 316 km en Belgique et 102 km aux Pays Bas. De plus, le train se propulse grâce à l'électricité sur 30% du trajet. Lorsque l'électricité est utilisée, l'ADEME nous donne une valeur de $3.67 \cdot 10^{-3}kgCO_2e/(km \cdot t)$ [11]. Pour calculer la partie électrifiée, nous calculons les émissions sans électrification puis nous prenons 70% de cette valeur et nous ajouterons les 30% d'électrification. Avec toutes ces données, nous trouvons une quantité émise de 52.1 tonnes de CO_2e par trajet. Nous avons donc une émission ramenée à la tonne-kilomètre de marchandise transportée de $0,0190kgCO_2e/(km \cdot t)$. Ces valeurs nous serviront de référence pour les autres technologies étudiées.

2.2 Coût financier du trajet existant

Maintenant, nous allons déterminer les prix relatifs à l'utilisation du train et à sa maintenance. Nous partons toujours de l'hypothèse que nous avons 50 wagons et 4 locomotives. Le trajet sera de 1315 km. Chaque locomotive achetée est estimée au prix de 4 millions d'euros.

Avec un prix de maintenance des wagons de 9 centimes par wagon par km [12], nous obtenons un prix de 5917 euros par trajet.

Ensuite, pour un prix de maintenance de 80 centimes par locomotive par km [12], nous estimons un prix de maintenance des locomotives de 4208 euros.

Pour finir, nous arrivons à un coût de maintenance total estimé de 10125,5 euros par trajet.

Nombre de locomotives	4
Nombre wagons	50
Maintenance wagon (€/km-wagon)	0,09
Maintenance wagons (€)	5917,5
Maintenance locomotives (€/km-locomotive)	0,8
Maintenance locomotives (€)	4208
Maintenance totale (€)	10125,5

TABLE 2.1 – Prix de la maintenance du train sur un trajet

Il reste différents paramètres à prendre en compte, comme la main d'œuvre, les prix des manœuvres et des péages.

Avant le départ du train et à l'arrivée, les trains de fret nécessitent l'utilisation de trains de manœuvre. On comptera ainsi une utilisation totale de deux heures pour une locomotive de manœuvre et de son agent (par train).

Le prix horaire pour de la manoeuvre de train est de 695 euros/heure [13].

Prix (€/locomotive-heure-agent)	695
Nombre total d'heures	4
Nombre de locomotives de manoeuvre	1
Total par trajet (€)	2780

TABLE 2.2 – Prix des manoeuvres en gare

On compte deux conducteurs par train ce qui nous donne :

Taux horaire médian conducteur de train (€/heure)	14
Nombre de conducteurs par train	2
Nombre d'heures par trajet	18,79
Total (€)	1052

TABLE 2.3 – Prix des conducteurs de train[14]

Nous aurons aussi besoin de payer pour la voie que nous empruntons. Nous faisons l'hypothèse que les tarifs de ces péages sont les mêmes en France qu'en Belgique et aux Pays-Bas, ainsi, avec les tarifs appliqués par la SNCF :

Prix du péage (€/km)	8
Nombre de kilomètres par trajet	1315
Total par trajet (€)	21040

TABLE 2.4 – Prix des péages[15]

Pour finir, nous allons prendre en compte le coût de l'énergie. Nous rappelons que l'énergie totale consommée est de 29.5 MWh. De plus, 30% de cette énergie provient de la caténaire. On prendra une consommation moyenne de 3 L/km et un prix du diesel à 1.3 euros/L.

Prix du MWh électrique [16]	474 euros
Consommation moyenne [17]	3 L/km
Prix diesel non routier	1.3 euros/L
Energie disponible dans 1L de diesel	10.74kWh
Rendement moteur moyen	0.4

TABLE 2.5 – Coût de l'énergie

Le coût total de l'énergie est donc de 10 438 euros.

Avec tous les coûts pris en compte, nous arrivons à une somme totale de 34997,5 euros par trajet. Il ne faut pas oublier l'investissement d'achat des locomotives, qui monte à 16 millions d'euros au total.

Maintenance totale	10125,5
Manoeuvre	2780
Main d'oeuvre	1052
Péages	21040
Energie	10438
Total	45415,5

TABLE 2.6 – Estimation finale des coûts en euros pour un trajet

Chapitre 3

Etude des différentes technologies proposées

3.1 Diesel et biocarburant

3.1.1 Diesel et bioéthanol

Pour cette technologie, nous baserons notre étude sur la BB 60000 à laquelle nous adapterons les différents systèmes de propulsion étudiés. Désormais, nous allons étudier le système de propulsion diesel des locomotives. Les dimensions de la locomotive ont été relevées dans le tableau ci-dessous [18] :

Puissance continue	840000	W
réservoir	3000	L
masse	76000	kg
longueur	15,05	m
largeur	2,834	m
hauteur	4,185	m
durée de vie estimée	30	ans

TABLE 3.1 – Caractéristiques de la locomotive BB 60000

Au cours de notre recherche bibliographique, nous nous sommes penchés sur les moyens de propulsion déjà existants pour le fret ferroviaire. Nous avons trouvé que le groupe moteur diesel couplé avec un générateur électrique [19] étant l'un des moyens de propulsion les plus utilisés. Nous allons aussi essayer de remplacer le carburant par du bioéthanol[20]. Malgré ses propriétés physiques inférieures au gazole, en terme d'énergie massique, ce carburant possède un potentiel de décarbonation plus élevé qu'un carburant conventionnel.

Pour commencer, nous cherchons à déterminer l'énergie à embarquer. En prenant en compte la puissance nécessaire à l'avancement ainsi que les rendement, nous trouvons que : $E = P_{avancement} \cdot \Delta t$ où $\frac{P_{avancement}}{\eta_{moteur}\eta_{elec}} = P_{carburant}$. À 70 km/h, le temps de trajet est de 18,8h et on sait que la BB 60000 développe 860kW. Ainsi, avec un rendement de 0,36, on trouve $E = 14,7MWh$ et en prenant en compte les 30% d'électrification $E = 10,3MWh$.

Maintenant, grâce au PCI volumique du diesel et celui du bioéthanol [20] qui valent respectivement $PCI_{diesel} = 32MJ/L$ et $PCI_{bioethanol} = 21MJ/L$, nous pouvons estimer les volumes des réservoirs grâce à la formule suivante : $Volume(L) = \frac{E}{PCI(MJ/L)\eta_{moteur}\eta_{elec}}$. De plus, avec les masses volumiques, il est aussi possible de calculer la masse embarquée ($\rho_{diesel} = 830kg/m^3$ et $\rho_{biomethanol} = 789kg/m^3$).

Nous pouvons aussi calculer les émissions dues au trajet.

Pour le diesel, nous avons pour la production du carburant ainsi que la combustion, une émission de $3,15kg_{CO2}/L$ et une consommation unitaire de $4,5.10^{-3}L/t/km$ [21]. Nous avons donc $0,0142kg_{CO2}/t/km$. Pour tracter une

masse d'environ 2079 t (2 locomotives et les wagons avec les réservoirs remplis) sur 1315 km, nous pouvons donc calculer les émissions totales pendant le trajet uniquement grâce à la formule suivante : $Emissions(tCO_2e) = \text{masse} \cdot \text{distance} \cdot 0,00142 \cdot 2$.

Pour ce qui est du bioéthanol, nous estimons un prix d'achat de 0,85 euros/L [22] et une réduction de 65% des émissions par rapport au diesel (moyenne de plusieurs sources).

Avec nos calculs, nous trouvons les données renseignées dans les tableaux suivants. Il est important de préciser que ces calculs ont été effectués avec 2 locomotives par train. Aussi, nous avons pris deux cas en compte. Le premier dans lequel aucune partie du trajet n'est électrifiée et la deuxième, en prenant 30% d'électrification des rails. Le prix de l'électricité a aussi été pris en compte avec la montée des prix de 2023 à 474€/MWh [16]. Sur 30% d'électrification, nous devons fournir $E_{\text{reseau}} = E \cdot 0,3 = 4,423 \text{ MWh}$. Nous pouvons donc calculer le surcoût dû à l'utilisation du réseau : $Surcoût = E_{\text{reseau}}(MWh) \cdot 474 = 2096,5$ euros. Nous avons donc le coût total pour les trajets électrifiés (toujours en multipliant par 2 les résultats obtenus pour le réseau).

	Diesel	Biocarburant
volume (m3)	8,26	18,46
masse (t)	6,86	14,56
émissions trajet (t CO2e)	77,52	27,13
prix du carburant (euros)	10 245,84	15 688,78

TABLE 3.2 – Quantification des données sans électrification pour 1 train de 2 locomotives

	Diesel	Biocarburant
Volume (m3)	5,78	12,92
Masse (t)	4,80	10,19
Emissions trajet (t CO2e)	54,32	19,10
Prix du carburant et du courant (euros)	11 361,21	15 171,27

TABLE 3.3 – Quantification des données avec 30% d' électrification pour 1 train de 2 locomotives

Nous pouvons tirer plusieurs informations de ces tableaux.

Premièrement, au niveau du volume, le diesel permet de gagner en masse et volume vis à vis du biométhanol. Étant donné que les BB 60000 sont équipées de réservoirs $30m^3$ [18], si nous choisissons une motorisation au bioéthanol, nous devons redimensionner les réservoirs ainsi que la locomotive elle-même.

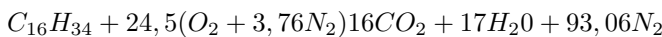
Ensuite, le prix de l'énergie varie significativement entre les deux technologies. Pour pouvoir estimer l'impact du choix de la technologie sur le prix sur, il faudra considérer les coûts totaux du projet. Cependant, a priori, il apparaît que le diesel sans électrification soit la solution la moins chère. Néanmoins, pour avoir une vision complète, il faut prendre en compte l'impact carbone de la solution.

Avec une baisse d'émissions d'environ 65% [23] (données sur l'utilisation seule du carburant), nous nous retrouvons avec un potentiel de décarbonation très important pour le biométhanol, caractéristique des carburants de synthèse. Néanmoins, il faudra se pencher sur les moyens de production des ces biocarburants afin d'en estimer les émissions totales précisément.

Enfin, nous voyons bien que nous devons profiter des parties électrifiées du trajet afin de gagner beaucoup de marge sur les différents paramètres du problème. Il sera peut-être possible et pertinent de travailler sur un système de recharge et de stockage d'énergie électrique pour le trajet.

Après cette première approche de dimensionnement, nous cherchons à déterminer plus précisément les émissions liées aux carburants.

En considérant le diesel comme un hexadécane (16 Carbones), nous écrivons l'équation de combustion de la molécule en supposant la réaction stoechiométrique et complète. Malgré les limites de ces hypothèses, elles nous permettront de beaucoup mieux estimer les émissions de CO_2 .



Nous avons donc une mole de diesel qui produit 16 moles de CO_2 . Puis pour une mole de réactif :

$$m_{\text{CO}_2} = M_{\text{CO}_2} n_{\text{CO}_2} = 704g \text{ et } m_{\text{diesel}} = M_{\text{diesel}} n_{\text{diesel}} = 226g$$

On trouve donc que, avec notre masse de diesel embarquée, nous trouvons des émissions de 7,49 t CO_2 .

Malheureusement, nous pouvons seulement approximer les résultats, car en réalité, nous savons bien que la combustion n'est pas complète et qu'elle se fait en excès d'air.

C'est pourquoi, nous allons simuler le fonctionnement sur le logiciel GT-Power afin de déterminer avec exactitude les émissions de CO_2 , CO, NO_x etc. Avant toute chose, nous devons construire le modèle du moteur sur le logiciel.

Ici, sont répertoriées les données relatives aux moteurs de la locomotive.

architecture	en V	(-)
Nombre de cylindres	8	(-)
cylindrée unitaire	4,3125	L
masse	4309	kg
Taux de compression	14 :1	(-)
cylindrée	34,5	L
Suralimentation	Turbocompresseur à air refroidi	

TABLE 3.4 – Caractéristiques du moteur thermique Caterpillar 3508B (4 temps) de la locomotive[24]

Après avoir construit le modèle du moteur, nous y ajoutons un turbocompresseur ainsi qu'un échangeur pour refroidir l'air comprimé. Il ne nous reste plus qu'à piloter le moteur. Nous avons donc travaillé avec un système d'injection, doté de multiples capteurs pour vérifier le pilotage du moteur à combustion interne. Les valeurs de débit et de taux de compression seront assurées par le logiciel, pour que le moteur puisse fournir la puissance consignée à la vitesse de rotation souhaitée.

Pour déterminer le point de fonctionnement du moteur, nous pouvons nous référer à ses courbes de fonctionnement (figure 3.1). Il suffit de n'en déterminer qu'un, sachant que le fonctionnement du MCI est stationnaire et stabilisé.

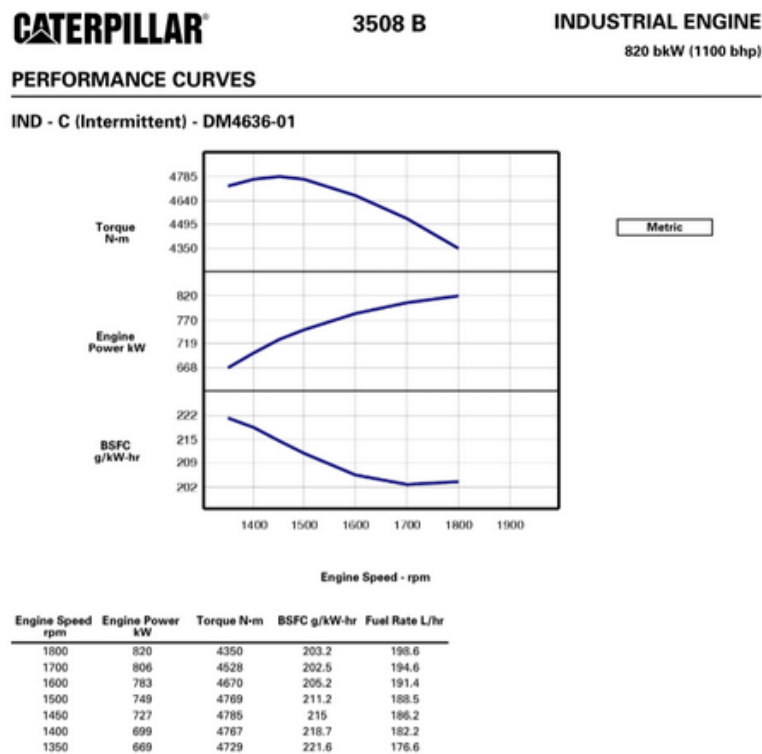


FIGURE 3.1 – Courbes caractéristiques du moteur 3508B

Pour déterminer la vitesse de rotation du moteur, nous faisons une interpolation linéaire pour trouver le régime pour 785 kW.

Nous trouvons donc un régime de rotation de 1609 tr/min, et grâce à la relation $P = C\omega$, un couple de 4656 Nm.

Avant de lancer la simulation, il reste un dernier calcul à faire, la masse de carburant injectée par cylindre. Nous devons produire $P_{\text{avancement}} = 784,9 \text{ kW}$ et $E = 1,03.10^4 \text{ kWh}$ d'énergie mécanique à l'aide de 2,4 tonnes de carburant. Nous déterminons le débit de carburant : $D_{\text{carburant}} = \frac{m_{\text{carburant}} P_{\text{avancement}}}{E \cdot 3600} = 50,69 \text{ g/s}$

Pour la simulation, nous avons donc un moteur 4 temps, fonctionnant à 1610 tours/min. Sachant qu'il faut deux tours pour faire un cycle, nous pouvons déterminer la masse de carburant à injecter par cylindre et par cycle et calculant le nombre de cycle par seconde. Nous trouvons une masse de 472,23 mg/cylindre/cycle.

Voici un récapitulatif des paramètres entrés dans le logiciel :

mgstrk	mg	▼	Injected mass of fuel	472.2 ...
RPM	RPM	▼		1609 ...
InitFuelMass				3778 ...
Tplenum	C	▼		25
brake_torque_target			Target Signal	4656 ...
shaft-speed	RPM	▼	Initial Speed	67000 ...

FIGURE 3.2 – Paramètres de pilotage du moteur diesel

La vitesse initiale du turbocompresseur a été déterminée à l'aide d'itérations successives du modèle et la masse de carburant initiale correspond à la masse totale de carburant injectée au début (huit fois la masse unitaire).

Après avoir lancé la dernière simulation, nous obtenons la régulation suivante :

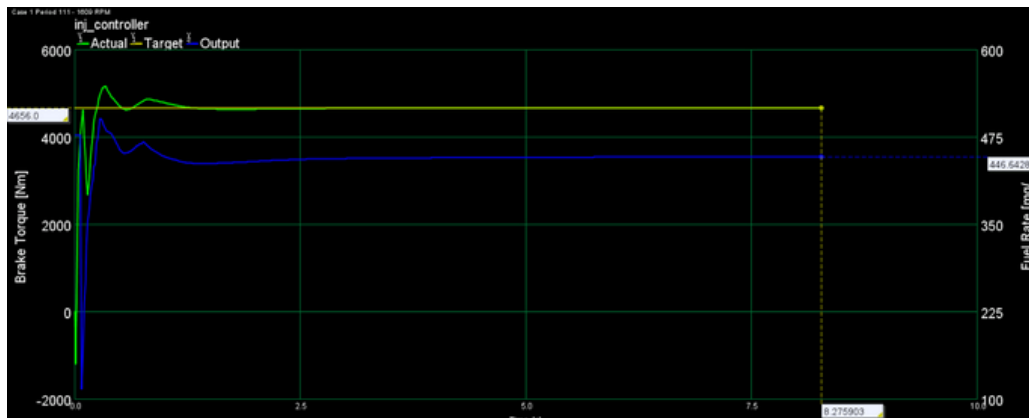


FIGURE 3.3 – Contrôle du moteur à combustion interne

Nous voyons bien que le logiciel suit bien le couple demandé, à la vitesse de rotation souhaitée. Cependant, nous remarquons une baisse de la consommation de carburant (en bleu sur la figure 3.3. Cette baisse d'environ 5,5% est due au fait que nous avons rempli les paramètres du moteur avec des données proches des valeurs calculées, mais pas exactement les mêmes. C'est pourquoi tous nos résultats seront entachés d'erreurs d'environ quelques pourcents.

Maintenant, nous pouvons regarder le turbocompresseur plus en détail. Les simulations nous ont donné ces résultats :

TURBOS			
Variable	Unit	Compr-1	Turbine-1
Average Mass Flow Rate	kg/s	0.7823	0.8304
Average Power (Incl. Shaft if Modeled)	kW	84.43	84.26
Average Speed	RPM	66540	66540
Massflow-Averaged Efficiency	%	67.44	75.65
Massflow-Averaged Map Pressure Ratio	No Unit	2.137	1.652

FIGURE 3.4 – Résultats relatifs au turbocompresseur

Avec ce tableau, nous avons bien l'égalité des puissances du compresseur et de la turbine, au rendement de l'arbre près. Nous avons la vitesse finale de l'arbre qui vaut 66540 tours/min en moyenne. Nous voyons surtout que le compresseur et la turbine fonctionnent dans une zone de très bon rendement (67,44% pour le compresseur et 75,65% pour la turbine).

Une dernière analyse possible est que la combustion a bien eu lieu avec un excès d'air. En effet : $\frac{D_{air}}{D_{carb}} = 16.26$. Or le ration débit d'air et de carburant stoechiométrique est de 14.5, donc a bien $\lambda > 1$. Le logiciel calcule un λ de 1.14 ce qui est bien environ égal à $\frac{16.26}{14.5}$.

De plus, nous sommes aussi dans les champs compresseurs et turbines, il n'y a pas de risques d'endommager le turbocompresseur en le faisant fonctionner dans ces conditions :

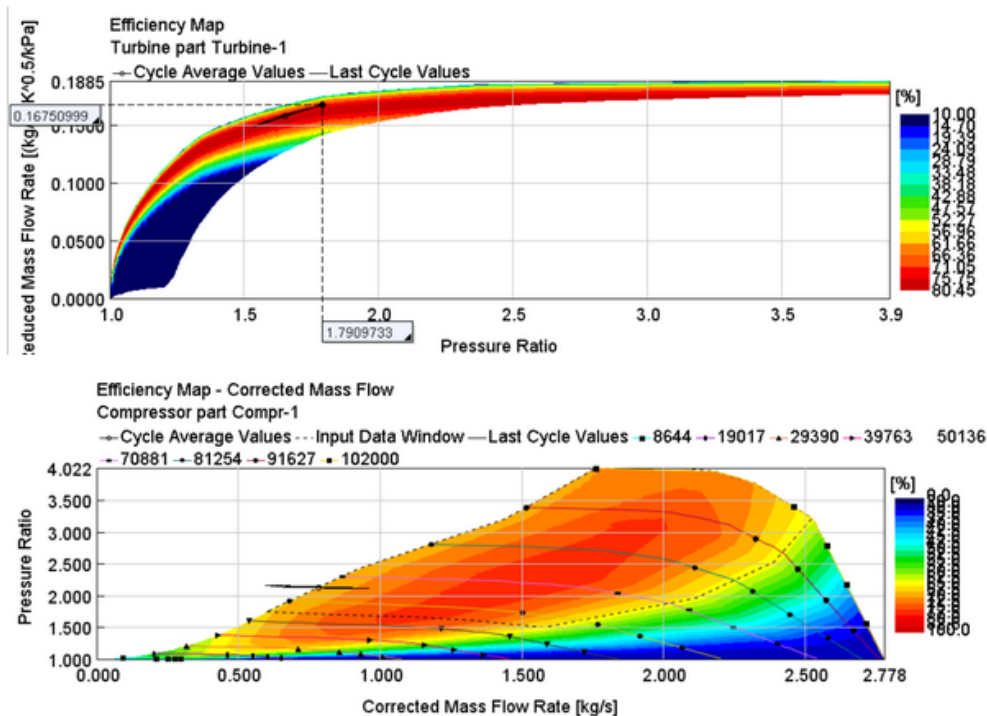


FIGURE 3.5 – Champ turbine et champ compresseur fournis par GT-Power

On voit bien que malgré le fait que les points de fonctionnement moyen respectent les limites du champ, nous avons des rendements que nous qualifierons de bons. Cependant, le rendement peut-être amélioré. Il faudrait mieux adapter le turbocompresseur afin d'avoir à fournir de plus faibles puissances pour la suralimentation.

Maintenant, regardons ce qu'il se passe au niveau de l'échangeur. Nous avons une puissance échangée de 16,2 kW et un refroidissement du fluide d'environ 20°C :

▶	Combined Energy Rate Out of Fluid	kW	16.202745
▶	Average Mass Flow Rate (Inlet)	g/s	782.346
▶	Mass Averaged Temperature (Inlet)	K	403.81592
▶	Mass Averaged Temperature (Outlet)	K	383.64948

FIGURE 3.6 – Données de l'échangeur utilisé pour le modèle GT

Nous pouvons déterminer l'efficacité de l'échangeur avec une température du fluide froid en entrée de 300K :

$E = \frac{403 - 383}{403 - 300} = 19,4\%$. L'échangeur a une efficacité très mauvaise. Cela est dû au fait que nous n'avons pas pu le dimensionner, manque de données.

Nous pouvons aussi relever différents résultats pour le moteur :

ENGINE		
Variable	Unit	Value
Engine Speed (cycle average)	RPM	1609
IMEP720 - Net Indicated Mean Effective Pressure	bar	18.79
BMEP - Brake Mean Effective Pressure	bar	16.86
Volumetric Efficiency, Air	fraction	1.442
▶ Brake Power	kW	784.13824
▶ BSFC - Brake Specific Fuel Consumption, Cyl	g/kW-h	219.91812

FIGURE 3.7 – Caractéristiques moteur dans la simulation GT

On voit bien que le rendement de remplissage du cylindre vaut $1,442 > 1$, typique d'un moteur suralimenté. La puissance calculée est légèrement inférieure à la puissance demandée (environ 762W). Nous voyons que la consommation spécifique est plus élevée que celle fournie par le constructeur (204,96 g/kWh par interpolation linéaire). Il est certain que le constructeur a amélioré son moteur et n'ayant pas accès à ces modifications, nous n'avons pas pu les ajouter à notre modèle. Nous pouvons aussi la calculer avec nos données : $ConsoSp = 232,47g/kWh$.

Nous rappelons que ces écarts sont possibles à cause de l'imprécision des paramètres que nous avons rentrés dans le logiciel. Avec ces données, nous pouvons conclure que le modèle est représentatif de la réalité. Nous pouvons donc faire un bilan des polluants et du CO₂ engendrés par le moteur :

▶	Brake Specific NOx - Cylinder Out	g/kW-h	18.123663
▶	Brake Specific NO - Cylinder Out	g/kW-h	18.058594
▶	Brake Specific CO - Cylinder Out	g/kW-h	6.753323
▶	Brake Specific CO2 - Cylinder Out	g/kW-h	680.50836
▶	Brake Specific Hydrocarbon - Cylinder Out	g/kW-h	3.4268541
▶	Brake Specific Soot - Cylinder Out	g/kW-h	1.2838734

FIGURE 3.8 – Bilan des polluants et du CO₂ engendrés

Nous pouvons faire plusieurs remarques à propos de ce tableau. Tout d'abord, nous voyons qu'il existe des émissions de monoxyde de carbone CO, ainsi que d'autres polluants comme des hydrocarbures, de la suie... Auparavant, nous avions estimé les émissions de CO₂ globales à 7,49t par locomotive. Nous pouvons déterminer les émissions par locomotive, en multipliant les émissions effectives par l'énergie nécessaire à l'avancement :

Produit	émissions (tonnes)	fraction (%)
NOx	0,75	2,49
NO	0,75	2,48
CO	0,28	0,93
CO2	28,10	93,46
HC	0,14	0,47
Suie	0,05	0,18

TABLE 3.5 – Emissions totales pour quatre locomotives

Nous pouvons expliquer ces écarts par l'hypothèse de départ selon laquelle la combustion est complète et stœchiométrique. Le modèle nous a permis d'estimer les émissions réelles de façon plus précise. Cette hypothèse permet de déterminer les émissions avec une très bonne approximation, en peu de temps.

Il ne nous reste plus qu'à standardiser les émissions. Nous devons déplacer deux trains avec quatre locomotives au total, donc 4152 tonnes sur 1315 km. Nous calculons donc le taux d'émissions : $TauxEmissions = \frac{Emissions}{m \cdot distance}$.

produit	taux d'émission (kg/t/km)
NOx	1,37E-04
NO	1,37E-04
CO	5,11E-05
CO2	5,15E-03
HC	2,59E-05
Suie	9,71E-06

TABLE 3.6 – Taux d'émission standardisé pour un trajet

Maintenant que la technologie existante a été étudiée, il ne nous reste plus qu'à étudier les solutions proposées afin de pouvoir les comparer et trouver la meilleure d'entre elles.

3.1.2 Hybridation diesel-batteries

Afin de réduire nos émissions carbone ainsi que le prix de nos trajets nous avons pensé à profiter de l'hybridation diesel-batterie qui nous permettrait de récupérer l'énergie habituellement perdue au freinage afin de la stocker et de nous en servir plus tard sur notre trajet.

Pour cela nous avons analysé les variations d'altitude de la ligne que nous allons utiliser afin de calculer la puissance moyenne utilisée ou récupérable et en déduire l'énergie stockable par notre train.

Nous avons fait l'hypothèse pendant les phases de descentes que toute l'énergie à prélever afin de maintenir la vitesse constante sera récupérée par notre alternateur/moteur.

Cela nous donne :

Puissance nécessaire en continu pour le convoi (kW)	1570
Energie totale à dissiper sans phase freinage final (MWh)	2,7
Energie totale gagnée (MWh)	2,16
Energie maximale à stocker dans la batterie (kWh)	120
Densité énergétique batteries (kg/kWh)	0,17
Densité de puissance batteries (kW/kg)	70
Masse nécessaire batteries en utilisation 20%-80% (kg)	57

TABLE 3.7 – Energie et puissance d'un train hybride (à deux locomotives)

Cela nous permet une augmentation non négligeable des performances, en comparant cette solution a celle du train diesel lui-aussi branché aux caténaires, on obtient :

Energie totale à stocker avec branchement (MWh)	20,64
Energie totale gagnée (MWh)	2,16
Masse diesel économisé (t)	0,50
Impact carbone (teCO2/trajet)	27
Impact carbone hybride (teCO2/trajet)	24
Prix en carburant et courant par trajet en diesel (€)	11361
Prix en carburant par trajet pour l'hybride (€)	10172

TABLE 3.8 – Performances de la solution hybride diesel/batterie

3.2 Batteries

Nous allons à présent étudier la solution utilisant des locomotives électriques embarquant des batteries. Nous allons étudier deux technologies de batteries, les batteries Li-ion et les batteries Lithium-titanium-oxyde (LTO). Le but est de trouver quelle technologie de batterie est la meilleure, c'est-à-dire dans notre cas celle qui émet le moins de gaz à effet de serre avec le prix le plus bas possible.

3.2.1 Hypothèses de calculs

Pour toute la partie 3.2, nous allons adopter les notations suivantes :

- N le nombre de cycles que la batterie va effectuer (ie sa durée de vie)
- PB le prix des batteries en €/kWh
- C la capacité de la batterie en kWh
- x le nombre d'arrêts effectués par le train
- f le nombre d'arrêt en France
- b le nombre d'arrêt en Belgique
- pb le nombre d'arrêt aux Pays-bas
- $\text{€}f$ le prix par kWh de l'électricité en France
- $\text{€}b$ le prix par kWh de l'électricité en Belgique
- $\text{€}pb$ le prix par kWh de l'électricité au Pays-bas
- η le rendement de charge de la batterie
- $CO2f$ les émissions de $CO2eq/kWh$ d'électricité en France
- $CO2b$ les émissions de $CO2eq/kWh$ d'électricité en Belgique
- $CO2pb$ les émissions de $CO2eq/kWh$ d'électricité au Pays-bas

Pour pouvoir dimensionner la capacité de nos batteries nous allons faire plusieurs hypothèses. Tout d'abord une batterie est en fin de vie quand elle atteint 80% de sa capacité initiale. Ses états de charges minimaux et maximaux sont respectivement 20% et 80% afin de ne pas entrer dans une décharge trop profonde qui pourrait fortement réduire le nombre de cycles que la batterie peut effectuer. Le rendement de traction d'une locomotive électrique est de l'ordre de 0,92 [10] et l'utilisation des batteries se fait sur 70% du trajet. En faisant ces hypothèses, la capacité de la batterie est alors de : $C = \frac{\text{Energie necessaire}}{0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,92} \cdot 0,7$.

Pour finir, nous prendrons les caractéristiques du trajet établies dans le chapitre 1, résumées dans le tableau 1.3 à la page 4.

Ainsi, au vu du trajet, nous trouvons une énergie nécessaire de $E_{utile} = 22155 \text{ kWh}$ et donc une capacité pour les batteries de $C = 46156 \text{ kWh}$.

La capacité de la batterie étant de 46,16 MWh, il semble compliqué d'intégrer une batterie qui puisse tenir tout le trajet sans avoir besoin d'être rechargée. En effet, la masse d'une telle batterie peut rapidement atteindre plusieurs centaines de tonnes. Pour pouvoir alors adopter la meilleure stratégie d'arrêt, nous avons décidé d'établir le coût du trajet et les émissions de gaz à effet de serre par trajet en fonction du nombre d'arrêts effectués. Le choix de la stratégie à adopter sera celle correspondant au meilleur compromis entre masse, volume, émissions de gaz à effet de serre et coût. On suppose aussi qu'on effectue aucune récupération d'énergie pour dimensionner la batterie même dans le pire des cas et être sûr que le train puisse faire le trajet.

Pour pouvoir effectuer les calculs nécessaires nous devons connaître les lieux des arrêts potentiels du train. On suppose alors que nous utilisons les 30% d'électrification de la ligne dès le départ. On commencera donc à utiliser la batterie au niveau de Lyon. Ci-dessous se trouve un tableau résumant les pays dans lesquels vont être effectués les arrêts en fonction de leur nombre.

Nombre d'arrêts	Lieux des arrêts
0	
1	1 France
2	1 France, 1 Belgique
3	2 France, 1 Belgique
4	3 France, 1 Belgique
5	3 France, 2 Belgique
6	3 France, 2 Belgique, 1 Pays-bas
7	3 France, 2 Belgique, 2 Pays-bas

TABLE 3.9 – Localisation des arrêts du train en fonction du nombre d'arrêts

3.2.1.1 Coût

Le coût est la somme du prix de l'électricité utilisée, de l'achat des batteries, de la maintenance amortie par trajet, du coût d'utilisation des superchargeurs et des charges fixes (wagons, conducteurs,...) développées dans les parties précédentes liées à l'utilisation du train.

Le premier coût qui sera le même pour toutes les stratégies est l'achat de l'électricité venant de la caténaire lorsque l'on se branche dessus de Marseille à Lyon. Sur cette portion, le prix du MWh est de 474€[16].

Ensuite, on calcule le prix d'achat pour la batterie. Notons tout d'abord que la batterie est chargée une fois de plus que le nombre d'arrêts car le train part avec la batterie chargée. Donc pour x arrêt la batterie fait $x+1$ charges/cycles. Ainsi, connaissant la capacité de la batterie C , le nombre de cycle qu'elle peut effectuer N , le nombre d'arrêt x et le prix PB de la batterie au kWh, il est possible de calculer son prix par trajet :

$$PrixB/trajet = \frac{C \cdot PB}{N} \cdot (x + 1).$$

D'autre part, ces batteries sont utilisées sur plusieurs années et nécessitent de la maintenance. Pour approximer les coûts de maintenance, nous nous basons sur une étude américaine [25] qui évalue le coût d'une locomotive électrique par rapport à une diesel. Dans cette étude, il est estimé que la maintenance sur toute la durée de vie de la batterie de 54,5€/kWh (kWh de batterie installées). Donc : $Maintenance(euros)/trajet = \frac{54,5 \cdot C}{N} (x+1)$.

Pour finir, le prix des recharges des batteries est la somme du prix de l'électricité et du coût d'utilisation du chargeur. On applique la même méthode que dans l'étude américaine, c'est-à-dire que le coût du chargeur est estimé à 0,0498€/MWh auquel on ajoute le coût direct de l'électricité. Nous résumons ci-dessous le prix de l'électricité dans les pays traversés par le train :

Prix de l'électricité	France	Belgique	Pays-bas
€/kWh	0,2516	0,435	0,45

TABLE 3.10 – Prix de l'électricité en 2023 [26] en fonction du pays

La puissance du chargeur utilisé dans l'étude est de 72 MW. On fera l'hypothèse que ce coût est proportionnel à la puissance du chargeur et on pondère alors le coût d'utilisation du chargeur par la puissance de celui dont nous avons réellement besoin.

$$\text{Donc : } ElecBatteire(€)/trajet = (0,0498 + \frac{1}{x+1}((f+1)€f + b \cdot €b + pb \cdot €pb)) \cdot \frac{E_{utile}}{\eta}$$

$$\text{Au final : } Prix(€/trajet) = ElecBatterie + ElecCatnaire + Maintenance + PrixB.$$

3.2.1.2 Émissions de gaz à effet de serre

Les émissions de gaz à effet de serre sont la somme des émissions liées à la production des batteries et à la production d'électricité.

Les émissions liées à l'électricité venant de la caténaire sont alors : $Energie\ necessaire \cdot 0,3 \cdot CO2f = 0,46tCO2eq/trajet$.

$$ElecBatterie(€)/trajet = \left(\frac{1}{x+1} ((f+1) \cdot CO2f + b \cdot CO2b + pb \cdot CO2pb) \right) \frac{\text{Energie utile}}{\eta}.$$

Les données utilisées pour les émissions sont données dans le tableau ci-dessous :

	Emissions (gCO ₂ eq/kWh)
France (CO ₂ f)	48
Belgique (CO ₂ b)	154
Pays-Bas (CO ₂ pb)	212

TABLE 3.11 – Emission de CO₂ équivalent par kWh de l’électricité des pays traversés par le train [27]

3.2.2 Technologie Lithium-titanium-oxyde (LTO)

Il existe différentes technologies autour des batteries LTO. Nous avons choisi la LTO-MNC qui aujourd’hui offre les meilleures caractéristiques. Cette technologie a pour particularité de pouvoir effectuer un très grand nombre de cycles mais par contre elle possède une mauvaise densité énergétique.

Batteries LTO	Min	Max
Densité énergétique en (Wh/kg)	94	96
Densité volumique (Wh/L)	196	219
Nombre de cycle	5000	10000
Prix (\$/kWh)	200	400

TABLE 3.12 – Caractéristiques des batteries LTO-MNC [28] utilisées

Tous les résultats qui sont présentés ci-dessous ont été effectués avec la méthodologie décrite dans la partie 3.2.1. Ci-dessous, la masse et le volume nécessaire de batteries en fonction du nombre d’arrêts effectués.

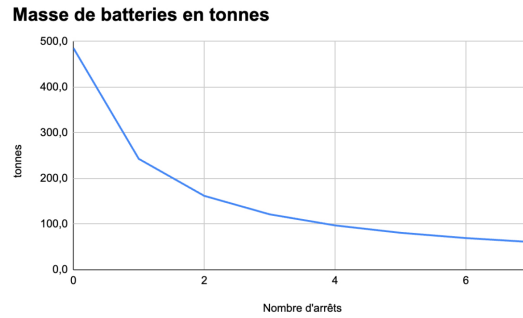


FIGURE 3.9 – Masse des batteries en fonction du nombre d’arrêts

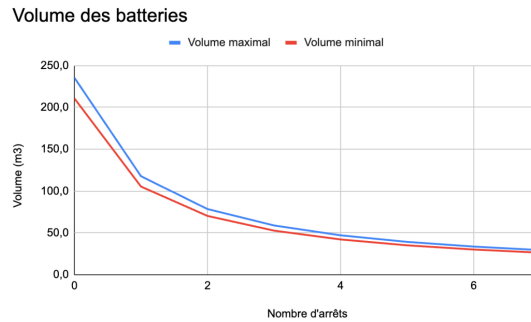


FIGURE 3.10 – Volume des batteries en fonction du nombre d’arrêts

Grâce à ces premiers calculs, on peut rapidement conclure que les stratégies à zéro et un arrêt ne sont pas possibles au vu des masses mises en jeu. Ne pas faire d’arrêt revient à rajouter un quart de la masse du

train en plus. Ces deux solutions ne semblent pas réalisables sans fortement augmenter la consommation du train.

Pour pouvoir ensuite établir le bilan carbone des batteries, on va prendre en compte la production de batteries sur leur cycle de vie. Nous prendons une émission de 185,49 kgCO₂eq par KWh de batteries produites [29]. Ci-dessous, les émissions de GES selon le nombre d'arrêts.

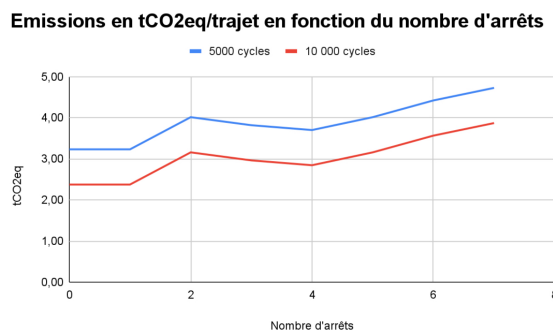


FIGURE 3.11 – Émissions de gaz à effet de serre en fonction du nombre d'arrêts

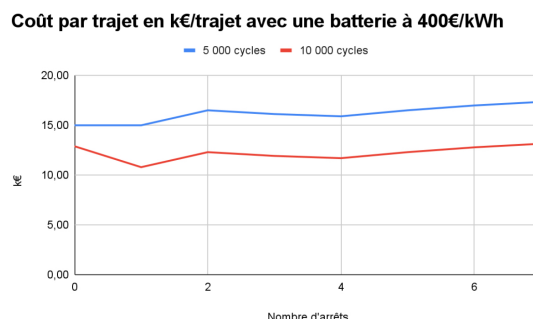


FIGURE 3.12 – Coût de l'utilisation des batteries par trajet en fonction du nombre d'arrêts

La première remarque qui peut être faite est que les émissions et le coût sont minimales quand on ne fait pas d'arrêt ou alors qu'un. Cela vient du fait que toute l'électricité utilisée est produite en France. C'est celle qui possède le prix le plus faible et est la moins carbonée des pays traversés par le train. En partant de ce principe, le nombre d'arrêts qui va être intéressant est celui qui maximise le nombre d'arrêts en France et minimise ceux en Belgique et aux Pays-bas. On remarque alors en excluant les deux premiers cas (car volume et masse trop grands) que faire une stratégie à quatre arrêts donc cinq charges est la meilleure tant au niveau des coûts qu'en émissions de gaz à effet de serre. On peut noter qu'il y a une diminution du coût et des émissions entre deux et 4 arrêts puis une augmentation. La diminution vient du fait qu'en augmentant le nombre d'arrêt la proportion d'électricité venant de France augmente par rapport à la stratégie à deux arrêts. Par contre, à partir de cinq arrêts, cette proportion diminue et alors le coût augmente de nouveau.

On décide donc pour cette technologie de batteries d'opter sur quatre arrêts, c'est-à-dire que l'on va effectuer trois arrêts en France et un en Belgique. Il nous faut alors 97,2 tonnes de batteries. La masse de batterie nécessaire n'a pas été prise en compte dans le premier calcul effectué à la page 3. Cette masse en plus va augmenter la puissance nécessaire et la consommation d'énergie. On va alors quantifier cette augmentation de consommation.

Les batteries nécessitent l'ajout deux wagons (66 tonnes maximales de charges utiles par wagon) en plus pour supporter leur poids. Mais d'autre part, on suppose que l'on a modifié la locomotive BB 60000 en lui enlevant le moteur thermique et les réservoirs pour ajouter l'électronique de puissance et des moteurs en plus pour atteindre la puissance nécessaire. Au final il nous faut qu'une locomotive et donc ci-dessous voici les caractéristiques du train actualisées :

Nombre d'arrêts	4
Charges de la batterie	5
Masse de batteries (t)	97,2
Masse du train (t) sans la locomotive	2053,2
Masse locomotive	70

TABLE 3.13 – caractéristiques du train

Avec ces nouvelles données, on calcule à nouveau la capacité nécessaire de batteries.

P (MW)	1,65
Energie consommée (kWh)	30966,63
Énergie à stocker (kWh)	23561,56
Capacité batterie (kWh)	9817,32
Masse (tonnes)	107,34

TABLE 3.14 – caractéristiques de la batterie

3.2.3 Technologie Li-ion

Comme dans la partie précédente, nous nous sommes proposés d'étudier le coût économique et les émissions de gaz à effet de serre d'un train à batteries, mais cette fois-ci, en considérant la technologie lithium-ion.

Batteries Li-ion	
Densité énergétique en (Wh/kg)	1704
Densité volumique (Wh/L)	270
Nombre de cycles	1500
Prix (\$/kWh)	135
Impact carbone à la production (kgCO ₂ eq/kWh) [30]	137.34

TABLE 3.15 – Caractéristiques des batteries Li-ion [31]

En comparant à la technologie LTO, ces batteries ont 2 avantages : les densités énergétiques et volumiques qui sont plus élevées et le prix au kWh plus faible. Cependant, on remarque que leur capacité a tendance à diminuer plus rapidement puisqu'elles ne peuvent effectuer au maximum que 1500 cycles. Il nous paraissait donc pertinent de développer les calculs pour vérifier quel type de batterie permet des trajets les moins chers et les moins carbonés possibles.

De la même manière que dans la partie précédente nous traçons ci-dessous la masse et le volume de batteries nécessaires avec la technologie Li-ion :

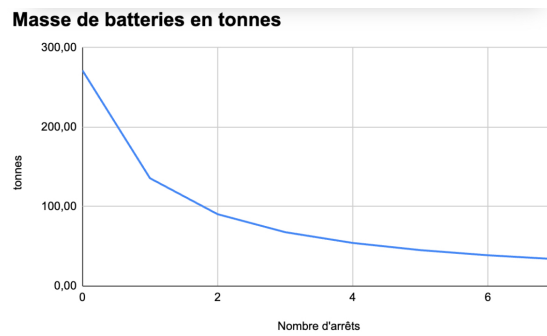


FIGURE 3.13 – Masse des batteries en fonction du nombre d'arrêts

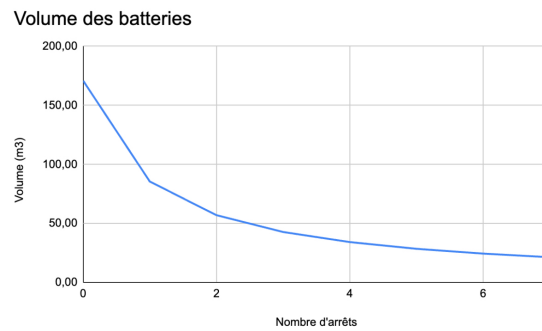


FIGURE 3.14 – Volume des batteries en fonction du nombre d'arrêts

Comme précédemment, il semble trop ambitieux de faire le trajet en une seule fois car il faudrait embarquer une masse de 270 tonnes de batteries environ. L'option avec un seul arrêt pourrait donc sembler la plus envisageable, cependant, elle nécessite 135 tonnes de batteries, soit plus que ce qui est stockable dans deux wagons (chaque wagon a une limite de charge utile de 66 tonnes, donc 132 tonnes maximum pour 2 wagons). Il faudrait donc 3 wagons pour stocker les batteries, ce qui serait moins rentable.

On calcule ensuite le coût du trajet et ses émissions de gaz à effet de serre pour choisir le nombre d'arrêts :
Figure : Prix du trajet en fonction du nombre d'arrêts.

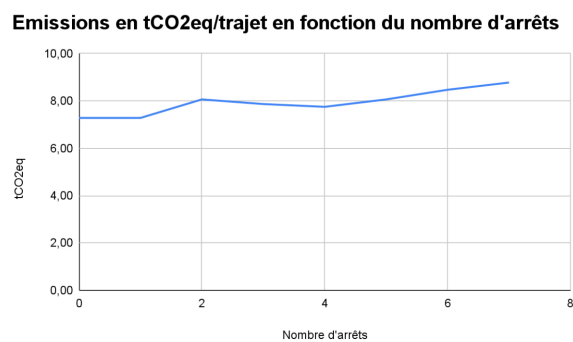


FIGURE 3.15 – Émissions de gaz à effet de serre en fonction du nombre d'arrêts

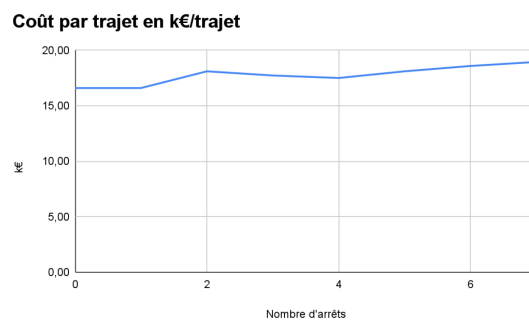


FIGURE 3.16 – Coût de l'utilisation des batteries par trajet en fonction du nombre d'arrêts

Finalement, le choix qui semble être le moins cher et le moins émetteur de carbone et qui respecte les problèmes évoqués précédemment, est de faire 4 arrêts. Comme en partie 2, la masse de batteries ajoutée participe à l'augmentation de la résistance au mouvement et donc le train a besoin de plus d'énergie pour se déplacer. Nous avons donc bouclé une fois et calculé les caractéristiques du train :

Nombre d'arrêts	4
Nombre de charges	5
Masse de batteries (t)	54,30
Masse du train (t) sans la locomotive	1994,30
Masse locomotive (t)	70

TABLE 3.16 – Caractéristiques du train

A partir d'ici on calcule la nouvelle capacité que les batteries doivent fournir :

P (MW)	1,60
Energie consommée (kWh)	30109,06
Energie à stocker (kWh)	22909,07
Capacité batterie (kWh)	9545,44

TABLE 3.17 – Nouvelles caractéristiques de la batterie

3.2.4 Comparaison

Nous allons résumer les résultats de l'analyse menée ci dessus. Nous résumons dans le tableau ci-dessous les résultats pour la technologie LTO :

	Coût de la batteries/trajet				Total (k€)	
Maintenance (k€)	200€/kWh	400€/kWh	Elec batteries (k€)	Elec Caténaire (k€)	Min	Max
0,07	0,33	0,59	7,63	4,79	12,75	13,01

TABLE 3.18 – Détails des coûts sur un trajet

Les émissions de gaz à effet de serre et le coût final ont été calculés pour une batterie faisant 7500 cycles soit dans la moyenne de ce qu'est capable de supporter la batterie en durée de vie.

En faisant le choix de la technologie LTO, la capacité batterie a augmenté de 600 kWh pour une nouvelle masse de 107,34 tonnes, ce qui fait que la masse a augmenté d'environ 6 tonnes. On considère que cette masse en plus n'impacte pas la performance du train, ou du moins trop peu pour être significatif.

D'autre part, les batteries LTO possède un taux de charge de type 1C [32](allant jusqu'à 5 C), ce qui signifie qu'il faut 1h pour recharger la batterie. Ainsi les recharges supplémentaires allongent le temps de trajet total à 22,79h. Pour recharger, il nous faut alors un chargeur de 4,7 MW (4,7 MWh à charger en 1h).

Nous résumons dans le tableau ci-dessous les résultats pour la technologie Li-ion en faisant l'hypothèse qu'une batterie au lithium peut effectuer 1500 cycles :

Coût total de la batterie (k€/trajet)	Electricité caténaire (k€)	Electricité batteries (k€)	Total (k€)
6,029	4,5	7,42	17,95

TABLE 3.19 – Prix final du trajet

Nombre d'arrêt	Electricité caténaire (tCO ₂ eq/trajet)	Recharge batterie (tCO ₂ eq/trajet)	Production batterie (tCO ₂ eq/trajet)	tCO ₂ eq/trajet
4	0,46	1,59	5,96	8,00

TABLE 3.20 – Émissions de CO₂eq du trajet

Pour conclure, nous décidons d'utiliser la technologie de batterie Lithium-titanium-oxyde (LTO). Cette technologie nous permet d'obtenir un coût d'utilisation et des émissions de gaz à effet de serre plus faible qu'avec les batteries Li-ion. Cette différence vient du fait que malgré que ce type de batterie nécessite une masse presque deux fois plus grande mais d'un autre côté elle peut faire environ 7500 cycles en moyenne contre 1500 pour la technologie Li-ion, soit 5 fois plus de trajets, ce qui réduit drastiquement le coût et les émissions par trajet. Il faut aussi noter que la récupération d'énergie au freinage n'a pas été prise en compte ici. Il est possible de récupérer jusqu'à 70% de l'énergie cinétique du train pendant un freinage.

3.3 Hybridation hydrogène

3.3.1 Stratégie d'hybridation

3.3.1.1 Stratégie globale

Le but de cette hybridation est de remplacer le générateur d'énergie électrique de la locomotive diesel (i.e. moteur et réservoir) par une pile à combustible, un réservoir d'hydrogène et une batterie. La batterie sera placée entre la pile à combustible et le moteur électrique. La pile à combustible produira de l'énergie qui sera stockée dans la batterie pour être utilisée au besoin.

L'architecture retenue est donc hybride série, comme l'est la locomotive diesel originale.

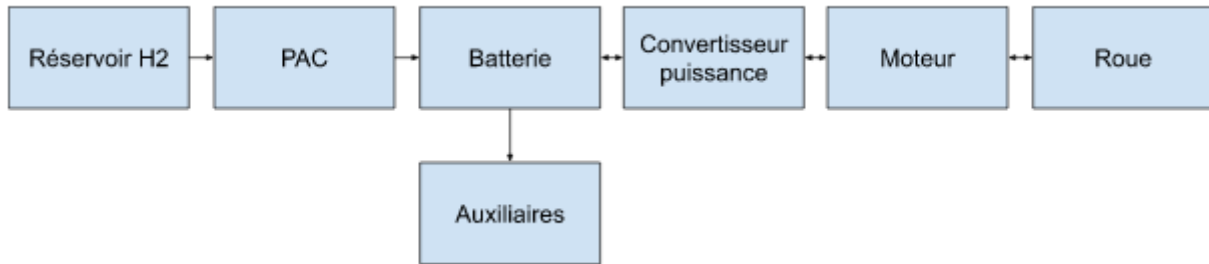


FIGURE 3.17 – Architecture de la chaîne de propulsion

De plus, les bilans financier et carbone proposés vont être faits dans le cadre d'un retrofit. Un matériel roulant diesel va être pris pour base, et la nouvelle solution de production d'énergie va remplacer le moteur diesel précédent. Il faudra donc s'assurer que la nouvelle solution peut s'intégrer dans la locomotive.

3.3.1.2 Dimensionnement de la batterie

Les deux objectifs principaux de la batterie vont être de permettre un freinage régénératif complet du convoi, et de pouvoir proposer une stratégie de pilotage de la pile à combustible indépendante de la puissance demandée en traction. Les pics de puissance demandés lors des accélérations pourront être fournis par la batterie. L'hypothèse comme quoi toute l'énergie est récupérée au freinage pourrait être améliorée en prenant seulement 75% de l'énergie totale. Cependant, pour simplifier la gestion de la batterie nous récupérerons l'entièreté de l'énergie.

Les paramètres suivants vont être dimensionnés pour la batterie :

- SOCmin, SOCmax (SOC - Etat de charge) : les états de charge min et max de la batterie sont pris à 20% et 80%, ce qui correspondent à des chiffres usuels permettant d'avoir une durée de vie de la batterie optimale en évitant de la surdimensionner
- Capacité : La capacité de la batterie va être dimensionnée pour permettre un freinage régénératif complet, et pour servir de tampon entre la puissance de la pile à combustible et la puissance aux roues. Le but de cette batterie tampon est de permettre un fonctionnement de la pile à combustible le plus proche possible de la puissance nominale et du redement maximal.

Au vu des exigences précédentes, si nous voulons permettre un freinage régénératif complet, on gardera toujours une réserve de capacité dans la batterie, comme indiqué sur la figure ci-dessous.

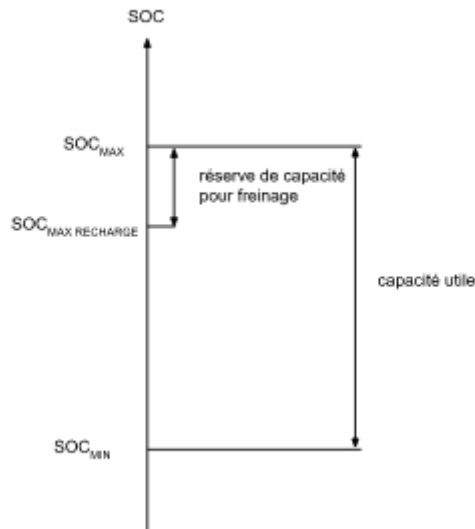


FIGURE 3.18 – Stratégie de dimensionnement de la batterie

Pour piloter la pile à combustible, nous allons proposer une loi de commande qui arrête de charger la batterie si celle-ci dépasse le seuil $SOC_{MAX \text{ CHARGE}}$.

3.3.1.3 Dimensionnement de la pile à combustible

Nous allons d'abord établir une loi de commande pour piloter la pile. Pour piloter la puissance demandée, nous utiliserons comme paramètre le SOC de la batterie. Dans un premier temps, nous allons le faire selon la loi suivante :

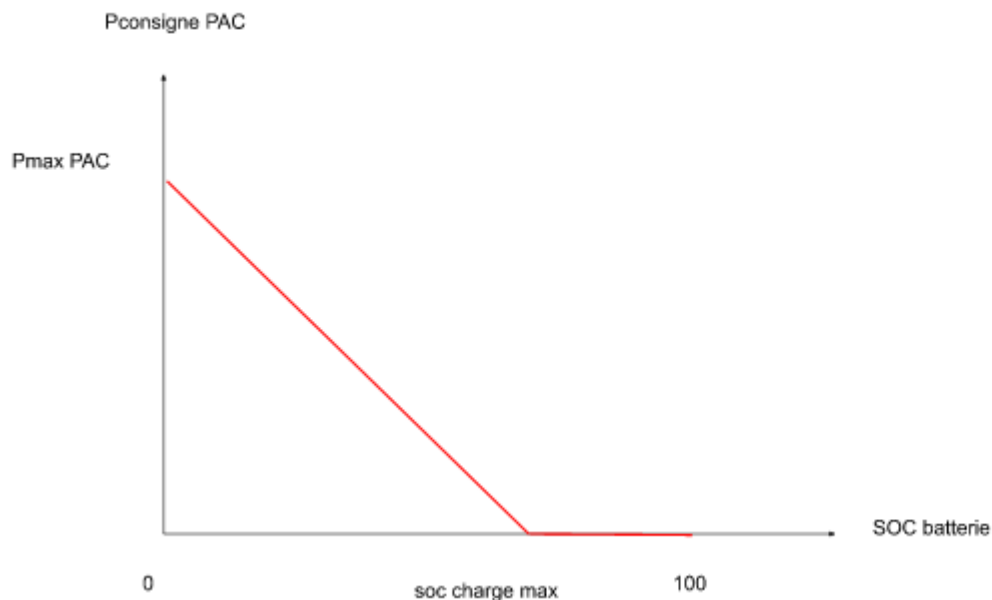


FIGURE 3.19 – Loi de commande de la pile à combustible

Le but est de piloter la demande de puissance, ici de manière linéaire, sur la plage où la charge batterie est autorisée, et de lui demander une puissance nulle à partir du seuil $SOC_{MAX \text{ CHARGE}}$, comme indiqué dans la partie précédente.

Ensuite, grâce à des simulations GT-Power, nous déterminerons la puissance nécessaire pour la pile à combustible qui suit cette loi de commande en choisissant le nombre de stack en parallèle et le nombre de cellules par stack.

3.3.2 Simulation GT-Power

3.3.2.1 Hypothèses

La modélisation de la chaîne de traction sous GT-Power est faite selon le schéma suivant :

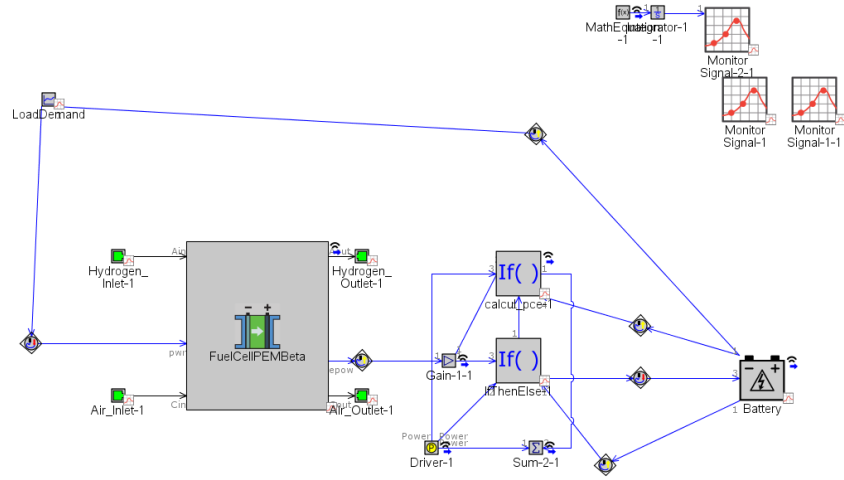


FIGURE 3.20 – Schéma de la modélisation de la chaîne de traction sous GT-power

Cette modélisation représente la chaîne de traction pour une des deux locomotives du convoi. Sur le schéma ci dessus, il y a plusieurs bloc de fonctionnalité différentes :

- "FuelCellPEMBeta" : ce bloc modélise la pile à combustible. Nous pouvons fixer dans ce bloc le nombre de cellules, la surface active de la cellule et la puissance demandée à la pile. Ici ce sont les seules valeurs qui nous intéressent car il s'agit d'un prédimensionnement et non d'une modélisation détaillée. Il est important de noter que le logiciel limite le nombre de cellules et donc la puissance de la pile aux alentours de 100 kW. Pour palier à cela nous intégrons un gain dont nous détaillerons l'intérêt ci-dessous.
- "Driver 1" : ce bloc contient le cycle que fait le train sur tout le trajet en terme de puissance. Il a été établi grâce à la résistance à l'avancement de la partie 1.3, la vitesse sur le tronçon ainsi que la pente sur le tronçon avec la formule suivante : $P_{trouon} = (RAV + m \cdot g \cdot pente) \cdot V$. La figure 3.21 représente ce cycle.
- "IfThenElse" : ce bloc intègre la logique de gestion de la batterie. Si la différence entre la puissance demandée et la puissance de sortie de la pile à combustible est positive, la batterie est déchargée et inversement. On y trouve aussi la gestion des SOC_{mini} et SOC_{maxi} .
- "calcul_pce-1" : ce bloc permet de calculer les puissance dans chaque élément (Pile à combustible, commande et batterie) pour pouvoir les mettre sous forme de graphe pour pouvoir analyser les résultats.
- "Gain-1-1" : comme la puissance maximale de la pile est limitée du au logiciel, ce gain permet de multiplier la puissance de sortie. L'interprétation physique de ce bloc est que pour un gain de x , on installe x pile à combustible ou alors on installe une pile de puissance totale $x \cdot$ puissance maximale de FuelCellPEMBeta.
- "Load Demand" : ce bloc permet de gérer la puissance demandée à la pile à combustible en fonction de l'état de charge de la batterie. La loi de commande se rentre sous forme de graphe exactement comme celui de la figure 3.18.

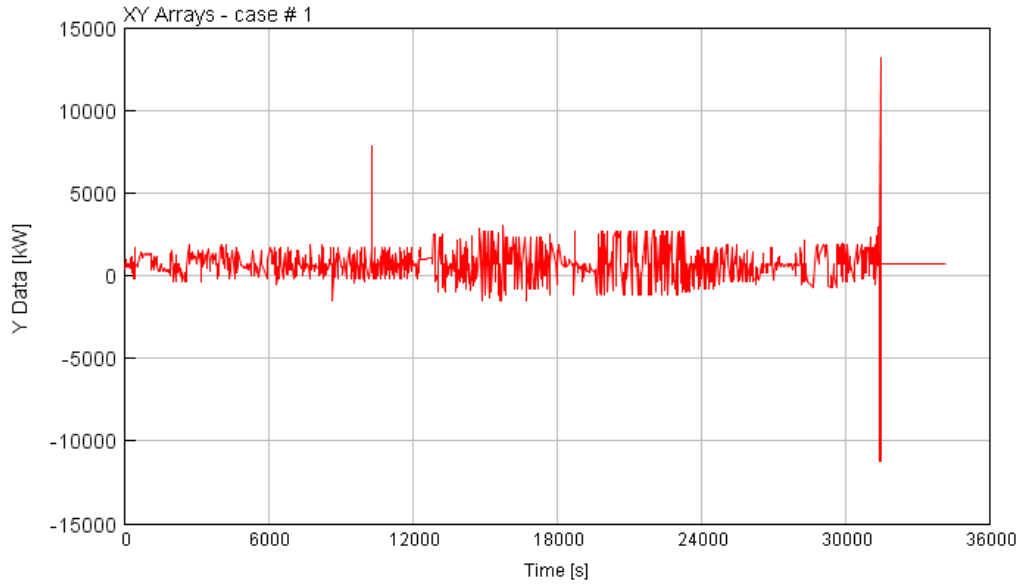


FIGURE 3.21 – Cycle parcouru par le train : puissance en fonction du temps

3.3.2.2 Simulations

Pour essayer de fixer une solution, nous allons faire 3 simulations.

La première aura pour but de déterminer les valeurs optimales de la capacité de la batterie, du gain "Gain-1-1" et le SOC initiale de la batterie. Pour cela, nous allons fixer les autres paramètres comme la loi de commande de la puissance demandée à la pile. Pour la capacité nous testerons des valeurs de 500Ah et 1000 AH. Pour le SOC initiale, nous testerons 0.3, 0.5 et 0.8. Pour finir, nous essaierons des gains allons de 1 à 5.

Le premier critère discriminant est l'état de charge minimale atteint au cours de la simulation. En effet, si il atteint 0,2, c'est que toute la puissance demandée n'a pas pu être délivrée. Ci dessous nous affichons le SOC mini en fonction du cas modélisé.

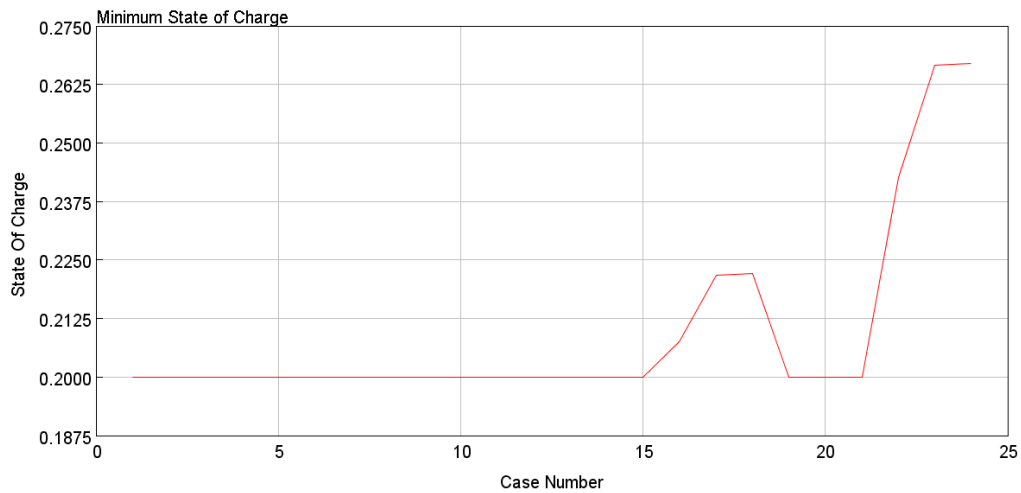


FIGURE 3.22 – SOC mini en fonction du cas modélisé

Le point commun de tous les cas qui n'ont pas un SOC qui atteint 0,2 est que leur capacité de batterie est de 1000Ah et il y a minimum un gain de 4, soit 4 Pile à combustible. De plus, nous obtenons des consommation en hydrogène plus faible pour un SOC initial de 0.8.

Ainsi, pour la deuxième simulation nous prendrons un SOC initiale de 0.8 et un gain de 4. Nous gardons la loi de commande de la pile à combustible fixé et nous allons chercher la capacité minimale pour la batterie. En effet, une batterie de capacité inférieure implique une batterie moins chère, moins volumineuse et plus légère. Nous ferons varier la capacité par incrément de 100 Ah en allant de 500 à 1000Ah.

Comme critère discriminant, nous gardons le même que précédemment est nous l'affichons ci dessous :

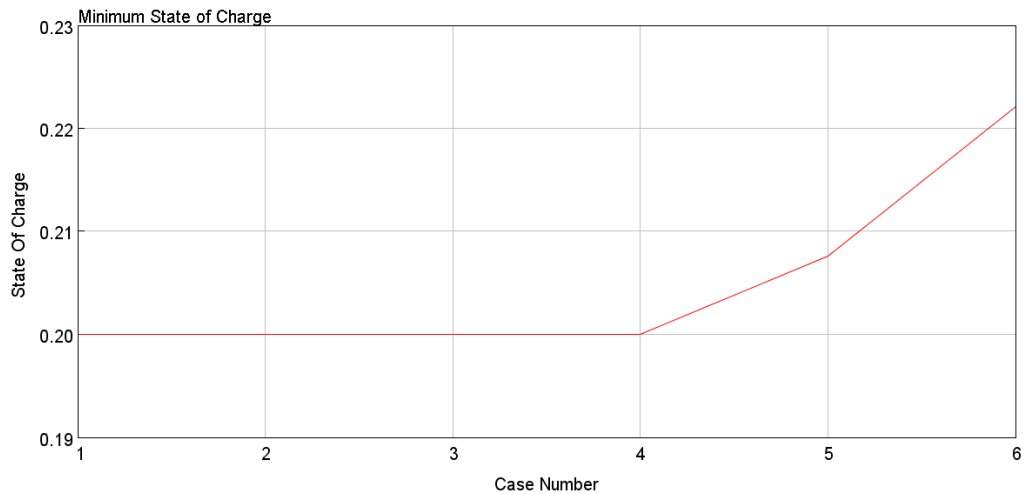


FIGURE 3.23 – SOC mini en fonction du cas modélisé

Ce graphe montre qu'il faut une batterie de capacité supérieure ou égal à 900Ah. Comme nous cherchons à minimiser la capacité, nous prendrons pour le reste des simulation une batterie de 900 Ah.

Pour la dernière simulation, nous cherchons la loi de commande optimale pour la puissance demandée à la pile. Pour cela nous fixerons les mêmes paramètres qu'à la simulation 2 avec en plus la capacité de la batterie à 900Ah. Pour les paramètres qui varient, nous avons 7 points pour la loi de commande : un pour chaque SOC allant de 0,2 à 0,8 par incrément de 0,1. Le facteur discriminant ici sera la consommation en hydrogène par pile à combustible. Nous allons en effet chercher à la minimiser. Nous vérifions aussi que le SOC reste bien supérieur à 0.2.

Après simulation, nous trouvons que la loi de commande optimale permettant la consommation minimale a la forme suivante :

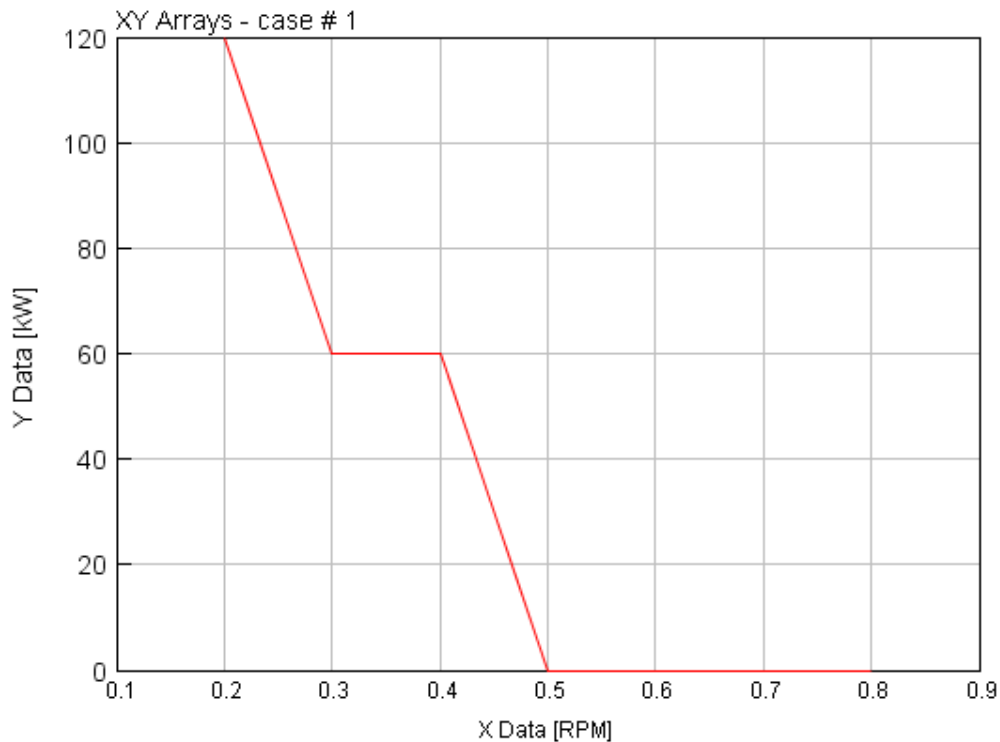


FIGURE 3.24 – Loi de commande de la pile à combustible optimale

Cette loi de commande dans ces conditions permet une consommation de 24,6 kg d'hydrogène pour tout le trajet par pile à combustible. Comme il y a 4 piles par locomotive, cela fait une masse de 98,4 kg par locomotive et une masse de 196,8 kg pour tout le convoi.

3.3.3 Émissions, coût et recharge

3.3.3.1 Dimensionnement du réservoir d'hydrogène

Les formes les plus courantes de stockage d'hydrogène sont gazeux à 350 ou 700 bars ou liquide. On opte pour un stockage à 700 bar car il permet une plus grande capacité qu'à 350 bars. La technologie liquide induit des fuites importantes et un coût de conditionnement aussi bien carbone que financier important, cette solution ne sera pas utilisée.

	gazeux 350 bars	gazeux 700 bar	liquide
capacité volumique (kg/m ³)		30	42
coût énergétique de conditionnement (%de l'énergie du réservoir)		15	35

TABLE 3.21 – Caractéristiques des différentes technologies de stockage de l'hydrogène [33]

Grâce à la simulation effectuée, on trouve une quantité d'hydrogène à embarquer de 98,4kg par locomotive. Cette quantité correspond à un volume total de réservoir de 3,28 m³ par locomotive. Le retrofit est donc possible étant donné que les réservoirs présents dans la locomotive diesel originale ont un volume de 3 m³ (cf figure 3.1).

3.3.3.2 Coût

Pour les coûts de cette solution, nous allons prendre en compte le coût de production de l'hydrogène, le prix des piles à combustible et le prix du réservoir.

Pour les moyens de production de l'hydrogène, nous allons prendre en compte l'électrolyse à haute température et le vaporéformage.

Le tableau suivant indique les différents coûts de la fabrication de l'hydrogène. L'électrolyse à haute température permet d'avoir des rendements de l'ordre de 80% [34].

Masse d'hydrogène pour deux locomotives	196,8 kg
coût de production	5 €/kg _{H2}
Coût total	984 euros

TABLE 3.22 – Bilan financier de la production d'hydrogène par électrolyse

Pour le vaporéformage, nous donnons les valeurs dans le tableau suivant :

Masse totale H2 pour 2 locomotives	196,8 kg
Prix vaporéformage [35]	1.5€/kg _{H2}
Prix total	295,2 €

TABLE 3.23 – Bilan financier de l'hydrogène produit par vaporéformage

Ainsi, du point de vu des coûts, il est plus rentable d'utiliser de l'hydrogène issu du vaporéformage. Cependant, il est évident que cette méthode va émettre beaucoup plus de CO₂.

Maintenant, pour le coût des piles à combustible, nous allons prendre comme référence une valeur de 180 euros/kW, donné par cette étude [36]. Dans notre simulation, chaque pile développe environ 100 kW, donc un coût total pour nos 8 piles de 144 000 euros. Avec une durée de vie estimée à 20000h [37], soit 1064 trajets pour nous, cela fait un coût par trajet d'environ 135 euros.

Pour finir, nous allons chiffrer le prix du réservoir. Actuellement, un réservoir pour de l'hydrogène à 700 bars coûtent aux alentours de 700 euros/kg_{H2} [38]. Étant donné que nous avons deux réservoirs qui stockent chacun 98,4 kg d'hydrogène, cela nous fait 138 000 euros. En prenant la même durée de vie que pour les piles, cela nous fait un coût par trajet de 130 euros.

électrolyse utilisant l'électricité du mix France 2023	2,86kgCO _{2e} /kgH ₂
électrolyse utilisant l'électricité du mix européen 2023	21kgCO _{2e} /kgH ₂
coût carbone en production française	1,125 TCO_{2e}
coût carbone avec le mix européen	8,265 TCO _{2e}

TABLE 3.24 – Bilan carbone pour production par électrolyse

Pour conclure, nous avons un coût par trajet de 560,2 euros si l'hydrogène est produit par vaporéformage, et de 1249 euros pour de l'hydrogène produit par électrolyse.

3.3.3.3 Émissions carbone

Comme vu précédemment, le vaporéformage partait être une bonne solution. Voyons maintenant les postes d'émission pour ces solutions de production d'hydrogène et la production du matériel (pile à combustible et réservoir).

Le contenu carbone de la production de l'hydrogène par électrolyse est donné ci-dessous pour différents scénarios, celui-ci prend en compte l'électricité utilisée, ainsi que le cycle de vie des installations d'électrolyse [39].

Pour le vaporéformage, les émissions sont plus grandes. En effet, il faut compter $14 \text{ kgCO}_2\text{e/kgH}_2$ [40]. Cela nous fait un bilan de 2,78 tCO_{2e}.

Pour la production de la pile et des réservoirs, le bilan est de 4 tCO_{2e} pour une voiture [41]. Étant donné que nous avons 8 piles de la taille d'une pile à combustible de voiture, nous pouvons utiliser ce chiffre et le multiplier par 8, soit une émission totale de 32 tCO_{2e}, soit des émissions de 30 kgCO_{2e} par trajet.

Chapitre 4

Synthèse des résultats

4.1 Diesel

Nous allons synthétiser les résultats trouvés dans la partie 3.1 à la page 8 . Dans cette partie, nous avons étudié trois technologies, la propulsion diesel, la propulsion au bioéthanol et l'hybridation diesel-batteries. Pour chacune, nous devons prendre en compte les variables d'intérêt que sont le temps de trajet, le coût et les émissions. Pour ces technologies, le temps de trajet n'est pas impacté car il n'est pas nécessaire de s'arrêter pour recharger.

Nous résumons les variables d'intérêts dans le tableau suivant :

	Diesel	Bioéthanol	Hybride
Prix total (€)	11361	15171	10577
Emissions ($tCO_2eq/trajet$)	14.05	4.9	12

TABLE 4.1 – Synthèse des résultats pour les technologies diesel, bioéthanol et hybride diesel-batterie

Du point de vu des émissions, il est clair que le biométhanol est le plus avantageux. Avec seulement 4.9 tonnes émises par trajet, l'impact par tonne de fret est de 3.46 kg de CO_2eq . Cependant, cette solution reste la plus coûteuse avec une augmentation de 33% du prix de la solution diesel classique.

Un bon compromis entre les deux est la solution hybride qui permet de réduire les émissions et qui coûte moins chère que la solution diesel classique. En effet, le prix de la batterie par trajet est compensé par les économies de carburant faites sur l'entièreté du trajet. Néanmoins, il ne faut pas omettre le fait que sa maintenance viendra aussi se rajouter à la maintenance du moteur et que ce coût n'est pas compris dans le chiffre donné.

4.2 Batteries

Donc au final, transporter la marchandise dans le sens Marseille-Rotterdam **coûte 13 000€ et émet 6,6 tonnes de CO2 équivalent**. La batterie avec cette masse de chargement possède une autonomie de 184,1 km. Dans la carte qui suit chaque couleur correspond à une charge de la batterie, donc à un changement de couleur on effectue un arrêt. La partie verte est la partie dans laquelle on utilise la caténaire comme alimentation. Entre chaque arrêt, il y a 184,110 km. La batterie sera capable de combler les 10km en plus si besoin en augmentant légèrement son état de décharge.

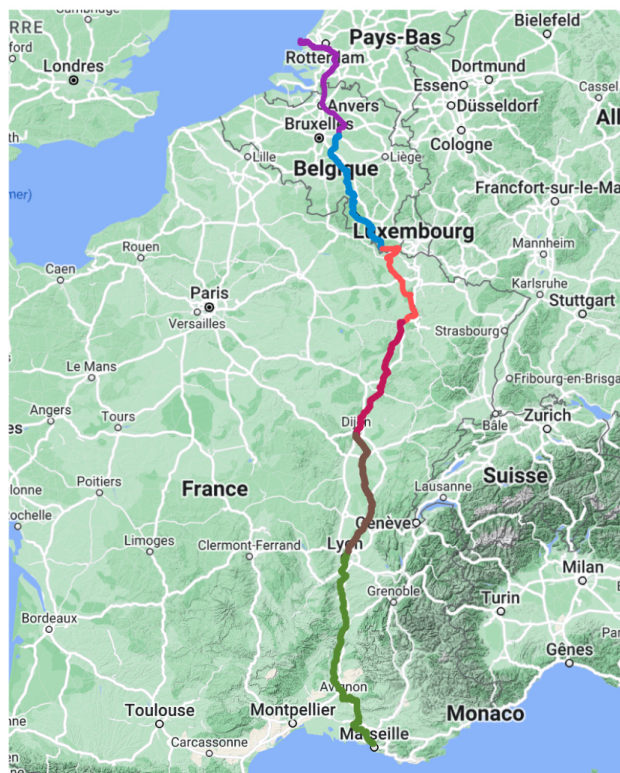


FIGURE 4.1 – Trajet avec les arrêts

Les lieux des arrêts sont :

- Zone de triage à côté du Technicentre SNCF BFC à de Dijon (France)
- SNCF poste 1 de Toul (France)
- Gare de Virton (Belgique)
- Zone de triage de Louvain (Belgique)

Dans chacun de ces lieux, il faudrait alors installer un chargeur de 4,7 MW.

De plus, si le trajet est effectué dans le sens **Rotterdam-Marseille**, les émissions de **CO₂ équivalent** seront **de 8,28 tonnes** pour un coût de **de 15000€**.

Pour finir, la solution utilisant des batteries émet peu de gaz à effet de serre et dépend fortement de l'intensité carbone des pays traversés. Mais cette solution au vu du peu d'électrification de la ligne implique la construction de chargeurs à forte puissance, ce qui peut être un frein à sa mise en place. On peut aussi qu'au vu des fortes masses et volumes déplacés par un train de fret l'ajout de deux wagons de batterie ne pose pas réellement de problème ici.

4.3 Hybridation hydrogène

Pour l'hybridation à hydrogène, les résultats dépendent fortement de l'origine de l'hydrogène. En effet, nous avons un coût par trajet de 560,2 euros si l'hydrogène est produit par vaporéformage, et de 1249 euros pour de l'hydrogène produit par électrolyse, en prenant en compte l'achat du matériel.

Du point de vue carbone, si l'hydrogène est produit par vaporéformage, cela émet 2,78 tonnes de CO₂e. Pour l'électrolyse, si l'électricité est française, cela émet 1,12 tonnes de CO₂e, alors que si l'électricité est européenne on émet 8,27 tonnes. De plus, la production du matériel émet 30kg par trajet.

Nous résumons ces résultats dans le tableau suivant :

	Vaporéformage	Électrolyse française	Électrolyse européenne
Prix total (€)	560,2	1249	1249
Emissions ($tCO_2eq/trajet$)	2,78	1,12	8,27

TABLE 4.2 – Synthèse des résultats pour les technologies hydrogène

Ainsi, ce tableau montre que pour minimiser les émissions il faut utiliser de l'hydrogène électrolyser en France.

Cependant, cette solution coûte plu chère et il faut prendre en compte le fait que les réseaux de distribution ne sont pas du tout développé pour l'hydrogène.

4.4 Résultats

Tous les résultats sont résumés ci dessous pour les 4 trajets nécessaires pour tout transporter :

	Prix total (€)	Emissions ($tCO_2eq/trajet$)
Diesel	45 444	56,2
Bioéthanol	60 684	19,6
Hybride diesel-batterie	42 308	48
Batteries	52 000	26,4
Hydrogène par vaporéformage	2 241	11,12
Hydrogène par électrolyse française	4 996	4,48
Hydrogène par électrolyse européenne	4 996	33,08

TABLE 4.3 – Synthèse des résultats

Ainsi, la solution qui offre le meilleur compromis semble être l'hydrogène produit par électrolyse en France. Cependant, il faut nuancer ce résultat car ces technologies sont peu développées et très compliquées à faire fonctionner. Une autre alternative serait donc les batteries qui coûtent chère mais émettent peu.

Annexes

Bibliographie

- [1] Wikipédia. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quivalent_vingt_pieds.
- [2] SNCF Réseau. Carte des corridors de fret. <https://www.sncf-reseau.com/medias-publics/2021-05/Carte%20des%20corridors%20de%20fret%20ferroviaire%20traversant%20la%20France.pdf>.
- [3] Open rail way map. Carte des vois ferrées dans le monde et leurs caractéristiques. <https://www.openrailwaymap.org/>.
- [4] SNCF. https://www.sncf-reseau.com/medias-publics/2023-04/DRR2023M_Document%20principal_V7_0.pdf.
- [5] Service Public de Wallonie. https://mobilite.wallonie.be/files/eDocsMobilite/politiques%20de%20mobilité/politique%20ferroviaire/Plan_desserte_definitif.pdf.
- [6] Longueur maximale des trains aux Pays Bas. <https://nos.nl/regio/overijssel/artikel/343342-langere-goederentreinen-door-overijssel-ministerie-trekt-portemonnee>.
- [7] SNCF. <https://medias.sncf.com/sncfcom/pdf/fret/Tarifs-version-fr.pdf>.
- [8] Wascosa. https://www.wascosa.ch/wagenpark/pdf/en/intermodalwagen/containertragwagen/containerwagen_48_en_ffs_2019-07.pdf.
- [9] Le Monde Vitesse moyenne d'un TER en France. https://www.lemonde.fr/economie/article/2017/11/18/dix-chiffres-qui-pourraient-vous-surprendre-sur-le-train-en-france_5216963_3234.html.
- [10] D. CYPRES. Cours de transport ferroviaire pour l'option propulsion de centrale nantes.
- [11] ADEME. Gt transport base carbone. <https://base-empreinte.ademe.fr/donnees/jeu-donnees>.
- [12] Taris d'entretien. <https://lomm.medium.com/transport-de-marchandises-mod%C3%A8les-de-co%C3%BBts-le-transport-ferroviaire-1-2-f55bb45a8c5d>.
- [13] Tarifs sncf manoeuvres. <https://medias.sncf.com/sncfcom/pdf/fret/Tarifs-version-fr.pdf>.
- [14] Prix des péages de trains. <https://www.lefigaro.fr/voyages/connaissiez-vous-le-droit-de-peage-cette-taxe-qui-fait-exploser-le-prix-de-vos-billets-de-train-2023>.
- [15] Salaire conducteur de train. <https://fr.talent.com/salary?job=conducteur+de+train>.
- [16] AFRA. <https://afra.fr/communiques-de-presse/prix-de-lenergie-quadruple-dans-le-ferroviaire-en-2023>.
- [17] Le Web des cheminots. <https://www.cheminots.net/topic/26195-consommation-de-locomotives/>.
- [18] Caractéristiques bb 60000. https://fr.wikipedia.org/wiki/BB_60000.
- [19] Transmission diesel électrique. https://fr.wikipedia.org/wiki/Transmission_diesel-%C3%A9lectrique.
- [20] Douanes françaises - bioéthanol. https://www.douane.gouv.fr/sites/default/files/uploads/files/2020-08/Annexes_circulaire_TIRIB.pdf.
- [21] Emissions du fret. <http://blog.cereza.fr/wp-content/uploads/2014/12/Cereza-Etude-Les-Emissions-de-CO2-du-fret-ferroviaire-face-au-transport-routier.pdf>.
- [22] Bioéthanol. <https://www.ad.fr/guides/guide-conseil/tout-savoir-sur-le-boitier-bio-ethanol-homologue/quel-est-le-prix-d-un-litre-de-bioethanol>.
- [23] Bioéthanol émissions. https://www.largus.fr/actualite-automobile/le-superethanol-e85-est-il-ecolo-9132390_p2.html.
- [24] Cat. https://www.cat.com/fr_FR/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18397966.html.
- [25] Elif Tasar Natalie D. Popovich, Deepak Rajagopal and Amol Phadke. Economic, environmental and grid-resilience benefits of converting diesel trains to battery-electric.
- [26] Tarifs électricité en 2023. Eurostat.

- [27] Electricity map.
- [28] M.Kupiers et D.Uwe Sauer T.Nemeth, P.Schroer. Lithium titanate oxide battery cells for high-power automotive applications – electro-thermal properties, aging behavior and cost considerations.
- [29] C.ROBERT A.RAVEY R.PEREY D.HISSEL. Environmental impacts of batteries for transportation application according to different life cycle steps.
- [30] N. C. Surawski et N. S. Bennett E. Zhao, P. D. Walker. Assessing the life cycle cumulative energy demand and greenhouse gas emissions of lithium-ion batteries, journal of energy storage.
- [31] J. GAUBICHER. Cours d'énergie pour la propulsion pour l'option propulsion de centrale nantes.
- [32] Vitesse de charge de la batterie. <https://www.capacitorsite.com/lithium.html>.
- [33] Conditionnement hydrogène. <https://www.contrepoints.org/wp-content/uploads/2015/07/Lhydrog%C3%A8ne-cet-hallucinog%C3%A8ne-Annexe-1.pdf>.
- [34] Prix hydrogène par électrolyse. <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/le-veritable-cout-de-lhydrogene-vert-122235/#:~:text=Le%20coût%20du%20dihydrogène%20obtenu,d%27origine%20éolienne%20ou%20photovoltaïque>.
- [35] Prix hydrogène par vaporéformage. <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/hydrogene.aspx?Type=Chapitre&numero=3#:~:text=L%27hydrogène%20produit%20aujourd%27hui,de%20celui%20du%20gaz%20naturel>.
- [36] Prix pile à combustible. <https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/23002-hd-fuel-cell-system-cost-2022.pdf?Status=Master>.
- [37] Durée de vie pile à combustible. <https://www.insis.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/piles-combustible-des-defaults-dans-les-electrodes-peuvent-se-propager-dautres-composants#:~:text=Elles%20seraient%20idéalement%20utilisées%20dans,est%20pas%20encore%20le%20cas>.
- [38] prix réservoir h2. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/13/5233>.
- [39] carbone hydrogène électrolyse. <https://www.sami.eco/blog/bilan-carbone-voiture-hydrogene>.
- [40] Carbone hydrogène électrolyse. <https://www.discoverthegreentech.com/hydrogene/production/vaporeformage-methane/#:~:text=Les%20estimations%20sont%20en%20général,par%20kg%20d%27hydrogène%20produit>.
- [41] Emissions production piles et réservoir. <https://www.sami.eco/blog/bilan-carbone-voiture-hydrogene#:~:text=La%20batterie%2C%20le%20réservoir%20à,de%204%20tonnes%20de%20CO2e.&text=de%2023%25%20les%20émissions%20de,est%20issu%20de%201%27électrolyse>.
- [42] Coefficient de résistance au roulement. https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistance_au_roulement.
- [43] Tarifs entretien. <https://lomm.medium.com/transport-de-marchandises-mod%C3%A8les-de-co%C3%BBts-le-transport-ferroviaire-1-2-f55bb45a8c5d>.
- [44] Durée de vie estimée d'une locomotive. <https://www.alstom.com/fr/press-releases-news/2023/3/locomotives-la-tete-et-les-muscles-du-transport-ferroviaire#:~:text=Si%20une%20locomotive%20a%20une,de%20vie%20de%201a%20locomotive>.