



HAL
open science

Etude de développement d'un concept de locomotive hybride à chaîne de traction électrique autonome propre et durable

Nissrine Abdallah

► **To cite this version:**

Nissrine Abdallah. Etude de développement d'un concept de locomotive hybride à chaîne de traction électrique autonome propre et durable. Energie électrique. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009. Français. NNT : 2009BELF0128 . tel-00607487

HAL Id: tel-00607487

<https://theses.hal.science/tel-00607487>

Submitted on 9 Jul 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT de l'université de technologie de Belfort-Montbéliard

Délivré par : l'école doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques **SPIM**
Discipline ou Spécialité: Génie Électrique

Présentée et Soutenue par Nissrine ABDALLAH

Le 16 Décembre 2009

Titre : Etude et développement d'un concept de locomotive hybride à chaîne de traction électrique autonome propre et durable

JURY

M. Pascal BROCHET, Professeur, Ecole Centrale de Lille, Rapporteur

M. Radu MUNTEANU, Professeur, Université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie, Rapporteur

M. Marcel JUFER, Professeur, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, Suisse,
Président du Jury

M. Maurizio CIRRINCIONE, Professeur, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Examineur

M. Didier GARRET, Responsable Plateforme Maintenance, ALSTOM Transport, Belfort,
Co-directeur de thèse

M. Samuel HIBON, Responsable Recherche et Développement, ALSTOM Transport, Belfort, Examineur

M. David BOUQUAIN, Maître de conférences, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Examineur

M. Abdellatif MIRAQUI, Professeur, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard,
Directeur de thèse

Ecole doctorale : SPIM

Directeur de Thèse : M. Abdellatif MIRAQUI

Résumé

Dans une démarche globale d'asservissement du bilan énergétique et climatique de son pack d'engins ferroviaires, et pour acquérir le savoir-faire en matière de spécification de futures locomotives électriques multi-tensions dépendant d'un kit autonome hybride, ALSTOM Transport s'intéresse de près à la problématique de l'hybridation ferroviaire pour des locomotives électriques multi-tensions en leurs intégrant une source d'énergie hybride embarquée. C'est dans cet élan que s'inscrit le projet d'«Etude et développement d'un concept de locomotive hybride à chaîne de traction électrique autonome propre et durable». Ce projet a été réalisé dans le cadre d'une thèse CIFRE lancé par l'Association Nationale de la Recherche Technique (ANRT) et mené par la société ALSTOM Transport et le laboratoire SET-UTBM. Il a pour but d'étudier et de développer un kit autonome hybride respectant l'environnement, à intégrer dans une locomotive électrique multi-tensions à chaîne de traction électrique, en prenant en compte l'encombrement disponible ; ceci est prévu pour des applications dans les domaines de locomotives tirant jusqu'à 1800 Tonnes et circulant en Europe, remplaçant ainsi les locomotives de manœuvre dans certains bouts de lignes non-électrifiées afin d'éviter le trafic ferroviaire, et les temps d'attente en réduisant ainsi les coûts d'exploitation, et en minimisant fortement la consommation du carburant, et les émissions du CO₂. Ce qui ramène la nouveauté dans le projet est de pouvoir intégrer un groupe hybride autonome dans une locomotive électrique multi-tension sans effectuer des modifications dans son architecture.

Les travaux réalisés ont consisté dans un premier temps à définir les différentes missions ferroviaires auprès des opérateurs privés sur des bout de lignes non-électrifiées répondant à notre problématique, et permettant ainsi de réaliser un dimensionnement énergétique du kit hybride autonome, respectant le cahier des charges de l'étude lié essentiellement à l'encombrement disponible. Ensuite, nous avons identifié les deux sources de tension et de courant de la source d'énergie hybride embarquée après avoir évalué plusieurs technologies potentielles.

Dans un deuxième temps, et après avoir défini l'architecture technique de la chaîne de traction de la locomotive électrique multi-tension à option du kit hybride, nous avons présenté la démarche de dimensionnement et de modélisation des ces deux sources d'énergie et de puissance.

La structure étant définie, nous avons abordé enfin la dernière phase d'étude qui est le développement du contrôle-commande, et la mise en œuvre de la gestion d'énergie entre les deux sources présentes à bord du véhicule, en tenant compte des limitations énergétiques du système de stockage et du dimensionnement du système. Le but de ces stratégies d'énergie est de maximiser par exemple le rendement global de la chaîne de traction. Les dimensions et choix en termes de stratégie de gestion issus de cette thèse seront directement exploités dans le projet au moment de sa construction.

Mots clés :

Kit d'autonomie hybride - Véhicule hybride - Hybridation ferroviaire - Gestion énergétique - Stockage - Gestion énergétique - Locomotive électrique multi-tension - Batterie NiMH - Supercondensateurs - Groupe Diesel - Modélisation – dimensionnement - Mission – développement propre durable

Abstract

In a comprehensive approach for controlling the energy balance and climate of their pack gear train, and acquire the know-how in the specification of future multi-voltage electric locomotives dependent on a standalone hybrid kit, ALSTOM Transport is very interested in the hybridization of their railway electric locomotives with multi-voltage power source incorporating a hybrid energy source onboard. It is in this spirit that the project fits “Survey and development of a Standalone embarked hybrid energy source clean and sustainable to be integrated in an electrical or diesel electrical locomotives”. This project was realized as part of a thesis CIFRE launched by the National Association for Technical Research (ANRT) and led by ALSTOM Transport and lab-SET UTBM. It aims to study and develop a standalone hybrid kit respecting the environment, to integrate into multi-voltage electric locomotives, taking into account the space available aboard; This is intended for locomotives pulling up to 1800 tons and traveling in Europe, thereby replacing the shunting locomotives in certain pieces of non-electrified lines to avoid train traffic and wait times thereby reducing operating costs, and greatly minimizing fuel consumption and emissions of CO₂. Which brings the novelty in the project to integrate a hybrid group in an independent multi-voltage electric locomotive without making changes in its architecture.

The framework consisted at first to define the different profiles missions in railway traffic with private operators on the end of non-electrified lines responding to our problem, and thus achieving a sizing of a standalone hybrid energy source, respecting the specifications study related mainly to the space available. Then, we have identified two sources “voltage (Power source) and current (Energy Source)” of the hybrid energy source onboard after evaluating several potential technologies.

In a second step of this study, and after defining the technical traction architecture of the electrical multi-voltage locomotive with option hybrid kit, we presented the approach of design and modeling of these two sources in energy and power.

The structure is defined; we finally tackled the last phase of study about the development of control-command systems, and implementation of energy management between the two sources present in the vehicle, taking into account the limitations energy storage system and its sizing. The goal of these strategies is to maximize the efficiency of the electric traction chain. The size and choice in terms of management strategy from this thesis will be directly exploited in the project at the time of its construction.

Key Words

Standalone hybrid kit - Hybrid vehicle – railway traction - Energy Management - Storage – Hybrid locomotive- multi-voltage electric locomotive - NiMH – accumulators - Supercapacitors - Diesel generator - Modeling - Sizing - Driving mission - developing sustainable & clean

Avant-propos

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire de thèse ont été effectués au Centre de recherche et développement d'ALSTOM Transport à Belfort sous la direction de Mr Didier GARRET Responsable de la plateforme maintenance des locomotives et au laboratoire SET (Système et Transport) sous la direction de Mr. Abdellatif MIRAOUI

Je remercie tout particulièrement :

M. Pascal BROCHET, Professeur à l'École Centrale de Lille, et M. Radu MUNTEANU, Professeur à l'Université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie, pour avoir rapporté ce travail et pour les critiques constructives émises.

M. Marcel JUFER, Professeur à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL pour avoir accepté de présider ce jury.

Monsieur Didier GARRET, Directeur de la plateforme de maintenance des locomotives électriques à ALSTOM Transport à Belfort pour la confiance qu'il m'a manifestée en me confiant ce travail, pour l'encadrement technique dont il m'a pourvu pendant ces trois années de thèse, pour l'écoute et la compréhension dont il a fait preuve à mon égard et surtout pour sa grande simplicité. Qu'il trouve à travers ce mémoire l'expression de ma gratitude et de mon amitié qui j'espère se poursuivra au-delà de ces années passées à ALSTOM Transport.

Monsieur Abdellatif MIRAOUI, Directeur de recherche de l'équipe Electrique à l'UTBM et Professeur des universités pour avoir accepté d'encadrer ce travail, pour ces conseils avisés et toujours pertinents, sa rigueur scientifique et ses grandes qualités humaines et sa grande confiance qu'il m'a manifestée en me confiant ce travail.

M. Samuel HIBON, directeur de Recherche et Développement à ALSTOM Transport à Belfort, pour son support lors de la dernière année de thèse.

M. David BOUQUAIN, Maître de conférences à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et M. Maurizio CIRRINCIONE, Professeur à l'Université de Technologie de

Belfort-Montbéliard, pour leurs soutiens scientifiques riches et pleins d'intelligences, pour leurs disponibilités et leurs grandes gentillesse.

M. Aberrafiaa KOUKAM pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire SET.

Monsieur Marc Debruyne, Expert de matériel roulant chez ALSTOM Transport pour l'intérêt porté à ce travail et son support et conseils techniques.

M. Pierre CHANAL, Directeur du Centre d'Ingénierie du Matériel roulant des locomotives d'ALSTOM Transport à Belfort pour m'avoir accueilli au sein de son équipe.

M. Robert PERIOT, Ancien directeur technique expert chaîne de traction à ALSTOM Transport à Tarbes et responsable du groupe CCN Management Energy pour m'avoir intégré dans son groupe d'expert de traction ferroviaire propre et durable et son support pour réaliser des essais au sein de l'UTBM.

M. Frédéric BODLET, Ingénieur traction chez ALSTOM Transport pour ses formations de modélisations des chaînes de traction hybride propre et durable effectuées lors de la thèse.

Tout le personnel de l'UTBM et d'ALSTOM Transport, en particulier les secrétaires et comptable qui m'ont facilité la vie au sein du laboratoire et de l'entreprise.

Je voudrais remercier également :

Mes collègues du bureau et mes amis leurs soutiens, leurs patiences et leurs compréhensions.

Mes parents pour le soutien financier et le cadre familial dont ils m'ont pourvu depuis mon enfance, leurs disponibilités, leurs immenses générosités, leurs patiences, leurs soutiens et leurs compréhensions.

*Je dédie ce mémoire à mes parents qui ont souffert
tant d'années de séparation pour effectuer mes
études supérieures et réaliser leurs rêves.*

*« Cultivez l'esprit par l'étude,
exercez le corps par le travail »
Sénèque*

Table des matières

Table des matières	11
Table des figures	18
Liste des Tableaux	22
Acronymes	24
Introduction Générale	26
Chapitre 1	
Etat de l’art, contexte du projet et cahier des charges de l’étude	29
1.1. Introduction.....	29
1.2. Etat de l’art de l’hybridation ferroviaire.....	31
1.2.1. Les intérêts d’une telle hybridation	31
1.2.2. Hybridation ferroviaire et la concurrence.....	33
• <i>Locomotives hybrides Green Goats de Railpower(CANADA)</i>	33
• <i>Le New Energy Train JR-EAST (Japon)</i>	34
• <i>Locomotive hybride de Bombardier ALPS (USA)</i>	36
• <i>Le MITRAC Energy Saver de Bombardier(Europe – Allemagne)</i>	38
• <i>Locomotive hybride au Laboratoire LEI (Suisse)</i>	40
1.2.3. Hybridation Ferroviaire et ALSTOM	41
• <i>Locomotive hybride BR203 de RailPower (Allemagne – Pays bas – France)</i>	41
• <i>Les Citadis de Rotterdam et de Nice</i>	43
• <i>Locotracteur à pile à combustible PAC – Projet COPPACE (France)</i>	44
1.2.4. Génération et stockage de l’énergie en ferroviaire	45
• <i>Le volant d’inertie</i>	47
• <i>Les supercondensateurs</i>	48
• <i>Les batteries</i>	50
1.2.5. Conclusion	53
1.3. Présentation du projet « Kit autonome hybride »	53
1.3.1. Objectif et Contexte du projet.....	53
1.3.2. Cahier des charges de l’étude	57
1.3.3. Démarches d’études.....	59

1.4. Conclusion	60
-----------------------	----

Chapitre 2

Dimensionnement Energétique du kit hybride et évaluation des différentes solutions envisagées61

2.1. Introduction.....	61
2.2. Définition de l'architecture de locomotive à option du groupe hybride embarqué.....	62
2.3. La dynamique des trains.....	66
2.3.1. Efforts nécessaires à la marche du train	66
2.3.2. Sollicitation d'adhérence.....	69
2.3.3. Caractéristique Effort-vitesse.....	69
2.3.4. Conclusion	72
2.4. Caractérisation et classification des missions ferroviaires.....	72
- <i>Besoin Ralliement FRET proche du terminal : chargement en port</i>	74
- <i>Ralliement autonome éloigné du terminal « Desserte FRET »</i>	75
- <i>Dépôt de chargement de 22 Wagons</i>	76
- <i>Transit autonome en haut le pied pour un nouveau point de départ commercial</i>	76
- <i>Desserte FRET locale autonome des wagons isolés</i>	77
- <i>Transit haut le pied autonome en dépôt de maintenance</i>	77
5 Km non électrifié.....	78
5 Km non électrifié.....	78
2.5. Dimensionnement Energétique du kit hybride	81
2.5.1. Simulation des missions ferroviaires.....	83
• <i>M1 : chargement de port, Ralliement proche du terminal</i>	85
• <i>M2 : Desserte FRET éloignée du terminal</i>	86
• <i>M3 : chargement des 22 Wagons</i>	87
• <i>M4 : transit FRET haut le pied pour rallier à un nouveau point commercial</i>	88
• <i>M5 : desserte FRET locale</i>	89
• <i>M6 : besoin en haut le pied dans un dépôt de maintenance</i>	90
2.5.2. Optimisation du dimensionnement énergétique : Fusions des missions	93
2.5.3. Conclusion	96
2.6. Evaluation des solutions envisagées	96
2.6.1. La source primaire : Générateur d'énergie	97
2.6.2. La source secondaire : système de stockage d'énergie	102
2.6.3. Conclusion	106
2.7. Conclusions et perspectives	106

Chapitre 3

Dimensionnement et modélisation des sources d'énergie de kit hybride embarqué108

3.1. Architecture fonctionnelle de la locomotive électrique à option du kit hybride.....	109
3.2. Dimensionnement des sources d'énergie du kit hybride.....	112
3.2.1. Dimensionnement du groupe Electrogène	112
• <i>Le Moteur Diesel</i>	116
• <i>Alternateur/Redresseur</i>	118
• <i>Validation du dimensionnement du groupe électrogène</i>	119
3.2.2. Dimensionnement du pack de batteries NiMH.....	121
3.2.2.1. Caractéristiques générales de la batterie NiMH	122
• <i>La capacité</i>	122
• <i>Le rendement énergétique</i>	124
• <i>Le rendement en courant</i>	124
• <i>Cellules, modules et pack design</i>	124
• <i>Effet de la température</i>	125
• <i>Limites technologiques des batteries NiMH</i>	126
3.2.2.2. Méthode analytique de dimensionnement des batteries de traction NiMH.....	127
• <i>Détermination du nombre de cellules en série $NsBAT$</i>	128
• <i>Détermination du nombre de branches en parallèle $NpBAT$</i>	129
• <i>Détermination des limites de l'état de charge SOC</i>	131
3.2.2.3 Analyse et validation des résultats de dimensionnement	132
• <i>Calcul de NSBAT pour le pack de batteries du power pack hybride</i>	132
• <i>Calcul de NPBAT pour le pack de batteries du power pack hybride</i>	132
• <i>Calcul des limites de SOC pour le pack de batteries du power pack hybride</i>	133
• <i>Validation des résultats de dimensionnement</i>	133
3.2.2.4. Comparaison de dimensionnement entre batteries NiMH et Li-ion.....	135
3.2.2.5. Conclusion	137
3.2.3. Méthode de dimensionnement des supercondensateurs	141
3.2.3.1. Modèle d'un supercondensateur	142
3.2.3.2. Modèle du pack SC.....	143
3.2.3.3. Dimensionnement du pack supercondensateur	144
• <i>Détermination du nombre d'éléments</i>	144
• <i>Etat de charge</i>	145
• <i>Tension nominale du pack</i>	145
• <i>Courant et puissance pack SC</i>	146
3.3. Modélisation des sources d'énergie du kit hybride	147
3.3.1. Modélisation du Groupe Electrogène	149
• <i>Modèle linéaire</i>	149

• <i>Modèles non linéaires</i>	151
3.3.2. Modélisation du pack de batteries NiMH	156
3.3.3 Modèle électrique dynamique moyen de la batterie NiMH du kit hybride embarqué	158
3.3.3.1. Etat de l'art des modèles équivalents électriques de la batterie NiMH	158
• <i>Modèle NiMH adaptée au génie électrique par l'université de Compiègne: description et validation expérimentale</i>	159
• <i>Modèle équivalent de la batterie obtenu par un fournisseur de batteries</i>	162
• <i>Synthèse générale de deux modèles équivalents</i>	164
3.3.3.2. Modélisation et validation du modèle dynamique moyen des batteries NiMH	165
• <i>Modélisation du pack de batteries NiMH</i>	165
• <i>Simulation et Validation du pack de batteries NiMH du kit hybride sous MATLAB Simulink</i> 168	
3.4. Validation expérimentale du modèle de la batterie NiMH à échelle réduite	173
3.4.1. Description du banc d'essai.....	173
3.4.2. Réalisation et validation des essais expérimentaux.....	174
• <i>Objectifs et contraintes d'essais</i>	174
• <i>Premier essai – Profil de chargement de port</i>	175
• <i>Deuxième essai : Cycle de deux besoins- Desserte locale/Transit haut le pied</i>	179
• <i>Troisième essai : Cycle chargement de port/cycle complet Décharge-Charge-Décharge</i> ...	179
• <i>Conclusion</i>	181
3.5. Conclusion	182

Chapitre 4

Développement du contrôle-commande et de la gestion d'énergie du kit hybride embarqué.....183

4.1. Développement de la gestion d'énergie	184
4.1.1. Loi de gestion en ligne : problématique et état de l'art.....	184
• <i>Comparaison de stratégies</i>	184
• <i>Analyse des résultats pour élaboration de lois expertes</i>	188
4.1.2. Choix de la gestion adoptée	189
4.1.3. Détermination des contraintes	190
4.1.4. Les modes de fonctionnement de la gestion d'énergie	192
4.1.4.1. Mode de fonctionnement normal.....	195
- <i>Notion du contrôle de l'état de charge sur un cycle de mission</i>	196
- <i>Phase de démarrage</i>	197
- <i>Phase de traction</i>	199
- <i>Phase d'arrêt</i>	201
4.1.4.2. Mode de fonctionnement dégradé.....	202
- <i>Phase de parking</i>	202
- <i>Mode d'interruption</i>	203

Switch TRAC position 2	204
Switch TRAC position 2	204
Mettre le Switch TRAC position 2	204
4.1.5. Intégration de la gestion d'énergie dans l'interface contrôle commande de la locomotive	205
- <i>Structure du système Contrôle Commande TCMS P EL II</i>	205
- <i>Interface de la gestion d'énergie en temps réel</i>	205
4.1.6. Conclusion	208
4.2. Modèle d'analyse de la gestion d'énergie.....	209
4.2.1. Modèle d'analyse du groupe Diesel	209
4.2.2. Modèle d'analyse du pack batteries	211
4.2.3. Modèle d'analyse de la gestion d'énergie.....	213
4.2.4. Simulation du Modèle d'analyse global du kit d'autonomie hybride	216
• <i>Chargement de port avec un SOC initial de 68% - réservoir 406 Litres</i>	216
• <i>Desserte locale 400 Tonnes 50 Km avec un SOC initial de 20% - réservoir 406 Litres</i>	217
• <i>Transit haut le pied 118 Km avec un SOC initial de 19 % - réservoir 406 Litres</i>	218
4.2.5. Conclusion	219
4.3. Modèle dynamique moyen de la régulation Bus – Pack batteries.....	220
4.3.1. Pré-dimensionnement du hacheur bidirectionnel du pack batteries	220
4.3.2. Modèle hacheur associé au pack de batteries	222
4.3.3. Régulation de courant	223
4.3.4. Régulation de tension.....	225
4.3.5. Conclusion	226
4.4. Critères de faisabilité.....	227
4.4.1. Volume du système	227
• <i>Volume du groupe Diesel</i>	227
• <i>Volume du pack des batteries</i>	228
4.4.2. Coût financier du système.....	231
• <i>Coût financier du groupe Diesel</i>	231
• <i>Coût financier du Pack batteries</i>	231
4.4.3. Durée de vie des batteries.....	232
4.4.4. Conclusion	233
4.5. Conclusions et perspectives	233
Conclusion Générale	235
ANNEXE A	
Figure 2.11. Modèle dynamique de la locomotive	239

Annexe B	
Tableau 2.12. Phase d'industrialisation des systèmes de stockage	240
Annexe C	
Méthode de dimensionnement analytique d'un pack de batterie de traction	241
Annexe D	
Dimensionnement d'un pack de supercondensateur et estimation de sa durée de vie	246
Annexe E	
Modèle d'analyse global du kit d'autonomie hybride.....	248
Bibliographie.....	250

Table des figures

Figure 1.1 Consommation mondiale annuelle d'énergie primaire [source : SFEN (société française d'énergie nucléaire)]	30
Figure 1.2 Réduction de l'Emission des NOX à travers les années.....	31
Figure 1.3 Architecture des Green Goats GG20B.....	34
Figure 1.4 Train hybride le New Energy Train JR-East.....	35
Figure 1.5 Le New Energy Train et sa gestion énergétique.....	36
Figure 1.6 Locomotive hybride ALPS : Intégration du volant d'inertie	37
Figure 1.7 Architecture de la locomotive hybride ALPS [29, 30].....	38
Figure 1.8 Le Mitrac Energy Saver de Bombardier.....	39
Figure 1.9 Principe de fonctionnement du train	40
Figure 1.10 Architecture de la locomotive hybride BR203	42
Figure 1.11 Le CITADIS de Rotterdam hybridé au volant d'inertie	43
Figure 1.12 Tram route de Nice.....	43
Figure 1.13 Schéma électrique de principe du tramway de Nice.....	44
Figure 1.14 Architecture du locotracteur hybride (PAC + Supercondensateurs).....	45
Figure 1.15 La locomotive Electrique multi-tension	54
Figure 1.16 Embranchements ferrés non-électrifiés pour des opérateurs industriels	55
Figure 1.17 Encombrement disponible dans la locomotive 1ère génération	57
Figure 1.18 Architecture actuelle d'une locomotive électrique PRIMA.....	58
Figure 1.19 Description des démarches d'études	59
Figure 2.1 Flux et types de puissance dans une locomotive électrique en traction	62
Figure 2.3 Architecture fonctionnelle de la locomotive électrique à option hybride	64
Figure 2.4 Courbe effort-vitesse de la locomotive électrique quadri-tensions	70
Figure 2.5 Courbe de freinage de la locomotive électrique multi-tension	71
Figure 2.6 Vue de Chargement du port de Marseille	74
Figure 2.7 Locomotive haut le pied dans un dépôt de maintenance.....	78
Figure 2.8 Caractéristiques de traction de la locomotive hybride BR203	80
Figure 2.9 Structure générale de CITHEL.....	81
Figure 2.10 Chaîne de traction 1500 V DC sous CITHEL	82
Figure 2.11 Paramètres de dimensionnement énergétique d'une locomotive hybride.....	85

Figure 2.12 Consommations Puissance-Energie du besoin Chargement de port	86
Figure 2.13 Consommations Puissance-Energie du besoin desserte FRET éloignée du terminal.....	87
Figure 2.14 Consommations Puissance-Energie du besoin chargement des 22 Wagons.....	88
Figure 2.15 Consommations Puissance-Energie du besoin transit FRET haut le pied	88
Figure 2.16 Consommations Puissance-Energie du besoin Desserte FRET locale 400 tonnes	89
Figure 2.17 Consommations Puissance-Energie du besoin haut le pied dans un dépôt de maintenance	90
Figure 2.18 Fusion des parcours ferroviaires « Début et Fin de missions non-électrifiées »	93
Figure 2.19 Dimensionnement énergétique du groupe hybride embarqué	95
Figure 2.20 Synthèse de la démarche d'étude	97
Figure 2.21 Comparaison des densités de puissance massique entre différentes motorisations.....	99
Figure 2.22 Comparaison des densités de puissance volumique entre différentes motorisations....	100
Figure 2.23 Plan de Ragne des systèmes de stockage d'énergie [37].....	103
Figure 2.24 Projection du plan de Ragne sur un axe fréquentiel [25]	104
Figure 2.25 Architecture de la locomotive électrique à option du groupe hybride embarqué	105
Figure 3.1 Architecture Fonctionnelle de locomotive électrique à option du groupe hybride	109
Figure 3.2 Fonctionnement d'une locomotive à option hybride	111
Figure 3.3 Une représentation système du groupe électrogène Diesel	112
Figure 3.4 Facteurs d'influence de l'efficacité énergétique d'un groupe Diesel [25]	116
Figure 3.5 Motorisations M1 et M2 choisies.....	117
Figure 3.6 Montage en ligne du Moteur + Alternateur Kassel et Leroy Somer	118
Figure 3.7 Dimensionnement du groupe électrogène du kit hybride.....	120
Figure 3.8 Caractéristique d'un module NiMH Du fournisseur de batteries 12 Volts 34 Ah (10 cellules en série).....	122
Figure 3.9 Effet de la température sur la batterie NiMH 100 Ah [43].....	125
Figure 3.10 Circuit électrique équivalent du pack de batteries et son hacheur bidirectionnel.....	127
Figure 3.11 Batteries NIMH du kit hybride en fonction du profil de puissance –.....	134
Figure 3.12 Caractéristique du module Li-ion VL12V de SAFT	136
Figure 3.13 Schéma synthétique de la méthode de dimensionnement des batteries	138
Figure 3.14 Graphe des contraintes technologiques des batteries	140
Figure 3.15 Algorithme du dimensionnement des supercondensateurs [38]	141
Figure 3.16 Configuration retenue pour le power pack hybride et son Bilan de puissance	148
Figure 3.17 Cartographie de consommation du groupe Diesel M2 de 350 KW.....	152
Figure 3.18 Motif de consommation spécifique adimensionnel d'un groupe de 350 KW.....	153
Figure 3.19 Modèle d'analyse du groupe Electrogène du kit hybride	155
Figure 3.20 Modèle d'analyse du pack de batteries du kit hybride embarqué	156
Figure 3.21 Plan de Nyquist de l'impédance de la batterie NiMH	160
Figure 3.22 Modélisation de l'impédance de Warburg.....	161
Figure 3.23 Schéma électrique équivalent de la batterie NiMH réalisé par le fournisseur	162
Figure 3.24 Schématisation d'une courbe de décharge de la batterie	166
Figure 3.25 Courbe équivalente de charge de la batterie.....	167
Figure 3.26 Model de pack de batteries NIMH du kit hybride sous MATLAB Simulink	168
Figure 3.27 Courbe équivalent de décharge du pack de batterie NiMH – power pack hybride.....	169

Figure 3.28 Comparaison entre deux modèles de batteries NiMH- Profil complet chargement de port	171
Figure 3.29 Comparaison entre deux modèles de batteries NiMH- Profil Transit haut le pied – desserte locale proche du terminal.....	172
Figure 3.30 Description du banc d’essai de la batterie NiMH du kit hybride embarqué.....	174
Figure 3.31 Premier Essai-Cycle de besoin chargement de port à échelle réduite entre la théorie et l’expérimentale	176
Figure 3.32 Deuxième Essai-Cycle de deux besoins- Desserte locale/Transit haut le pied- à échelle réduite entre la théorie et l’expérimentale	177
Figure 3.33 Troisième Essai-Cycle chargement de port/cycle complet « Décharge Charge Décharge »- à échelle réduite entre la théorie et l’expérimentale	178
Figure 4.1 Synthèse du fonctionnement du développement de la source hybride embarquée	191
Figure 4.2 Synthèse des différents modes de la gestion d’énergie – Kit hybride embarqué.....	193
Figure 4.3 Architecture fonctionnelle du kit hybride embarqué– Gestion d’énergie	194
Figure 4.4 Contrôle de l’état de charge sur un cycle de mission	196
Figure 4.5 Organigramme de l’algorithme – boîte noire de la phase démarrage.....	198
Figure 4.6 Organigramme de l’algorithme – boîte noire de la phase démarrage.....	200
Figure 4.7 Organigramme de l’algorithme – boîte noire de la phase d’arrêt	201
Figure 4.8 Organigramme de l’algorithme – boîte noire de la phase PARKING.....	202
Figure 4.9 Organigramme de l’algorithme – boîte noire de la phase Interruption.....	204
Figure 4.10 Blocs de gestion d’énergie à intégrer dans le système TCMS de la locomotive	207
Figure 4.11 Nouvelle interface Homme/Machine à intégrer dans l’interface contrôle-commande ..	208
Figure 4.12 Modélisation du bloc groupe Diesel.....	210
Figure 4.13 Modélisation du bloc pack de batteries	212
Figure 4.14 Modélisation du bloc Gestion énergie du groupe d’autonomie hybride	213
Figure 4.15 Analyse du comportement du groupe Diesel et des batteries – chargement de port ...	217
Figure 4.16 Analyse du comportement du groupe Diesel et des batteries – Desserte locale	218
Figure 4.17 Analyse du comportement du groupe Diesel et des batteries – Transit haut le pied	219
Figure 4.18 Architecture du pack de batteries associé au hacheur bidirectionnel.....	220
Figure 4.19 Modèle hacheur associé au pack de batteries	222
Figure 4.20 Modèle électrique dynamique moyen d’un module de batteries et son hacheur Régulation du courant.....	223
Figure 4.21 Réponse du courant IBATmes en fonction de sa régulation	224
Figure 4.22 Modèle du hacheur et régulateur de courant associé	225
Figure 4.23 Réponse de la tension VBUS mes en fonction de sa régulation.....	226
Figure 4.24 Modèle du bus et le régulateur de tension associé	226
Figure 4.25 Bilan de puissance du moteur thermique et ses auxiliaires.....	227
Figure 4.26 Modèle d’assemblage de pack de batteries du kit d’autonomie hybride.....	229
Figure 4.27 Schéma de configuration des batteries NiMH et ses auxiliaires	229

Liste des Tableaux

Tableau I.1 Comparaison des caractéristiques techniques des accumulateurs [19]	52
Tableau II.1 Tensions d'alimentation des réseaux de traction (Norme CEI 60850)	63
Tableau II.2 Caractéristique de profils de missions auprès des ports	75
Tableau II.3 Classification et caractérisation des profils de missions	80
Tableau II.4 Paramètres de dimensionnement du Chargement de port	86
Tableau II.5 Paramètres de dimensionnement du besoin desserte FRET éloignée du terminal	87
Tableau II.6 Paramètres de dimensionnement du besoin transit FRET haut le pied	89
Tableau II.7 Paramètres de dimensionnement du besoin Desserte FRET locale 400 tonnes	90
Tableau II.8 Dimensionnement énergétique du kit hybride embarqué.....	91
Tableau II.9 Nombre de cycle par an en fonction de chaque mission	92
Tableau II.10 Optimisation et fusion des missions ferroviaires	94
Tableau II.11 Tableau des pondérations des motorisations choisies.....	101
Tableau III.1 Comparaison d'encombrement entre les groupes électrogène M1 et M2.....	120
Tableau III.2 Bilan comparatif entre NiMH NHP 340-10 et Li-ion VL12V pour le kit hybride.....	137
Tableau III.3 Caractéristiques techniques de la batterie NiMH du kit hybride embarqué	139
Tableau 3.XVI Paramètres du circuit équivalent NiMH par la technique d'impédancemétrie-Fournisseur de batteries	164
Tableau IV.1 Estimation de durée de vie du pack de batteries du kit d'autonomie	232

Acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ANR	Agence Nationale de la Recherche
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Française
CCM	Center for Concept in Mechatronics
ALPS	Advanced Locomotive Propulsion System
PAC	Pile à Combustible
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
TCMS	Train Control and Monitoring System
HT	Haute Tension
GNV	Gaz Naturel Vehicle
SCR	Selective Catalytic Reduction
EGR	Exhaust Gas Recirculation
TCU	Train Control Unit
TRN	Transports Régionaux Neuchâtelois
TER	Transport Express Regional
HC	Hydrocarbure
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption
SOC	State Of Charge
DOD	Deep Of Charge
PDD	Profondeur De Décharge

Introduction Générale

La planète abrite aujourd'hui 6 milliards d'individus. Elle en comptera 9 milliards dans vingt ans. Bien entendu, aujourd'hui plus que jamais, les besoins en énergie de l'humanité sont colossaux et en progression. Ainsi, la consommation d'énergie primaire dans le monde augmente régulièrement. Cette énergie consommée chaque jour dans le monde provient en grande partie de matières premières. Parmi les énergies primaires se trouve le pétrole qui représente 33,8 % de l'énergie primaire consommée en France. Le secteur des transports recouvre à lui seul plus de la moitié de la demande de pétrole en France. Par ailleurs, l'automobile est responsable d'environ 20% des émissions anthropiques du CO2 mondial. Ajoutant à cela que nos réserves en pétrole se raréfient, à savoir que notre planète "n'est pas rechargeable" sinon à une grande échelle de temps.

Le secteur des transports est celui dont la contribution à la croissance des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) est la plus importante. D'après son rapport « Mobilité, transport et environnement » de décembre 2006, la Commission des Comptes et de l'Économie de l'Environnement (CCEE), rappelle qu'aujourd'hui, le transport est responsable de 27% des émissions totales de GES. Selon les projections du ministère des transports, les émissions de GES augmenteraient de plus de 17% d'ici 20 ans. La qualité de l'air des zones urbaines reste préoccupante et nuisible à la santé. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), la pollution atmosphérique (particules en suspension) représentait, dans l'Union européenne en 2000, environ 8.6 mois de vie perdue par personne. D'après l'Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail (AFSSET), en 2002, 3.3% des décès d'adultes de plus de 30 ans en France étaient imputables aux particules fines. Devant ce constat très alarmant, la recherche de solutions drastiques au problème de pollution est aujourd'hui une priorité incontestable [1, 4, 7].

Or la consommation de ces énergies premières provoque la pollution de la planète. Les réserves naturelles s'amenuisent et la planète se réchauffe. A remarquer également que des fortes tensions géopolitiques invitent à s'interroger sur les bases d'une société durable et viable pour tous. Signé en 1997 par 180 états, le protocole de Kyoto, le plus important traité international sur le sujet, est entré en vigueur en février 2005. Il oblige les pays concernés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre.

Aujourd'hui, la préparation du transport du futur, écologiquement propre et à "zéro pétrole", est une question stratégique et une étape incontournable. Plusieurs industries et laboratoires travaillent

au perfectionnement des solutions alternatives de génération de l'énergie telles que la pile à combustible, les biocarburants et des systèmes de stockage tels que les batteries, les volants d'inertie et les supercondensateurs. Cependant, ces nouvelles technologies n'ont pas encore atteint la maturité nécessaire pour leur démocratisation : la pile à combustible est "hors de prix" et les problèmes de sécurité inhérents au stockage de l'hydrogène ne sont pas encore résolus. Pour ce qui concerne les accumulateurs électrochimiques, leurs performances et leur durée de vie doivent encore évoluer pour répondre aux exigences d'autonomie et de moindre coût. S'ils semblent assez bien maîtrisés dans les applications stationnaires, les volants d'inertie posent encore beaucoup de problèmes de sécurité pour le domaine des transports. Bref, la conception de véhicules électriques financièrement abordables et à grande autonomie attendra encore quelques années. . .

En attendant la maturité de ces nouvelles technologies de génération et de stockage de l'énergie électrique, les véhicules hybrides constituent une alternative intéressante qui garantit l'autonomie des véhicules thermiques tout en pourvoyant une certaine sobriété en carbone. Aujourd'hui certains industriels et gouvernements consentent des efforts au développement des véhicules hybrides. L'automobile est le secteur le plus concerné pour sa contribution, en croissance vertigineuse, à la pollution globale. Mais le ferroviaire est aussi concerné : pour ses besoins en engins autonomes de secours, pour couvrir son réseau non-électrifié (terminaisons portuaires, gares de triages) et son réseau non électrifié. Aux États-Unis, la quasi totalité du réseau ferré est non électrifié et le pack d'engins ferroviaires est essentiellement thermique. Même en France, malgré une large électrification des lignes grandes vitesses, une bonne partie du réseau est non électrifiée. Surtout en ce qui concerne les bouts de lignes non-électrifiées, les opérateurs nationaux ainsi que les opérateurs privés continuent à acheter des locomotives Diesel rien que pour parcourir des petites distances pour rejoindre leurs sites industriels.

Dans ces conditions, les enjeux économiques liés à la taxation des émissions de carbone et au prix en constante augmentation du pétrole, couplé au besoin stratégique d'indépendance par rapport au pétrole sont autant de raisons qui justifient l'hybridation ferroviaire. Des expériences réussies ont déjà eu lieu notamment au Canada et au Japon.

Dans une démarche globale d'asservissement du bilan énergétique et climatique de son pack d'engins ferroviaires, et pour acquérir le savoir-faire en matière de spécification de futures locomotives électriques multi-tensions dépendant d'un kit autonome hybride, ALSTOM Transport s'intéresse de près à la problématique de l'hybridation ferroviaire pour des locomotives électriques multi-tensions en leurs intégrant une source d'énergie hybride embarquée. C'est dans cet élan que s'inscrit le projet d'« Etude et développement d'un concept de locomotive hybride à chaîne de traction électrique autonome propre et durable ». Ce projet a été réalisé dans le cadre d'une thèse CIFRE lancé par l'Association Nationale de la Recherche Technique (ANRT) et mené par la société ALSTOM Transport et le laboratoire SET-UTBM. il a pour but d'étudier et de développer un kit autonome hybride respectant l'environnement, à intégrer dans une locomotive électrique multi-tensions à chaîne de traction électrique, en prenant en compte l'encombrement disponible ; ceci est prévu pour des applications dans les domaines de locomotives tirant jusqu'à 1800 Tonnes et circulant en Europe, remplaçant ainsi les locomotives de manœuvre dans certains bouts de lignes non-électrifiées afin d'éviter le trafic ferroviaire, et les temps d'attente en réduisant ainsi les coûts d'exploitation, et en minimisant fortement la consommation du carburant, et les émissions du CO₂.

Ce qui ramène la nouveauté dans le projet est de pouvoir intégrer un groupe hybride autonome dans une locomotive électrique multi-tension sans effectuer des modifications dans son architecture.

Les travaux réalisés ont consisté dans un premier temps à définir les différentes missions ferroviaires auprès des opérateurs privés sur des bout de lignes non-électrifiées répondant à notre problématique, et permettant ainsi de réaliser un dimensionnement énergétique du kit hybride autonome, respectant le cahier des charges de l'étude lié essentiellement à l'encombrement disponible. Ensuite, nous avons identifié les deux sources de tension et de courant de la source d'énergie hybride embarquée après avoir évalué plusieurs technologies potentielles.

Dans un deuxième temps, et après avoir défini l'architecture technique de la chaîne de traction de la locomotive électrique multi-tension à option du kit hybride, nous avons présenté la démarche de dimensionnement et de modélisation des ces deux sources d'énergie et de puissance.

La structure étant définie, nous avons abordé enfin la dernière phase d'étude qui est le développement du contrôle-commande, et la mise en œuvre de la gestion d'énergie entre les deux sources présentes à bord du véhicule, en tenant compte des limitations énergétiques du système de stockage et du dimensionnement du système. Le but de ces stratégies d'énergie est de maximiser par exemple le rendement global de la chaîne de traction.

Ce travail de thèse est composé de quatre chapitres rappelant la démarche présentée ci-dessus.

Dans le premier chapitre, nous présentons l'état de l'art de l'hybridation ferroviaire à travers quelques exemples de trains hybrides et aussi à travers une analyse des motivations de la démarche d'hybridation dans le domaine ferroviaire. Enfin, nous présentons le cahier des charges spécifique de cette étude et les démarches scientifiques entreprises.

Le chapitre 2 est une contribution au dimensionnement énergétique de la source d'énergie hybride embarquée à intégrer dans la locomotive électrique multi-tension après avoir classifié les différentes missions ferroviaires appliquée au contexte de notre étude. Ensuite, nous avons identifié les solutions techniques des deux sources d'énergie et de puissance du groupe hybride.

Le chapitre 3 présente la démarche de dimensionnement et de modélisation des sources d'énergie de la source hybride embarquée. Nous affinons ainsi, à l'issue de cette analyse, le dimensionnement et la modélisation électrique de notre système de stockage d'énergie, à travers d'une validation expérimentale à échelle réduite du système.

Le chapitre 4 traite la mise en œuvre de la gestion énergétique de notre kit autonome en fonction des missions potentielles ferroviaires. Nous abordons ainsi la synthèse du contrôle-commande (tension du bus, convertisseur bidirectionnel, calcul des régulations de tension et de courant)

Chapitre 1

Etat de l'art, contexte du projet et cahier des charges de l'étude

1.1. Introduction

Dès les débuts de l'automobile, plusieurs moyens de propulsion se sont trouvés en compétition. Parmi ceux-ci, il y avait chaude lutte entre moteur à vapeur, moteur thermique et moteur électrique. D'ailleurs, lors de la première course Américaine de véhicule motorisé en 1896, deux des sept véhicules présents étaient des voitures électriques. De plus, ces deux voitures sont arrivées en première et deuxième place.

Le développement des véhicules électriques s'est fait en trois phases alternées par des périodes de désintérêt ou de stagnation. La démonstration de Gaston Planté à l'Académie Française des Sciences le 26 mars 1860 d'une batterie au plomb plus légère et plus efficace, a dopé la recherche dans le domaine des batteries. Quelques années plus tard, furent mises au point les batteries alcalines rechargeables Nickel-Cadmium et Nickel-Fer. Ces batteries furent produites à l'échelle industrielle à la fin du 19ième siècle. Les retombées furent immédiates dans le domaine de la traction électrique. Vers 1912, des centaines de milliers de véhicules électriques (voitures, camionnettes, trams et bus) circulaient dans les grandes villes en Europe, aux USA et en Australie [4, 7, 10].

Mais cette révolution de la traction électrique fut courte. La progression des véhicules électriques s'est ralentie à cause de l'invention des moteurs à combustion interne à démarrage électrique développés par Henry Ford en 1913. Les véhicules Diesel pourvoyant plus d'autonomie, de mobilité et de vitesse tout en étant moins chers, les améliorations sur la durée de vie et les performances des batteries n'ont pas pu renverser la tendance. Durant tout le 20^{ème} siècle, nous avons vu la prédominance des propulsions à combustion interne. Le gros inconvénient pourtant de cette technologie est qu'il émet une pollution atmosphérique. Désormais, ce critère est pris en compte dans la conception des systèmes.

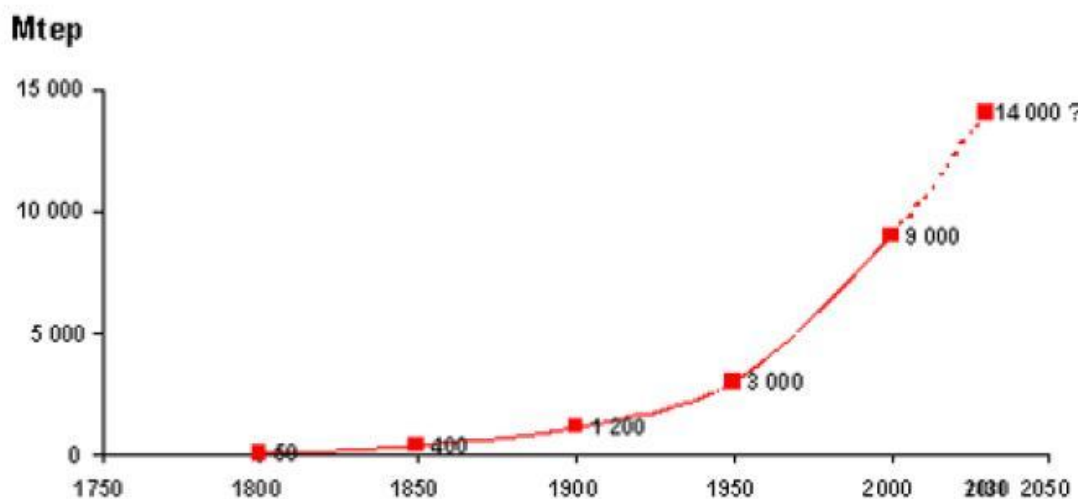


Figure 1.1 Consommation mondiale annuelle d'énergie primaire [source : SFEN (société française d'énergie nucléaire)]

Les experts scientifiques ont montré que les moyens de transport à combustion interne sont les principaux responsables des troubles environnementaux. Le réchauffement de la planète, la dégradation de la qualité de l'air et la rapide diminution des réserves en pétrole rendent nécessaire la mise en œuvre de solutions alternatives au moteur à combustion interne (figure 1.1). Les transports consomment un cinquième de l'énergie dans le monde. Ils sont aussi responsables de 20% des émissions de dioxyde de carbone. Selon le scénario du laisser-faire, les émissions augmenteront de 60% entre 1990 et 2010, soit 40% de la croissance totale. Voilà pourquoi, il importe de développer des moyens de réduire les émissions.

Plusieurs actions sont menées par plusieurs équipes de recherche en France, aux Etats-Unis et Royaume-Unis pour réduire la consommation du pétrole, les émissions de gaz à effet de serre, de polluants et de particules dans l'atmosphère, en couplant les moteurs thermiques classiques à des moteurs électriques accompagnés de plusieurs technologies de stockage d'énergie réversible en courant (batteries, supercondensateurs et volant d'inertie). Mais la traction électrique ne connut sa véritable période de gloire qu'à partir du protocole de Kyoto en 1992 et de façon plus accentuée ces dernières années avec la sensibilisation générale des gouvernements et des populations du monde entier aux problèmes environnementaux [51, 52].

Sur les sept thèmes déclarés comme prioritaires par la communauté européenne, se trouve le transport dans la rubrique, «développement durable». La problématique concernant le transport zéro émission présente l'activité majeure du pôle de compétitivité Véhicule du Futur. D'où la figure 1.2 élaborée par la communauté européenne sur l'émission de NO_x « oxyde de nitrogène » qui doit atteindre les zéro émissions après l'année 2014 [28, 46].

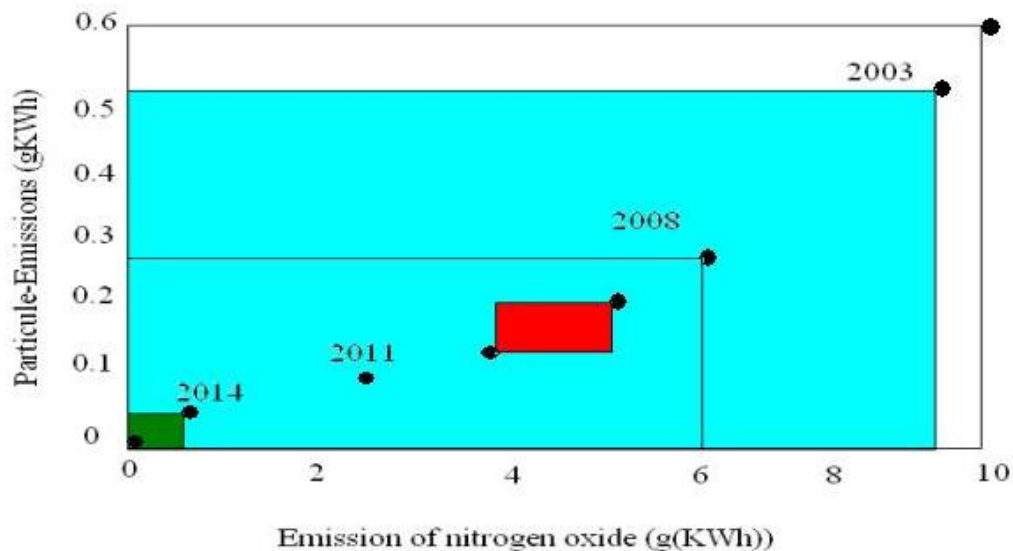


Figure 2.2 Réduction de l'Emission des NOX à travers les années

Malgré le grand accroissement mondial des recherches scientifiques pour le développement des nouvelles technologies de stockage d'énergie et de génération d'énergie respectant l'environnement, la réalisation d'un véhicule purement électrique de grande autonomie et de haute performance n'est pas d'actualité. Spécialement, dans le domaine de la traction ferroviaire où les puissances consommées dépassent largement celle de la traction routière ; il est donc économiquement et technologiquement impossible de concevoir des trains rapides ou des trains fret par la seule puissance d'un pack batteries ou de volants d'inertie et/ou d'une pile à combustible. Donc, les solutions les plus envisageables dans le domaine ferroviaire consistent à développer des solutions hybrides couplant les moteurs thermiques classiques à des moteurs électriques accompagnés d'un stockage d'énergie [7, 10, 12, 26, 50, 56].

Ce chapitre se compose essentiellement de trois parties. La section §1.2 présente l'état de l'art de l'hybridation ferroviaire. Ensuite, la section §1.3 présente le projet du développement du kit hybride autonome, dans le cadre duquel est réalisée cette étude. Enfin, la section §1.4 présente le cahier des charges de cette étude et les démarches scientifiques prévues.

1.2. Etat de l'art de l'hybridation ferroviaire

1.2.1. Les intérêts d'une telle hybridation

Si le faible impact global du chemin de fer sur l'environnement est reconnu, des problèmes locaux persistent, comme dans certaines gares du fait des rejets des moteurs Diesel. La technologie Diesel a beaucoup progressée pendant ces 20 dernières années. Les moteurs actuels intègrent ou sont en train d'intégrer (pour les plus gros) de nouveaux systèmes qui permettent d'améliorer la combustion et donc de diminuer la consommation de carburant et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Les améliorations ont porté essentiellement sur les caractéristiques de l'injection et de la compression. La géométrie des injecteurs a été améliorée, l'utilisation des hautes pressions, des pompes à injection et du common rail ont permis d'augmenter considérablement le rendement des

moteurs Diesel actuels. Mais les technologies appliquées aux moteurs ferroviaires sont en retard par rapport à celles utilisées dans l'automobile [26, 50, 56]. Cela s'explique par le très grand nombre de moteurs automobiles fabriqués chaque année face au petit marché que représente celui des moteurs ferroviaires. Par conséquent, le manque de rentabilité ajouté à la quasi absence de normes pendant de nombreuses années a ralenti le besoin d'appliquer des nouvelles technologies aux moteurs Diesel ferroviaires. De plus, les longues utilisations de ces moteurs (moyenne de 40 ans) fait que l'intégration de ces nouvelles technologies dans le domaine ferroviaire au niveau des moteurs est assez lente. Par conséquent, le nombre de vieux moteurs Diesel en exploitation est assez important. Beaucoup d'entreprises de chemins de fer préfèrent donc moderniser ces anciennes installations.

En effet, le ferroviaire est reconnu comme un transport durable "sobre en carbone". Selon l'ADEME et la SNCF en France, le transport ferroviaire voyageur émet en moyenne 5.38 gCO₂/(voyageur.km) contre 148 gCO₂/(voyageur.km) pour l'aérien. Cette performance est spécifique à la France où la plupart des trains voyageurs sont électriques. En tenant compte du taux de remplissage des trains, le parc de trains voyageurs à la SNCF est constitué de 85% de TGV (électriques), 10% de TRN dont 12% de Diesel et 5% TER dont 36% de Diesel [50, 56]. Le tableau se noircit légèrement lorsqu'on élargit le calcul à d'autres pays européens comme l'Allemagne, la Belgique, l'Espagne, l'Italie, le Luxembourg, les Pays-bas et le Royaume-Uni. L'indicateur climatique du ferroviaire s'élève alors à 56 gCO₂/ (voyageur.km). Ce chiffre est en encore plus mauvais aux USA où, en dehors des lignes de métro ou de tram, le réseau ferré est presque entièrement non électrifié. Mais le transport ferroviaire reste globalement, en comparaison à l'automobile et l'aérien, le moyen de transport qui a le moins d'impacts fâcheux sur l'environnement.

Néanmoins, les locomotives et les locotracteurs sont utilisés principalement pour les manœuvres, les triages et les dessertes locales des wagons. La majorité de ces engins sont propulsés par des moteurs Diesel et étaient avant 1980 très souvent en technologie diesel-électrique par couplage d'un moteur Diesel avec une génératrice alimentant des moteurs électriques ; ce type de propulsion offrait un très grand couple au démarrage et une finesse de vitesse de translation propice aux manœuvres ferroviaires. Les moteurs thermiques tournent plus de 60% du temps au ralenti. Ce mode de fonctionnement est synonyme d'un excès de consommation de fuel, d'émission de polluants et de nuisances sonores. L'hybridation des engins ferroviaires favorise une économie de fuel et donc une réduction des émissions nocives et des nuisances sonores. En outre, il est stratégiquement indispensable pour les acteurs du domaine des transports (automobile, ferroviaire et aérien) de préparer leur entrée dans l'ère de l'« après pétrole ». Pour une locomotive électrique, l'hybridation par du stockage en local permet le lissage de la consommation sur la caténaire et une meilleure qualité du réseau de distribution de l'énergie.

Une nouvelle forme d'hybridation ferroviaire est développée sur certains tramways : il s'agit d'une hybridation pour raison d'autonomie au passage de plages ou d'ouvrages historiques que les autorités locales ne veulent pas dénaturer par la pose de caténaires apparentes. C'est notamment le cas du Citadis de Rotterdam et de celui de Nice, construits par l'industriel ALSTOM [13, 18, 21].

Ainsi, la première motivation de l'hybridation ferroviaire est la réduction de la consommation de gasoil et des émissions de CO₂, intersection entre l'économie et environnement. C'est pour cela que le cas d'hybridation ferroviaire le plus répandu est l'hybridation des locomotives Diesel. Une autre nouvelle forme d'hybridation ferroviaire est intéressante à développer : il s'agit d'ajouter une source d'énergie hybride embarquée dans une locomotive électrique existante afin de la rendre autonome pour les petites missions aux bouts de lignes. Actuellement, les plates-formes FRET n'étant pas électrifiées, un locotracteur diesel effectue la traction jusqu'au point de départ sous lignes

électrifiées. Ces types de missions existent typiquement dans les ports, les plates formes de triage FRET, les stations de chargement de cargaison (Minerais, automobile, céréales,...) [33]. Cette solution autoriserait donc une diminution des coûts d'exploitations par la réduction d'utilisation des locotracteurs et aussi par la réduction des temps logistiques.

Par ailleurs, malgré la percée des nouvelles technologies de stockage telles que les supercondensateurs et les volants d'inertie, les accumulateurs électrochimiques restent le système de stockage le plus intéressant pour des applications nécessitant une capacité de stockage élevée. Leur utilisation assez répandue les rend économiquement plus attrayantes que les autres solutions. De fait, l'architecture d'engins ferroviaires hybrides la plus répandue est celle qui associe un ou des moteurs thermiques et une batterie d'accumulateurs électrochimiques.

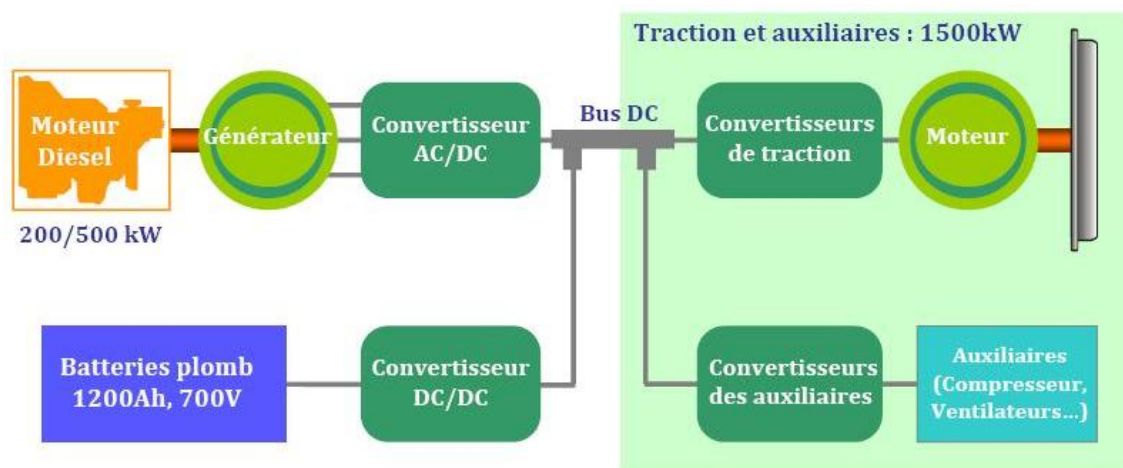
1.2.2. Hybridation ferroviaire et la concurrence

❁ Locomotives hybrides Green Goats de Railpower(CANADA)

Alimentée par des batteries chargées par un petit groupe électrogène fonctionnant au diesel, la locomotive Green Goat est beaucoup plus silencieuse que les locomotives diesel classiques. Elle satisfait aux normes niveau 2 de l'U.S. Environmental Protection Agency qui sont entrées en vigueur en 2005 et qui concernent en particulier les émissions de gaz d'échappement. RailPower Technologies affirme que les locomotives Green Goat permettent de réduire les émissions d'oxyde d'azote (NOx) à l'origine du smog et les particules de diesel de 90 % par rapport aux locomotives de triage classiques [25, 26, 27].

Ce système est équivalent au niveau puissance à un moteur Diesel de 1500 – 2000 CV. L'imposant moteur Diesel classique des locomotives a été remplacé par une série de batteries alimentées par un petit moteur thermique. Ces batteries vont à leur tour fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement des moteurs électriques qui assurent la traction. Le schéma fourni par le fabricant, Rail power, résume le fonctionnement.

Les batteries occupent une grande partie de la place et leurs poids important permettent d'assurer une bonne adhérence et donc une bonne traction. Le moteur thermique ne fonctionne que pour recharger les batteries et lorsqu'il fonctionne, il reste à son régime optimal de performance. La puissance du moteur est comprise entre 90 et 220 kW. Les batteries ont une durée de vie de 10 ans.



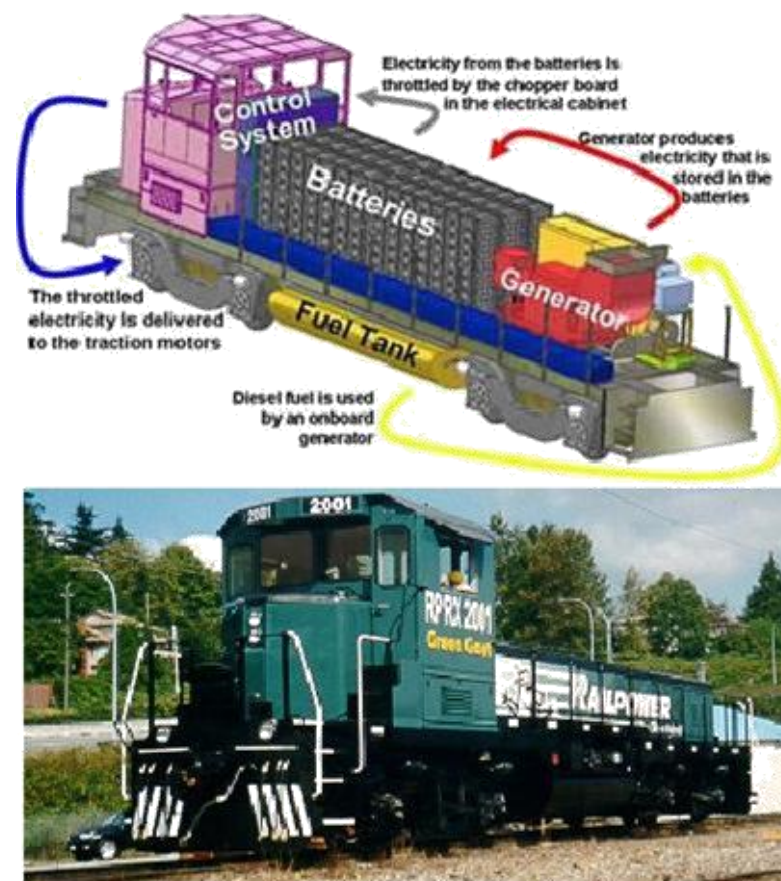


Figure 3.3 Architecture des Green Goats GG20B

La figure 1.3 montre l'architecture de la Green Goat GG20B. Un impressionnant pack de batteries (1200 Ah/700 V) hybride un petit groupe Diesel (200 à 500 kW) pour assurer la traction et l'alimentation des auxiliaires, soit une puissance totale de 1500 kW. RailPower dispose d'un brevet sur cette architecture d'hybridation et a négocié des licences d'exploitation avec plusieurs constructeurs ferroviaires dont ALSTOM et Bombardier.

Ce système permet une réduction de 40 à 60% de la consommation de carburant par rapport à un modèle équivalent Diesel. Les NOx sont réduits jusqu'à 90% et les particules fines jusqu'à 77%. Une importante réduction du bruit ainsi que des vibrations a aussi été mesurée. La consommation est également réduite de plus de 40 %.

Le coût de transformation de ce type de locomotive (GP9) a été estimé à environ 700 000 \$. Le 14 mars 2005 à Calgary, le Chemin de fer Canadien Pacifique a annoncé l'achat de 35 locomotives hybrides de la série Green Goat sur une période de quatre ans, auprès de RailPower Technologies Corp. de Vancouver.

at" seront assemblées par ALSTOM dans les triages de Calgary qui ont été loués auprès du CFCP.

La réduction des impacts environnementaux et l'économie de fuel qu'elles permettent rendent ces locomotives économiquement et écologiquement attractives. Néanmoins, l'utilisation des batteries électrochimiques, dans un contexte de traction pure, expose ces dernières à des pics de puissance répétés et à une multitude de microcycles, ce qui réduit sensiblement leur durée de vie. Les résultats de retour d'expérience sur les Green Goats sont gardés dans le plus grand secret mais, en coulisse, RailPower avoue travailler sur le prolongement de la durée de vie des batteries...

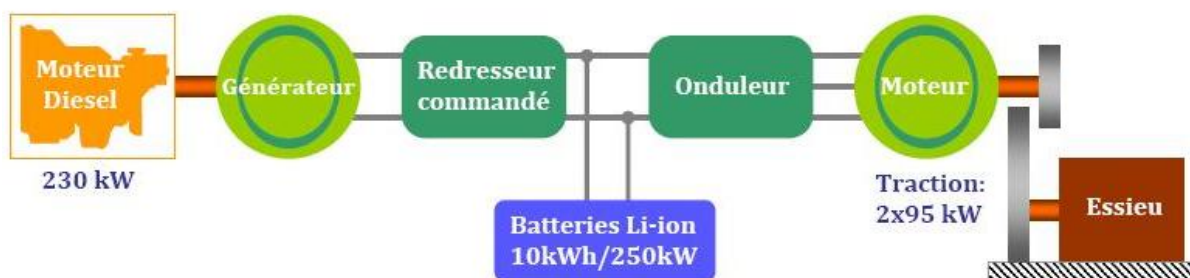
✿ *Le New Energy Train JR-EAST (Japon)*

East Japan Railway Company a développé un autorail hybride Diesel/électrique : le « New Energy Train » (NE Train). Les premiers essais ont débuté en mai 2003 sur la ligne de Nikko. Le projet prévoit de se poursuivre en remplaçant le moteur thermique par une pile à combustible [26, 47, 48].

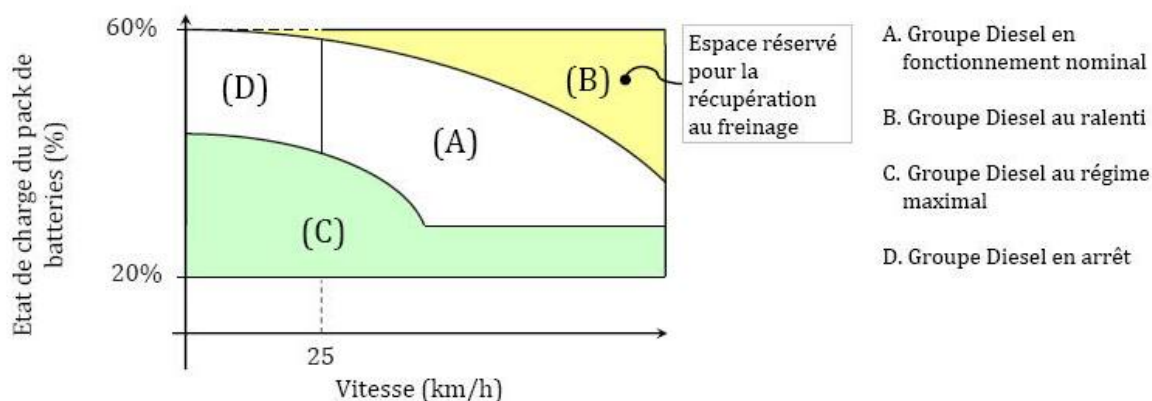


Figure 4.4 Train hybride le New Energy Train JR-East

Le démarrage est assuré par l'énergie électrique, le moteur Diesel est utilisé lors des phases d'accélération pour produire l'énergie suffisante. Le moteur thermique assure aussi la charge des batteries qui sont placées sur le toit. Il s'agit de 5 batteries lithium-ion (Figure 1.4). L'énergie récupérée lors du freinage est également récupérée pour alimenter les batteries. Pour un parcours à moins de 5 Km/h, donc dans les gares, la traction est entièrement électrique. La figure 1.5 explique le fonctionnement de ce système ; L'architecture est sobre : un groupe Diesel de 230 kW électrique est associé à un pack de batteries lithium-ion de 10 kWh capable de fournir 250 kW de puissance crête. JR-EAST explique le choix de la technologie lithium-ion (Li-ion) par ses performances aussi bien en densité de puissance qu'en densité d'énergie. De plus, JR-EAST compte sur une baisse de prix consécutive à l'augmentation prévisible de l'utilisation de cette technologie dans l'automobile.



(a) L'architecture électrique du NE@Train



(b) La gestion énergétique du NE@Train

Figure 5.5 Le New Energy Train et sa gestion énergétique

Une réduction de la consommation de carburant de 20% a été obtenue en utilisant l'énergie récupérée par le freinage et l'optimisation du moteur a permis de réduire de 50% les émissions en NOx et en particules. De plus, le bruit a nettement diminué et notamment dans les gares puisque le système y fonctionne en mode électrique, le moteur thermique étant coupé.

Malgré ses excellentes performances économiques et environnementales, le NE@Train n'est qu'un exemple, édifiant certes, de gestion intelligente de l'énergie. Mais ce train ne constitue par un véritable modèle d'hybridation ferroviaire, car la puissance du Diesel de 230 kW embarquée reste trop élevée pour un besoin en traction de 295 kW. La véritable révolution en matière d'hybridation ferroviaire est venue du Canada avec RailPower.

❁ Locomotive hybride de Bombardier ALPS (USA)

Le programme ALPS Advanced Locomotive Propulsion System a été établi par le Centre Electromécanique à l'Université de Texas CEM-UT en 1996 avec le patronage de l'administration fédérale de chemin de fer et des organismes d'état. L'objectif du programme est de Développer et démontrer les technologies requises pour une locomotive pour voyageurs à propulsion hybride avec les caractéristiques suivantes :

- ✓ Vitesse maximale 150 Km/h.
- ✓ Possibilités exceptionnelles d'accélération – comparables aux locomotives électriques.
- ✓ Une réduction de la consommation de carburant en utilisant l'énergie récupérée par le freinage ainsi que la réduction des émissions en NOx et en particules.

- ✓ reportez \$3.000.000 à \$5.000.000 par coût d'électrification d'infrastructure de rail, en économisant jusqu'à \$1 billion.

Une fois développée, les technologies d'ALPS sont prévues pour permettre la formation rentable de nouveaux trains à grande vitesse dans l'ensemble des Etats-Unis. La technologie est programmée pour être disponible sur la côte de Golfe, le sud-est et les couloirs à grande vitesse trapézoïdaux, aussi bien que les couloirs à grande vitesse existants.

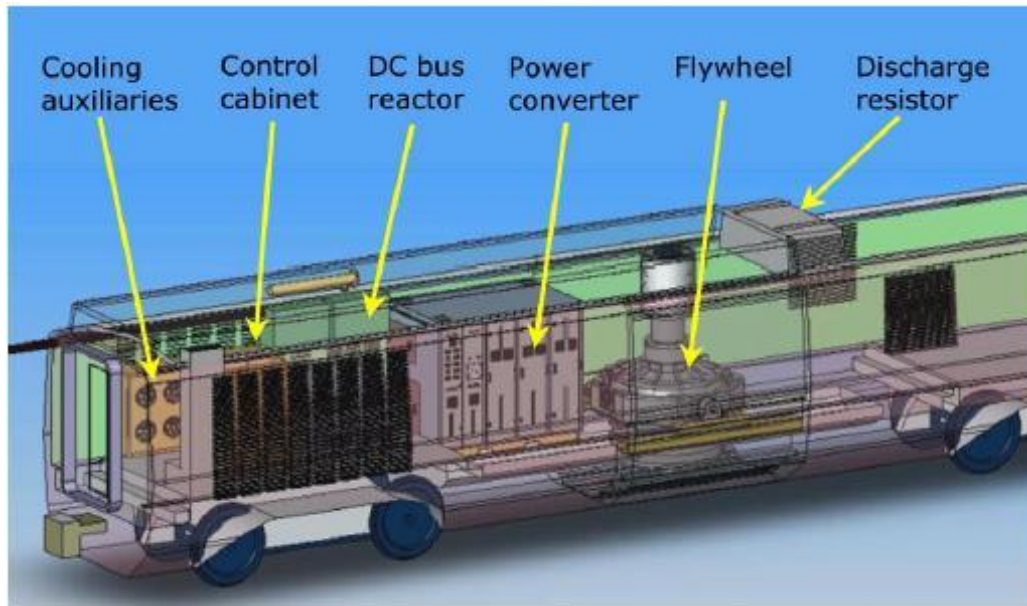


Figure 6.6 Locomotive hybride ALPS : Intégration du volant d'inertie

La locomotive ALPS est une locomotive hybride entre une Turbine à gaz et un Volant d'inertie de puissance de 2 MW développé par le «Center for Electromechanics» à l'université de Texas-Austin sponsorisé par « The Federal Railroad Administration» (FRA) (Figure 1.6.)

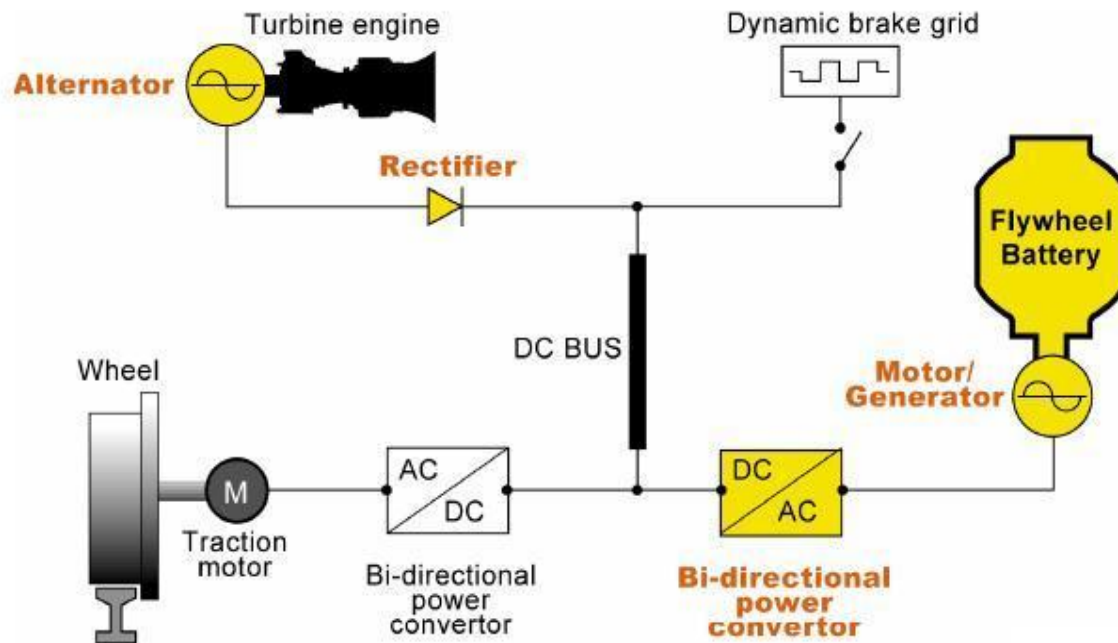


Figure 7.7 Architecture de la locomotive hybride ALPS [29, 30]

La figure 1.7. montre l'architecture technique de la locomotive hybride ALPS. La Turbine à gaz a une puissance entre 2.5 et 4 MW avec une vitesse de rotation entre 14 000 et 16 500 tr/min. Le générateur de l'ALPS est une machine synchrone avec un diamètre de 0.7 m, 1.37m de longueur et de masse de 980 Kg. L'énergie fournie par le volant d'inertie est égal à 360 MJ (100 KW/h) et d'une puissance de 2 MW pendant 3 minutes; il a un encombrement de 1.6 m de diamètre et de 1.9 m de longueur, avec une vitesse de rotation entre 7.500 et 15.000 tr/mn, ce qui représente 75% de sa gamme de stockage d'énergie. Le convertisseur de puissance est également équipé d'un circuit de résistance pour se protéger contre la surtension ou pour dissiper l'énergie résiduelle du volant à tout moment [26, 29, 30].

✿ Le MITRAC Energy Saver de Bombardier(Europe – Allemagne)

Ce projet est réalisé par la Bombardier Transportation GmbH, Mannheim en collaboration avec la Mannheimer Verkehrs AG (MVV) hybridé par des supercondensateurs dans des motrices diesels-électriques [26, 49].

Les avantages de la nouvelle technologie ne se limitent pas seulement à la réduction des coûts électriques directs qui sont, de toute manière, importants – pour le métro urbain, ils se situent actuellement à environ 30 000 € pour une motrice diesel typique, même à environ 180 000 € par an – et à la vue des prix des énergies en perpétuelle augmentation, ils occuperont une part de plus en plus grande dans les coûts globaux.

Pour les motrices électriques, les aspects annexes suivants sont également importants :

- Réduction de l'émission de produits à effet de serre, en particulier de CO₂ (contribution importante à la réalisation de la convention de Kyoto),
- Economies possibles dans le domaine des investissements dans l'infrastructure (plus petites sections de caténaire, plus grands écarts entre les sous-stations),

- Possibilité d'une augmentation de circulation sur des lignes existantes sans mesures d'extension.

Egalement importants pour les motrices diesel :

- Réduction de l'émission de produits à effet de serre, en particulier de CO₂,
- Raccourcissement des durées de trajet en raison de l'effet « Booster »,
- Respect des cadences au moyen de motrices diesel-électrique à motorisation plus faible (et donc moins chères),
- Possibilité de maîtrise de courts trajets sans caténaire respectivement moteurs diesel coupés

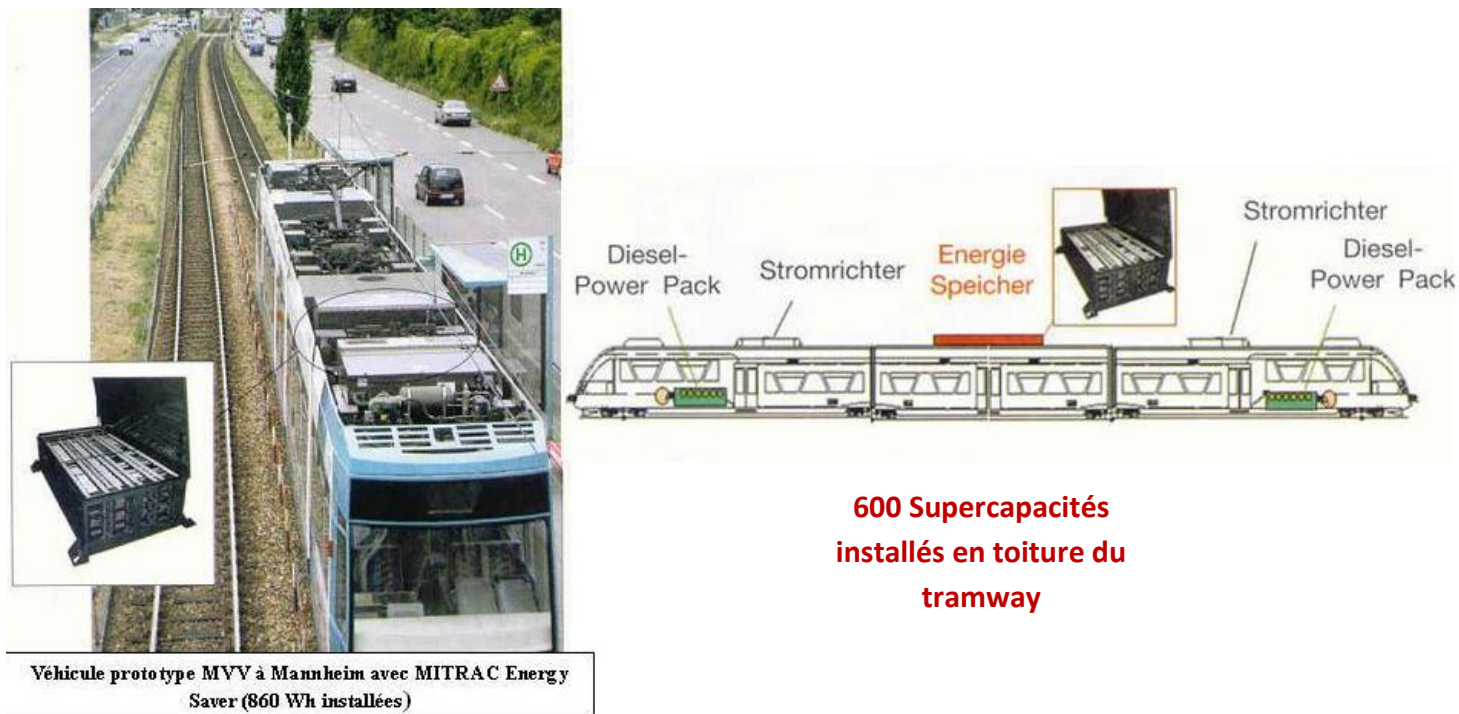


Figure 8.8 Le Mitrac Energy Saver de Bombardier

Cette hybridation permet de réduire les frais de service et d'améliorer la compatibilité environnementale. Pendant le freinage, les supercondensateurs stockent l'énergie cinétique. Lors d'un démarrage, elles délivrent cette énergie fournissant l'accélération requise. Le Mitrac Energy Saver embarque 600 éléments supercapacitifs (BCAP0008 de Maxwell Technologies) montés en série sur le toit (figure 1.8) et délivrant à pleine charge 750 V. Le pack de supercondensateurs est refroidi à l'air forcé.

Le Mitrac Energy Saver permet une économie d'énergie de 30%, une diminution de 50% de la puissance de pointe à fournir par le réseau et une réduction de l'ordre de 50% des chutes de tension caténaire. En effet, pour un courant typique de 1000 A, la chute de tension vue par le tramway peut s'élever jusqu'à 100 V. En réduisant les pics de courant, cette solution soulage la tension caténaire. Cette solution permet également de rouler à haute accélération maintenue sur 1000 mètres sans caténaire (figure 1.8), permettant de se dispenser de lignes lors de travaux, de gel ou afin de réduire la pollution visuelle près des sites historiques.

✿ Locomotive hybride au Laboratoire LEI (Suisse)

Cette étude était réalisée par le laboratoire LEI « laboratoire d'électronique industrielle » en suisse dans le domaine de traction [34].

Le système de traction diesel-électrique est très répandu dans le domaine ferroviaire et plus précisément dans des régions à faible potentiel de trafic. Dans ces conditions, ce choix est retenu pour son coût plus faible qu'une technologie électrique standard. L'inconvénient le plus important de cette technologie est l'évolution du prix d'achat du diesel. Il est donc important de développer de nouvelles stratégies pour augmenter le rendement d'un système diesel-électrique. Pour atteindre ce but, un système de stockage supercapacitif sera proposé.

Les caractéristiques principales du train qui s'agit de rames de la série GTW4 sont:

- Poids total (sans charge): 67 t
- Poids total (pleine charge, toutes les places étant occupées): 84 t
- Puissance des moteurs diesel: 2 * 380 kW
- Puissance max. aux roues: 620 kW
- Vitesse maximale: 140 km/h

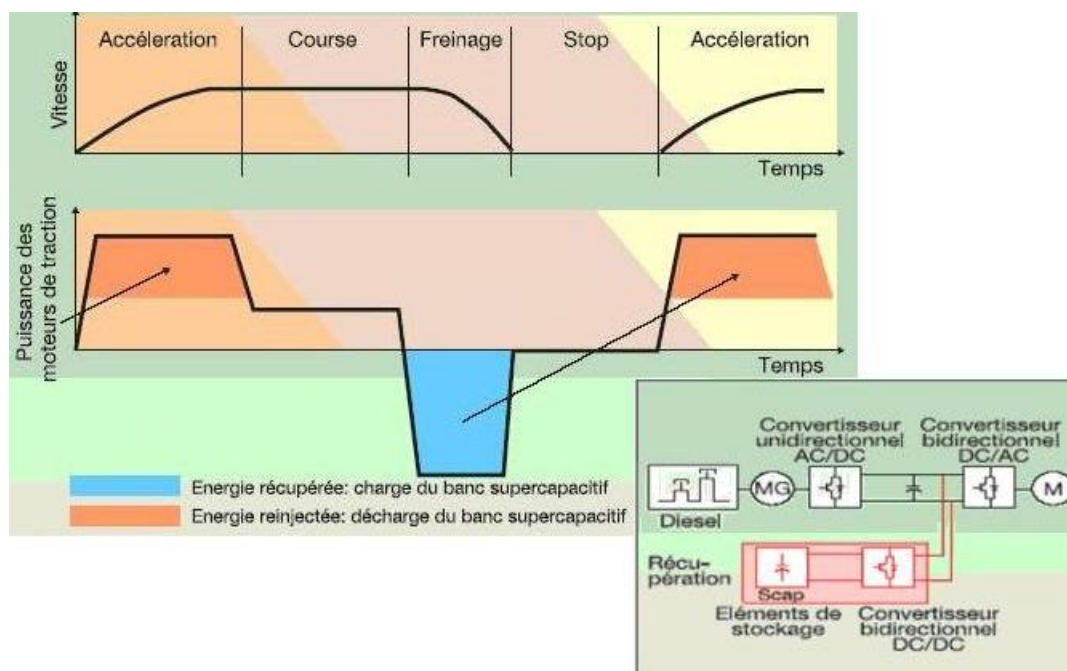


Figure 9.9 Principe de fonctionnement du train

Pour définir quelle est la solution la plus rentable, un calcul des coûts d'exploitation du train a été fait pour ces différents cas. En prenant l'hypothèse que la durée de vie d'un train de ce type est de 25 ans, le meilleur compromis est trouvé par l'utilisation d'un moteur diesel de 380 kW; soit la moitié de la taille du moteur actuel. Le banc supercapacitif est alors composé de 15 000 éléments de 2600 Farads (Figure 1.9). Le gain sur la consommation de carburant diesel est de 50%. Ce gain sur la consommation de diesel est obtenu sans pertes de performances du train (accélération, vitesse maximale, etc.). Bien que le prix d'achat des supercondensateurs soit élevé, la solution du train avec stockage supercapacitif est rentable par rapport à l'exploitation d'un train diesel- électrique standard après 10 années d'exploitation.

Ces Cinq exemples de réalisations ne constituent pas une liste exhaustive des cas d'hybridation ferroviaire. Plusieurs autres projets ou exemples d'hybridation ferroviaire existent, notamment la locomotive hybride de General Electric (Diesel/Batteries), le tram de l'Avanto Light Rail Vehicle de SIEMENS (Diesel/volant d'inertie) et la locomotive hybride LLC de Denver USA (pile à combustible) pour ne citer que ceux-là.

1.2.3. Hybridation Ferroviaire et ALSTOM

✿ Locomotive hybride BR203 de RailPower (Allemagne – Pays bas – France)

Après avoir effectué des essais de la locomotive Green Goat avec ce genre d'hybridation, les batteries VRLA ont eu des problèmes techniques, RAILPOWER a transféré l'étude à ALSTOM Transport Allemagne en Utilisant une locomotive Diesel-hydraulique existante « BR 203 » [31]. Les batteries Plomb-acide VRLA de RAILPOWER ont été changé par des batteries Ni-MH fournies par GP le 07-04-2006, et finalement changé par les batteries Ni-Cd fournies par LE FOURNISSEUR DE BATTERIES le 24-05-2006. La Vitesse maximale: 60Km/h et de Puissance de 550 KW/196KN (Figure 1.10).



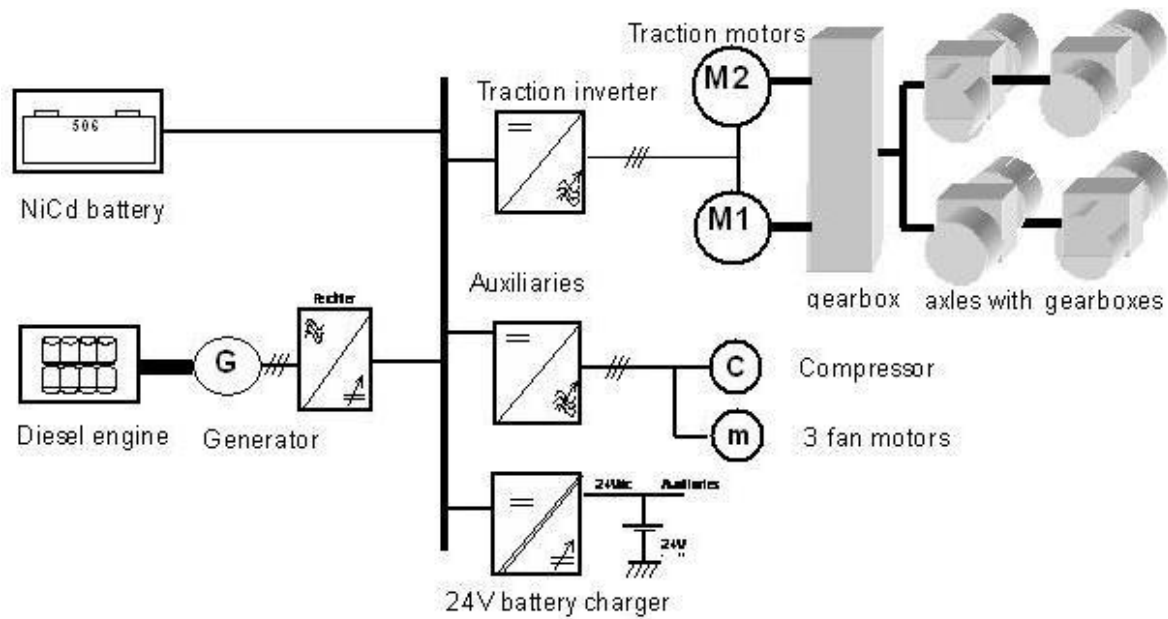


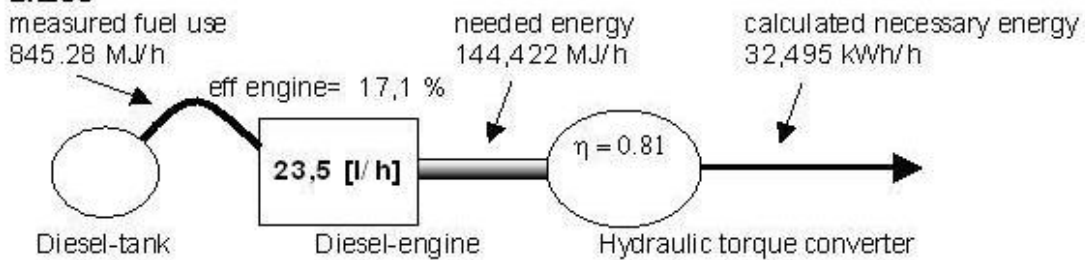
Figure 10.10 Architecture de la locomotive hybride BR203

Voici un bilan comparatif entre une locomotive hydraulique classique BR203 et une locomotive hybride BR203 :

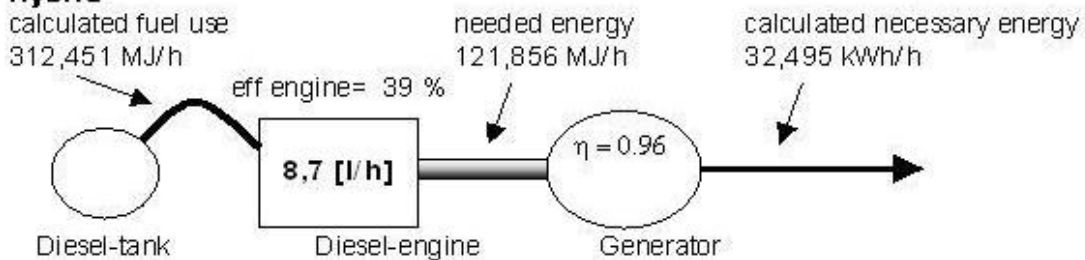
	measured				calculated		
	Fuel use [l]	Time span [h]	Fuel energy [MJ/h]	Fuel use per hour [l/h]	Average power [kWh/h]	Power incl [MJ/h]	Efficiency engine [%]
BR203	14088	600	845,280	23,48	32,49	144,422	17,1%
Hybrid	5208	600	312,451	8,68	32,49	121,856	39,0%

47759 1903

BR203



Hybrid



✿ Les Citadis de Rotterdam et de Nice

Les Citadis de Rotterdam (figure 1.11a) et de Nice sont deux exemples d'hybridation particulièrement intéressants, notamment pour leur cahier des charges [40].



(a) Le CITADIS de Rotterdam



(b) Le volant d'inertie de CCM

Figure 11.11 Le CITADIS de Rotterdam hybridé au volant d'inertie

Le Citadis de Rotterdam est un tramway normalement alimenté par caténaire, mais la ville de Rotterdam a spécifié que la traversée du pont Erasmus se fasse sans caténaire apparente qui risquerait de dénaturer le site. Le dilemme consistait alors à assurer une autonomie du tramway le temps de la traversée du pont. Le constructeur ferroviaire ALSTOM qui a remporté l'appel d'offre a proposé et réalisé un tramway hybride Caténaire - Volant d'inertie. Le volant d'inertie chargé, pendant la circulation en ville, prend la relève de la caténaire pendant la traversée du pont Erasmus. La présence du volant d'inertie, initialement pour la raison évoquée ci-dessus a donné l'idée de l'extension de son utilisation. En effet, le volant est sollicité même en présence de la caténaire pour lisser les demandes de puissance au démarrage et pour recycler, en local, l'énergie de freinage. Cette utilisation permet une stabilisation de la tension caténaire. Le volant d'inertie fabriqué par la société néerlandaise CCM (Center for Concepts in Mechatronics) a un volume de 1.7m^3 périphérique compris pour une capacité de stockage de $5,33\text{ kWh}$ à 22000 tr/min et une puissance crête de 325 kW (voir figure 1.11b).

Pour les mêmes raisons, ALSTOM a construit à Nice un Citadis hybridé aux batteries NiMH pour la traversée des places Garibaldi (435 m) et Massena (485 m) à 30 km/h sans caténaire (Figure 1.12).

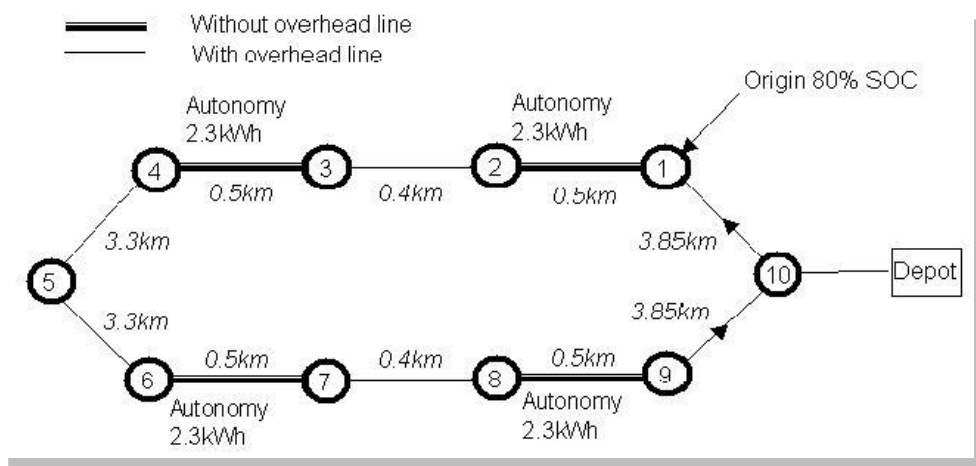


Figure 12.12 Tram route de Nice

La tension aux bornes de la batterie doit être comprise entre 450 V et 850 V pendant toute la durée de vie de la batterie. Pendant la charge, la batterie n'est pas raccordée au réseau électrique de puissance du bord autrement que par l'intermédiaire du chargeur. La tension pendant la charge doit être comprise entre 450 V et 1000 V pendant toute la durée de vie de la batterie. Ce Pack de batteries a une puissance maximale de 200 KW et une capacité énergétique de 27 KWh. (Figure 1.13)

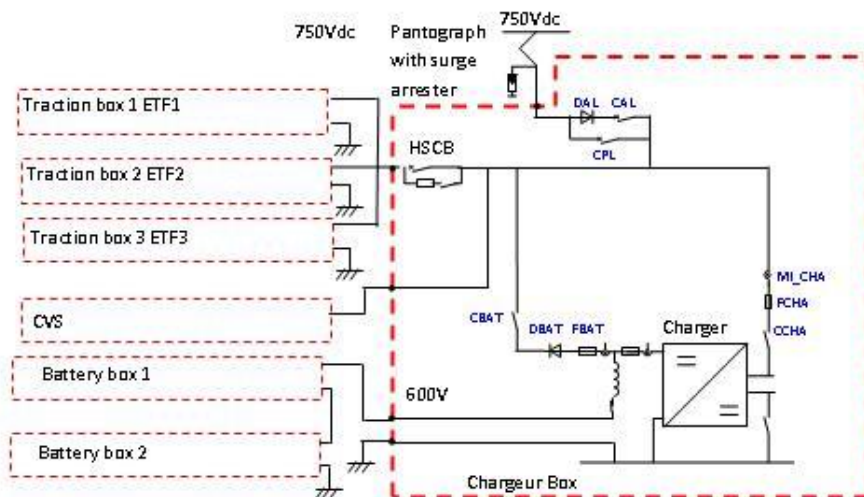


Figure 13.13 Schéma électrique de principe du tramway de Nice

❁ Locotracteur à pile à combustible PAC – Projet COPPACE (France)

La concurrence sur les locotracteurs à Pile A Combustible sera évoquée. Une spécification préliminaire permettra de préciser une proposition d'architecture chaîne de traction et sa stratégie d'énergie. Les études ont été menées sur la base du parc matériel de la SNCF qui est considéré représentatif des besoins. En effet, la SNCF possède de nombreux engins diesel malgré la forte électrification du réseau. En préambule, il faut souligner que la consommation totale d'énergie SNCF a connu une augmentation de 19% entre 1985 et 1999. La part de l'électricité est en forte progression contre celle du diesel qui baisse mais qui reste très significative en coût [32, 37].

Les locomotives de manœuvre doivent bénéficier au plus vite de programme d'amélioration. 600 engins sont ciblés. Ceux ci n'effectuent que des petits parcours à l'intérieur de zones urbaines. Les 1200 locotracteurs nécessitant d'améliorer leur bilan environnemental pourraient profiter à court terme des moteurs camions et à long terme des PAC. Une recherche d'antériorité de brevets n'a pas montré qu'il existait déjà des brevets dans l'utilisation de PAC pour des engins ferroviaires Diesel.

Ainsi, le rendement actuel du Diesel au réducteur estimé à 0,266 passerait à 0,35 du seul fait d'implanter une PAC pour remplacer le Diesel-Alternateur. Hybrider permet en plus d'économiser environ 20% de consommation si la mission du véhicule comporte régulièrement des variations de vitesses ou de pentes.

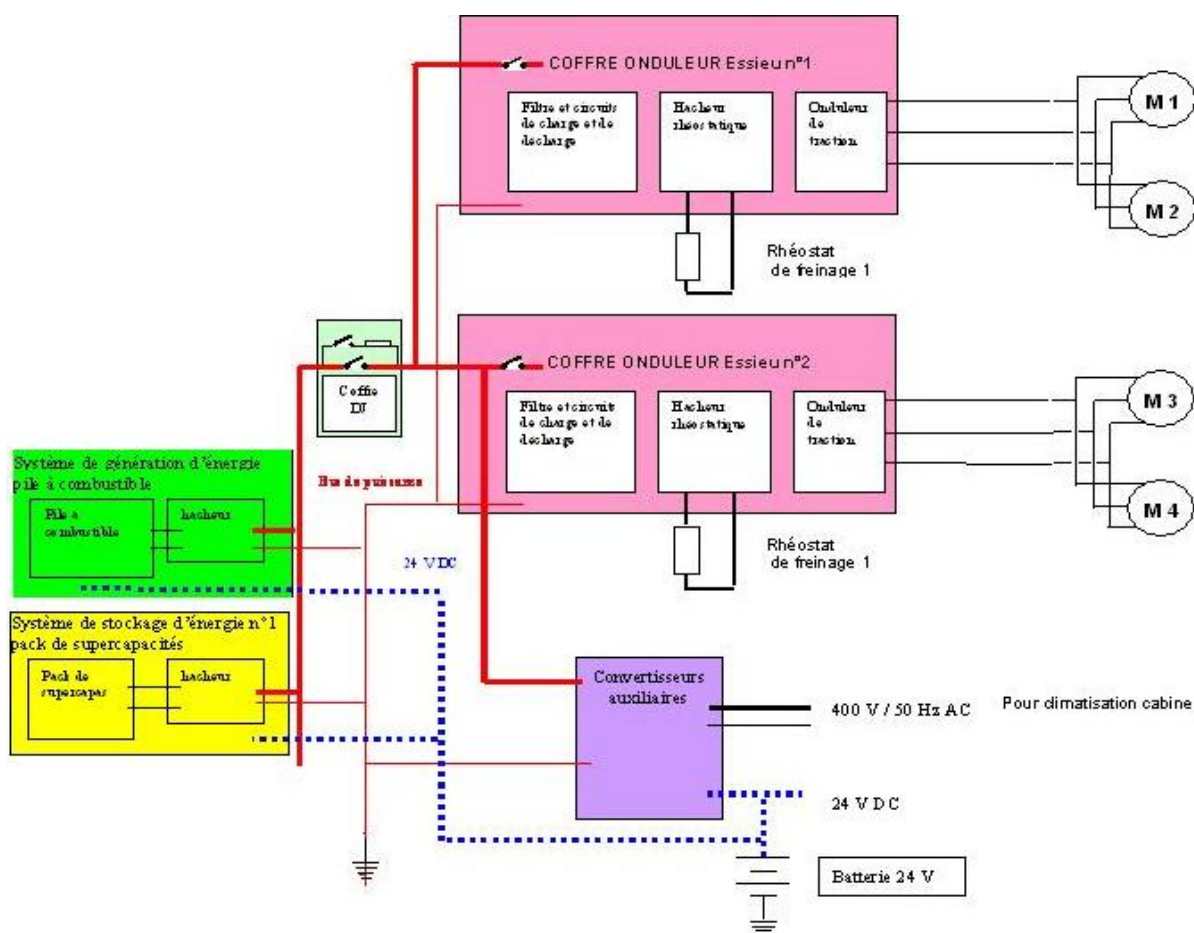


Figure 14.14 Architecture du locotracteur hybride (PAC + Supercondensateurs)

La solution préconisée est une PAC de 500 kW d'une masse de 2000 Kg hybridée avec un pack de supercondensateurs composé de 980 éléments (Figure 1.14). Ainsi, le SSE est utilisé comme boost de puissance lors des phases d'accélération du véhicule et sert donc principalement en arrêt / démarrage comme lors d'une création de convoi. Le SSE devra donc pouvoir fournir et stocker de la puissance sans devoir disposer d'une énergie importante. Ainsi, il faut stocker l'équivalent de 1500 l de diesel soit 32240 MJ. Ceci correspond à 270 kg d'hydrogène. Afin de stocker cet hydrogène, on peut utiliser des réservoirs sous pression de 350 bars ce qui représentent une masse de 5060 kg et un volume de 12 m³.

1.2.4. Génération et stockage de l'énergie en ferroviaire

Dans cette sous-section, nous faisons une synthèse sur la génération et le stockage de l'énergie en milieu ferroviaire. Nous proposons une analyse succincte des moyens de génération de puissance utilisés en ferroviaire et l'évolution de ces moyens dans les années à venir face aux préoccupations environnementales et à la raréfaction des ressources pétrolières. Pour ce qui concerne les dispositifs de stockage, nous faisons un bilan rapide de leur utilisation en ferroviaire. Puis, à la vue des nouveaux besoins⁽¹⁾ et de l'amélioration des performances de certains dispositifs de stockage, nous essayons de dégager des tendances sur le transport du futur.

⁽¹⁾L'hybridation ferroviaire entraîne de nouveaux besoins en matière de stockage de l'énergie

En Europe, l'électricité reste la principale source d'énergie en ferroviaire. D'après les responsables du réseau ferré français, le développement du réseau ferré correspond souvent à l'électrification des lignes. C'est donc une tendance qui se renforcera dans les années à venir. Actuellement, la France compte 14778 kilomètres de lignes électrifiées sur un réseau exploité de 29203 kilomètres. Plus de 85% du trafic fret et 90% du trafic voyageur sont écoulés sur la partie du réseau équipée de lignes électrifiées. Le réseau électrifié est aujourd'hui le seul réseau adapté à la grande vitesse pour laquelle les besoins en puissance peuvent monter jusqu'à 12 MW, voire plus. Mais l'électrification des lignes entraîne un investissement colossal : les réseaux non électrifiés ont donc encore de beaux jours devant eux. De plus, certains tronçons du réseau sont non-électrifiés, notamment les terminaisons portuaires ou les gares de triage. Par ailleurs, quel que soit le type de réseau, les opérations de secours nécessitent des engins autonomes (souvent Diesel) [49, 55, 56]. Malgré l'intensification de l'électrification du réseau ferré français, le besoin d'engins autonomes pour couvrir les lignes non électrifiées et les opérations de secours impose le recours à des engins Diesel. Aux États-Unis, les autorités ferroviaires ont fait le choix de garder les réseaux non électrifiés pour faciliter l'empilement de containers sur plusieurs mètres de hauteur à bord des trains fret. Ce choix impose une utilisation d'engins Diesel.

L'hydrogène est sans doute la meilleure technologie, qui concilie à la fois la sobriété en carbone pour la production d'électricité et une garantie d'autonomie qui se rapproche du Diesel ⁽²⁾. La pile à combustible correspond bien à l'objectif « zéro émission » que visent les acteurs automobiles et ferroviaires. La technologie de pile la plus fréquemment utilisée est la PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) qui comporte en particulier une membrane échangeuse de protons, du platine pour catalyser la réaction globale. Mais, en l'état, cette technologie est économiquement inabordable. Les constituants de la pile sont extrêmement coûteux. Une pile de 70 kW revient au prix d'une Ferrari Testarossa, et on estime qu'il faudra diviser ce prix par au moins 100 pour parvenir à un produit commercialisable sur des voitures haut de gamme.

La pile à combustible comme source d'énergie ferroviaire n'est donc pas économiquement envisageable dans le court terme. Cependant, une démocratisation de cette technologie, d'abord dans l'automobile, pourrait conduire à des prix de plus en plus abordables et faciliter son intégration en ferroviaire. Par ailleurs, des verrous technologiques liés à la sécurisation du stockage d'hydrogène à bord des trains et la durée de vie des piles pour le moment trop faible (même pour l'automobile) restent à lever [49].

Parmi les systèmes de stockage d'énergie les plus performants dans les applications ferroviaires ainsi que dans le domaine de transport en général, on trouve : les accumulateurs électrochimiques, les volants d'inertie et enfin les supercondensateurs.

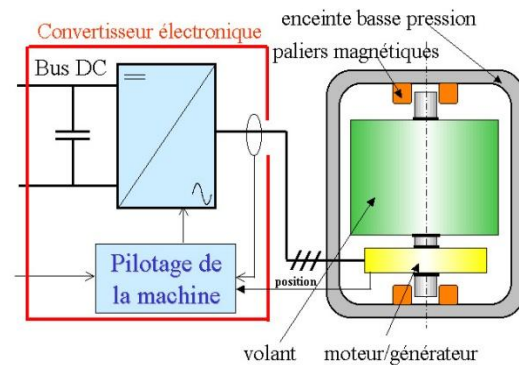
⁽²⁾Même si son stockage pose encore de réels problèmes

✿ Le volant d'inertie

L'énergie est stockée sous forme cinétique dans un volant d'inertie :

$$E_{vol} = \frac{1}{2} J \Omega^2$$

- J : Moment d'inertie (kg.m²)
- Ω : Vitesse angulaire de rotation (rad/s)



Constitution d'un dispositif électromécanique

- 1- Le volant d'inertie
- 2- Le moteur/générateur
- 3- La suspension
 - La suspension mécanique
 - La suspension magnétique

Des matériaux à haute résistance à la traction (due à la force centrifuge) capables de vitesses périphériques élevées sont utilisés pour réaliser la partie mobile du volant d'inertie. Les meilleurs matériaux sont les composites à fibres de carbone (structures bobinées) capables d'atteindre des vitesses périphériques de 1500 m/s correspondant à une énergie de 100 voire 150 Wh/kg [37]. L'énergie massique est définie par :

$$\frac{E_{vol}}{m} = K_{dep} \frac{\sigma_{max}}{\rho}$$

- ρ : masse volumique du matériau (kg/m³)
- σ_{max} : résistance à la traction (J/m³)
- K_{dep} : facteur dépendant de la forme du volant ($K_{dep}=0,5$ pour un cylindre à parois minces)
- m : Masse du volant (kg)

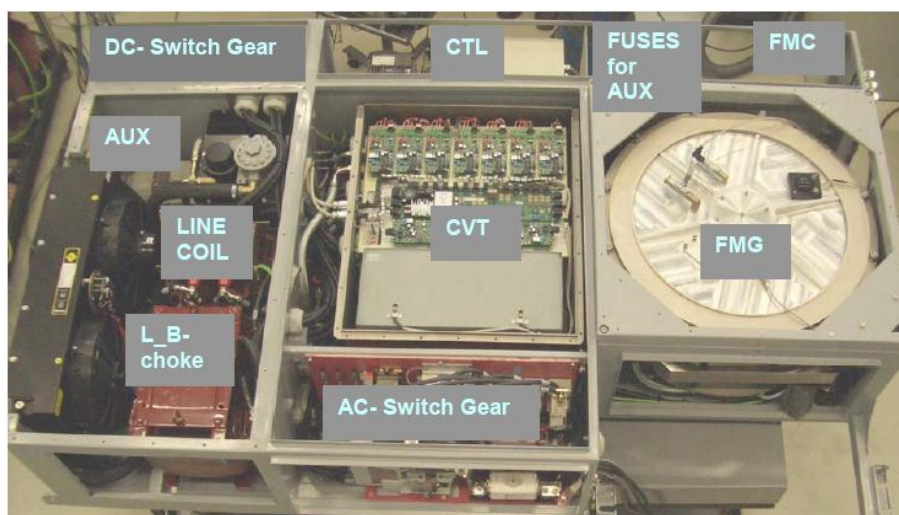
Il faut adjoindre au volant des auxiliaires (paliers magnétiques, enceinte sous vide, moteur/générateur...) qui conduisent à des valeurs plus proches de 25 Wh/kg. Le moteur/générateur est l'interface électromécanique permettant la charge et la décharge.

Exemple d'un volant d'inertie RAV2 EMAFER, sous le nom CCM :

- Variation de vitesse : 11000 à 22000 tr/min
- Énergie stockée : 5.3 kWh (totale) 4kWh (utilisable) soit 6 Wh/kg
- Puissance 200kW (continue) soit 300W/kg
- Rendement 90%
- Cyclabilité 107
- Masse totale 670 kg (masse totale incluant volant+onduleur+commande+refroidissement ...)

Le volant CCM est un système de stockage électromécanique qui a été développé dans le laboratoire « Centre for Concepts in Mechatronics » à Hollande et dont la technologie vient d'être

achetée par ALSTOM Transport. L'industrialisation de ce volant et sa fabrication seront effectuées dans deux sites différents : ALSTOM Ornans qui va industrialiser le caisson entier (le volant, le moteur/générateur accouplé au volant,...) et ALSTOM Tarbes qui va intégrer et optimiser la partie commande (association convertisseur/volant, pilotage...). La technologie du volant CCM est conçue pour une longue durée de vie (jusqu'à 30 ans) caractérisée par une densité énergétique élevée de 4 kWh et une puissance maximale disponible de 325 KW pour un poids de 1200 Kg comprenant les auxiliaires (pompe à vide, contacteur...) et le coffret de toit (*Dimensions : Longueur × largeur × Hauteur = 2300 × 1400 × 514 mm.*) Le nouveau développement visera une réduction considérable du poids et du volume. Les évolutions technologiques dans les secteurs tels que les composés de fibre de carbone, les moteurs à aimant permanent, l'alimentation électrique et les circuits de commande assureront au système un taux de fiabilité élevé avec des densités de puissance incomparables. Une application intéressante d'un prototype de ce volant a été effectuée en collaboration avec ALSTOM Tarbes à Rotterdam où le but était d'une part de proposer un fonctionnement autonome entre 2 stations et d'autre part de réduire la consommation du tramway à l'aide d'un mode économique dans lequel le volant soutenait l'alimentation caténaire.



Le volant CCM avec ses auxiliaires

A noter que ce dernier a éclaté dans le laboratoire lors d'un essai extrême, qui a été déjà réalisé auparavant et qui s'était bien passé. Jusqu'à présent les raisons de cet accident sont inconnues, et en cours d'analyse. Pour autant, les travaux de recherche sur cette technologie continue.

❁ Les supercondensateurs

Un supercondensateur est un condensateur de technologie particulière permettant d'obtenir une densité de puissance et une densité d'énergie intermédiaire entre les batteries et les condensateurs électrolytiques classiques [35, 39]. Ces composants permettent donc de stocker une quantité d'énergie intermédiaire entre ces deux modes de stockage, et de la restituer plus rapidement qu'une batterie.

La nature du matériau utilisé pour les électrodes divise les supercondensateurs en deux familles :

- a) Les supercondensateurs électrostatiques dans lesquels le stockage de l'électricité s'effectue par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques. L'énergie est donc stockée dans la double couche électrique. Les électrodes sont à base de carbone activé et l'électrolyte doit être un conducteur ionique, organique ou aqueux par exemple acide sulfurique.
- b) Les supercondensateurs électrochimiques dans lesquels interviennent en plus des processus faradiques réversibles. Les électrodes seront donc organiques (oxydes de métaux), ou inorganiques (polymères conducteurs).

Le principe général de fonctionnement des supercondensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique. L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif complet entraîne le stockage électrostatique de charges aux deux interfaces électrode-électrolyte. Le principe de fonctionnement peut être décomposé en fonction des 4 états différents du composant (déchargé, en charge, chargé, en décharge) :

Etat déchargé

A l'état déchargé et sans aucune alimentation, une accumulation de charge se crée spontanément à l'interface électrode/électrolyte aussi bien du côté de l'électrode (q^{el}) que du côté de l'électrolyte (q^{ion}). q^{el} et q^{ion} sont respectivement les charges de nature électronique et ionique par unité de surface. La condition d'électroneutralité impose $q^{el} = -q^{ion}$. Un potentiel, dit potentiel d'abandon apparaît alors à chaque interface, le signe et l'amplitude de ce potentiel est spécifique de chaque couple électrode/électrolyte. Cette accumulation de charges correspond à la double couche électrochimique (son épaisseur est de quelques nanomètres).

En charge

Lors de l'application d'une différence de potentiel aux bornes du supercondensateur, la distribution des charges aux deux interfaces va être modifiée. L'une d'entre elles passant par son potentiel de charge nulle tandis que l'autre voit augmenter l'accumulation de charges. Il y a donc une augmentation du potentiel.

Etat chargé

Si la charge est poursuivie jusqu'à la valeur maximale U_{max} du potentiel applicable, les deux doubles couches électrochimiques se comportent comme deux condensateurs et voient donc leurs charges augmentées selon une loi du type $Q = CU$. A l'état chargé, la capacité totale du dispositif résulte des capacités (C_1 et C_2) des deux interfaces en série et est donc donnée par :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

En décharge

Lors de la décharge, les ions et les électrons suivent le chemin inverse et un courant électrique est utilisable dans le circuit extérieur. Nous remarquons par cette propriété que le supercondensateur développe dans sa structure interne deux capacités et non une comme le condensateur classique (qui se situe à l'anode). Pour utiliser au maximum la couche double électrique, les matériaux utilisés

pour les électrodes doivent avoir de grande faculté à conduire les charges électroniques et donc possèdent des surfaces spécifiques élevées supérieures à 1000 m²/g, telles que le carbone activé.

☀ **Les batteries**

Pour les applications de transport électriques, la technologie utilisée actuellement est celle des batteries respectant les conditions suivantes :

- Une bonne puissance massique (rapport puissance/poids en W/kg) permettant de bonnes accélérations.
- Une bonne énergie massique (Wh/kg) synonyme d'une bonne autonomie ;
- Une tension stable engendrant des performances régulières ;
- Une durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles de chargement/déchargement conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur ;
- Entretien faible et recyclage facile.

Bien que la littérature technique décrive de nombreux accumulateurs, seules les batteries plomb-acide et nickel-cadmium sont aujourd'hui industriellement utilisables, et la nouvelle révélation est le Nickel Metal hydrure [13, 19, 20, 21, 57].

☞ **L'accumulateur au plomb**, inventé en 1859, est à la fois le plus ancien et le plus utilisé des accumulateurs électrochimiques. Sa tension par élément est de 2 V. Sa version pour la traction automobile, beaucoup plus récente (1970-1975), tente de trouver le meilleur compromis possible entre l'énergie massique et la durée de vie (le nombre de cycles de recharge possible). Elles restent le système le moins cher produit industriellement avec une des meilleures durées de vie. Leur principal inconvénient est leur faible énergie massique. Les batteries au plomb se caractérisent actuellement par :

- Une énergie massique de l'ordre de 40 Wh/kg pour les éléments ouverts et de 30 Wh/kg pour les éléments étanches. Lors d'une décharge en 5 h à courant constant et en utilisation réelle dans un véhicule, ces valeurs sont réduites de 20 %;
- Un nombre de cycles de charge variant entre 600 et 900 sur un banc d'essai ; cette valeur est réduite de moitié sur un véhicule ;
- Une mauvaise tenue aux décharges profondes ; les éléments les plus faibles subissent assez souvent, en fin de charge, une inversion électrochimique ;
- Une réduction des performances à basse température.

☞ **L'accumulateur au nickel-cadmium**, inventé en 1904, est l'un des batteries performantes et le plus largement commercialisé ; sa tension par élément est de 1,2 V. Elles ont été choisies par les constructeurs automobiles français (PSA et Renault) pour équiper leurs véhicules commercialisés depuis fin 1995. La version, dite frite plastifiée, récemment développée, pour la voiture électrique se caractérise par les performances suivantes :

- Une énergie massique de l'ordre de 50 Wh/kg, lors d'une décharge de 2 h, c'est-à-dire le double de celle des batteries au plomb ;
- Un nombre de cycles de charge légèrement supérieure à 2000 ;
- Une dégradation des performances très réduite à faible état de charge ;

- Par ailleurs, les décharges profondes affectent peu ce type de batteries, les éléments ne subissent pas le phénomène d'inversion de polarité.

Malgré des performances incontestablement supérieures à celles des batteries au plomb, les accumulateurs au nickel-cadmium n'équipent que peu de voitures électriques et ne risquent pas, dans un avenir proche, de supplanter les accumulateurs au plomb ; cela tient à plusieurs facteurs :

- Un coût élevé par kilowattheure (actuellement quatre fois supérieur à celui des batteries au plomb), que la fabrication en grande série peut réduire de 20 % environ ;
- Une réduction plus importante est difficilement envisageable, vu la disponibilité limitée du cadmium ;
- Une mauvaise tenue à des températures supérieures à 40°-50°C, surtout en charge ;
- La toxicité du cadmium ;
- Une conception du type ouvert, nécessitant une remise à niveau périodique de l'électrolyte.

☞ **Les batteries nickel-hydrure** de métal ont longtemps figuré comme les remplaçantes idéales des deux systèmes précédents. Elles possèdent des performances massives et volumiques très supérieures aux technologies à base de plomb ou de cadmium et ont profité du développement de l'électrode à base de nickel utilisée dans le système précédent (Ni/Cd) ou pour les batteries Ni-hydrogène développées pour les applications spatiales. Leurs seuls problèmes actuels semblent être leur durée de vie encore faible pour une batterie de traction (à forte profondeur de décharge) et leur mauvaise tenue à la température élevée (spécialement en fin de charge). Cette technologie de batterie semble cependant avoir été adoptée par la plupart des constructeurs automobiles et ferroviaires comme batterie de puissance. Elle fonctionne alors à faible profondeur de décharge, ce qui augmente considérablement sa durée de vie (nombre de cycles charge/décharge).

☞ **Les batteries lithium-ion** demeurent l'espoir principal du véhicule électrique pur. En effet, seul ce système pourrait, dans l'état actuel des connaissances, permettre d'augmenter considérablement l'autonomie des véhicules électriques purs grâce à ses performances massives et volumiques de capacité énergétique. Ce système présente la tension élémentaire la plus élevée (4 volt/élément, à comparer à 2 V, 1 V et 1,2 V pour respectivement les technologies plomb, Ni/Cd et Ni/MH). Cette haute tension élémentaire reflète la très haute réactivité du couple électrochimique mis en jeu et illustre un des inconvénients majeurs de cette technologie : la sécurité. En effet, un système élaboré de sécurité doit être associé à ce type de pile pour éviter tout dépôt de Li métal, lors de la recharge en particulier. Ce système doit gérer chaque élément séparément pour éviter tout déséquilibre de charge et établir un compromis idéal entre capacité résiduelle et sécurité. Ces systèmes de gestion, le plus souvent électroniques, tendent à augmenter considérablement le coût de la technologie. L'autre paramètre critique des batteries lithium-ion réside dans le compromis coût/durée de vie. En effet, pour obtenir des durées de vie raisonnables pour l'application électrique pure (supérieures à mille cycles), il faut ajouter à l'électrode positive des additifs augmentant dramatiquement le coût de la batterie.

Le tableau 1.1 présente les différentes caractéristiques pour différents types de batteries utilisées dans les applications de transport électriques et hybrides.

	Plomb	Ni/Cd	Ni/MH	ZEBRA	Li phosphate	Li ion	Li polymère
Energie spécifique (Wh/Kg)*	30-50	45-80	60-110	120	120-140	150-190	150-190
Densité d'énergie (Wh/litre)*	75-120	80-150	220-330	180	190-220	220-330	220-330
Puissance en pointe (W/Kg)	Jusqu'à 700		Jusqu'à 900	200	Jusqu'à 800	Jusqu'à 1500	Jusqu'à 250
Nombre de cycle (charge/décharge)	400-600 (1) 1200 (2)	2000	1500	800	>2000	500-1000	200-300
Autodécharge par mois	5%	20%	60%	12% par jour	5%	10%	10%
Temps de charge	8-16h	1h	2h-4h			2h-4h	2h-4h
Tension nominale d'un élément	2V	1.2V	1.2V	2.6V	3.2V	3.6V	3.7V
Gamme de température de fonctionnement	-20°C à 60°C	-40°C à 60°C	-20°C à 60°C	-40°C à 50°C	0°C à 45°C (charge) -20°C à 60°C (décharge)	-20°C à 60°C	0°C à 60°C
Avantages	Faible coût	Fiabilité Performances à froid	Très bonne densité d'énergie	Très bonne densité d'énergie Bonne cyclabilité	Très bonne densité d'énergie, sécurité, coût, cyclabilité	Excellente énergie et puissance	Batteries minces possibles
Inconvénients	Faible énergie Mort subie	Relativement basse énergie Toxicité	Coût des matériaux de base Comportement en température	Puissance limitée Auto-consommation	Charge à basse T°	Sécurité des gros éléments Coût	Performances à froid Coût
Coûts Indicateurs ⁽³⁾ (€/KWh)	200 à 250 ⁽¹⁾ 200 ⁽²⁾	600	1500 à 2000	800 à 900	1000 à 1800	2000	1500 à 2000

Tableau I.1 Comparaison des caractéristiques techniques des accumulateurs [19]

* les chiffres extrêmes des fourchettes correspondent à des tailles différentes d'éléments (les gros éléments ayant en général des énergies plus élevées) ou à des conceptions pour des applications différentes.

(1) étanche ; (2) tubulaire ; (3) pour les volumes actuels de production.

1.2.5. Conclusion

Globalement, l'hybridation ferroviaire est d'abord motivée par des raisons écologiques, auxquelles nous pouvons associer la tranquillité des riverains. Ensuite, viennent des motivations économiques (économie d'énergie et de fuel) puis des raisons stratégiques (la préparation à l'« après pétrole »). Enfin, il y a la recherche d'autonomie. L'objectif « zéro pétrole » qui sera sans aucun doute la seule alternative dans les années à venir est économiquement utopique dans le contexte actuel où la pile à combustible est "hors de prix" et le problème du stockage de l'hydrogène n'est pas encore résolu.

1.3. Présentation du projet « Kit autonome hybride »

1.3.1. Objectif et Contexte du projet

ALSTOM Transport S.A. a développé une locomotive électrique multi-tensions répondant aux opérateurs ferroviaires (Figure 1.15). Cette locomotive électrique, à 4 motorisations électriques aux bogies (AC et DC), est dotée d'une puissance nominale de 4200 kW, de deux cabines de conduite. Sa vitesse maximale est environ 140 km/h et l'effort au démarrage est de 320 kN.

La locomotive a reçu son homologation des réseaux ferroviaires français et allemands, elle est conçue pour être équipée de tous les dispositifs de sécurité lui permettant d'être utilisée sur les réseaux européens.

Cette locomotive est dotée de composants standards et modulaires qui sert au transport de marchandises de la SNCF entre la France, l'Allemagne et la Suisse sous le numéro de série BB437000.

Le système de chaîne de traction installé sur toutes les locomotives de la gamme se base sur la technologie IGBT ONIX. Tous les diagrammes de traction sont conçus pour minimiser l'impact d'une défaillance de fonctionnement :

- ✓ Le diagramme de puissance se base sur un système de chaînes de traction identiques et totalement indépendantes pour chaque essieu et ce, quelle que soit la tension à la caténaire.
- ✓ Deux convertisseurs statiques identiques fournissent la puissance nécessaire aux fonctions auxiliaires de la locomotive. L'un délivre une tension à fréquence fixe (50 Hz), tandis que l'autre fournit une tension à fréquence variable dans le but de minimiser le niveau sonore des systèmes de ventilation. Chaque convertisseur peut alimenter tous les auxiliaires en mode dégradé.

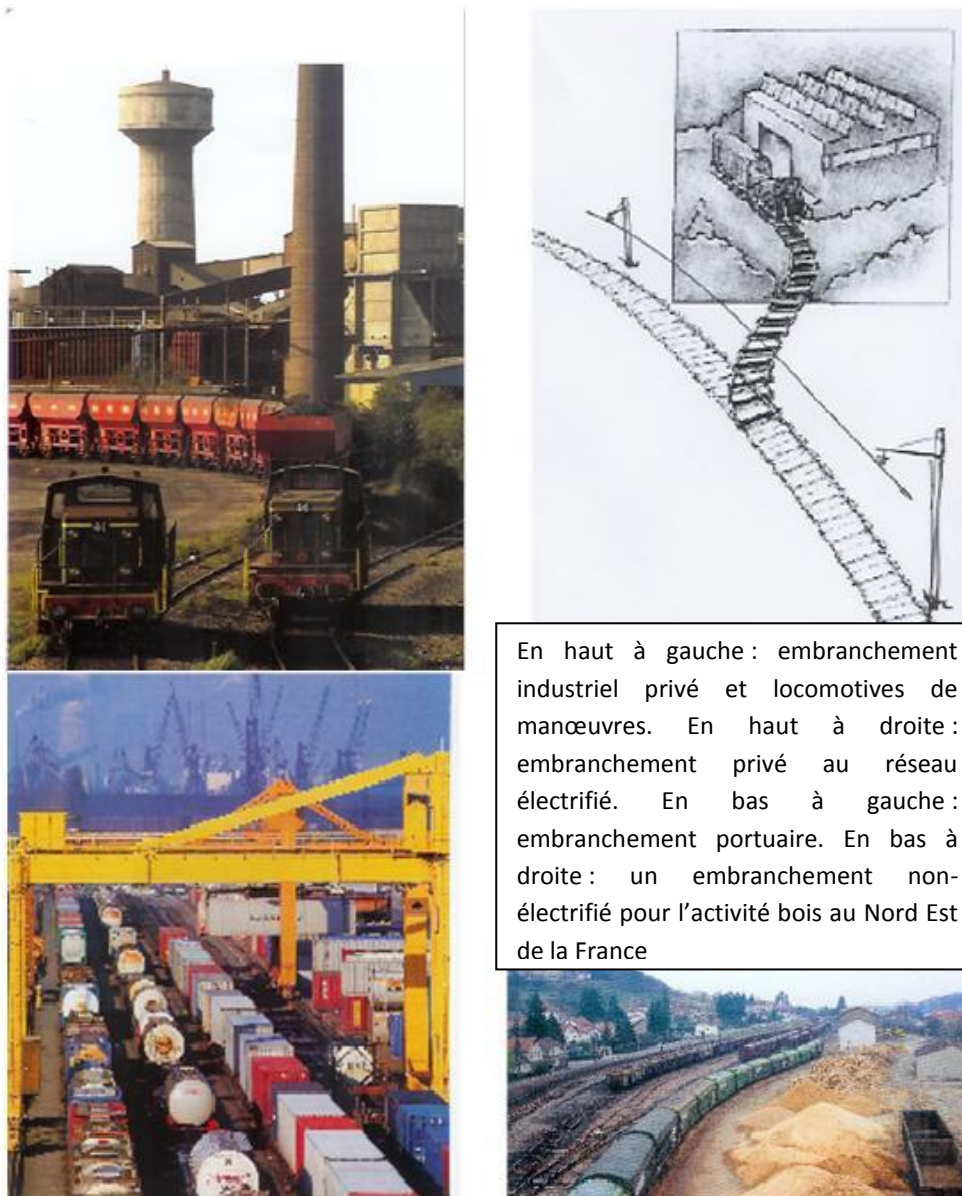
En 2005, pour préparer la locomotive Le système du kit autonome hybride à embarquer pour permettre à une locomotive électrique de réaliser:



Figure 15.15 La locomotive Electrique multi-tension

- l'exploitation sous caténares 1500V DC / 3000V DC / 15 000V AC 16Hz / 25 000V AC 50 Hz
- l'exploitation sans caténaire

Lorsque la locomotive électrique arrive sous une portion de voie non électrifiée, le groupe hybride embarquée assurera une production principale d'énergie autonome. Il permettra donc, au delà des possibilités déjà existantes de faire du trafic interopérable en Europe, de réaliser le service TRAIN COMPLET depuis le lieu de production ou de chargement jusqu'au client final, notamment pour les marchés du FRET. Ce kit va rendre la locomotive autonome sans caténaire en bout de lignes et donc elle ne dépendra pas d'une locomotive de manœuvre en prise de quai ou en fin de mission sur embranchement non électrifié : la productivité et la flexibilité d'exploitation avec une locomotive électrique en sera améliorée.



En haut à gauche : embranchement industriel privé et locomotives de manœuvres. En haut à droite : embranchement privé au réseau électrifié. En bas à gauche : embranchement portuaire. En bas à droite : un embranchement non-électrifié pour l'activité bois au Nord Est de la France

Figure 16.16 Embranchements ferrés non-électrifiés pour des opérateurs industriels

L'objectif visé de ce projet est de conforter notre connaissance sur les systèmes de propulsion ferroviaire, notamment dans une politique de développement durable. La problématique concernant le transport « zéro émission » nous mène à développer une stratégie novatrice de gestion de l'énergie embarquée dans une locomotive pour la rendre autonome ; ceci, en garantissant des progrès en terme de diminution de consommation d'énergie, de bruit et de pollution atmosphérique.

Cette démarche implique d'intégrer la dimension d'un développement global (chaîne de traction et supervision du véhicule) pour une solution techniquement et économiquement viable.

Les opérateurs privés effectuent leurs chargements essentiellement sur des embranchements ferrés non électrifiés (Figure 1.16). Ils utilisent principalement des locomotives de manœuvres à propulsion diesel avec le défaut de consommer beaucoup de gasoil et d'émettre de la pollution atmosphérique et du bruit. Ainsi, les exploitants nationaux lancent des plans d'amélioration de leur parc de locomotives de manœuvre pour des raisons de coût d'exploitation et pour les aspects environnementaux.

Beaucoup d'opérateurs privés locaux (qui n'exploitent que quelques Kms ou quelques dizaines de Kms depuis des voies de remisage commun sur un port par exemple, ou depuis un site industriel privé jusqu'aux voies d'accès de réseaux nationaux) existent en Europe (Figure 1.16). Le constructeur qui serait capable de proposer la solution innovante d'une locomotive qui pourrait à la fois faire les manœuvres sur les embranchements privés et ensuite réaliser les parcours grandes lignes sur réseau électrifié se démarquerait grandement de la concurrence et intéresserait les opérateurs privés. Ceux-ci pourraient se diversifier en étendant leur exploitation à des parcours de bout en bout. Les opérateurs nationaux seraient aussi intéressés pour augmenter leur productivité et leur flexibilité d'exploitation.

Les solutions doivent aussi permettre d'augmenter la capacité des trains, en massifiant les convois le plus possible et au plus près des limites des réglementations : 3600 T brute, 750 mètre de longueur maximum. En Europe, Pour bâtir des trains encore plus productifs, il sera nécessaire de repousser les limites aux environs de 1000 à 1500 mètres de longueur et ainsi permettre la traction de convoi de 7000 Tonnes et approfondir les limites de la dynamique des trains longs (problème d'attelage : effort à la compression : jerk qui dérive la décélération, améliorer la synchronisation du freinage. Les charges par essieux pourront également progressivement augmenter jusqu'à 25 Tonnes par essieu, voir 30 Tonnes par essieu pour certaines lignes de minerai au nord de l'Europe.

Les solutions doivent aussi permettre de réduire les temps non productifs des matériels roulants : réduire les temps de maintenance à leur durée optimum, réduire les temps non productifs d'un trajet de bout en bout : remorquage, remisage, stockage des engins moteur dans un terminal en attente de convoi, temps de changement de locomotive (locomotive de manœuvre locomotive de ligne). Par exemple, la possibilité de réaliser une prise de quai directement avec la locomotive de ligne, sans nécessité de locomotive de manœuvre est un atout pour l'exploitant.

Cette fonction HYBRIDE permettrait également d'améliorer la fiabilité des locomotives électriques actuelles. En effet, les pannes majeures (provoquant une immobilisation en ligne) issues de la fonction ALIMENTATION HT (disjoncteurs HT, parafoudres, sectionneurs de configuration, traversée 25KV, transformateur principal, transformation de palpage, filtre d'entrée, écrêteur) provoque une immobilisation en ligne et demande de secours catastrophique pour un exploitant ferroviaire. Pour un opérateur privé, ces situations sont encore plus pénalisantes de part l'infrastructure nationale dont il dépend : le rapatriement suite à une demande de secours lui coûtera très chère et une indisponibilité de sa locomotive de 1 à 2 jours.

Elle permettra donc aussi d'améliorer la disponibilité opérationnelle en évitant des rapatriements devenus inutiles puisque ces pannes n'entraîneront plus de demandes de secours. La locomotive par cette fonction redondante de propulsion autonome shuntera sa dépendance au réseau électrique et pourra terminer sa mission.

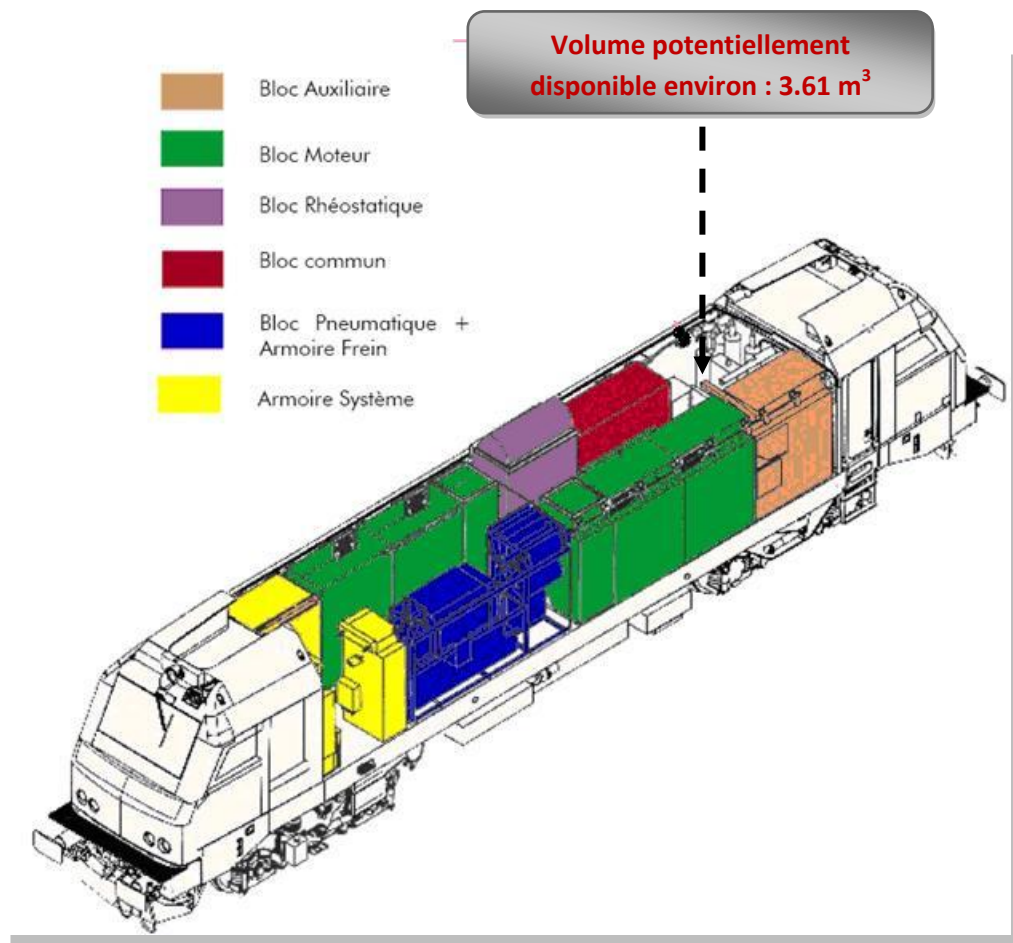


Figure 17.17 Encombrement disponible dans la locomotive 1ère génération

1.3.2. Cahier des charges de l'étude

Le cahier des charges de l'étude comprend deux principaux volets. Le premier volet spécifie une contribution au dimensionnement, à la conception séquentielle et à la validation d'une source d'énergie hybride embarquée à intégrer dans la locomotive électrique quadri-tensions, ce qui la va rendre autonome sur les bouts de lignes non-électrifiées. Le deuxième volet du cahier des charges est de permettre à ALSTOM Transport d'acquérir le « savoir-faire » en matière de production des engins ferroviaires hybrides.

Dans le premier volet du cahier des charges, la nouvelle option de source embarquée se démarque clairement de la concurrence. Sa température de fonctionnement doit-être entre -20°C et 70°C et elle doit-être capable de tirer des convois ferroviaires de 1800 Tonnes suivant des profils de missions variantes en fonction de la rampe, de la vitesse et du rayon de courbure. Elle s'intégrera dans l'architecture actuelle de la locomotive, c'est pour cela une contrainte essentielle dans le cahier des charges qui va limiter et valider le dimensionnement et la conception de la source d'énergie hybride embarquée, est l'encombrement disponible est environ 4 m³ (Figure 1.17). Une autre contrainte essentielle à respecter est la masse du kit hybride autonome qui ne doit pas être au-delà

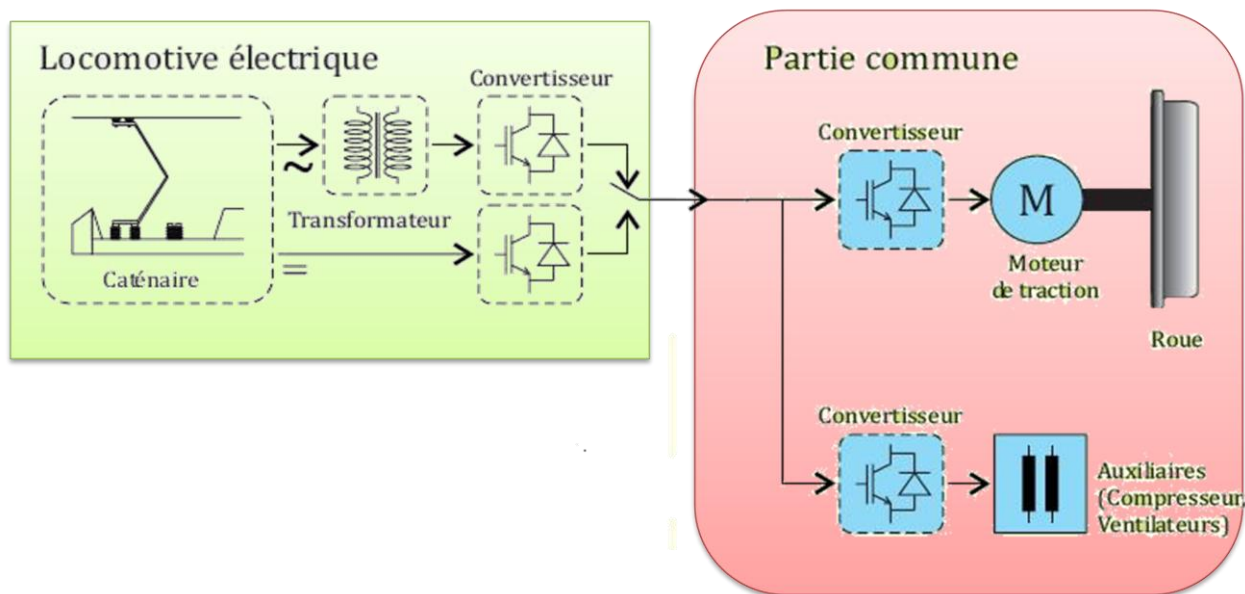


Figure 18.18 Architecture actuelle d'une locomotive électrique PRIMA

de 1.5 Tonnes car actuellement la locomotive électrique actuelle pèse 88 Tonnes en respectant les normes Européennes. Grâce à cette option, la locomotive sera un engin interopérable dans différents pays, polyvalent sous différentes tensions et autonome en traction sans caténaire. Nous devons également faire face aux normes d'antipollution et respectées ces critères de l'année 2012 (Emissions de particules : 0.2 g/KWh ; Emissions CO₂ : 3.5 g/KWh ; Emissions NO_x et Hc Hydrocarbure : 4 g/KWh).

Cette locomotive électrique mue par quatre bogies moteurs. Les moteurs de traction sont des machines asynchrones. Le couple moteur au démarrage est égal à 9560 Nm. L'architecture actuelle de la locomotive électrique comme le montre la figure 1.18 est extrêmement simple. L'alimentation des moteurs de traction et des auxiliaires est assurée par la caténaire (Alternative et continue). La puissance à la jante de la locomotive varie selon l'alimentation de la caténaire (Environ 6.4 MW en AC et 5 MW en DC).

Depuis la caténaire, la fonction palpage permet de confirmer que le conducteur a bien sélectionné le bon pantographe vis-à-vis de la tension caténaire. La mise en service sera effectuée par le disjoncteur continu DJ(C) ou monophasé DJ(M). Un filtre d'entrée de la chaîne de traction qui limite l'ondulation du courant appelé à la caténaire à la mise sous tension continue. Cette self permet d'atténuer les courants alternatifs parasites superposés au continu. Elle garantit aussi l'impédance de la locomotive avec le filtre 2F et filtre le courant rejeté par la loco (perturbation électromagnétique dans les circuits de voie et les télécommunications). Le transformateur de traction est utilisé sous les pantographes alternatifs 25 KV et 15 KV monophasé. Le PMCF est un convertisseur qui a une double fonction : un redresseur sous pantographes alternatifs et un hacheur élévateur sous pantographes continus, il assure ainsi la réversibilité de transit d'énergie pour permettre le freinage par récupération.

L'emplacement de la source hybride embarquée consiste au remplacement de la caténaire sans changer les blocs de traction de la locomotive. Pour mener à bien cette étude, une étude de marché

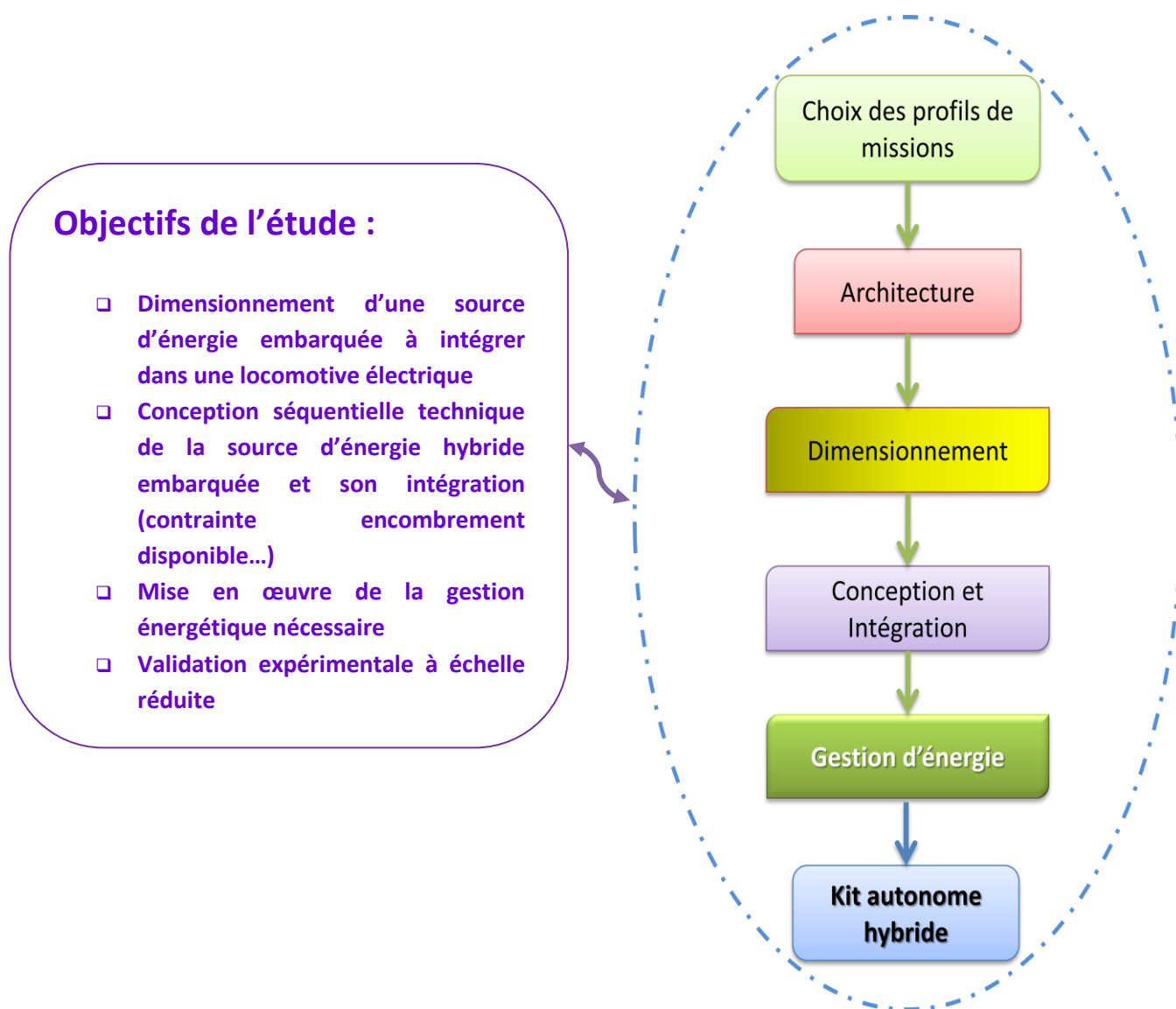


Figure 19.19 Description des démarches d'études

doit s'effectuer auprès des opérateurs privés afin de développer une base de données des différentes missions ferroviaires sur des bouts de lignes non-électrifiées, et de pouvoir ainsi dimensionner et concevoir le groupe hybride autonome aussi définir et dimensionner la stratégie de gestion énergétique. Une validation à échelle réduite va être mise en place pour confirmer le bon dimensionnement du système suivant les profils de missions.

Le deuxième volet du cahier des charges est une contribution à la capitalisation du « savoir-faire » en termes de production des locomotives hybrides. Cette étude doit ressortir les tendances prometteuses sur l'hybridation ferroviaire, les configurations et les technologies nécessaires selon les profils de missions.

1.3.3. Démarches d'études

Pour répondre au mieux au cahier des charges, l'étude a été décomposée en quatre phases distinctes (Figure 1.19) : la première phase est la plus impliquée et la plus intéressante comme c'est

une étude de marché auprès des opérateurs privés afin de développer une base de données des missions ferroviaires sur des bouts de lignes non-électrifiées prioritaires pour notre application. Grâce à ces missions ferroviaires, on va pouvoir dimensionner les performances du kit autonome.

La deuxième phase permet d'effectuer le dimensionnement des différents composants du kit autonome, ainsi que définir l'architecture nécessaire à intégrer sur la chaîne de traction électrique de la locomotive électrique quadri-tensions. Après avoir défini la solution adoptée, on conçoit les sources nécessaires à l'application et ses différents composants, ainsi que son intégration dans la locomotive. Cette phase constitue la base du cahier des charges de l'étude comme notre contrainte principale est l'encombrement disponible qui limite les performances du groupe hybride et alors il définira le dimensionnement adéquat et la conception séquentielle des ses différents composants.

La troisième phase est alors de pouvoir synthétiser une gestion d'énergie entre les différents sources d'énergie dont les principaux critères visés sont rendre la locomotive électrique autonome sur les parties non-électrifiées, réduire les coûts d'exploitation ferroviaire, mais aussi réduire la pollution et augmenter la durée de vie des composants et le coût du système.

La quatrième phase est de pouvoir modéliser simuler et valider la solution adoptée par un banc d'essai expérimental à échelle réduite cette nouvelle approche a bénéficié d'une meilleure connaissance des éléments, de modèles plus riches et plus élaborés et du recul nécessaire pour une analyse plus fouillée.

1.4. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons fait le tour de l'état de l'art de l'hybridation ferroviaire. Les exemples étudiés montrent qu'un intérêt certain est porté à l'hybridation un peu partout à travers le monde, spécialement chez les concurrents d'entreprise qui ont déjà effectué des projets concernant la traction hybride pour les locomotives ; mais ce qui ramène la nouveauté dans le projet est de pouvoir intégrer une source d'énergie hybride embarquée respectant le développement durable dans une locomotive électrique quadri-tensions existante sans avoir effectué des modifications dans son architecture, afin de la rendre autonome sur des bouts de lignes non-électrifiées en ramenant des gains potentiels aux opérateurs ferroviaires. Ceci devrait s'accroître avec la crise persistante du pétrole. Nous avons également présenté le projet dans le cadre duquel est effectuée la présente étude. La difficulté de ce projet ne réside pas seulement dans le fait d'associer une source embarquée à la locomotive électrique, mais surtout dans le fait de pouvoir l'intégrer dans son encombrement prévue sans modification de son architecture actuelle et en respectant les normes Européennes au niveau de sa masse totale. D'où l'intérêt de notre étude s'axant sur le bon choix des profils de missions en prenant en compte l'encombrement disponible qui va nous dimensionner et concevoir l'architecture technique détaillée du kit autonome, en prenant en compte sa gestion d'énergie nécessaire.

Chapitre 2

Dimensionnement Energétique du kit hybride et évaluation des différentes solutions envisagées

2.1. Introduction

La présence d'une source d'énergie hybride et embarquée dans une locomotive électrique existante est un nouveau défi aux pratiques ferroviaires traditionnelles. Nous montrons, à travers ce chapitre, une analyse des différentes missions ferroviaires auprès des opérateurs privés sur des bouts de lignes non-électrifiées répondant à notre problématique d'hybridation, et permettant de réaliser un dimensionnement énergétique du kit hybride autonome limité par le cahier des charges de l'étude. La première section de ce chapitre traite la partie de définition l'architecture préliminaire de la chaîne de traction électrique de la locomotive électrique multi-tension en mode hybride et autonome. Il s'agit de choisir le bus de tension nécessaire à l'intégration de la source hybride embarquée. La deuxième section traite de la dynamique des trains. Il s'agit d'un rappel des techniques traditionnelles de spécification des locomotives électriques et Diesel. La troisième section présente et classe les différentes missions ferroviaires. Il s'agit de hiérarchiser et de simuler les différents parcours de profils de lignes. La quatrième section traite la partie simulation des profils classifiés pour proposer un dimensionnement sommaire de groupe hybride autonome. Et enfin, la cinquième section présente l'évaluation des différentes solutions envisagées de la source embarquée à travers d'une étude comparative détaillée.

2.2. Définition de l'architecture de locomotive à option du groupe hybride embarqué

Le chemin de fer existait déjà depuis longtemps lorsqu'apparut la traction électrique. C'est cependant celle-ci qui lui permit de connaître le large développement qu'il a atteint maintenant :

- ✓ Augmentation des charges de trains.
- ✓ Augmentation des vitesses et des accélérations conduisant à une réduction des temps de trajet.

Comparée à une locomotive à vapeur, puis à la locomotive diesel de même masse, non seulement une locomotive électrique dispose d'une puissance nominale bien plus élevée, mais aussi elle peut développer pendant un temps court une puissance encore plus grande, de 50 % à 100 % supérieure. Cette propriété de la locomotive électrique justifie les lourds investissements en électrification dès que le trafic devient important sur une ligne, reléguant le diesel –successeur de la vapeur – aux lignes à trafic faible voire sporadique [36, 52].

La fonction d'une locomotive électrique est de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique. Comme cette conversion varie dans le temps, on doit plutôt parler de conversion de puissance (Figure 2.1).

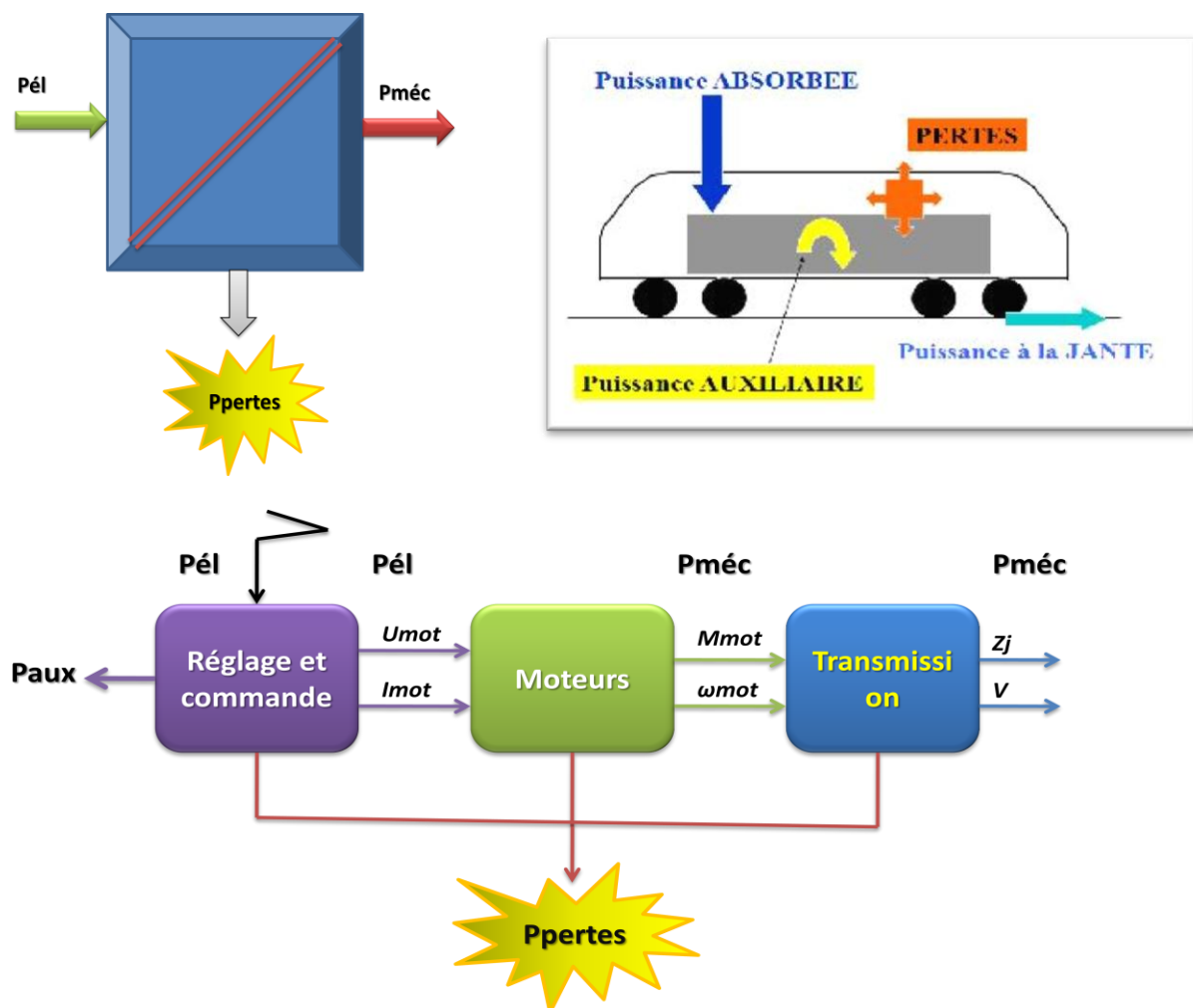


Figure 20.1 Flux et types de puissance dans une locomotive électrique en traction

On peut détailler la conversion la puissance électrique absorbée par la caténaire en trois étapes : Régalage et commande, moteurs et transmissions (Figure 2.1). En cas de freinage électrique, une conversion dans le sens inverse est opérée. L'énergie absorbée par un engin moteur est plus importante que celle utilisée à la jante pour la traction. La répartition est double :

- à chaque étape de sa transformation ou de son traitement, l'énergie subit des pertes sous forme de calories à évacuer. Cette opération nécessite la mise en œuvre d'organes de refroidissement et de ventilation.
- l'engin assure, outre sa fonction principale de traction, des fonctions annexes indispensables à la mission dans son ensemble.

La chaîne de traction d'une locomotive électrique classique Multi-tensions est présentée dans la Figure 1.18 du premier chapitre. Dans la locomotive électrique multi-tension, la partie Pantographe permet la captation de la tension à la caténaire, soit 25 Kv monophasé par le PT1, soit 15 Kv monophasé par le PT2, soit 1500 V DC par le PT3, soit 3000 V DC par le PT4. La configuration se fait à vide, hors tension par le sectionneur H(O-C), et le palpage permet de confirmer que le conducteur a bien sélectionné le bon pantographe vis-à-vis de la tension caténaire. La mise en service sera effectuée par le disjoncteur continu DJ(C) ou monophasé DJ(M) ; ces deux appareils permettent également de protéger des surintensités et court-circuit. Le H(O-M) et H(O-C) permettent aussi la mise à la masse des circulations de la maintenance de la locomotive.

Les plages des tensions caténares sont définies dans le tableau II.1 comme suit :

Système d'électrification	Tension non permanente la plus basse U_{min2} (V)	Tension permanente la plus basse U_{min1} (V)	Tension nominale U_n (V)	Tension permanente la plus élevée U_{max1} (V)	Tension non permanente la plus élevée U_{max2} (V)	Fréquence (Hz)
courant continu (valeurs moyennes)	1 000	1 000	1 500	1 800	1 950	0
	2 000	2 000	3 000	3 600	3 900	0
courant alternatif (valeurs efficaces)	11 000	12 000	15 000	17 250	18 000	16 _{2/3}
	17 500	19 000	25 000	27 500	29 000	50

Tableau II.1 Tensions d'alimentation des réseaux de traction (Norme CEI 60850)

La durée des tensions entre U_{min1} et U_{min2} ne doit pas dépasser 2 min et la durée des tensions entre U_{max1} et U_{max2} ne doit pas dépasser 5 min;

Un filtre d'entrée limite l'ondulation du courant appelé à la caténaire à la mise sous tension continue. Cette self permet d'atténuer les courants alternatifs parasites superposés au continu. Elle garantit aussi l'impédance de la locomotive avec le filtre 2F et filtre le courant rejeté par la loco (perturbation électromagnétique dans les circuits de voie et les télécommunications).

Le transformateur de traction est utilisé sous les pantographes alternatifs 25 KV et 15 KV monophasé.

Le PMCF (pont monophasé à commutation forcée) EN TRACTION monophasé et FREINAGE RHEOSTATIQUE (en mono ou continu, le moteur fonctionnant en génératrice débite son courant dans l'onduleur qui fonctionne en redresseur. Ce courant est absorbé alors par un rhéostat ; Le niveau de freinage sera ajusté par réglage de ce courant avec un hacheur de 1 bras IGBT -Diode)

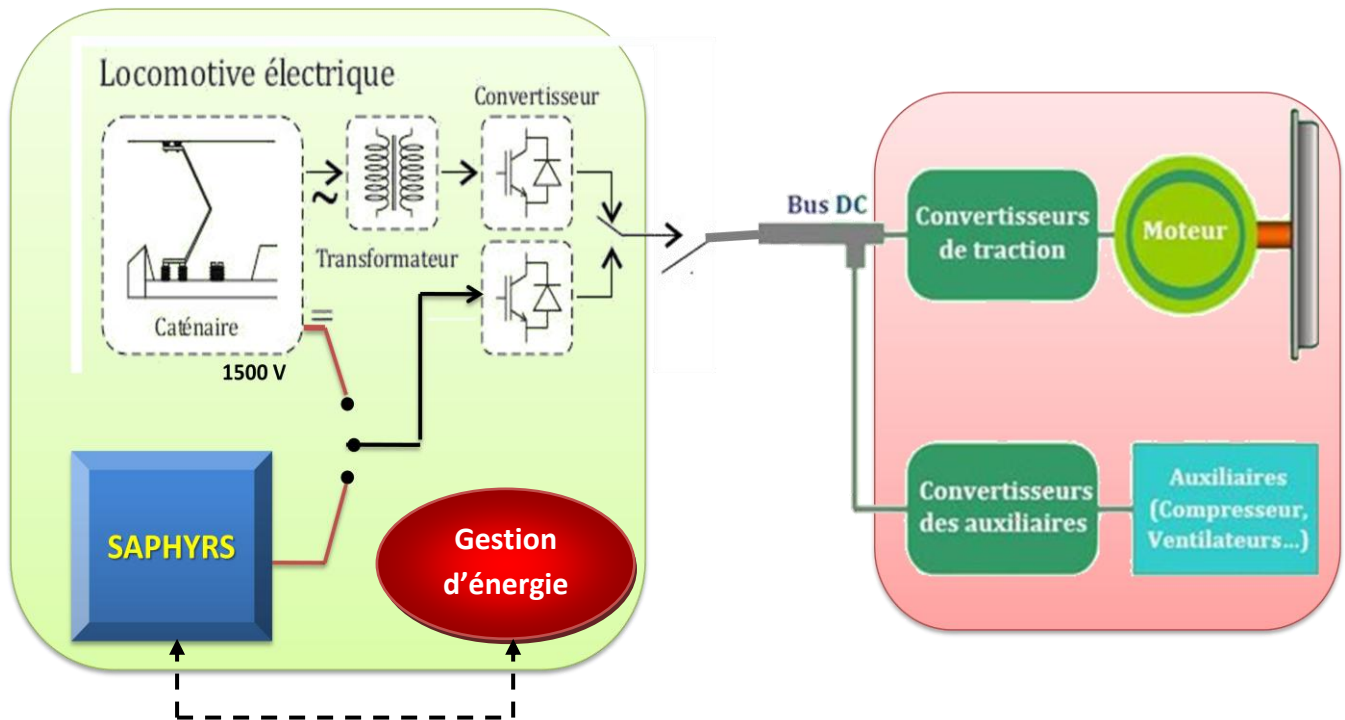


Figure 21.3 Architecture fonctionnelle de la locomotive électrique à option hybride

La fonction PMCF alimentée par le secondaire du transformateur permet de :

- réguler la tension bus nécessaire en entrée de l'onduleur : redresser la tension, élever la tension et lisser la tension
- avoir un facteur de forme proche de 1 ($\cos\phi$ et allure de l'onde)
- filtrer certaines fréquences indésirables (courants harmoniques perturbateur)
- assure la réversibilité de transit d'énergie pour permettre le freinage par récupération.

Les moteurs de traction sont dimensionnés pour une valeur de courant au régime continu ou nominal. On peut surcharger les moteurs pendant un certain temps en utilisant l'inertie thermique des organes métalliques de leur construction, sans risquer un échauffement excessif des parties les plus sensibles. Evidemment, plus le point de fonctionnement est éloigné de la limite du régime continu, plus le temps de fonctionnement doit être court avant d'atteindre l'échauffement maximal des composants. Pour limiter les harmoniques, la fréquence de pulsation doit être au moins 20 fois supérieure à la plus grande fréquence du réseau triphasé. Si la fréquence du convertisseur est plus grande que la vitesse de la machine asynchrone, celle-ci fonctionne en mode moteur et le convertisseur en onduleur. C'est le régime traction. Si la fréquence du convertisseur est plus faible que la vitesse de la machine asynchrone, celle-ci fonctionne en mode génératrice et le convertisseur

en redresseur. C'est le régime freinage. En monophasé, pour le régime de freinage à récupération, le pont monophasé côté ligne de contact doit être apte à fonctionner en onduleur.

L'entraînement mécanique, ou transmission, a pour but de transmettre aux roues motrices le couple développé par les moteurs de traction. La puissance mécanique des moteurs n'est pas entièrement transmise à la jante, mais avec un rendement η_G compris entre 0,95 et 0,99.

Le rendement de l'engin de traction est le rapport entre

$$\eta = \frac{\text{Puissance Jante}}{\text{Puissance absorbée} + \text{pertes}}$$

$$\Rightarrow P_{\text{absorbée}} = \frac{P_{\text{jante}} - \eta \cdot P_{\text{pertes}}}{\eta}$$

En général, le rendement de la chaîne de traction est estimé à 85%, en notant que le rendement des convertisseurs varie entre 0.95 et 0.99 (PMCF 98%, onduleur 99%, moteur de traction 95%...).

L'énergie auxiliaire nécessaire au fonctionnement de la locomotive en dehors des fonctions principales de traction et de freinage qui permet d'alimenter les moto-ventilateurs pour le refroidissement des convertisseurs, du rhéostat de freinage ou des moteurs de traction mais aussi la climatisation en cabine de conduite et le compresseur d'air ou encore les motopompes et la charge batterie.

La chaîne de traction électrique d'une locomotive électrique quadri-tensions fonctionne donc en 2 modes d'alimentation : monophasé et continu. L'intégration du kit autonome hybride consiste au remplacement de la caténaire sans changer les blocs de traction de la locomotive, et sans effectuer une grande modification dans l'interface contrôle-commande, car l'objectif essentiel pour l'entreprise est de réduire au maximum les coûts de réalisation et d'intégration d'une telle option. Après la partie de source d'énergie, il existe un bus central continu, auquel sont connectées les sources d'énergie et les blocs de traction et les auxiliaires. Toutes les liaisons à ce bus continu sont faites à travers des convertisseurs.

Comme la contrainte principale de notre cahier des charges est de respecter l'encombrement disponible dans la locomotive, le dimensionnement de la source hybride est donc limité avec une telle contrainte, et donc aussi l'architecture de la chaîne de traction de la locomotive électrique, car le choix de bus de tension où le groupe autonome doit s'intégrer change aussi ses dimensions, y compris ses composants.

Après avoir analysé les différentes possibilités et les contraintes du cahier des charges, la source hybride s'intégrera à l'extérieur de la chaîne de traction comme un pantographe virtuel sur le bus continu 1500 V DC. La fonction palpage de tension permet de confirmer que le conducteur a bien sélectionné le bon pantographe vis-à-vis de la tension caténaire, et discrimine « Continue » et « Monophasé » pour commander les sectionneurs et disjoncteurs adéquats. Cette fonction exige de même le choix d'intégrer le kit autonome dans la partie de présence des pantographes, comme un pantographe virtuelle en utilisant les mêmes fonctions existantes du PT3 « pantographe 1500 V DC », pour limiter les modifications interne dans les blocs de TCMS, ainsi que dans le pupitre de conduite. La seule partie à modifier dans l'architecture est l'addition d'un SWITCH entre le pantographe 1500 V DC et le kit autonome PT5. Le module de gestion énergétique gère la

participation de chacune des sources d'énergie en agissant sur les convertisseurs (Figure 2.3). Grâce à ce choix, nous respectons le cahier de charges au niveau d'encombrement du système, et nous gardons l'architecture originale de la locomotive et de sa chaîne de traction, y compris son interface contrôle-commande (pantographe virtuelle 1500 V DC), ce qui nous permet de réduire au maximum le dimensionnement des différents convertisseurs et composants du kit d'autonomie.

La définition de l'architecture de la locomotive électrique multi-tension à option du groupe hybride embarqué (Figure 2.2) nous garantit la bonne démarche d'étude vers le dimensionnement énergétique de la source hybride embarquée, en l'utilisant dans les calculs des puissances et des énergies consommées dans les différentes missions ferroviaires pour les bouts de lignes non-électrifiées.

2.3. La dynamique des trains

Généralement, ce programme est spécifié dans le cahier des charges par la donnée de plusieurs informations dont les plus importantes sont : les types de train à remorquer, avec leur masse, l'effort au démarrage nécessaire, les profils de ligne susceptibles d'être rencontrés, la vitesse maximale, l'effort résiduel à la vitesse maximale. Ces informations sont utilisées pour la spécification des caractéristiques ci-après : les efforts nécessaires à la marche du train, l'adhérence, le couple moteur, la puissance de traction et la caractéristique effort-vitesse. Dans cette section, nous montrons à travers la présentation succincte de ces caractéristiques, comment la spécification de profils de ligne, de vitesse et de charge permet de "remonter" au dimensionnement de l'engin et à la programmation des horaires des trains [7, 10, 37, 51, 52].

2.3.1. Efforts nécessaires à la marche du train

Les efforts nécessaires à la marche du train sont donnés par l'équation fondamentale de la dynamique des trains :

$$F_j = R + Mgi' + KM\gamma$$

Le terme F_j (exprimé en kN) correspond à la somme des efforts aux jantes. Elle exprime la force totale que doit développer l'engin à ses jantes pour déplacer le train sur un profil (de pente) $i_0(\%)$ avec une accélération ($m.s^{-2}$). Le terme R (exprimé en kN) est la résistance à l'avancement (RAV). R exprime les efforts résistants à vaincre pour faire rouler un train à une vitesse V donnée en palier.

$$R = A + BV + CV^2$$

Le coefficient A représente les frottements dans les boîtes d'essieux et la résistance au roulement sur les rails. Ce coefficient dépend de la masse du train et du nombre d'essieux. Le terme BV représente les efforts de frottement des boudins de roue contre le champignon des rails et le terme CV^2 la résistance aérodynamique du train qui dépend :

- de l'action de l'air sur la face frontale ;
- de l'effet de l'écoulement de l'air le long des parois

- des turbulences dues aux césures entre véhicules et celles qui se produisent sous le train entre la voie et les dessous de caisse ;
- de toutes les imperfections aérodynamiques.

Les paramètres A, B et C sont déterminés par des essais minutieux. La RAV est l'obsession des acteurs ferroviaires, car elle constitue un poste important de consommation d'énergie. Le terme $Mgi0$ représente la force résistante due au poids Mg de l'engin, compte tenu de la pente du profil de ligne et de la courbure des rails ($i0$ exprimé en ‰ soit mm/m). Le paramètre $i0$ communément appelé profil corrigé, est de l'ordre de 8 à 10‰ sur les lignes classiques. Le profil $i0$ est plus sévère sur les lignes à grande vitesse (LGV). Il monte à 35‰ (rampe du « Bois Clair ») sur 6km sur la ligne TGV PSE(1) Enfin, le terme kM représente l'effort nécessaire pour accélérer une masse kM avec une accélération (m/s^2). kM est une masse fictive représentant la somme des masses roulantes ramenée aux jantes motrices. K varie de 1,10 à 1,30 pour une locomotive et vaut 1.04 pour un TGV.

Les différentes résistances à l'avancement pour un calcul d'effort résistant total nécessaire à la marche du train sont :

Résistance à l'avancement de la Locomotive

- Masse 90 t
- Equivalent masses tournantes 13.5 t
- Résistance à l'avancement (daN): $110.7 + 0.9V + 0.03V^2$ (V en km/h)

Résistance à l'avancement Matériel remorqué:

Porte-autos ;

- Masse 800 t
- Equivalent masses tournantes 4%
- Résistance à l'avancement (daN/t): $1.2 + 0.01V + 0.00056V^2$ (V en km/h)

Transport combiné:

- Masse 800 t et 1800 t
- Equivalent masses tournantes 4%
- Résistance à l'avancement (daN/t): $1.2 + 0.01V + 0.000171V^2$ (V en km/h)

Tout-venant:

- Masse 1200 t et 1800 t
- Equivalent masses tournantes 4%
- Résistance à l'avancement (daN/t): $1.2 + 0.00899V + 0.00044V^2$ (V en km/h)

Résistance due à l'inertie : effort accélérateur

La mise en vitesse du train obéit à la loi fondamentale de la dynamique : $F = M \cdot \gamma$

La somme des masses en mouvement comprend:

- Les masses en translation: masse totale de tous les véhicules - moteurs et remorqués

- L'inertie équivalente en translation des masses en rotation comprenant :
 - ✓ essieux et accouplements
 - ✓ roues dentées de transmission
 - ✓ disques de frein
 - ✓ rotors de moteurs de traction

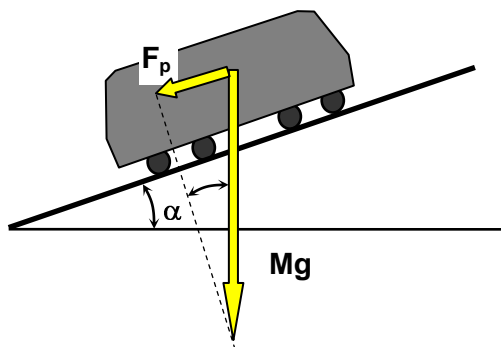
Son expression devient $F = \Sigma M \gamma = \left[M + \left(\frac{I_e}{R^2} + I_m \cdot \frac{\rho^2}{R^2} \right) \right] \gamma = c \cdot M \gamma = (c_m M_m + c_r \cdot M_r) \gamma$

Résistance due au profil de la voie

La voie exerce une double résistance :

- suivant le profil en long : influence des rampes
- suivant le profil en Plan : influence des courbes

Influence des rampes



Un convoi de masse M sur un plan incliné (rampe ou pente) faisant un angle α avec le plan horizontal, est soumis à un effort F_p tel que: $F_p = M g \sin \alpha$

L'angle s'exprime par sa tangente, en **mm** par **m**, (% ∞) sinus et tangente étant très proches.

Or :

$$i' = i + \frac{k}{\rho}$$

Aussi : et $i = \tan \alpha \approx \sin \alpha$ comme α est \ll

d'où: $F_p = i' \cdot M_{\text{totale}} \cdot g$

Cas particulier de la résistance au démarrage : le "décollage"

La phase de démarrage d'un train est un cas spécifique qui tient compte de la mise en mouvement des organes en rotation au cours de laquelle le film d'huile entre pièces en contact n'est pas formé complètement. Ce phénomène de "décollage" est accentué en période de basses températures. Une résistance à l'avancement supplémentaire est prise en compte, notamment en rampe du fait de la tension mécanique existante entre attelage de chaque véhicule. Les valeurs couramment utilisées sont :

FRET	$i < 7\text{‰}$	$R_d = \frac{M}{100} (i \cdot 0.981 + 4.5)$
FRET	$i < 7\text{‰}$	$R_d = \frac{M}{100} (1.25 \cdot i \cdot 0.981 + 2.75)$

2.3.2. Sollicitation d'adhérence

La sollicitation d'adhérence est le rapport entre l'effort maximal transmissible aux roues motrices et la force adhérente au rail due à la masse de l'engin

$$\mu = \frac{1}{Mg} \cdot F_{jmax}$$

La valeur de μ dépend de l'état du rail. Sur rail sec, la valeur de μ peut atteindre 30% à 35% voire 40%. Sur rail mouillé, avec éventuellement des feuilles mortes μ peut descendre en dessous de 10%. A grande vitesse, le niveau d'adhérence se réduit à 10% environ. La technique du sablage devant les roues motrices permet de relever le niveau d'adhérence sur zones humides et glissantes. La sollicitation d'adhérence est un facteur important à prendre en compte dans la gestion des efforts transmis aux roues motrices et la gestion du freinage pour éviter un glissement excessif des roues sur les rails.

2.3.3. Caractéristique Effort-vitesse

La caractéristique d'Effort-Vitesse dans la phase de traction comprend deux zones :

✱ **zone de limitation d'effort** :

Son ordonnée à l'origine indique l'**effort maximal au démarrage** « F_D ». Il tient compte de l'adhérence maximale utilisable à vitesse nulle, telle que définie précédemment. Lorsque la vitesse augmente, l'effort diminue parce que l'adhérence utilisable diminue avec la vitesse. Cette décroissance est généralement fixée par l'expression empirique :

$$\mu = \mu_0 \frac{8 + 0,1V}{8 + 0,2V}$$

μ : Adhérence à vitesse V

μ_0 : adhérence au démarrage

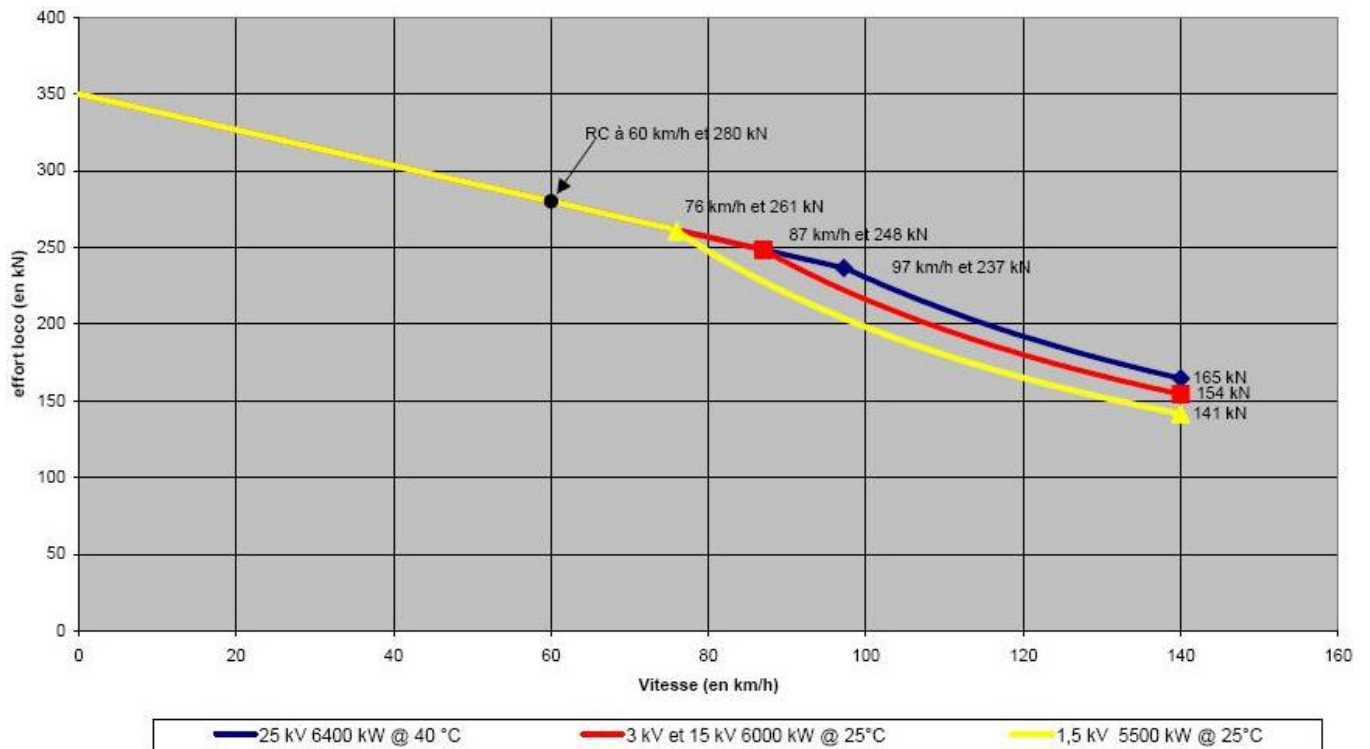


Figure 22.4 Courbe effort-vitesse de la locomotive électrique quadri-tensions

✿ **zone d'équipuissance :**

La fonction $F = f(V)$ est une hyperbole équilatère d'équation :

$$F = \frac{P}{V}$$

Aussi appelée hyperbole d'équipuissance. Elle caractérise tous les points de fonctionnement à puissance constante, correspondant à un effort et à une vitesse donnés :

La puissance à la jante s'écrit de la manière suivante :

$$P_j = \frac{1}{3.6} \cdot F_j V$$

$$P_j = \frac{1}{3.6} (A + Mgi' + KM\gamma V + BV^2 + CV^3)$$

✿ **Régimes de marche**

Le parcours d'un train est fonction du programme de traction défini précédemment. On distingue trois régimes de marche dimensionnant en termes de puissance et de composants de la chaîne de traction :

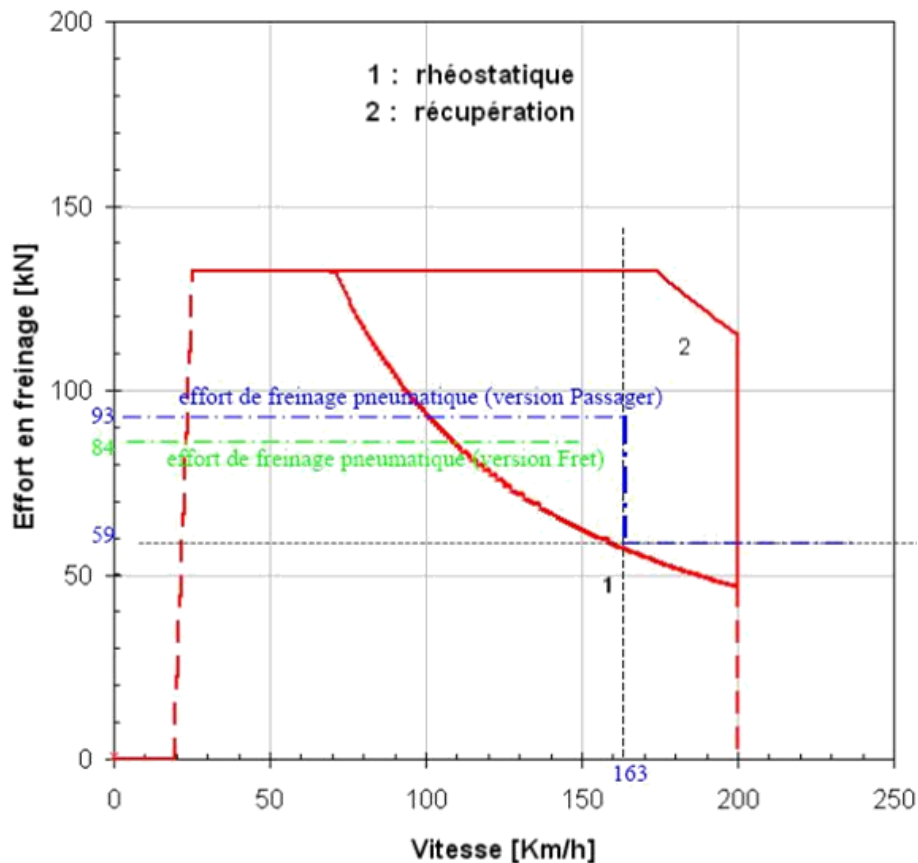


Figure 23.5 Courbe de freinage de la locomotive électrique multi-

- ✓ **Régime de démarrage** : la puissance mise en jeu est nulle à $V=0$; l'effort est le plus élevé. Pour un train de fret parcourant une longue distance avec peu d'arrêts ce régime est peu fréquent ; par contre il peut durer un temps important s'il s'effectue en rampe. Un train de banlieue dont les stations à desservir sont rapprochées effectue des démarrages très fréquents avec des efforts importants du fait des fortes accélérations.
- ✓ **Régime continu** : on appelle ainsi la marche à puissance telle que tous les organes de la transmission soit à leur température d'équilibre qu'ils peuvent supporter un temps infini. De ce qui précède, ce sont les parcours à longue distance qui utilisent ce régime.
- ✓ **Régime de surcharge** : il est possible pour certains organes de la transmission de délivrer une puissance supérieure à leur régime continu en restant dans des limites d'échauffement acceptables. Autrefois appelé "régime uni horaire", ce régime peut être défini pour un temps donné différent de l'heure.

Dans la figure 2.4, la courbe $F(V)$ de la locomotive électrique quadri-tensions montre bien les trois régimes de traction. Dans notre cas on s'intéresse à la courbe de traction sous 1500 V DC. L'effort au démarrage vaut 350 kN, et au-delà d'une vitesse de 60 Km/h un régime continu sera établi avec une valeur d'effort de 280 kN, sachant que la masse de la charge remorquée est de 1800 Tonnes.

La puissance de freinage installée dans l'engin moteur est utilisée pour les besoins de son seul ralentissement. Par contre les moyens mis en œuvre pour réaliser ce freinage diffèrent de ceux du matériel remorqué dès lors qu'il est possible d'utiliser la réversibilité de l'organe moteur pour dissiper de l'énergie. C'est le cas du moteur électrique fonctionnant en générateur et capable

d'exercer un couple résistant. Nous l'étudierons dans le cadre de la chaîne de traction. Dans la locomotive électrique (Figure 2.5), deux types de freinage existe : Rhéostatique où l'énergie de freinage sera dissipée dans les blocs rhéostatiques, et un autre pneumatique qui sera utilisé dans le cas de freinage d'urgence.

2.3.4. Conclusion

Notons, pour conclure sur la dynamique des trains, que la chaîne de calculs qui permet de remonter les profils de ligne, des programmes de vitesse et des performances des chaînes de traction à la consommation de puissance et d'énergie d'un train est bien la phase la plus intéressante pour développer un engin ferroviaire. Cette étude est bien maîtrisée par les fournisseurs ferroviaires à travers des logiciels spéciaux (CALCPERF et CITHEL). Dans la perspective de l'hybridation ferroviaire, nous envisageons de conserver la chaîne de traction initiale de la locomotive électrique quadri-tensions, ce choix permettant un gain de temps de conception considérable dans le cadre de ce projet. La connaissance de la consommation de puissance et d'énergie sur la locomotive est la tâche la plus importante pour notre dimensionnement de la source hybride autonome, il est donc nécessaire de partir du programme de traction complet (Profil de ligne, charge et profil de vitesse). Pour les besoins du projet du développement du kit autonome, une étude de marché a été mise en place auprès des opérateurs ferroviaires, qui a permis de classifier les missions ferroviaires potentielles, et de calculer les consommations de puissance et d'énergie à bord grâce au logiciel CITHEL d'entreprise. Ceci va être détaillé dans la prochaine partie car c'est sur la base de ces profils de missions que s'appuie la démarche d'hybridation.

2.4. Caractérisation et classification des missions ferroviaires

La faisabilité de la conception d'un véhicule hybride dépend en grande partie de la nature de la mission spécifiée par le cahier des charges. En général, le cahier des charges ne spécifie pas qu'une seule mission mais plutôt un ensemble de missions. Dans le cadre du projet de développement de la source hybride embarquée, la locomotive électrique quadri-tensions est une locomotive électrique utilisée pour des missions de FRET. D'une façon générale, les missions ferroviaires sont réparties en segments de missions [25, 34]. Les segments les plus connus sont :

- les triages, les dessertes locales et les manœuvres (< 1000 kW, < 80 km/h) ;
- les transports urbains en omnibus, banlieue parisienne (< 1000 kW, 120 km/h) ;
- les dessertes régionales (< 2000 kW, 200 km/h) ;
- les grandes lignes voyageurs (4 à 5MW, 200 km/h) ;
- le fret (3 à 6MW, 2000 tonnes, 100 km/h à 200 km/h) ;
- le segment TGV (3 à 9.3MW, 300 km/h) ;

De nouvelles missions sont en cours d'identification actuellement à la SNCF, telles que les auxiliaires TGV; les tampons énergétiques pour le lissage de la consommation en sous-station. Le ferroviaire compte donc une panoplie de segments de missions qui, à leur tour, peuvent contenir chacun plusieurs missions différentes selon le profil du trajet, le type et le tonnage du convoi

remorqué. Nous montrons comment il est possible, à partir d'un jeu d'indicateurs bien ciblés, de caractériser les différents segments de missions et d'évaluer la faisabilité de l'hybridation ferroviaire sur ces segments.

L'objectif de ce projet est de compléter la locomotive électrique avec une source autonome hybride propre et durable afin d'éviter l'investissement dans un véhicule supplémentaire, et permet une amélioration des conditions d'exploitation en simplifiant la logistique et en diminuant potentiellement les coûts de maintenance. Actuellement, les plates Formes FRET n'étant pas électrifiées, une fois le train prêt, un locotracteur le tracte jusqu'au point de départ sous lignes électrifiées.

Plusieurs opérateurs privés et la SNCF ont déjà été rencontrés, ainsi que des applications portuaires auprès des opérateurs privés allemands et anglais, car l'objectif principal est de pouvoir rendre la locomotive interopérable en Europe. La collecte des besoins clients porte essentiellement sur une fonction d'autonomie énergétique pour des engins moteurs sur voie non-électrifiée. Une telle fonction autoriserait donc une diminution des coûts d'exploitations par la réduction d'exploitation des locotracteurs et les temps des logistiques.

L'étude de marché nous a aboutit à caractériser les profils de missions pour le groupe hybride, et qu'on a conclu que :

- Pente : généralement faible
- Les rayons de courbure minimum descendent très rarement en dessous de 90 m mais sont généralement de 150 m.
- Vitesse de fonctionnement sur les réseaux secondaires (régis par la loi) : zone de chargement quai de 6 Km/h, zone de triage de 20 Km/h, zone de liaison entre 2 sites (dessertes) de 30 Km/h
- Coût de diesel ferroviaire : 0,6 €/litre
- Coût d'analyses d'un locotracteur avec conducteur et accrocheur : 150 €/h

Pour des raisons de sécurité, les manœuvres ferroviaires sont toujours effectuées par 2 opérateurs qui peuvent correspondre par radio.

Dans le cadre du projet de développement du kit autonome, nous disposons d'une base de données de missions ferroviaires contenant des missions de triage⁽¹⁾, de desserte locale⁽²⁾, de chargement des wagons dans un site industriel (Minerais (mine), automobiles, céréales...) ou portuaire. Une telle source embarquée permettrait également de s'affranchir de l'assistance pour la reconduction au garage (remisage) ainsi que pour la circulation dans les dépôts de maintenance, et certains transits en haut le pied. Cette disparité s'explique par le fait qu'en exploitation réelle les missions varient selon la charge, la vitesse ou le profil de ligne. Cette profusion de missions permet de couvrir toutes les performances attendues. L'analyse des missions doit permettre d'extraire les caractéristiques dimensionnantes de la source d'énergie hybride à embarquer dans la locomotive électrique.

Les missions ferroviaires obtenues suite à l'étude de marché nous permettent de classer les besoins suivants classés par ordre décroissant d'importance:

(1) Il s'agit de la formation des trains des convois de fret

(2) La desserte locale est une mission de transport de marchandises entre deux gares voisines ou chez les clients (Peugeot, Renault, . . .) vers les gares de triage pour la formation des convois fret



Figure 24.6 Vue de Chargement du port de Marseille

- ☞ Ralliement autonome proche du terminal « Chargement de port » : 1800 Tonnes (7 Km)
- ☞ Ralliement autonome éloigné du terminal « Desserte FRET »: 1800 Tonnes (35 Km)
- ☞ Site de chargement : 1850 Tonnes (840 m)
- ☞ Transit autonome en haut le pied pour un nouveau point de départ commercial : 90 Tonnes (118 Km)
- ☞ Desserte FRET locale autonome des wagons isolés : 400 Tonnes (60 Km)
- ☞ Transit haut le pied autonome en dépôt de maintenance : 90 Tonnes (11 Km)

✿ **Besoin Ralliement FRET proche du terminal : chargement en port**

Les lignes ferroviaires desservant les ports ne sont pas électrifiées dans leurs entières. La chaîne de gestion ferroviaire d'un port est assurée par trois types d'intermédiaire : un premier qui décharge le train, un deuxième qui remorque le train depuis le quai jusqu'au gare de triage, un troisième qui assure la grande ligne FRET.

Site	Zone de Chargement			Zone d'Intermédiaire			Informations autres			
	Vitesse de fonctionnement	Rayon de courbure mini	Pente	Vitesse de fonctionnement	Rayon de courbure mini	Pente	Distance (1 trajet)	Masse Maxi Train	Masse Moyenne	Nombre de locotracteur sur site
Le Havre	15km/h	150	0	50 km/h	500	faible	30 km	1800	1200	13 - 15
Lyon	6 km/h	150	faible	6 km/h	200	20 ‰	0 à 7 km		1600 1800	2
Marseille	6 km/h	150	faible	30 km/h	normale	12 ‰	6-5 km	-	-	?
Gennevilliers	?	200	faible	?	200	faible	? 11 km ?	?	?	?
Varangéville	6 km/h	150	15 ‰	-	-	15 ‰	200 m	2100	1500	1

Tableau III.2 Caractéristique de profils de missions auprès des ports

Actuellement, les chaînes logistiques suivent souvent les mêmes successions d'exploitants. Tous les exploitants parlent d'un temps de gonflage d'environ 10 à 20 minutes. Une telle solution permettrait donc de gagner du temps logistique énorme, et simplifie ainsi sa chaîne. L'étude de marché a ciblé 5 ports de chargement en Europe (Tableau II.2). Dans la figure 2.6, une vue du port de Marseille montre clairement les bous de lignes non-électrifiées. Il est constitué de deux terminaux « Est et Ouest », qui dépendent respectivement des distances de 5 à 6 Km de lignes non-électrifiées. La vitesse de fonctionnement des locotracteurs est de 6 Km/h. Lors de la liaison entre les zones de chargement et la gare de triage, les vitesses augmentent jusqu'à 30 Km/h. Cependant, après un examen attentif de la figure 2.6 qui correspond à une vue de satellite de port, il est possible de voir la présence de la caténaire à environ 1.5 Km du quai de chargement.

Grâce à ces caractéristiques de profils de lignes, un segment de mission pour le ralliement FRET d'un chargement de port a été caractérisé pour l'étude du kit hybride autonome, en prenant en compte les différentes contraintes pour établir enfin un dimensionnement correcte du système.

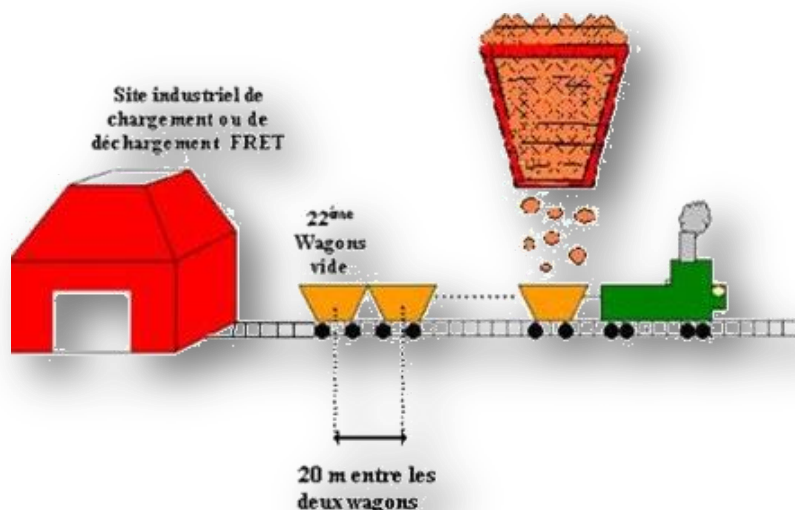
Ralliement autonome éloigné du terminal « Desserte FRET »

L'intérêt de cet opérateur privé (France) est lui aussi très clairement exprimé à propos d'un besoin d'autonomie énergétique des locomotives en bout de ligne.

Sa demande est de deux ordres : pouvoir rallier les sites d'exploitation lorrains par les lignes non électrifiées et associer à cette possibilité. C'est la desserte d'un train complet pour aller d'un site industriel à une voie électrifiée. Le besoin de cet opérateur nous a donc été précisé par : Pouvoir tracter un convoi FRET de 1800 tonnes à 30 Km/h sur un embranchement privé non électrifié long de 30 KM. L'autonomie demandée est de 1 heure pour 1800 tonnes dans la région lorraine. Les profils de lignes peuvent donc atteindre 10 à 15 pour mille pour mille.

❁ Dépôt de chargement de 22 Wagons

L'intérêt de cet opérateur privé est très clairement exprimé à propos d'un besoin énergétique des locomotives en bout des lignes non-électrifiées vers des sites industriels de chargement ou de déchargement FRET non-électrifiés. Aujourd'hui, l'opérateur a la nécessité de disposer de locotracteurs sur ces sites en bout de lignes pour acheminer les convois du site de chargement à la ligne électrifiée la plus proche.



Ces locotracteurs ont une durée de vie courte (15 ans) car ces engins sont soumis à rudes épreuves : plusieurs cycles de démarrage, dans notre cas on a la réalisation d'un chargement de 22 wagons successivement. Un locotracteur ayant servi 5 ans doit être fortement révisé pour continuer son usage. Un cahier des charges apparaît donc : effectuer 22 démarrages consécutifs, progressivement de 100 tonnes à 1800 tonnes ; La distance parcourue est environ 840 m, et la vitesse est de 5 Km/h en palier.

❁ Transit autonome en haut le pied pour un nouveau point de départ commercial

L'intérêt cet opérateur privé est très clairement exprimé à propos d'un besoin d'autonomie énergétique des locomotives en bout de ligne : les sites industriels de chargement ou de déchargement FRET ne sont pas électrifiés. Aujourd'hui, l'opérateur a la nécessité de disposer de locotracteurs sur ces sites en bout de ligne pour acheminer les convois du site de chargement à la ligne électrifiée la plus proche. Ces locotracteurs ont des durées de vie courtes car ces engins sont soumis à rudes épreuves (beaucoup de cycles de démarrage, corrosion importantes dû à l'air salin ou aux poussières corrosives ; un locotracteur ayant servi 5 ans doit être fortement révisé pour continuer son usage). Un autre besoin a été évoqué est de pouvoir transférer une locomotive en haut le pied⁽¹⁾ d'un site de fin de mission commerciale en un lieu A à un autre site pour le départ d'une autre mission commerciale en un lieu B. La vitesse de circulation demandée par VEOLIA est de 100Km/h.

⁽¹⁾ Haut le pied il s'agit pour le matériel roulant d'une locomotive circulant sans tracter de wagons et pour le personnel, d'un parcours à bord d'un train avec ou sans voyageurs, où l'agent se déplace en simple passager, sans effectuer de mission de contrôle.

L'estimation de l'autonomie a été faite pour un parcours de 60 Kms pour rallier un point d'exploitation par voie non électrifiée. Soit dans ce cas, une autonomie de 36 mn pour une charge de 90 tonnes, le profil de ligne sera considéré avec des rampes maxi de 5 pour mille dans un premier temps.

Cet opérateur privé est également très attentif à sa consommation d'énergie ; Le besoin à ce sujet pour VEOLIA est de disposer d'une électronique de bord pour compter l'énergie réellement consommée par ses convois pour ne se faire facturer l'énergie dépensée par d'autres opérateurs. La fonction compteur d'énergie est d'ailleurs déjà obligatoire sur le réseau allemand. En propulsion Diesel, cet opérateur signale que les prix du gasoil sont très différents d'un pays à l'autre (deux fois plus cher en Allemagne qu'en France) et les pleins sont effectués en tenant compte de ces différences. Son besoin d'efficacité énergétique de ses engins est très clairement affiché. Pour donner une référence, le prix du KW/h en France était d'environ 0,07 euro et prix d'un litre de gasoil : 0,56 euros en 2005. Ramener au prix au KM, un convoi FRET tracté avec une locomotive électrique grande ligne coûte environ 2 euros/KM et par une locomotive Diesel-électrique coûte environ 5 euros /KM.

Desserte FRET locale autonome des wagons isolés

En complément aux demandes précédentes qui intéressent cet opérateur national des chemins de fer, il précise son besoin pour les dessertes de wagons isolés à partir d'une gare FRET.

Il est demandé de pouvoir faire les mêmes missions qu'un locotracteur BB 63000 d'une puissance de 600 KW c'est à dire pouvoir effectuer des missions sur voies non électrifiées dans un rayon de 60 Km, pour transporter 3 wagons soit une charge maxi de 400 tonnes, à 60 Km/h maxi. L'autonomie demandée dans ce cas est de 1 heure.

Les profils de lignes sont variables. La consommation pour ces missions est en moyenne de 3000 l de gasoil par locotracteur par semaine. Ce cahier des charges permettrait aussi de couvrir les besoins d'un marché nouveau qu'il est en train d'étudier : le transport urbain de FRET pour réaliser du transport de wagons isolés en ville.

Transit haut le pied autonome en dépôt de maintenance

Un mainteneur réceptionne souvent les matériels de maintenance d'un exploitant en gare FRET ; Il lui faut donc acheminer les locomotives vers son dépôt de maintenance par une voie qui n'est pas forcément électrifiée. Le besoin d'un locotracteur est alors requis. C'est par exemple le cas pour la maintenance des locomotives de l'opérateur privé VEOLIA effectué sur le site ALSTOM de Belfort (1,8 Km). Une autonomie d'énergie de traction de 15 mn d'une locomotive sans charge (Haut le pied) 100 tonnes sur un parcours de 5 Km maximum, à 20 Km/h max permettrait de couvrir les différents cas de figures pour les réceptions en dépôts de maintenance.

Un besoin complémentaire serait ainsi également couvert par ce cahier des charges : pouvoir circuler au sein d'un dépôt de maintenance (Figure 2.7) ou dans un atelier, sans disposer de caténaire. Le besoin de l'exploitant national chinois illustre bien cela : c'est la logistique de maintenance des locomotives qui demande à pouvoir déplacer, sans caténaire, une locomotive dans un atelier de maintenance. La solution proposée actuellement est d'alimenter la chaîne de traction par l'intermédiaire d'une prise de courant de l'atelier. Cette solution peu chère, présente

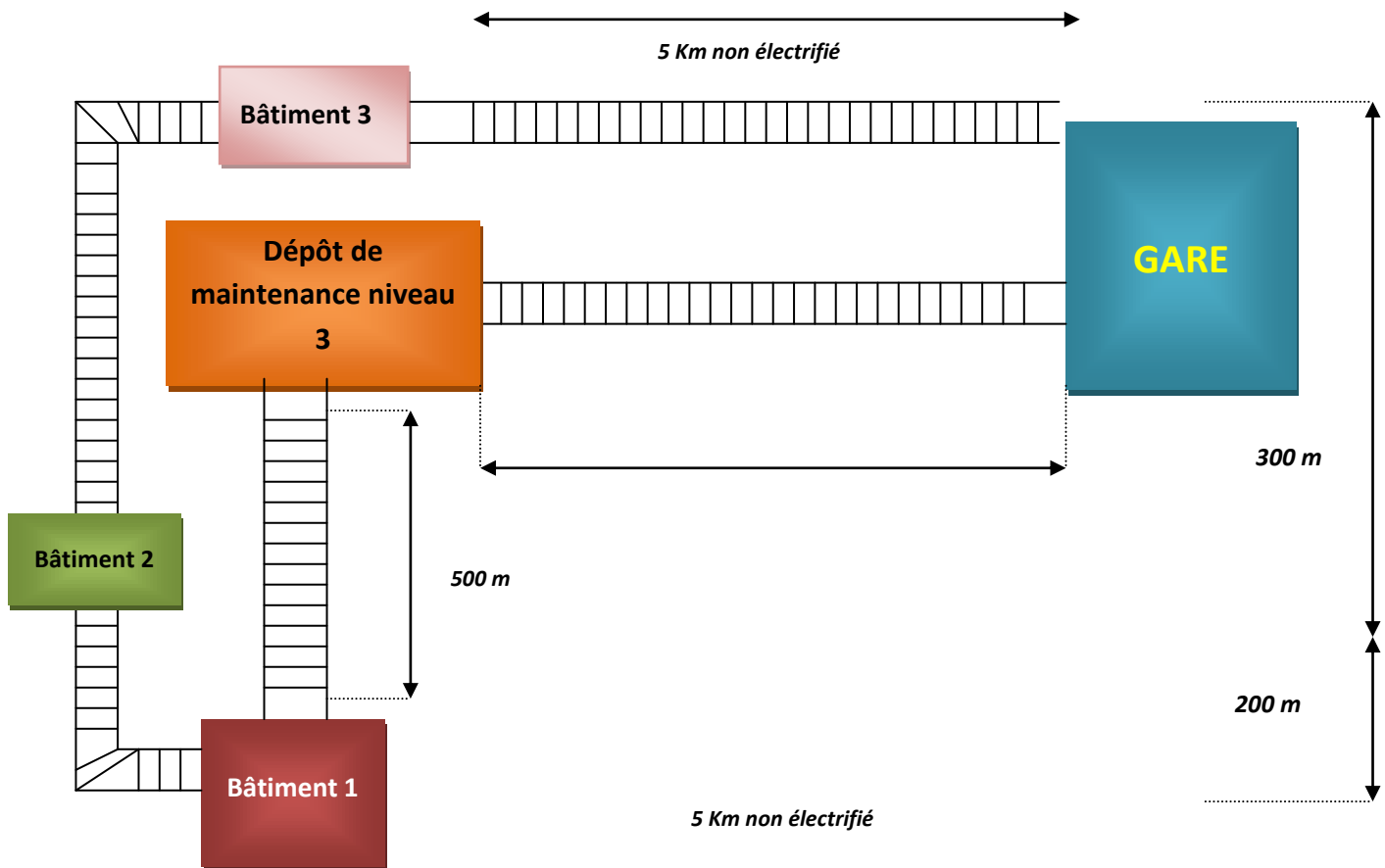


Figure 25.7 Locomotive haut le pied dans un dépôt de maintenance

l'inconvénient de limiter le déplacement à quelques dizaines de mètres, de part la présence d'un câble de liaison.

2 autres besoins sont en cours de définition :

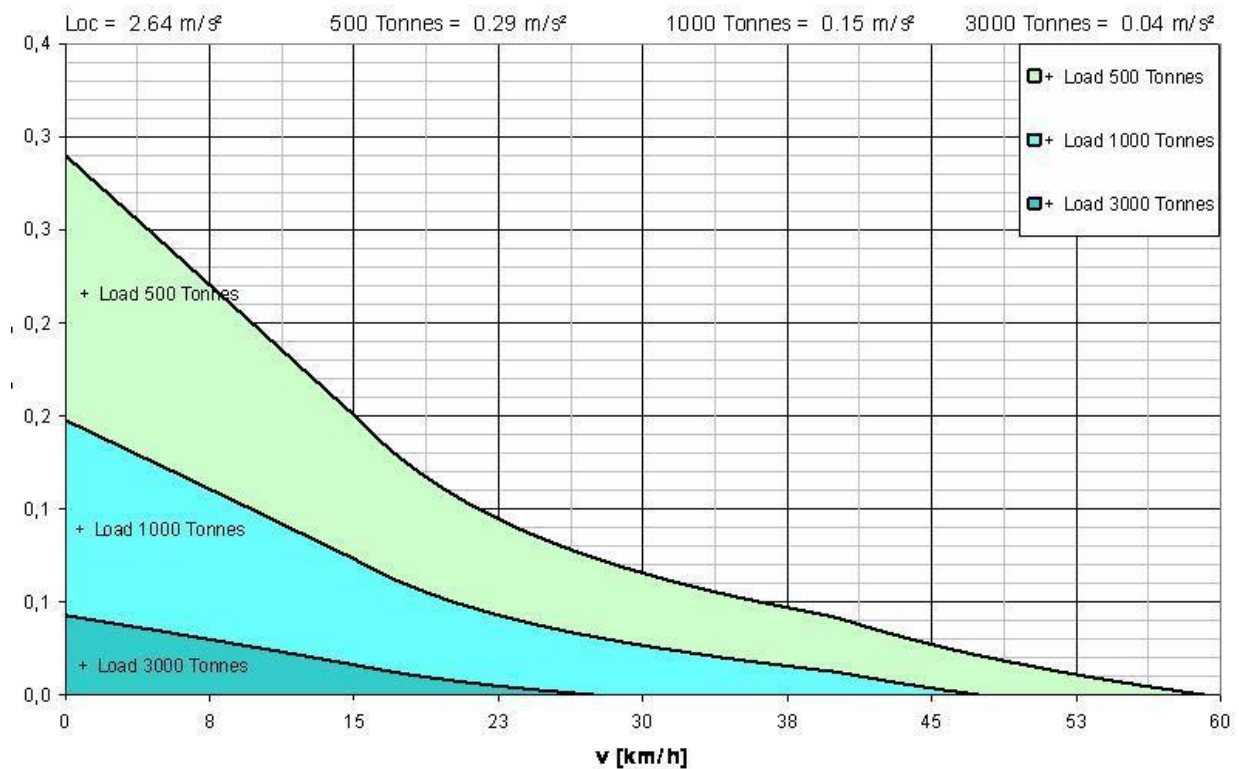
- l'un concerne la possibilité de pouvoir évacuer un convoi bloqué en ligne pour une cause de panne ou destruction d'appareils Haute tension tels que pantographe, transformateur principal, le disjoncteur HT, sectionneur de configuration, transformateur de palpage, excréteur notamment. Une autonomie d'énergie permettra de tracter le convoi jusqu'à la prochaine voie de garage afin de ne pas bloquer la circulation en ligne (et évite ainsi une demande de secours en ligne).
- l'autre concerne la possibilité de garder le confort des passagers de trains voyageurs lors de panne de production d'énergie auxiliaire ou d'arrêt en ligne. L'énergie d'éclairage et l'énergie de chauffage/climatisation seront disponibles dans ces cas de figure.

Grâce à cette étude de marché des différents besoins potentiels, nous avons construit une base de données de 6 missions ferroviaires variantes selon la charge, la vitesse et le profil de ligne. Cette profusion permet de couvrir toutes les performances attendues du groupe hybride embarqué pour

assurer ces futures missions sur terrain. La prochaine étape d'analyse de ces différents besoins doit permettre d'extraire les caractéristiques dimensionnantes du kit autonome.

Pour finaliser cette tâche d'étude, il fallait déterminer certaines caractéristiques intéressantes qui rentrent dans le programme de traction durant ces différentes missions, comme les valeurs d'accélération en fonction de la vitesse et de la charge remorquée, et les valeurs des vitesses maximales en fonction des rampes et de la charge remorquée. Pour valider ces paramètres, nous avons exploité les résultats obtenus dans le cadre du projet de locotracteur hybride BR203 à ALSTOM Transport Stendal (Figure 2.8).

Hybrid Rangier Lok / Hybrid shunting loc



a) Limites d'accélération m/s²

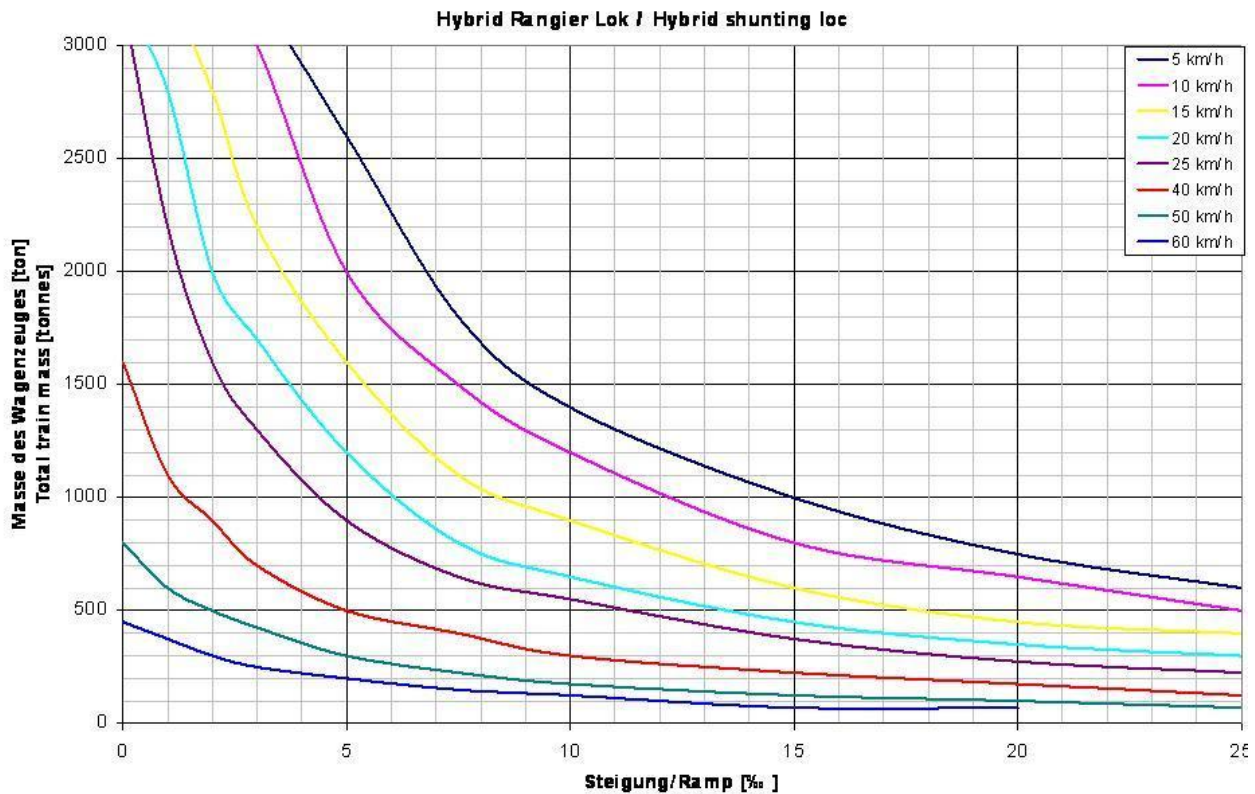


Figure 26.8 Caractéristiques de traction de la locomotive hybride BR203

Missions ferroviaires	Charge remorquée	Distance d'autonomie	Vitesse maximale	Profil de ligne		accélération
M1 : chargement de port	1800 Tonnes	7 Km	15 Km/h	12‰	200 m	0.02 m/s ²
M2 : Desserte FRET éloignée du terminal	1800 Tonnes	35 Km	10 Km/h	10‰	350 m	0.01 à 0.02 m/s ²
M3 : chargement des 22 Wagons	1840 Tonnes	840 m	5 Km/h	0‰	0 m	0.02 m/s ²
M4 : transit FRET haut le pied pour rallier à un nouveau point commercial	90 Tonnes	118 Km	80 Km/h	12‰	300 m	0.1 à 1 m/s ²
M5 : desserte FRET locale	400 Tonnes	60 Km	50 Km/h	12‰	350 m	0.04 à 0.07 m/s ²
M6 : Transit haut le pied dans un dépôt de maintenance	90 Tonnes	11 Km	20 Km/h	0‰	0 m	0.03 à 0.07 m/s ²

Tableau IV.3 Classification et caractérisation des profils de missions

Enfin, nous aboutissons notre étude à classifier et caractériser 6 missions potentielles dans le marché ferroviaire permettant de couvrir toutes les performances attendues du groupe hybride autonome pour assurer ces futures missions sur terrain (Tableau II.3). Dans la suite de l'étude, nous calculons les consommations de puissance et d'énergie à bord grâce au logiciel CITHEL d'entreprise. Ceci va être détaillé dans la prochaine partie car c'est sur la base de ces profils de missions que s'appuie la démarche d'hybridation.

2.5. Dimensionnement Energétique du kit hybride

Avant d'aller plus loin, il convient de clarifier le sens de certaines notions abordées dans ce rapport. Il s'agit notamment des notions de "source de puissance" et de "source d'énergie" et de la notion de véhicule hybride.

Nous désignons par "source d'énergie électrique", une source pouvant délivrer une puissance électrique moyenne donnée, sur une durée du même ordre de grandeur que celle de la mission typique que doit assurer le système. Même si ces éléments sont dimensionnés par la puissance qu'ils sont amenés à fournir, ils fournissent la totalité de l'énergie nécessaire à la mission. C'est pour cela qu'ils sont qualifiés de "sources d'énergie".

Nous désignons par "source de puissance électrique", une source dont le bilan énergétique est nul, aux pertes près, sur la durée totale de la mission typique du système. Ainsi, les éléments de stockage, batteries, volants d'inertie et supercondensateurs, relativement à une mission de véhicule hybride autonome (nous définissons plus bas la notion de véhicule hybride autonome), sont des sources de puissance.

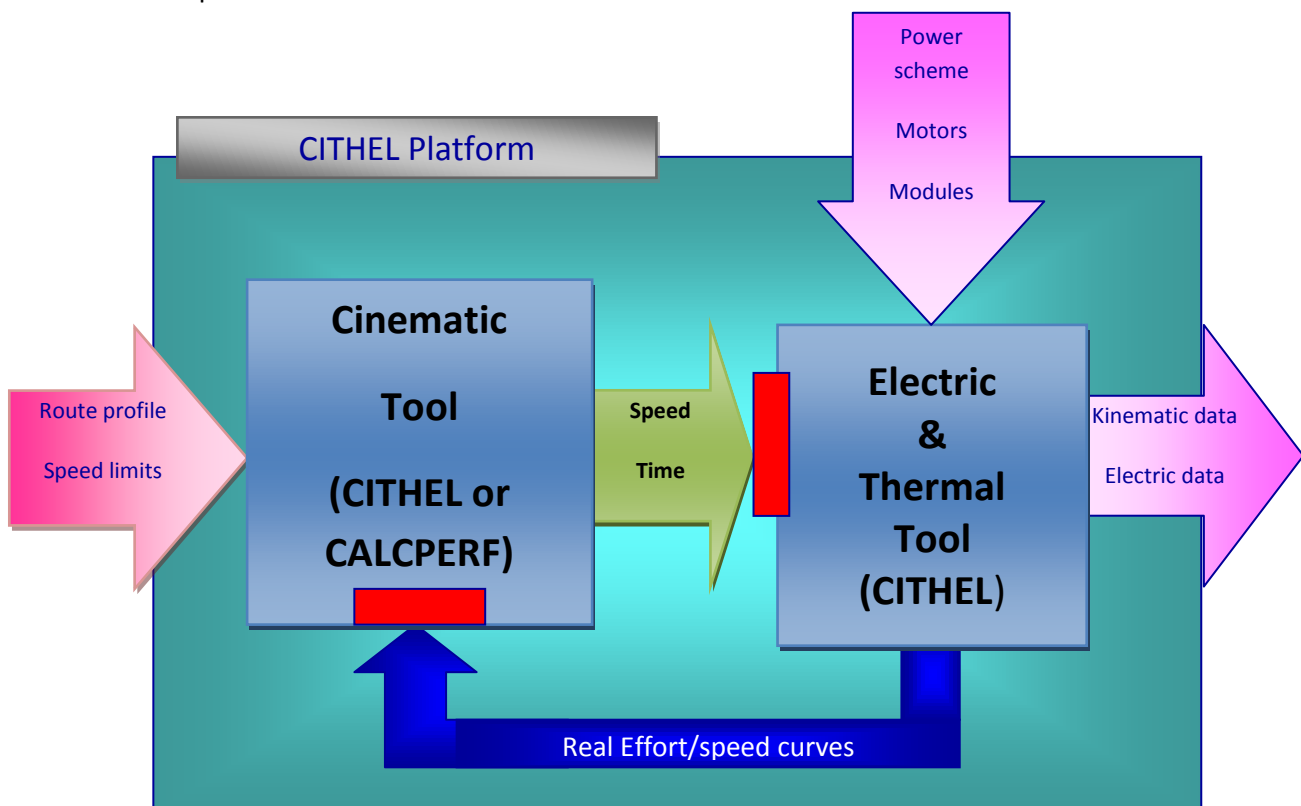


Figure 27.9 Structure générale de CITHEL

La notion d'hybridation est vague et peut couvrir une panoplie de situations très différentes les unes des autres. Nous pourrions parler plus clairement d'"hybridation par stockage". En ce sens, la locomotive bi-mode Diesel-électrique de Bombardier n'est pas une véritable locomotive hybride. Même définie ainsi, l'hybridation par stockage peut se décliner en deux versions différentes. Il y a les véhicules hybrides autonomes, dont la seule véritable source d'énergie est le générateur d'énergie primaire, le stockage servant de tampon énergétique local : c'est le cas du démonstrateur LHyDIE concerné par cette étude. A l'opposé, il y a les véhicules hybrides non autonomes, pour lesquels le stockage est pré-chargé pour seconder voire suppléer le générateur d'énergie primaire, en tant que générateur de puissance, souvent pendant un temps court vis-à-vis de la mission de traction ; sa recharge se faisant en point fixe par un apport externe d'énergie. Le dimensionnement du générateur d'énergie et du système de stockage est très différent selon le cas. Pour ce qui nous concerne, nous considérons une hybridation autonome par stockage.

Dans la suite, la notion d'hybridation entre une source d'énergie et une source de puissance sera prise en compte pour le choix de dimensionnement sommaire du système, sachant que l'allure de la puissance consommée en fonction de temps de la mission a une importance capitale pour le choix d'hybridation. Ces allures vont-être obtenues grâce au logiciel CITHEL.

CITHEL est un logiciel de calcul Cinématique, Thermique et Electrique développé pour modéliser et simuler une chaîne de traction ferroviaire. Ce logiciel a été développé en interne d'ALSTOM Transport. Il facilite les calculs itératifs. Grâce à ce calculateur, on arrive à choisir les meilleurs moteurs électriques et les modules de puissance les plus adaptées pour pouvoir répondre aux besoins clients. La structure générale du logiciel est représentée dans la Figure 2.9.

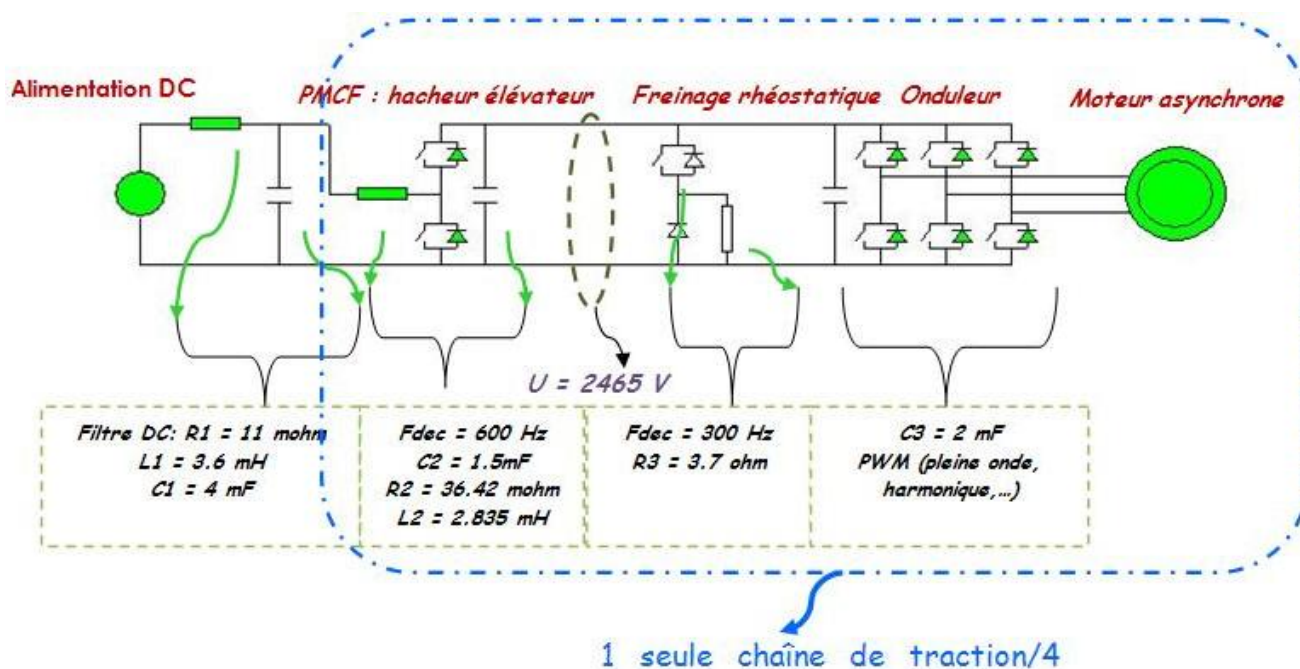


Figure 28.10 Chaîne de traction 1500 V DC sous CITHEL

Dans notre cas, il s'agit, dans un premier temps, d'introduire la chaîne de traction électrique sous caténaire 1500 V DC, d'après l'architecture fonctionnelle de la locomotive électrique quadri-tensions à option d'un groupe hybride autonome qui a été validée précédemment. Ceci est très primordial pour notre étude, car les consommations de Puissance-Energie varient en fonction du type

d'alimentation sélectionné et choisi; d'où la nécessité d'avoir effectué cette tâche d'étude au début de ce chapitre. La figure 2.10 montre la chaîne de traction introduite dans la partie électrique de CITHEL, y compris ses différentes caractéristiques. Ensuite, nous introduisons dans un deuxième temps les 6 profils de missions, classifiés selon leurs caractéristiques définies dans la partie précédente, dans la partie dynamique de CITHEL. La figure 2.11 présentée dans l'Annexe A, décrit le modèle dynamique de la locomotive et ses différentes caractéristiques, qui prend en compte tous les paramètres liés à l'étude (calcul des résistances à l'avancement, caractéristique Effort-Vitesse,...). Enfin, nous obtenons les allures de consommations de Puissance-Energie pendant la durée totale de la mission, et donc le dimensionnement énergétique de la source d'énergie hybride sera consolidé.

2.5.1. Simulation des missions ferroviaires

L'allure de la consommation de puissance⁽¹⁾ en fonction du temps total de la mission est l'objectif capital pour l'hybridation, il faudra donc aller au-delà de ces indicateurs classiques pour appréhender la problématique de l'hybridation ferroviaire sur des bases saines

Or, l'hybridation d'une mission ferroviaire dépend de deux paramètres, le temps total de la mission $t_{mission}$ et la puissance consommée $P_{mission}$, on peut alors écrire :

$$M_{hybride} = f(t_{mission}, P_{mission})$$

$M_{hybride}$ représente la mission ferroviaire.

Nous désignons dans notre notion d'hybridation :

- ☞ Une "source d'énergie électrique", pouvant délivrer une puissance électrique moyenne donnée, sur une durée du même ordre de grandeur que celle de la mission typique que doit assurer le système qu'on nomme $P_{moyenne}$.
- ☞ Une source de puissance électrique", une source dont le bilan énergétique est nul, aux pertes près, sur la durée totale de la mission typique du système qu'on nomme P_{SSE} ⁽²⁾

La puissance crête P_{max} et puissance moyenne P_{moy} d'une mission sont deux indicateurs couramment utilisés pour le dimensionnement électrique et thermique de la chaîne de production d'énergie embarquée sur une locomotive classique (électrique ou Diesel). On peut donc écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{max} = \max P t \quad \text{où } t \in [0, t_{mission}] \\ P_{moyenne} = \frac{1}{t_{mission}} \int_0^{t_{mission}} P t dt = \alpha \times P_{max}, \text{ avec } \alpha \in [0,1] \end{array} \right.$$

(1) la puissance représentant la mission intègre les pertes du système de traction et la consommation des auxiliaires.

(2) SSE Système de Stockage d'Énergie

Dans notre hypothèse, la source d'énergie primaire fournit de façon constante la puissance moyenne de la mission, considérons l'évolution de l'énergie $E_s(t)$ dans le dispositif de stockage :

$$E_S t = - \int_0^{t_{mission}} P t - P_{moyenne} dt, t \in [0, t_{mission}]$$

$$E_{mission} = \int_0^{t_{mission}} P t dt = t_{mission} \times P_{moyenne}$$

Soit $E_{mission} = \alpha \cdot t_{mission} \cdot P_{max}$ avec $\alpha \in [0,1]$

Nous en déduisons l'énergie utile E_u que stockerait le dispositif de stockage pour assurer cette mission.

$$\left\{ \begin{array}{l} E_u = \max E_S t - \min E_S t, t \in [0, t_{mission}] \\ \text{Nous connaissons ainsi la puissance maximale de stockage :} \\ P_{max}^{SSE} = P_{max} - P_{moyenne} \end{array} \right.$$

Or, une fréquence se définit comme l'inverse de temps nécessaire pour que le phénomène se reproduise identique à lui-même avec $fréquence = \frac{1}{temps}$; nous pouvons donc considérer que $\frac{P_{max}^{SSE}}{E_u}$ est l'inverse de temps et donc une fréquence énergétique qu'on nomme $f_{hybride}$. En

fonction de la valeur de cette fréquence, le choix de dispositif de stockage sera confirmé ; dans le cas d'une valeur de fréquence élevée, nous adoptons un système de stockage « booster de puissance » et dans le cas contraire, nous adoptons plutôt un système de stockage énergétique (comme les batteries de traction).

L'objectif principal de simulation des missions ferroviaires classifiées est la connaissance de la $P_{moyenne}$ dimensionnant la source d'énergie primaire, P_{max} correspondant à la puissance maximale et l'énergie utile au stockage d'énergie E_u dimensionnant le dispositif de stockage d'énergie. Ce triplet conserve la plupart des informations nécessaires au dimensionnement énergétique (source de puissance et stockage) d'une locomotive hybride ferroviaire. En plus de ce triplet, il faut prendre en considération un paramètre de plus $E_{mission}$ dimensionnant la source d'énergie primaire, car le projet du kit hybride embarqué a une contrainte initiale dans ce cahier des charges est l'encombrement disponible dans la locomotive électrique multi-tension ; prenant en exemple le cas d'un moteur thermique, $E_{mission}$ définit le réservoir de gasoil à intégrer.

Notons alors que l'hybridation ferroviaire (Figure 2.11) peut s'écrire de la façon suivante :

$$F_{hybridation} = f(P_{moyenne}, P_{max}, E_u, E_{mission})$$

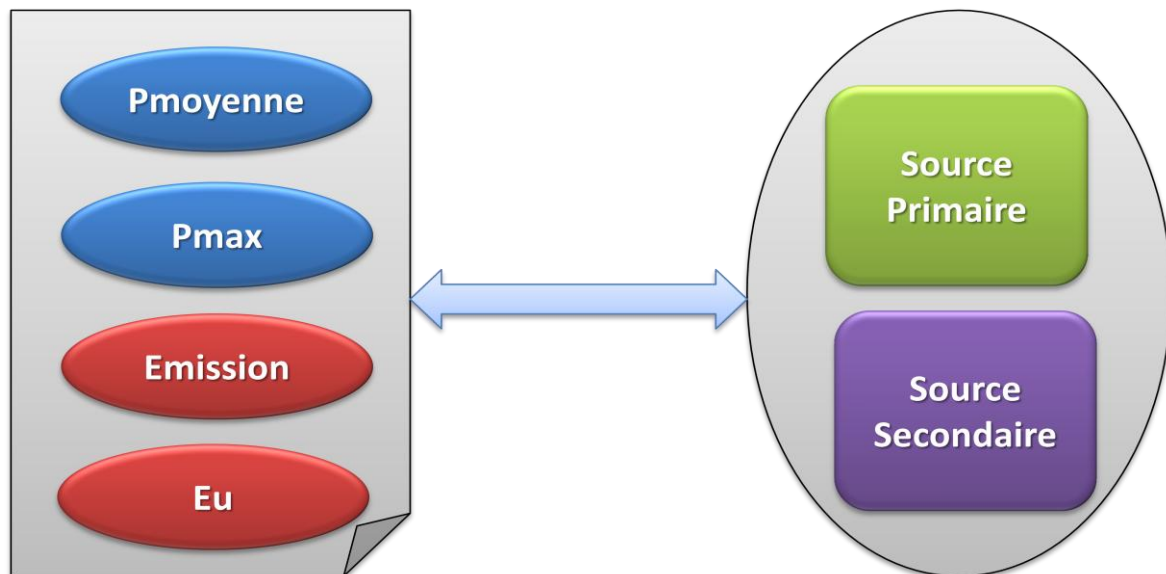


Figure 29.11 Paramètres de dimensionnement énergétique d'une locomotive hybride

Comme les différents paramètres dimensionnant une locomotive hybride et qui sont obtenus à partir d'une allure de consommation de puissance en fonction de temps, nous présentons ainsi les simulations des 6 missions ferroviaires potentielles pour notre projet, où nous nous sommes basés sur un profil réel ferroviaire « Rouen-Dijon », en essayant de rassembler le maximum de contraintes de profil de lignes afin de couvrir les consommations Puissance-Energie.

✿ **M1 : chargement de port, Ralliement proche du terminal**

La simulation du profil de mission « chargement de port proche du terminal » (Figure 2.12) comprend, trois allures différentes en fonction du temps total de mission : la puissance consommée par la caténaire $P(t)$ correspondant à la puissance nécessaire à la traction de la locomotive et celle des auxiliaires, l'énergie totale de la mission correspondant à $E_{mission}$ et enfin le profil de vitesse en fonction de temps de mission. P_{max} atteint une valeur de 490 KW, avec un temps de mission de 6000 Secondes. Les caractéristiques de la source d'énergie est : $P_{moyenne}$ vaut 300 KW et $E_{mission}$ est égale à 450 KWh. En ce qui concerne la source de stockage, le tableau 2.5 nous sorte les valeurs successives de P_{max}^{SSE} de 200 KW et E_u de 24 KWh, avec :

$$\begin{cases} P_{max}^{SSE} = \max(P_{max}^{SSE} \text{ pic}) \\ E_u = \int_0^{npics} E_u(npics) \text{ avec } npics \text{ est le nombre des pics de puissance } P_{max}^{SSE} \end{cases}$$

Notons, d'après la figure 2.12, qu'au démarrage nous sollicitons d'une puissance de démarrage de 460 KW en palier. Dans le cas d'une rampe de 12‰ ainsi qu'un rayon de courbure de 80 m la puissance atteint les 325 KW.

Les valeurs obtenues nous donnent un premier dimensionnement énergétique de la source hybride. A bien noter que cette mission est capitale parmi les autres missions.

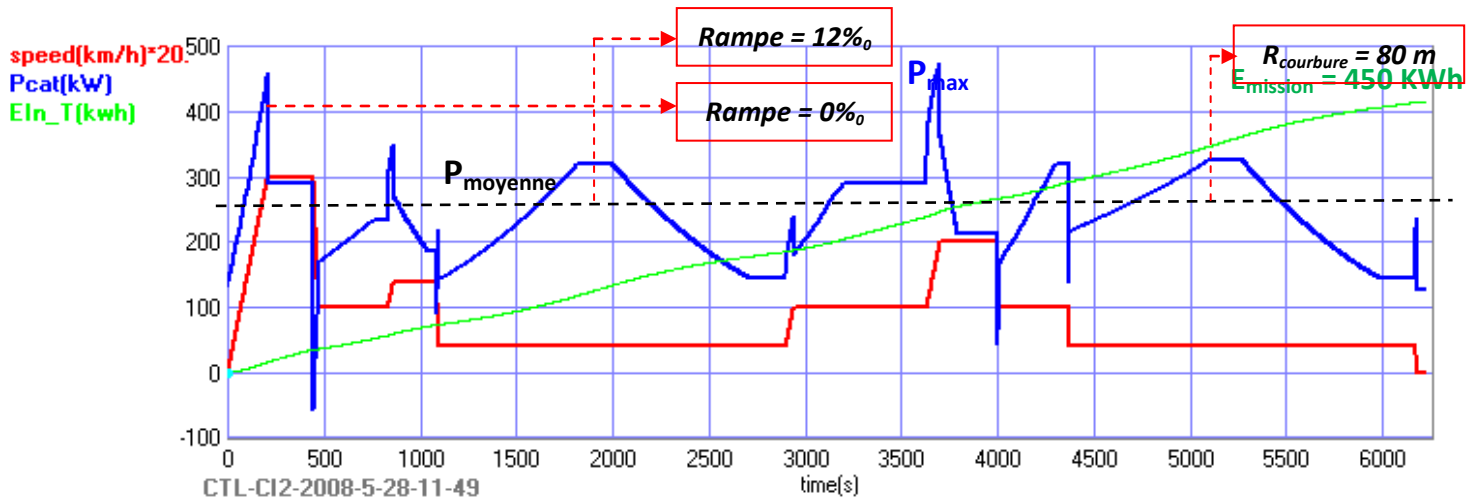


Figure 30.12 Consommations Puissance-Energie du besoin Chargement de port

chargement en port	1 ^{er} pic de puissance	2 ^{ème} pic de puissance	3 ^{ème} pic de puissance	4 ^{ème} pic de puissance	5 ^{ème} pic de puissance	6 ^{ème} pic de puissance	Performance SSE totale Selon le besoin
P_{max}^{SSE}	160 KW	50 KW	21 KW	190 KW	20 KW	20 KW	200 KW
durée du pic	290 seconds	45 Seconds	200 Seconds	150 Seconds	150 Seconds	150 Seconds	
E_u	12 KWh	0.625 KWh	1.66 KWh	7.91 KWh	0.833 KWh	0.833 KWh	24 KWh

Tableau V.4 Paramètres de dimensionnement du Chargement de port

✿ M2 : Desserte FRET éloignée du terminal

La simulation du profil de mission « Desserte éloignée du terminal » (Figure 2.13) comprend, trois allures différentes en fonction du temps total de mission : la puissance consommée par la caténaire $P(t)$ correspondant à la puissance nécessaire à la traction de la locomotive et celle des auxiliaires, l'énergie totale de la mission correspondant à $E_{mission}$ et enfin le profil de vitesse en fonction de temps de mission. P_{max} atteint une valeur de 400 KW, avec un temps de mission de 32000 Secondes. Les caractéristiques de la source d'énergie est : $P_{moyenne}$ vaut 300 KW et $E_{mission}$ est égale à 2000 KWh. En ce qui concerne la source de stockage, le tableau 2.6 nous sorte les valeurs successives de P_{max}^{SSE} de 100 KW et E_u de 21.3 KWh. Notons, d'après la figure 2.13, qu'en palier nous sollicitons d'une puissance de 200 KW à une vitesse de 10 Km/h. Dans le cas d'une rampe de 10‰ la puissance croît jusqu'à 300 KW avec une vitesse réduite de 2 Km/h.

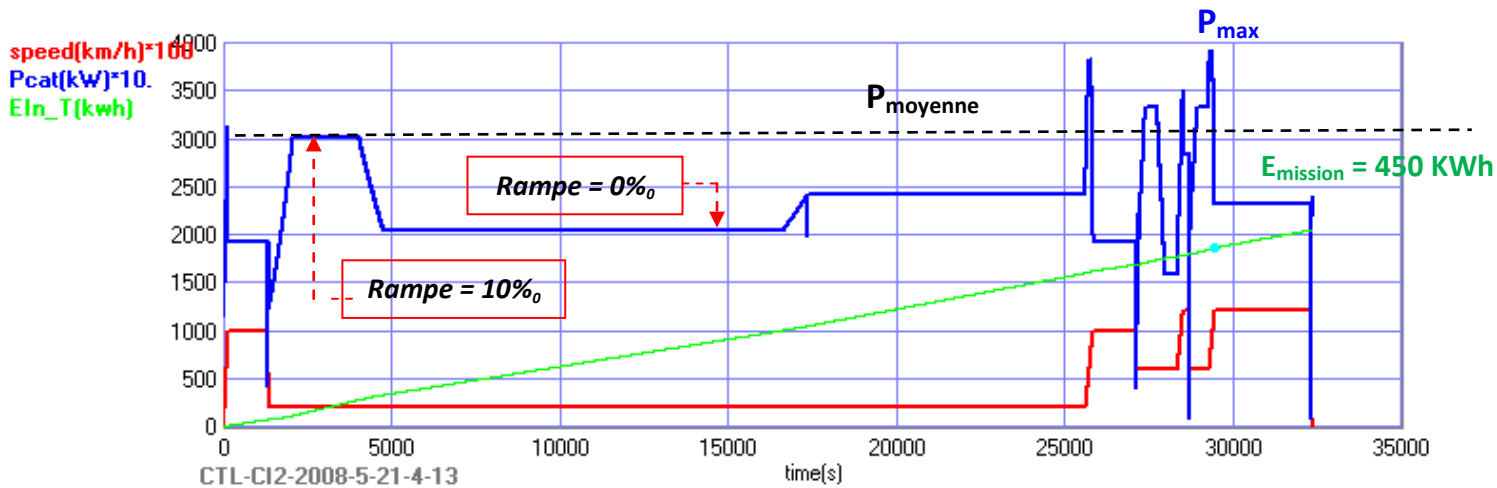


Figure 31.13 Consommations Puissance-Energie du besoin desserte FRET éloignée du terminal

Desserte FRET éloignée du terminal	1 ^{er} pic de puissance	2 ^{ème} pic de puissance	3 ^{ème} pic de puissance	4 ^{ème} pic de puissance	5 ^{ème} pic de puissance	Performance SSE totale Selon le besoin
P_{max}^{SSE}	81 KW	50 KW	50 KW	50 KW	91 KW	100 KW
durée du pic	195 seconds	450 Seconds	40 Seconds	400 Seconds	180 Seconds	
E_u	4.4 KWh	6.25 KWh	0.55 KWh	5.55 KWh	4.55 KWh	21.3 KWh

Tableau VI.5 Paramètres de dimensionnement du besoin desserte FRET éloignée du terminal

✿ M3 : chargement des 22 Wagons

La simulation du profil de mission « chargement des 22 Wagons » (Figure 2.14) comprend, trois allures différentes en fonction du temps total de mission : la puissance consommée par la caténaire $P(t)$ correspondant à la puissance nécessaire à la traction de la locomotive et celle des auxiliaires, l'énergie totale de la mission correspondant à $E_{mission}$ et enfin le profil de vitesse en fonction de temps de mission. P_{max} atteint une valeur de 125 KW, avec un temps de mission de 32000 Secondes. Ce profil de mission ne dépend pas d'une source de stockage d'énergie car sa puissance crête est inférieure à 300 KW en se référant à la puissance moyenne $P_{moyenne}$ prise en compte dans le besoin capital « chargement de port ». Notons, d'après la figure 2.14, qu'en palier et avec 22 Wagons vides nous sollicitons d'une puissance de 50 KW avec une vitesse de 5 Km/h. Après avoir chargé les 22 Wagons, la puissance croît jusqu'à 120 KW avec la même vitesse. Ce besoin dépend d'une source primaire uniquement.

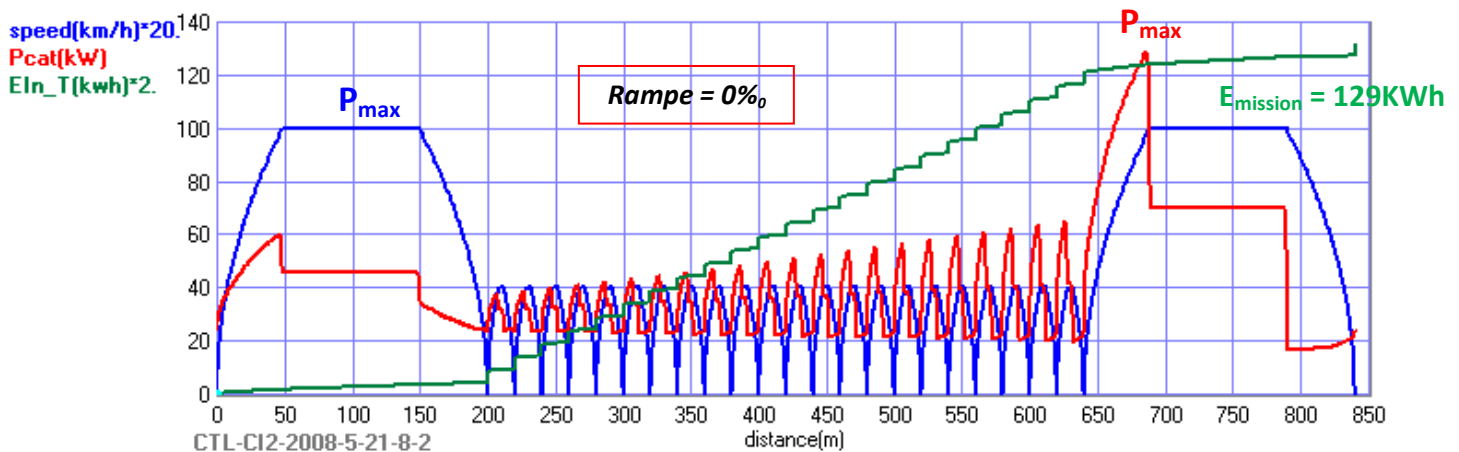


Figure 32.14 Consommations Puissance-Energie du besoin chargement des 22 Wagons

✿ **M4 : transit FRET haut le pied pour rallier à un nouveau point commercial**

La simulation du profil de mission « transit FRET en haut le pied » (Figure 2.15) comprend, trois allures différentes en fonction du temps total de mission : la puissance consommée par la caténaire $P(t)$ correspondant à la puissance nécessaire à la traction de la locomotive et celle des auxiliaires, l'énergie totale de la mission correspondant à $E_{mission}$ et enfin le profil de vitesse en fonction de temps de mission. P_{max} atteint une valeur de 500 KW, avec un temps de mission de 8000 Secondes. Les caractéristiques de la source d'énergie est : $P_{moyenne}$ vaut 300 KW et $E_{mission}$ est égale à 550 KWh. En ce qui concerne la source de stockage, le tableau 2.7 nous sorte les valeurs successives de P_{max}^{SSE} de 200 KW et E_u de 8.13 KWh. Notons, d'après la figure 2.15, qu'en présence d'une rampe de 5‰ et d'un rayon de courbure de 1000 m, nous sollicitons d'une puissance crête de 500 KW avec une vitesse de 50 Km/h en haut le pied. Dans le cas d'une descente de -4‰, la puissance consommée par la caténaire vaut 200 KW malgré d'une vitesse de traction de 80 Km/h. Ceci fait preuve de la grande Influence de la consommation de puissance de traction en fonction du profil de ligne (rampe, rayon de courbure) et la vitesse de la locomotive.

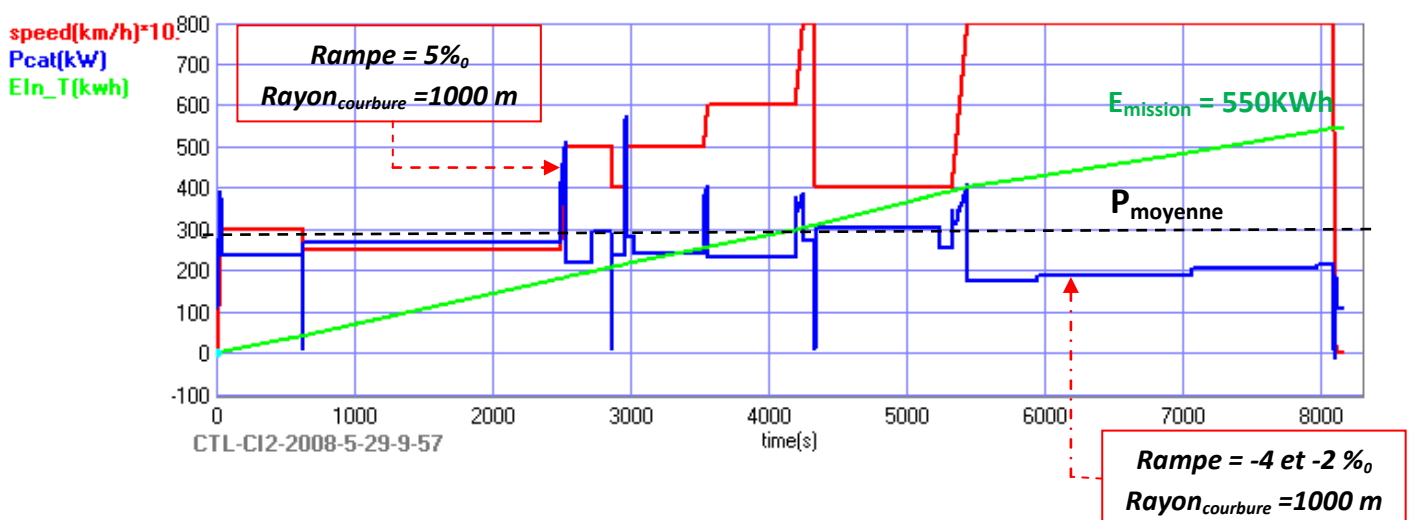


Figure 33.15 Consommations Puissance-Energie du besoin transit FRET haut le pied

Transit FRET haut le pied	1 ^{er} pic de puissance	2 ^{ème} pic de puissance	3 ^{ème} pic de puissance	4 ^{ème} pic de puissance	5 ^{ème} pic de puissance	Performance SSE totale Selon le besoin
P_{max}^{SSE}	200 KW	200 KW	100 KW	100 KW	100 KW	200 KW
durée du pic	36 seconds	14 Seconds	27 Seconds	57 Seconds	110 Seconds	
E_u	2 KWh	0.8 KWh	0.75 KWh	1.58 KWh	3 KWh	8.13 KWh

Tableau VII.6 Paramètres de dimensionnement du besoin transit FRET haut le pied

✿ M5 : desserte FRET locale

La simulation du profil de mission « Desserte FRET locale » (Figure 2.16) comprend, trois allures différentes en fonction du temps total de mission : la puissance consommée par la caténaire $P(t)$ correspondant à la puissance nécessaire à la traction de la locomotive et celle des auxiliaires, l'énergie totale de la mission correspondant à $E_{mission}$ et enfin le profil de vitesse en fonction de temps de mission. P_{max} atteint une valeur de 500 KW, avec un temps de mission de 14000 Secondes. Les caractéristiques de la source d'énergie est : $P_{moyenne}$ vaut 300 KW et $E_{mission}$ est égale à 900 KWh. En ce qui concerne la source de stockage, le tableau 2.7 nous sorte les valeurs successives de P_{max}^{SSE} de 200 KW et E_u de 21 KWh. Notons, d'après la figure 2.16, qu'en présence d'une rampe de -5 ‰ et d'un rayon de courbure de 1000 m, nous sollicitons d'une puissance crête de 500 KW avec une vitesse de 50 Km/h avec une charge remorquée de 400 tonnes. Dans le cas d'une rampe de 3 ‰, la puissance consommée par la caténaire vaut 500 KW sans dépendre d'un rayon de courbure, avec une vitesse de parcours de 40 Km/h.

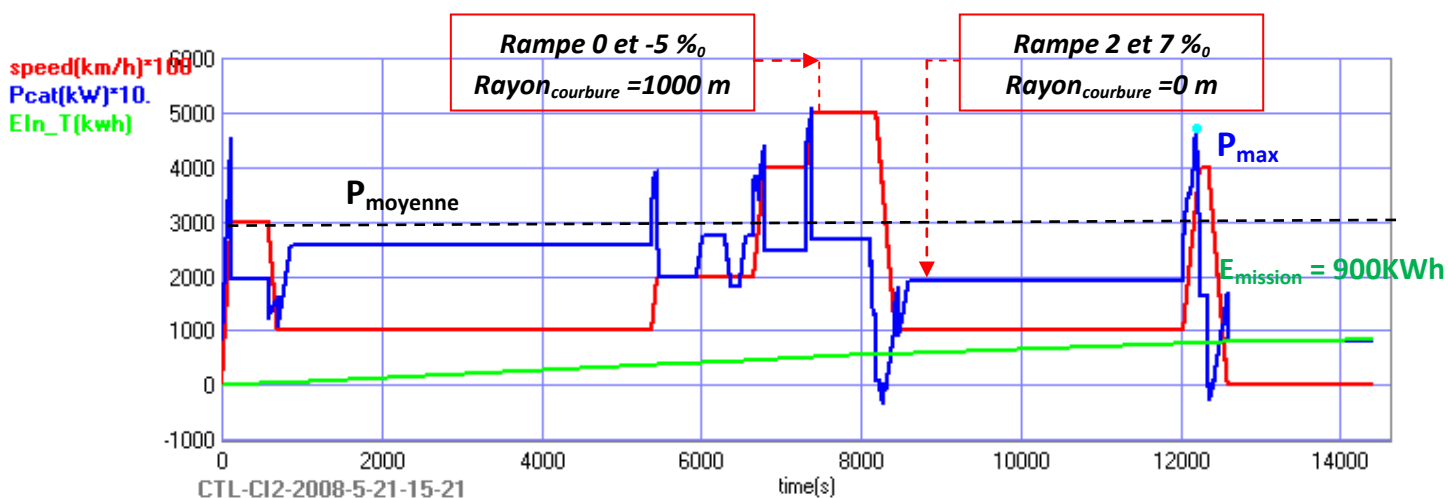


Figure 34.16 Consommations Puissance-Energie du besoin Desserte FRET locale 400 tonnes

Desserte FRET locale	1 ^{er} pic de puissance	2 ^{ème} pic de puissance	3 ^{ème} pic pic de puissance	4 ^{ème} pic de puissance	5 ^{ème} pic de puissance	Performance SSE totale Selon le besoin
P_{max}^{SSE}	150 KW	100 KW	130 KW	200 KW	171 KW	200 KW
durée du pic	50 seconds	70 Seconds	130 Seconds	68 Seconds	178 Seconds	
E_u	2.08 KWh	1.94 KWh	4.69 KWh	3.77 KWh	8.45 KWh	21 KWh

Tableau VIII.7 Paramètres de dimensionnement du besoin Desserte FRET locale 400 tonnes

✿ M6 : besoin en haut le pied dans un dépôt de maintenance

La simulation du profil de mission « haut le pied dans un dépôt de maintenance » (Figure 2.17) comprend, trois allures différentes en fonction du temps total de mission : la puissance consommée par la caténaire $P(t)$ correspondant à la puissance nécessaire à la traction de la locomotive et celle des auxiliaires, l'énergie totale de la mission correspondant à $E_{mission}$ et enfin le profil de vitesse en fonction de temps de mission. P_{max} atteint une valeur de 265 KW, avec un temps de mission de 11000 Secondes. Ce profil de mission ne dépend pas d'une source de stockage d'énergie car sa puissance crête est inférieure à 300 KW en se référant à la puissance moyenne $P_{moyenne}$ prise en compte dans le besoin capital « chargement de port ».

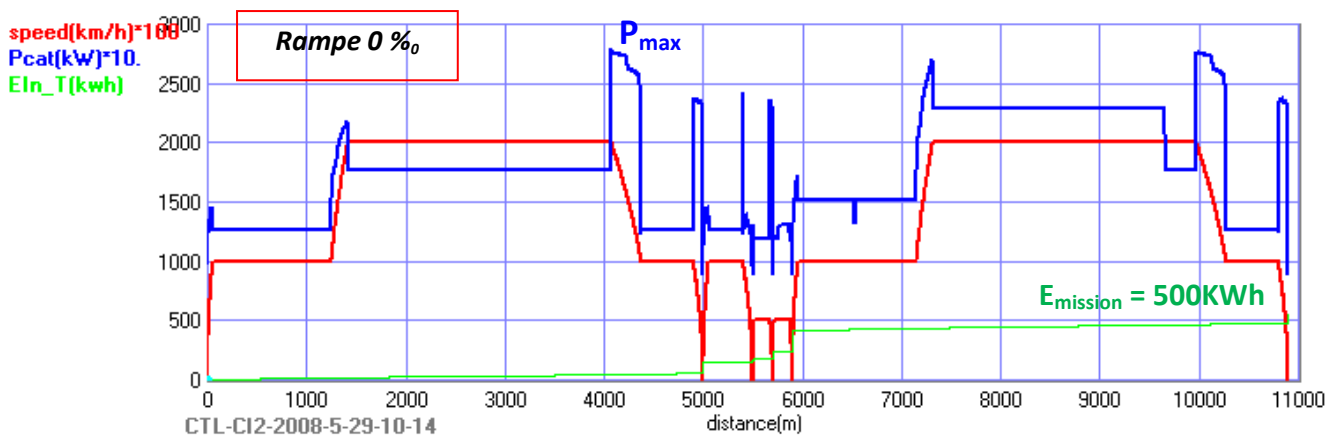


Figure 35.17 Consommations Puissance-Energie du besoin haut le pied dans un dépôt de maintenance

De tout ce qui précède, nous prouvons sur le plan énergétique pur –dimensionnement des sources d'énergie et de puissance-, les 6 missions (en particulier la première M1) imposent le dimensionnement de la source hybride embarquée. Nous avons ainsi limité nos simulations de synthèse et d'analyse énergétique du kit autonome, à ces missions. Le processus de conception se trouve ainsi simplifié et accéléré. Le Tableau 2.8 regroupe tous les résultats concernant les paramètres de dimensionnement du groupe hybride. Nous pouvons conclure que 4/6 des missions caractérisées nécessitent un système de stockage d'énergie. Du coup, ce kit dépendra d'une source d'énergie primaire avec $P_{moyenne}$ égale à 300 KW utile DC, et d'une source de puissance comme dispositif de stockage avec P_{max}^{SSE} égale à 200 KW et E_u égale à 24 KWh. Ainsi, pour compléter notre dimensionnement énergétique d'une locomotive hybride, nous avons introduit le cyclage annuel de chaque mission caractérisée. Notons qu'une locomotive électrique FRET fonctionne 50 semaines par an. Soit $Cycle_{an}$ le nombre de cycle total de fonctionnement d'une mission ferroviaire par an.

Missions ferroviaires	Distance d'autonomie	Vitesse maximale	Limite d'accélération	Source d'énergie primaire		Source de puissance	
				$P_{moyenne}$	$E_{mission}$	P_{max}^{SSE}	E_u
M1 : chargement en port Avec 1800 Tonnes	7 Km	15 Km/h	0.02 m/s ²	300 KW	450 KWh	200 KW	24 KWh
M2 : Desserte FRET éloignée du terminal avec 1800 Tonnes	35 Km	10 Km/h	0.01 à 0.02 m/s ²	300 KW	2000 KWh	100 KW	21,3 KWh
M3 : Dépôt de chargement (22 Wagons)	840 m	5 Km/h	0.02 m/s ²	150 KW	129 KWh	-	-
M4 : transit FRET en haut le pied	118 Km	80 Km/h	0.1 à 1 m/s ²	300 KW	550 KWh	200 KW	8,13 KWh
M5 : desserte FRET locale avec masse totale 400 Tonnes	60 Km	50 Km/h	0.04 à 0.07 m/s ²	300 KW	900 KWh	200 KW	21 KWh
M6 : Transit en haut le pied dans un dépôt de maintenance avec une masse totale de 90 Tonnes	11 Km	20 Km/h	0.03 à 0.07m/s ²	250 KW	500 KWh	-	-

Tableau IX.8 Dimensionnement énergétique du kit hybride embarqué

$$Cycle_{an} = n_{jour} \cdot n_{foncS} \cdot n_{foncA}$$

Avec n_{jour} correspond à la somme des nombres de fonctionnement de la locomotive

n_{foncS} Correspond au nombre total de fonctionnement de la locomotive par semaine

n_{foncA} Correspond au nombre total de fonctionnement de la locomotive par an.

Missions ferroviaires	Distance d'autonomie	Consommation d'énergie totale	Temps de fonctionnement	Nombre de cycles par semaine	Nombre de cycle par an
M1 : chargement en port Avec 1800 Tonnes	7 Km	450 KWh	1.66 Heures	2 * 5 jours = 10	10 * 50 semaines = 500
M2 : Desserte FRET éloignée du terminal avec 1800 Tonnes	35 Km	2000 KWh	8 heures	2 * 5 jours = 10	10 * 50 semaines = 500
M3 : Dépôt de chargement (22 Wagons)	840 m	130 KWh	2.5 heures	1 * 5 jours = 5	5 * 50 = 250
M4 : transit FRET en haut le pied	118 Km	550 KWh	3.33 heures	1	50
M5 : desserte FRET locale avec masse totale 400 Tonnes	60 Km	900 KWh	2.22 Heures	3 * 5 jours = 15	15 * 50 = 750
M6 : Transit en haut le pied dans un dépôt de maintenance avec une masse totale de 90 Tonnes	11 Km	500 KWh	1 heure	2 * 5 jours = 10	10 * 50 = 500

Tableau X.9 Nombre de cycle par an en fonction de chaque mission

Les résultats sont présentés dans le tableau 2.9. Nous remarquons que la deuxième mission M2 dépend d'un temps de fonctionnement assez long par rapport aux autres missions (8 heures), comme la vitesse est bien limitée en respectant les plages de consommations de puissance à cause de l'encombrement disponible dans la locomotive qui limite le dimensionnement et alors les performances du groupe hybride.

Néanmoins, le calcul de cyclage annuel des différentes missions ferroviaires est très primordial pour le bon dimensionnement de la source de puissance, spécialement dans le cas d'un pack de batteries. Une telle solution est très influencée par son état de charge SOC et ses limites de fonctionnement lors de la traction. Aussi, le calcul de nombre de cycle nous permet d'estimer la durée de vie du système et ses composants.

En ce référant au tableau 2.9, nous obtenons alors :

$$\forall M \in M1, M6, Cycle_{total}^{SSE} = \max Cycle_{an} M$$

Où $Cycle_{total}^{SSE}$ correspond au nombre de cycle total d'un système de stockage d'énergie

$Cycle_{an} M$ Correspond au nombre de cycle total d'une mission donnée

Soit $Cycle_{total}^{SSE} = Cycle_{an} M5 = 750 Cycles$; cette valeur s'ajoute à côté des consommations Puissances-Energie pour aboutir à un dimensionnement technique valable pour notre application.

2.5.2. Optimisation du dimensionnement énergétique : Fusions des missions

Notons que l'objectif de ce kit autonome est de parcourir les bouts de lignes non-électrifiées, sachant que ces parties peuvent se localiser au début et fin de missions. Et donc, il faut prévenir une réserve énergétique pour effectuer une mission complète journalière.

Notre approche d'étude nécessite une étude plus poussée est la synthèse des missions dimensionnantes en ayant la possibilité de rassembler plus missions ferroviaires dans une unique mission. En effet, dans le cas où plusieurs missions ressortent dans un segment de mission, et du coup les critères de dimensionnement énergétique sera optimisé pour répondre au maximum des contraintes. Les processus de fusions des missions dans un seul segment et d'extraction des missions multi-segment seraient primordiaux dans le contexte systémique, en particulier pour les approches d'optimisation.

La fusion des missions correspond donc à unir dans un seul parcours deux ou plusieurs missions ferroviaires répondant au cahier des charges du kit autonome. Le parcours se compose de trois parties (Figure 2.18) : un premier correspondant au début des missions sans caténaire jusqu'à l'arrivée aux

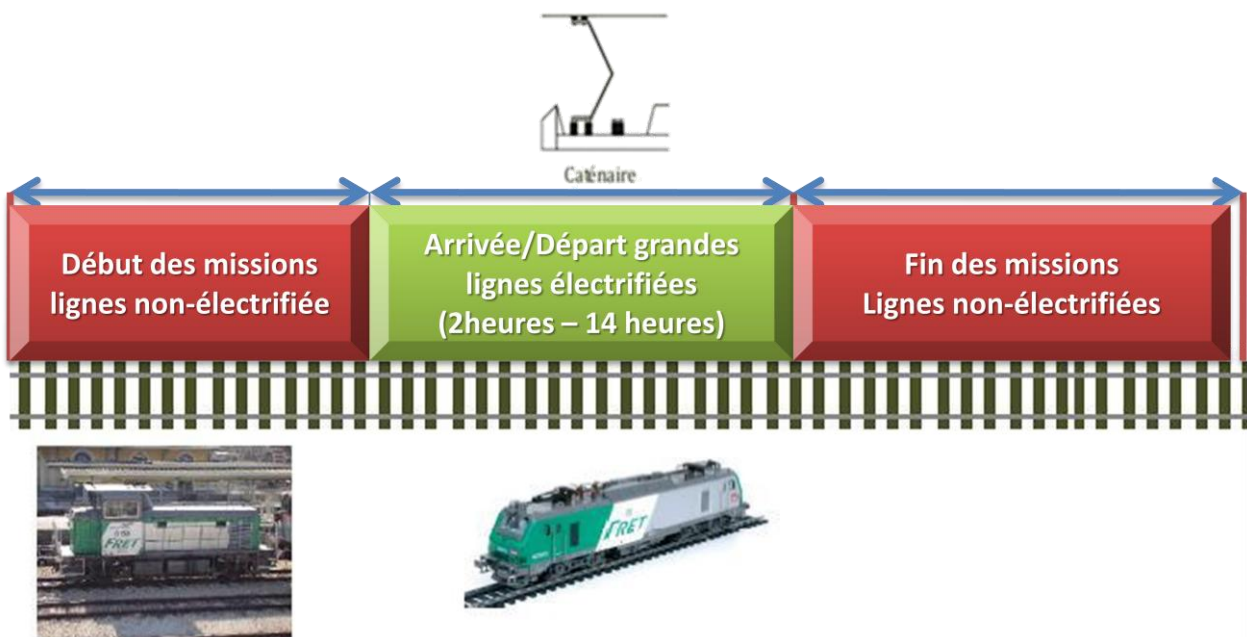


Figure 36.18 Fusion des parcours ferroviaires « Début et Fin de missions non-électrifiées »

Missions ferroviaires	Distance d'autonomie	$E_{mission}$	$t_{mission}$	Nombre de cycle par an
Début lignes non-électrifiées [M6=> M3=>M1] : + Fin lignes non-électrifiées [M1=>M6]	36.84 Km	2030 KWh, 406 Litres gasoil	7.82 Heures	500 Cycles
Début lignes non-électrifiées [M6 =>M1] : + Fin lignes non-électrifiées [M1=>M6]	36 Km	1900 KWh, 380 Litres gasoil	5.32 heures	350 Cycles
Début lignes non-électrifiées [M2 =>M6] :	46 Km	2500 KWh, 500 Litres gasoil	9 heures	250 Cycles
Début lignes non-électrifiées M1 => grande lignes électrifiées	7 Km	450 KWh, 90 Litres gasoil	1.66 heures	100 Cycles
Début lignes non-électrifiées M5 => grande lignes électrifiées	60 Km	900 KWh, 180 Litres gasoil	2.22 Heures	100 Cycles
Début lignes non-électrifiées M4 => grande lignes électrifiées	118 Km	550 KWh, 110 Litres gasoil	3.33 heures	50 Cycles

Tableau XI.10 Optimisation et fusion des missions ferroviaires

grandes lignes. Un deuxième parcours correspondant au trajet grandes lignes de la locomotive sous caténaire, qui dure entre 2 heures et 14 heures d'une façon générale. Et enfin un troisième parcours correspondant au trajet de la fin des missions sans caténaire jusqu'aux sites des clients, et réciproquement.

Le tableau 2.10 détaille toutes les fusions possibles à réaliser à partir des 6 missions ferroviaires. On obtient alors une valeur de $Cycle_{SSE}^{total}$ équivalent à 1350 Cycles par an. Une autre caractéristique a été aussi définie, qui est le pourcentage d'exploitation des différents scénarios, nous obtenons donc :

- Scénario 1 : 40% du premier besoin (500 Cycles par an, 24 KWh, 200 KW) +
 - Scénario 2 : 30% du premier besoin (350 Cycles par an, 24 KWh, 200 KW) +
 - Scénario 3 : 15% du deuxième besoin (250 Cycles par an, 21 KWh, 100 KW) +
 - Scénario 4 : 10% du premier besoin (100 Cycles par an, 24 KWh, 200 KW) +
 - Scénario 5 : 5% du quatrième besoin (100 Cycles par an, 21 KWh, 200 KW) +
- 50 Cycles par an du troisième besoin à prendre en compte avec les cinq scénarios (8.13 KWh, 200 KW)

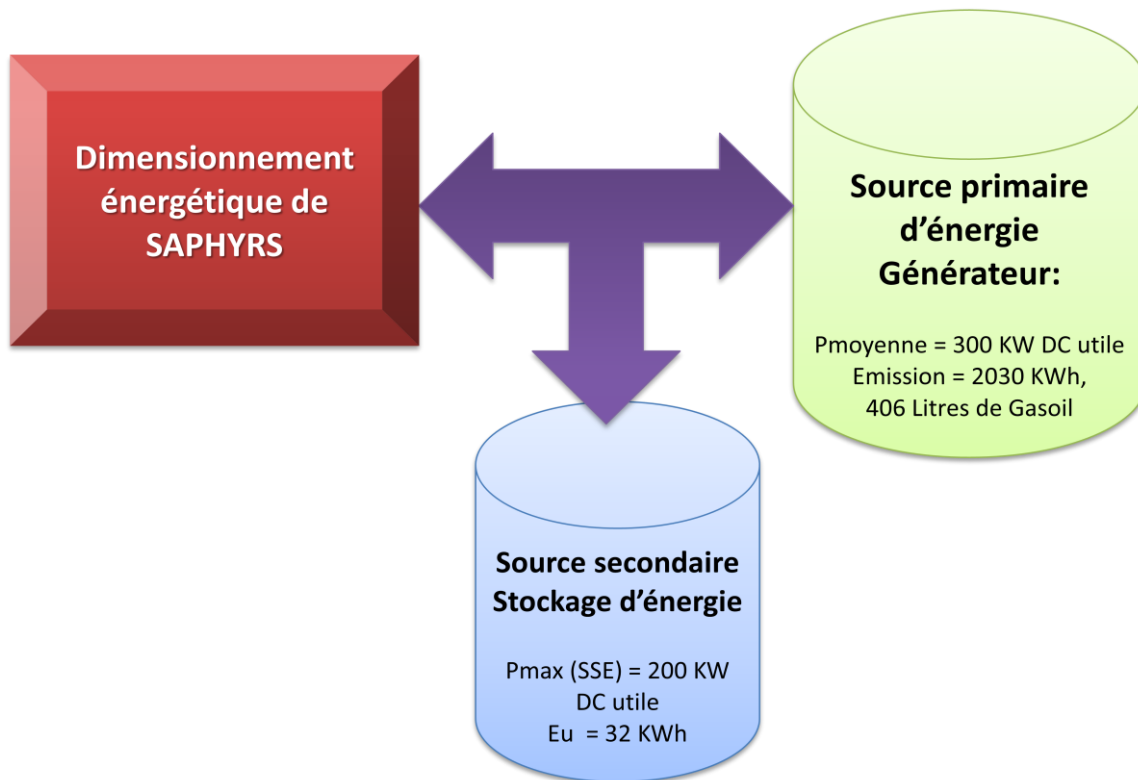


Figure 37.19 Dimensionnement énergétique du groupe hybride embarqué

Concernant le troisième scénario de missions, le temps complet de mission vaut 9 heures, soit 2500 KWh équivalent à 500 Litres de gasoil. Le premier scénario est le plus important, il représente 40% du cyclage des missions totales ; l'énergie consommée vaut 2030 KWh, soit un réservoir de 406 Litres de gasoil.

Suite cette optimisation de consommations de Puissance-Energie en fonction des cinq scénarios capitaux, nous avons abouti à un dimensionnement énergétique optimisé du générateur d'énergie et du système de stockage. Nous considérons une hybridation autonome par stockage.

En ce qui concerne le système de stockage d'énergie pour les cinq scénarios, notons donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{max}^{SSE} = \max(P_{max}^{SSE}(n)), \text{ avec } n \in [1,5] = 200 \text{ KW DC utile} \\ E_u = \max E_u \text{ Scenario}_n + E_u \text{ Scenario}_5, \text{ avec } n \in [1,4] = 24 + 8.13 \approx 32 \text{ KWh} \end{array} \right.$$

$E_u \text{ Scenario}_5$ doit-être prise en compte indépendamment des autres valeurs énergétiques dans les différents scénarios car elle correspond à une consommation capitale dans les missions ferroviaires, la maintenance des locomotives, à prendre en compte avec les 4 premiers scénarios.

En ce qui concerne le générateur d'énergie, notons que :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{moyenne} = \frac{1}{t_{mission}} \int_0^{t_{mission}} P \, dt = \alpha \times P_{max}, \text{ avec } \alpha \in [0,1] = 300 \text{ KW DC utile} \\ E_{mission} = \max E_{mission} \text{ Scenario}_n, \text{ avec } n \in [1,4] = 2030 \text{ KWh}, \text{ sachant que le} \\ \text{volume nécessaire vaut environ 406 litres.} \end{array} \right.$$

2.5.3. Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté un dimensionnement énergétique d'une source d'énergie hybride à embarquer dans la locomotive électrique multi-tension. Une étude de marché auprès des exploitants ferroviaires Européens nous a permis d'identifier parmi plusieurs besoins, des missions dominantes qui vont nous servir à identifier les performances du système.

Comme l'objectif principal de ce projet est de rendre une locomotive électrique autonome au-delà des lignes électrifiées, en réduisant ainsi les émissions polluantes dans le cadre de développement propre et durable, nous avons adopté une notion d'hybridation qui se compose d'une source d'énergie principale, fournissant la puissance moyenne toute au long de la mission, et une source d'énergie électrique secondaire, fournissant la puissance nécessaire à la traction au-delà de la puissance moyenne donnée. Cette stratégie d'hybridation correspond le mieux à notre application comme notre contrainte principale dans le cahier de charges est l'encombrement disponible dans la locomotive qui limite ainsi les performances de notre groupe hybride.

A partir des missions choisies, nous avons pu identifier quatre paramètres nécessaires au dimensionnement énergétique du système ($P_{moyenne}$, $E_{mission}$, E_u et P_{max}^{SSE}). La partie suivante, nous effectuerons une évaluation des différentes solutions envisagées, afin d'identifier un choix technique de la source hybride embarquée, qui se base sur le dimensionnement énergétique obtenue.

2.6. Evaluation des solutions envisagées

Le dimensionnement énergétique de notre power pack hybride nous permet d'identifier son architecture technique. L'objectif principal de cette partie est de pouvoir évaluer les différentes solutions existantes qui peuvent correspondre aux caractéristiques des deux sources de notre kit hybride embarqué : générateur d'énergie, et le système de stockage d'énergie. Nous proposons dans un premier temps une étude sommaire des sources d'énergie et de puissance qui peuvent s'impliquer dans notre étude. Il s'agit de ressortir leurs caractéristiques intrinsèques en fonction des conditions d'exploitation en leur pourvoyant une bonne longévité et une efficacité énergétique optimale. Nous avons défini dans la section §2.5.1 les notions de "source de puissance" et de "source d'énergie". Rappelons que nous désignons par "source d'énergie électrique", une source pouvant délivrer une puissance électrique moyenne donnée, sur une durée du même ordre de grandeur que celle de la mission typique que doit assurer le système. Nous désignons par "source de puissance électrique", une source dont le bilan énergétique est nul, aux pertes près, sur la durée totale de la mission typique du système. Ainsi, les éléments de stockage, batteries, volants d'inertie et supercondensateurs, relativement à une mission de véhicule hybride autonome⁽¹⁾, sont des sources de puissance.

(1) Sur un véhicule hybride autonome, les éléments de stockage ne font que restituer l'énergie stockée. Ils ne sont donc pas des sources d'énergie, mais plutôt des sources de puissance.

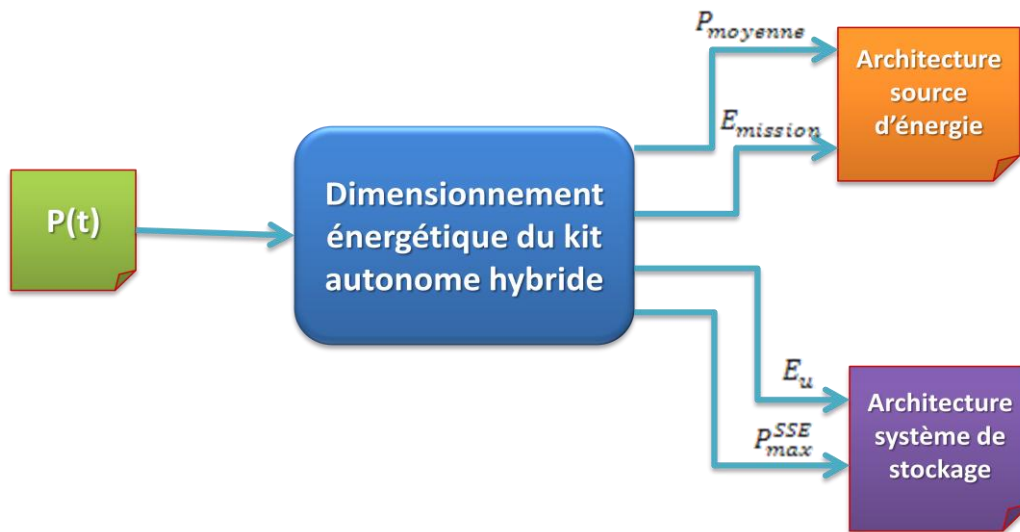


Figure 38.20 Synthèse de la démarche d'étude

Même si les batteries sont en grande partie déchargées pendant la mission de traction puis rechargées à l'arrêt, on peut quand même les qualifier de "sources de puissance" si l'on étend la mission de traction au temps de recharge. Rappelons que nous avons associé ce temps de recharge à l'arrêt à une "contrainte de dégradation temporelle" de la mission globale.

La convention de signe relative aux flux de puissance est la suivante : pour les générateurs de puissance (éléments de stockage), une puissance positive correspond à une décharge et une puissance négative à une charge ; pour les générateurs d'énergie la puissance est constamment positive et correspond à une fourniture de puissance ; enfin, pour la mission de puissance (traction + auxiliaires + pertes), une puissance positive correspond à une consommation d'énergie et une puissance négative à un rejet d'énergie (la récupération au freinage par exemple).

Notre procédure d'étude est faite en deux tâches : Une présentation des différentes technologies potentielles existantes d'une façon synthétique, et une étude comparative entre elles pour la mise en évidence la solution la plus adéquate.

2.6.1. La source primaire : Générateur d'énergie

Deux contraintes principales vont nous cadrer et limiter notre recherche sur les technologies potentielles existantes, afin de déterminer notre type de générateur d'énergie :

- ☞ Le volume disponible dans la locomotive égal environ à 4 m^3
- ☞ Le dimensionnement énergétique : puissance électrique nominale utile de 300 KW DC, et une réserve d'énergie électrique de 2030 KWh

Dans le marché industriel actuel, il n'existe pas un générateur d'énergie purement électrique qui pourrait répondre à un tel besoin et qui répond aux normes ferroviaires. Prenant, par exemple, une pile à combustible, produisant 50 KW de puissance, dépend d'un volume moyen de 3 m^3 y compris auxiliaires nécessaires. Un autre problème résidant dans cette solution est sa durée de vie, qui est limitée à 1000 heures actuellement, et qui est vraiment négligeable devant la durée de vie de la locomotive (40 000 heures). Ainsi qu'il existe une norme actuelle qui interdit le passage de l'hydrogène sous tunnels. D'un autre côté, les batteries ne correspondent non plus à notre cahier des

charges, car elles occuperont au moins 10 m³ dans la locomotive sans évoquer le problème de durée de vie.

C'est pour ces raisons, il est préférable de s'affronter aux sources d'énergie mécanique-électrique comme c'est un domaine d'étude plus ancien et que les technologies sont plus maîtrisables. Actuellement, les moteurs ont des consommations assez élevées mais ils ont de faibles émissions de NOx. Par contre, dans les années à venir, les constructeurs vont fabriquer des moteurs plus performants avec des rendements de plus en plus élevés et donc une consommation plus faibles. Cela va entraîner une diminution des émissions de CO₂, mais une augmentation des NOx. Pour respecter et répondre aux futures normes, une utilisation de systèmes spécifiques de réduction de polluants sera nécessaire.

Plusieurs types de motorisations pouvant répondre à notre cahier des charges comme : les moteurs à biocarburants, la quasiturbine, les turbines à gaz, les moteurs à air comprimé, les moteurs diesels et bio diesels etc...

Les moteurs « IC à piston »

Les bonnes performances du GNV⁽¹⁾ viennent du fait qu'il contient très peu du carbone. Les moteurs quant à eux sont des dérivés de versions essences classiques, donc fiables et disponibles. Les coûts énergétiques actuels sont relativement bas, et le réapprovisionnement n'est pas trop difficile car le GNV est un gaz délivré par les réseaux urbains, comme les réserves mondiales sont très grandes donc des bonnes perspectives futures.

Les risques sont liés Les risques du GNV sont liés à une fuite avec confinement et source d'ignition. Les réservoirs actuels ont des dispositifs de sécurités afin d'éviter l'explosion en cas de choc très violent. Il faut également préciser que le risque accident d'une locomotive est très faible (du moins en Europe) ce qui limite les risques de chocs. Pour les fuites, la présence de rhéostats de freinage dans la cabine n'est pas à négliger.

En effet, les rhéostats sont là pour dissiper sous forme de chaleur l'énergie de freinage. La température maximum atteignable lors d'un gros freinage est de 600°C. La température d'auto inflammation du GNV étant aux alentours de 540°C, en cas de fuite si des molécules de méthane rencontrent des éléments chauds du rhéostat, les conséquences peuvent-être dramatiques. Pour garantir des bonnes conditions de sécurité, il faut limiter le risque de confinement en cas de fuite. Par exemple, la traversée de tunnel pourrait être remise en question ce handicaperait l'exploitation.

L'utilisation d'hydrogène est également envisageable mais au prix du gros effort de développement. En effet, à l'heure actuelle, des bus circulent grâce à l'hydrogène comme des moteurs sont déjà disponibles dans le marché industriel pour des puissances de 200 kW environ. Cette technologie, serait très contraignante pour les stockages (en embarqué et au dépôt) et plus fastidieuse que le GNV pour le réapprovisionnement. De plus, ce gaz est encore plus dangereux que le GNV. Les carburants liquides sont plus lourds et plus carbonés donc plus polluants. Ils sont également de plus en plus chers. Certes, les moteurs diesels ont un bon rendement et bénéficient d'une technologie perfectionnée, mais ils ont des mauvais résultats au niveau des émissions (particules). Ils respectent ainsi les normes anti-pollutions pour 2012 mais au prix d'ultimes évolutions. Seront-ils capables de respecter les normes suivantes ?

Avec les moteurs diesels, les moteurs à gaz partagent le point commun d'une large gamme de puissances disponibles. Ce qui est un net avantage en terme de développement.

⁽¹⁾ GNV signifie Gaz Naturel Vehicules

❁ **Les bio carburants** ne sont pas intéressants d'un point de vu énergétique et sont très coûteux (surtout le bio éthanol). Cependant, ils permettraient de réduire les émissions polluantes par rapport au diesel. Leur principe intérêt est politique car il permet à un pays sans ressources pétrolières de garantir son indépendance énergétique.

❁ **Les moteurs Wankels** sont compacts, et ont de bonnes performances globales. Leurs bonnes combustion est à l'origine de faible pollution mais ont un rendement plus faible, d'où une consommation (beaucoup) plus importante. De plus, il n'existe pas vraiment de marché pour ce moteur, ainsi Mazda est actuellement le seul fabricant de ce type moteur et ne fabrique qu'un seul modèle d'une puissance aux alentours de 200 kW. Ces moteurs ne sont pas réputés pour leur longévité.

❁ **Les moteurs de type quasiturbine** ne sont pas encore suffisamment développés pour pouvoir être utilisé dans des applications ferroviaires. De même que les moteurs de la société MDI. La version de la quasi turbine la plus développée actuellement est celle à air comprimé mais après un petit calcul, il apparaît clairement que le volume d'air comprimé à stocker serait beaucoup trop grand. Une solution pourrait consister à créer de l'énergie sous forme d'air comprimé en temps réels. Cependant, stocké de l'énergie sous forme électrique pour créer de l'air comprimé afin de recréer de l'électricité n'est pas intéressant. Les performances annoncé pour les quasiturbines et moteur MDI montre que ces technologies sont très prometteuse, les évolutions sont donc à suivre.

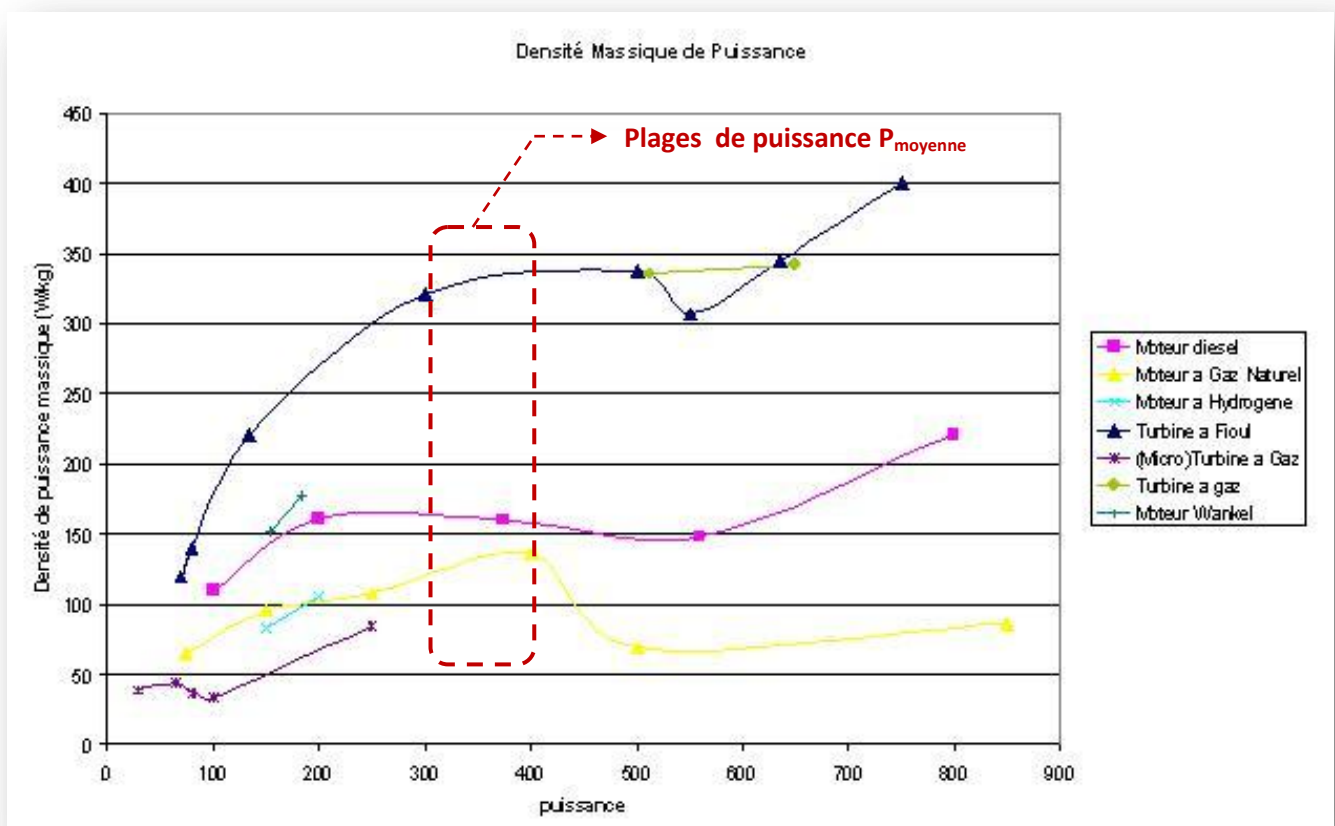


Figure 39.21 Comparaison des densités de puissance massique entre différentes motorisations

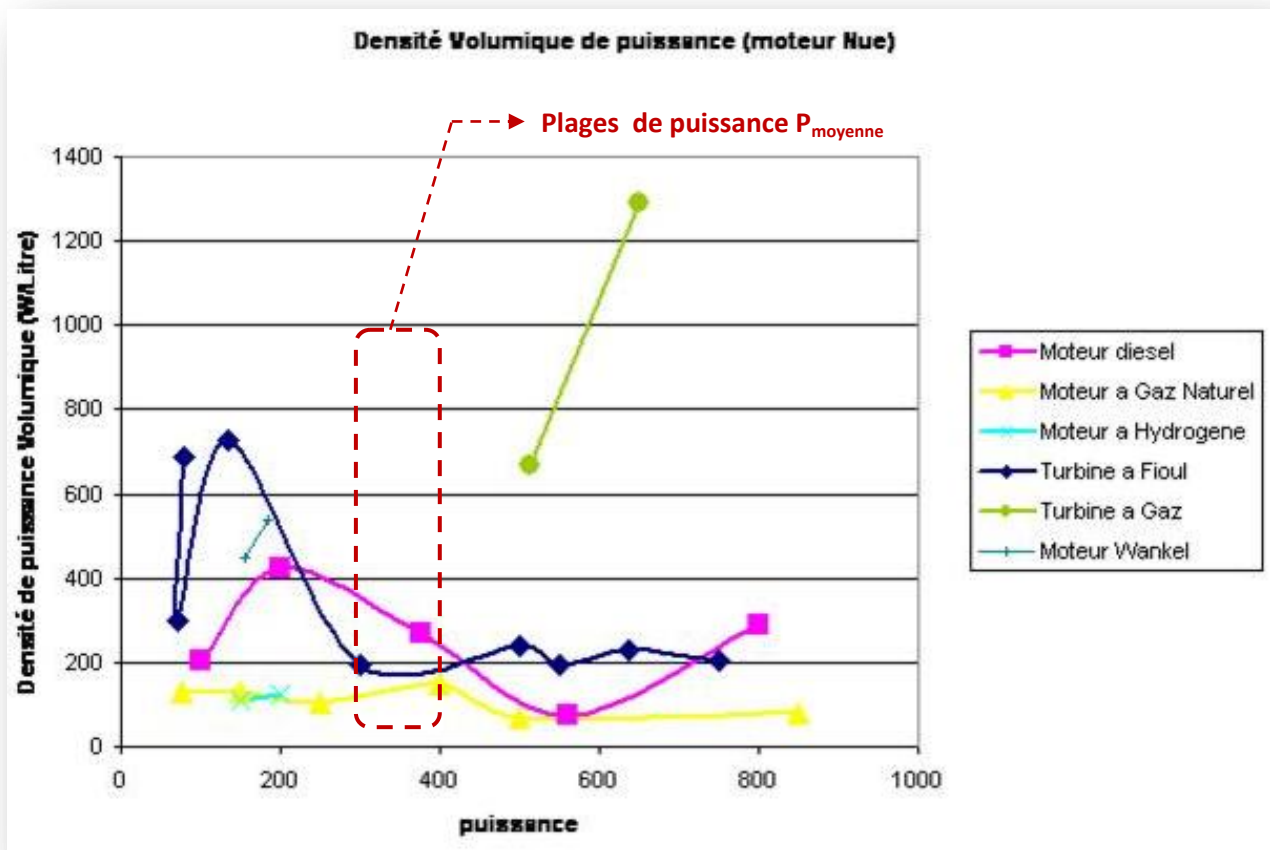


Figure 40.22 Comparaison des densités de puissance volumique entre différentes motorisations

❖ **Les Micro turbines** ne bénéficient pas d'un très bon rendement énergétique lors d'une simple génération d'électricité. En effet, elles n'ont de l'intérêt que dans une utilisation en cogénération car en plus de fournir une puissance mécanique transformable en électricité, elles sont capables de fournir une grande quantité de chaleur (qui ne serait pas utile dans le cas d'une locomotive). Les Micro turbines, sont uniquement disponibles en solutions prêtes à l'emploi mais en comparaison avec les « Set de Générations » diesel, à puissances équivalentes, elles sont 2 fois plus volumineuses et ont un rendement deux fois plus faible.

❖ **Les turbines à fuels** du type « hélicoptère » sont incontestablement plus légères et plus compactes mais au prix d'une technologie inhabituelle dans le milieu ferroviaire donc plus onéreuse. De plus, vu les puissances qui seront mises en cause, les gains en volumes et en poids dans les puissances ne seront pas si conséquents. Cette technologie ne bénéficie pas non plus d'un très bon rendement.

L'étude comparative de ces différentes propositions est effectuée suivant une comparaison des densités massiques et volumiques en fonction de la puissance. D'après les deux Figure 2.21 et Figure 2.22, nous constatons que dans le cadre du développement d'un générateur d'énergie de 300 kW électrique utile, soit 330 kW thermique, les meilleures motorisations sont les moteurs « IC à piston ». Ils sont fiables, éprouvés, et qu'ils présentent les meilleures caractéristiques en termes de densité

massiques et volumiques. Ce qui peut varier est donc le carburant à utiliser. Le GNV ou l'hydrogène sont plus dangereux, en contrepartie ils ont déjà été utilisés dans le milieu ferroviaire. Le diesel et biodiesel sont plus simples à mettre en œuvre et à utiliser (stockage, approvisionnement, maintenance) mais pollueront plus. Chaque carburant ayant des plages d'inflammabilité et des propriétés de combustions différentes. Les moteurs diesels seront plus compacts, les moteurs pour carburant gazeux seront plus volumineux. Les coûts énergétiques sont également à prendre en compte. Il faut donc faire un choix entre facilitée de mise en œuvre, coût et pollution.

Afin de déterminer d'une façon objective le meilleur carburant à utiliser, utilisation d'un tableau de pondération des paramètres : pour plusieurs caractéristiques, il va être attribué à chaque carburant une note comprise entre 1 et 5 en fonction de la performance qu'il va lui être lié. Les caractéristiques sélectionnées sont les plus importantes pour notre choix.

Par exemple le stockage d'hydrogène étant le moins bon, il recevra un coefficient de 1. Le stockage du diesel étant de loin le meilleur il recevra 5. Le paramètre stockage sera attribué en fonction de la facilité, le coût et le volume utilisé pour le stockage. Les paramètres « sécurité » et « Facilité de mise en œuvre » sont très proche car un carburant dangereux obligera à une gestion rigoureuse et donc entraînera une difficulté de mise en œuvre.

✿ **Pour une application à court terme**, les moteurs diesels/biodiesels sont donc les plus adaptés pour notre besoin (Tableau 2.11.a)). De plus, ces 2 carburants sont très voisins, il y a très peu de différences entre eux si bien que certains moteurs peuvent fonctionner quasi indifféremment avec l'un ou l'autre. Leurs gestions étant très proches, il n'est incohérent de laisser le choix du carburant au client. Cette technologie est celle qui présente les meilleures caractéristiques de densité massique et volumique en terme de moteur et du stockage. Il s'agit également d'une technologie maîtrisée, fiable, peu dangereuse et peu onéreuse.

✿ **Pour une application à long terme** (Tableau 2.11.b), le facteur «Pollution» est à plus prendre en considération, ainsi, il sera noté sur 10. Les coûts énergétiques vont être réajustés (estimation) : Diesel et GNV augmenteront en prix en contrepartie avec H2. Nous estimons que le biodiesel augmentera significativement car la hausse prix du grain va être compensée par les améliorations technologiques. Le paramètre de « facilité de mise en œuvre » va être réajusté car sur le long terme,

Carburant	Diesel	Bio diesel	H2	GNV
Coûts énergétiques	4	2	1	5
Pollutions	1	2	5	4
Stockage	5	4	1	2
Facilité de mise en œuvre	5	4	1	2
Sécurité	5	5	1	2
Total	20	17	9	15

a) Pour une application à court terme

Carburant	Diesel	Bio diesel	H2	GNV
Coûts énergétiques	4	2	1	5
Pollutions	1	2	5	4
Stockage	5	4	1	2
Facilité de mise en œuvre	5	4	1	2
Sécurité	5	5	1	2
Total	20	17	9	15

b) Pour une application à long terme

Tableau XII.11 Tableau des pondérations des motorisations choisies

les barrières actuelles seront vaincues (avec l'arrivée de la pile à combustible, les technologies de stockage et de gestion de l'hydrogène vont évoluer). Notons que la suprématie du diesel risque d'être remise en cause.

Nous modérons cependant ces résultats, car l'arrivée dans quelques années des nouvelles solutions de production d'énergie (PAC, Moteur MDI, Quasiturbine...) pourraient bousculer d'une façon importante le marché actuel.

A l'issue de cette analyse, nous retiendrons deux technologies prépondérantes :

- ✓ Les moteurs diesels (et biodiesels)
- ✓ Les moteurs à gaz (GNV)

Ces solutions sont toutes les 2 issues de la technologie du moteur à combustion interne

Le moteur à Gaz présente un fort potentiel pour des futures utilisations grâce à son coût énergétique et sa faible pollution. Toutefois, avec l'architecture actuelle d'une locomotive, utiliser ce carburant serait trop risqué. De plus, le surcoût entraîné par le développement de cette technologie ne serait pas rentabilisé en moins de 5 ans (sans parler du développement des infrastructures). A ces inconvénients, il faut ajouter qu'il faudra faire fesse à l'effet psychologique entraîné par l'utilisation de GNV.

Vue les inconvénients rédhibitoires (sécurité) liés au GNV et au gaz en générale (H₂). Dans le contexte de notre problématique, il apparaît clairement que la meilleure solution soit l'utilisation de Diesel ou de Bio diesel. Le diesel est simple et éprouvé, le bio diesel a un coût énergétique plus élevé mais il pollue moins et il n'est pas issu d'une filière de carburant fossile.

De plus, les moteurs biodiesels et diesels sont similaires. La différence majeure est la gestion des carburants (les filtres des biodiesels doivent avoir de meilleures résistances bactériologiques) Autrement, certains modèles de moteurs se diffèrent par la programmation de leurs calculateurs d'injection. Il sera donc très facile et intéressant de laisser le choix aux clients entre bio diesel et diesel voir même de proposer un système multi carburant, « flex-fuel ».

Pour conclure, nous adoptons dans notre power pack hybride le moteur Diesel comme une source d'énergie primaire, avec une puissance nominale thermique de 330 KW, soit 300 KW électrique utile DC, avec un réservoir de gasoil de 406 Litres.

2.6.2. La source secondaire : système de stockage d'énergie

Les éléments de stockage sont caractérisés par l'énergie qu'ils peuvent stocker et la puissance qu'ils peuvent délivrer. Globalement, plus un élément est intéressant sur le plan énergétique, moins il l'est sur le plan de la puissance, et vice-versa. Les batteries admettent une densité d'énergie allant de 3 à 300 Wh/kg contre 0.4 à 15 Wh/kg seulement pour les supercondensateurs [49, 54, 55]. Par contre, sur le plan de la puissance, les supercondensateurs admettent 500 à 104 W/kg contre 10 à 500 W/kg seulement pour les batteries. La figure 2.23 [37] montre dans le plan énergie – puissance, la localisation des régions correspondant aux différents éléments de stockage : il s'agit du plan de Ragone. Les frontières des régions balisées sont déterminées sur la base des pertes internes et/ou les fuites dans les éléments de stockage. Les principaux éléments de stockage sont classés, du plus

dense en énergie au plus dense en puissance, avec dans l'ordre batteries, volants d'inertie et supercondensateurs. Le

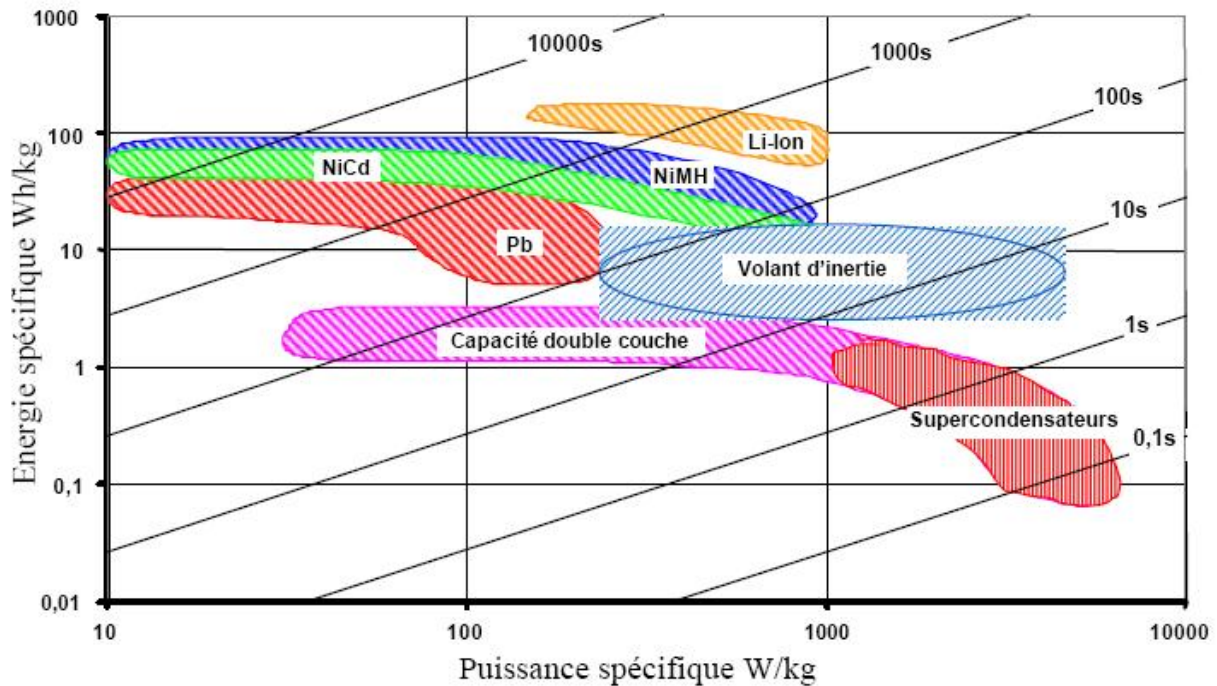


Figure 41.23 Plan de Ragone des systèmes de stockage d'énergie [37]

plan de Ragone contient aussi une indication sur la durée des applications adaptées à chaque élément. Avec une forte densité d'énergie et une faible densité de puissance, les batteries sont plus indiquées pour les applications de durée typique de l'ordre de quelques minutes à plusieurs heures. A contrario, les supercondensateurs sont plus adaptés aux applications de durée typique de l'ordre de quelques secondes à quelques minutes. Les volants d'inertie se situent globalement entre les batteries et les supercondensateurs, tout en étant très voisins de ces derniers.

En dehors de la caractérisation dans le plan de Ragone des éléments de stockage, ces technologies se différencient largement par leur durée de vie. Les batteries sont les plus fragiles : elles n'offrent que 1000 voire 2000 cycles au maximum. Sur ce critère de cyclage, les supercondensateurs sont remarquablement meilleurs : 500000 cycles environ. Mais l'élément de stockage le plus durable reste le volant d'inertie. Typiquement, pour une application de type locomotive hybride, un volant fonctionnerait plus de 20 ans contre 10 à 15 ans pour le supercondensateur et 5 ans pour la batterie⁽¹⁾.

Le plan de Ragone transparaît une vision fréquentielle des systèmes de stockage d'énergie. Les notions de densité de puissance et d'énergie renvoient à une notion de fréquence. Soient ρ_e et ρ_p , respectivement, la densité d'énergie et la densité de puissance d'un élément de stockage. Le

rapport : $f_p \text{ HZ} = \frac{\rho_p [\frac{W}{Kg}]}{\rho_e [\frac{J}{Kg}]}$ est équivalent à une fréquence [25]. Cette fréquence est une

indication caractérisant chaque type de stockage. En reportant sur un axe fréquentiel les différentes régions du plan de Ragone, nous obtenons une projection du plan de Ragone dans un espace fréquentiel unidirectionnel. Nous notons que les batteries couvrent les fréquences entre $4e^{-5}$ Hz et $2e^{-3}$ Hz, les volants d'inertie vont de $4e^{-3}$ Hz à $7e^{-2}$ Hz et les supercondensateurs couvrent les

fréquences de $3e^{-2}$ Hz à 2 Hz. Il est donc possible d'établir une relation d'ordre dans un référentiel fréquentiel, entre les différents éléments de stockage. Des petites fréquences vers les hautes fréquences, les éléments de stockage peuvent être classés dans l'ordre batteries, volants d'inertie, supercondensateurs. Sachant que le fonctionnement du groupe Diesel, près de sa puissance nominale, est la meilleure condition pour polluer moins et économiser du gasoil, ce dernier peut être considéré comme une source d'énergie à puissance quasi continue donc de fréquence nulle (ou extrêmement faible).

Les éléments de stockage "rapides" (supercondensateurs, volants d'inertie) assurent les composantes de hautes fréquences de la mission. Les générateurs d'énergie (groupe Diesel) assurent continûment la moyenne de la mission et le reste, c'est-à-dire les composantes de basses fréquences, reviennent aux batteries.

Selon notre dimensionnement énergétique de la source secondaire, nous obtenons:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{max}^{SSE} = 200KW \\ E_{SSE} = 32 KWh \end{array} \right. \quad \longrightarrow \quad f_{p,SSE} = 1.736 mHZ$$

Comme le montre la figure 2.24, le repérage de la fréquence du système de stockage d'énergie sur la projection du plan de Ragone confirme clairement que la technologie répondant à notre cahier des charges, et qui est les batteries, sachant que le volant d'inertie peut créer une solution potentielle aussi. Notons que les batteries NiMH et Li-ion ont plus d'avantages que les autres types de batteries (Plomb et NiCd). Notre système de stockage d'énergie est considéré comme une source de puissance, mais aussi le besoin énergétique de 32 KWh le transforme aussi en source d'énergie.

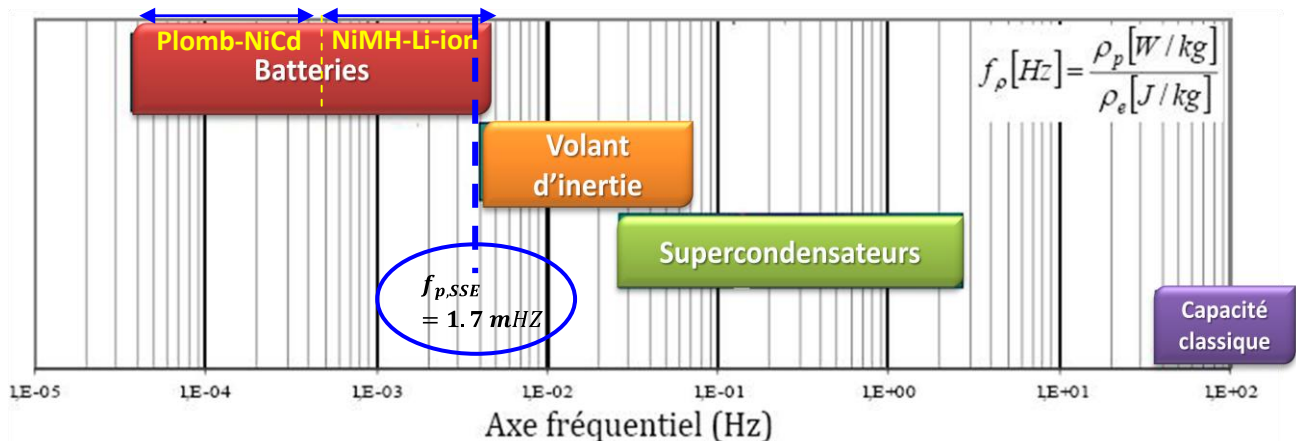


Figure 42.24 Projection du plan de Ragone sur un axe fréquentiel [25]

Les supercondensateurs dépendant d'une fréquence élevée, ont un bon rendement quand ils fournissent de la puissance nécessaire pour 40 à 50 secondes maximum qui est équivalent à 2.2 KWh dans notre cahier des charges ; au-delà, leurs rendements commencent à chuter. Les supercondensateurs sont des systèmes très prometteurs pour les applications hybrides, surtout pour booster les puissances, mais ils ne correspondent donc pas à notre choix technique. Dans le cas où l'encombrement n'était pas une contrainte principal de notre cahier de charges, il aurait été

intéressant d'ajouter un petit pack de supercondensateurs pour booster la puissance au démarrage, et récupérer l'énergie de freinage.

Actuellement, aucune entreprise propose un volant d'inertie dans le marché industriel répondant aux applications ferroviaires (Tableau 2.12 Annexe B). Le seul existant est le volant CCM présenté dans le chapitre 1, qui peut fournir une puissance maximale de 200 KW et une capacité énergétique de 4 KWh utile, qui est équivalent à une fréquence de $1.38e^{-2}$ HZ. Cette valeur est assez élevée par rapport à notre fréquence cherchée. Du coup, la solution du volant d'inertie est ainsi éliminée.

Les batteries NiMH et Li-ion correspondent donc le plus à notre choix technique. Les batteries Li-ion sont caractérisées sont considérablement utilisés dans des véhicules électriques purs grâce à ses performances massives et volumiques de capacité énergétique. Les batteries NiMH semblent cependant avoir été adoptées par la plupart des constructeurs automobiles et ferroviaires comme batterie de puissance. Elle fonctionne alors à faible profondeur de décharge, ce qui augmente considérablement sa durée de vie (nombre de cycles charge/décharge).

Comme le montre le tableau 2.12, les batteries Li-ion ne sont toujours pas disponible dans le marché industriel jusqu'à 2010, sachant qu'il existe actuellement des prototypes. Malgré les avantages d'une telle batterie, Cette technologie mal utilisée présente des dangers potentiels : elles peuvent se dégrader en chauffant au-delà de 80°C en une réaction brutale et dangereuse. Il faut toujours manipuler les accumulateurs lithium-ion avec une extrême précaution, ces batteries peuvent être explosives. En contre partie, les batteries NiMH sont actuellement le standard pour équiper les voitures hybrides (moteur à combustion + moteur électrique). En effet malgré des performances en retrait par rapport aux batteries à base de lithium, elles gardent l'avantage de bien supporter de forts courants de charge et de décharge et sont beaucoup plus sûres en cas de surchauffe. Elles sont aussi dans la phase de validation technique qui est suivie par la phase d'industrialisation.

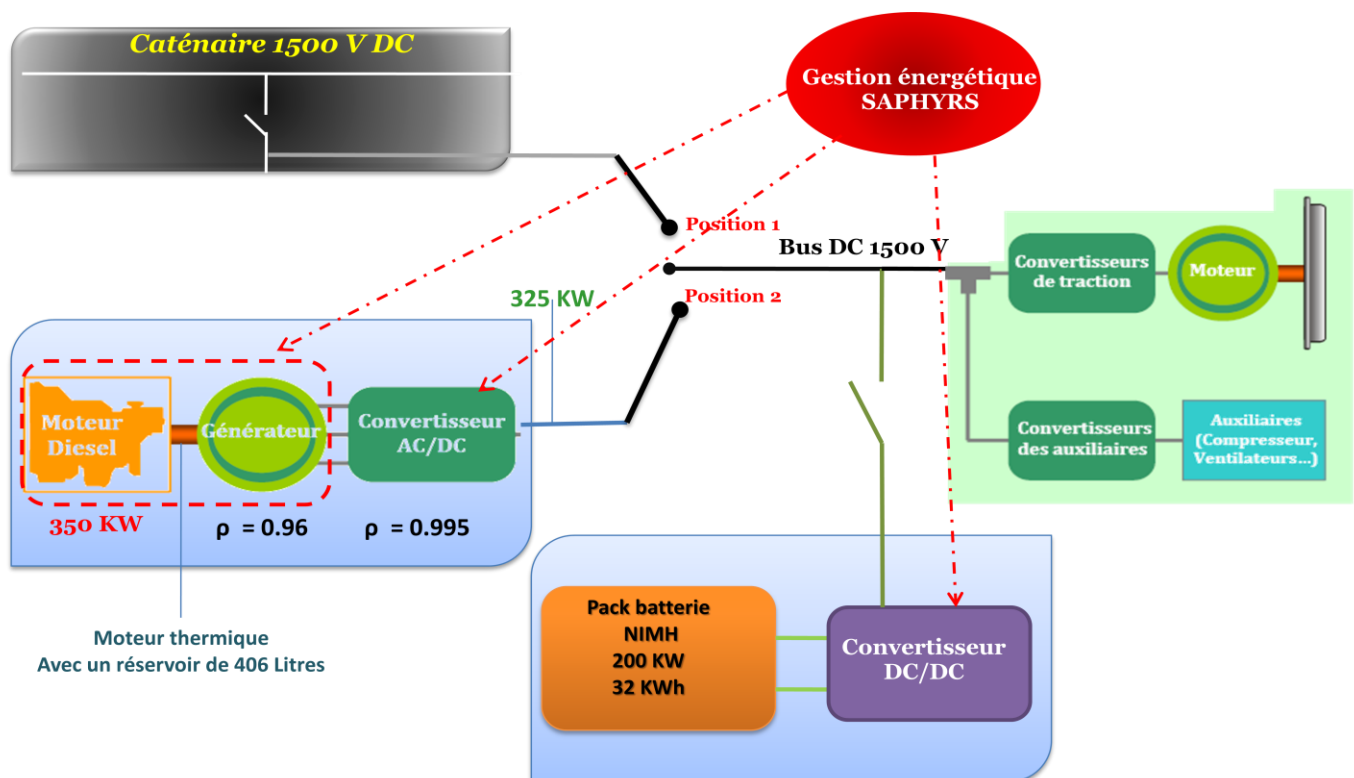


Figure 43.25 Architecture de la locomotive électrique à option du groupe hybride embarqué

Pour conclure, le système de stockage d'énergie pour notre power pack hybride sera un pack de batteries NiMH, avec une puissance maximale de 200 KW, une capacité énergétique de 32 KWh et un nombre de cycle/an de 1350. Les batteries Li-ion sont une solution très prometteuse pour le futur et qui peuvent remplacer alors le pack de batteries NiMH. Dans le chapitre 3, nous allons présenter un bilan comparatif de dimensionnement entre un pack de batteries NiMH et un pack de batteries Li-ion.

2.6.3. Conclusion

Après avoir défini le dimensionnement énergétique de notre source hybride, nous avons réussi dans cette partie, après avoir évalué différentes solutions envisagées, à proposer une architecture technique des deux sources d'énergie : le moteur Diesel qui est le générateur d'énergie pouvant délivrer une puissance électrique moyenne donnée de 330 KW thermique avec une réserve d'énergie de 2030 KWh soit 406 Litres de Gasoil, sur une durée du même ordre de grandeur que celle de la mission typique que doit assurer le système. Même si ces éléments sont dimensionnés par la puissance qu'ils sont amenés à fournir, ils fournissent la totalité de l'énergie nécessaire à la mission. C'est pour cela qu'ils sont qualifiés de "sources d'énergie". Nous désignons par "source de puissance électrique", les batteries NiMH dont le bilan énergétique est nul, aux pertes près, sur la durée totale de la mission typique du système, pouvant délivrer 200 KW de puissance avec une réserve énergétique de 32 KWh (Voir Figure 2.25).

Sachant que le fonctionnement du groupe Diesel, près de sa puissance nominale, est la meilleure condition pour polluer moins et économiser du gasoil, ce dernier peut être considéré comme une source d'énergie à puissance quasi continue donc de fréquence nulle (ou extrêmement faible). Les batteries NiMH assurent les composantes de hautes fréquences de la mission.

2.7. Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode de dimensionnement énergétique d'une source d'énergie hybride à embarquée dans une locomotive électrique quadri-tensions. Une étude de marché auprès des exploitants ferroviaires Européens nous a permis d'identifier parmi plusieurs besoins, des missions dominantes qui vont nous servir à identifier les performances du système. A partir des missions choisies, nous avons pu identifier quatre paramètres nécessaires au dimensionnement énergétique du système ($P_{moyenne}$, $E_{mission}$, E_u et P_{max}^{SSE}). Ensuite, nous avons évalué plusieurs différentes solutions envisagées, compatible avec le dimensionnement énergétique effectué. Notre power pack hybride se composera alors deux sources : le moteur diesel, correspondant au générateur d'énergie avec une puissance nominale électrique utile de 300 KW DC avec une réserve d'énergie de 406 Litres, et un pack de batteries NiMH, correspondant au stockage d'énergie avec une puissance nominale électrique de 200 KW et une capacité énergétique de 32 KWh.

Le chapitre qui suit aborde l'étude de la conception technique de notre kit hybride embarqué, y compris son dimensionnement et son intégration dans la locomotive en se basant sur des fournisseurs existants dans le marché industriel.

Chapitre 3

Dimensionnement et modélisation des sources d'énergie de kit hybride embarqué

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une démarche de dimensionnement énergétique de la source hybride embarquée, et nous avons identifié, après avoir évalué plusieurs technologies potentielles, la solution des deux sources de notre power pack hybride : un moteur Diesel comme générateur d'énergie et un pack de batteries NiMH comme système de stockage d'énergie. Dans ce chapitre, nous présentons la démarche de dimensionnement et de modélisation de ces deux sources. Ce chapitre est réparti en quatre sections. Dans la première section, nous définissons l'architecture fonctionnelle de locomotive électrique à option d'un groupe hybride embarqué, afin de l'adapter à notre étude de dimensionnement à échelle réelle du système. Dans la deuxième section, nous proposons une étude de dimensionnement du groupe électrogène (moteur diesel, alternateur/redresseur) par rapport au dimensionnement énergétique obtenu au chapitre 2, tout en respectant la contrainte principale qui est l'encombrement disponible dans la locomotive. Ce dimensionnement a été fait suite à un choix du fournisseur qui correspond le mieux à notre cahier des charges. Ensuite nous proposons une méthode de dimensionnement d'un pack de batteries pour la traction ferroviaire, où nous ferons la comparaison entre les batteries NiMH et Li-ion ; Nous avons ainsi proposé un algorithme de dimensionnement d'un pack des supercondensateurs. Cette méthode de dimensionnement sera validée avec le fournisseur de batteries. Il s'agit de dimensionner le pack des batteries par le choix de la tension de bus, le calcul des nombres de cellules en branches et en parallèle et le dimensionnement de son convertisseur bidirectionnel et des éléments passifs associés. La troisième partie présente la modélisation de ces deux sources. Dans un premier temps, nous modélisons le groupe électrogène (moteur diesel, alternateur/redresseur), ensuite nous présentons un modèle dynamique équivalent du pack de batteries NiMH en se référant sur plusieurs méthodes analytiques validées dans la littérature. Dans la quatrième section, Le dimensionnement et le modèle des batteries ont été validés grâce aux essais expérimentaux à échelle réduite sur deux modules de batteries NiMH 34 Ah fournis par le fournisseur, en injectant les profils de puissance/de courant des besoins ayant sollicités un système de stockage d'énergie. L'objectif de ces essais est d'assurer que le choix technique de système de stockage répond bien aux profils de missions et à notre cahier des charges.

3.1. Architecture fonctionnelle de la locomotive électrique à option du kit hybride

Avant de passer aux parties de dimensionnement, et de modélisation de notre source hybride embarquée, nous revenons à l'architecture de la locomotive électrique à option du power pack hybride. Ayant défini dans le chapitre 2, que notre source hybride se compose de deux sources, une source de tension et une source de courant, nous avons défini une première architecture de la chaîne de traction où ce kit hybride doit s'intégrer afin d'effectuer le dimensionnement énergétique nécessaire.

Cette partie détaille et présente l'architecture fonctionnelle finale de la locomotive à option du kit autonome, illustrée dans la figure 3.1. Il s'agit de deux sources d'énergie et de puissance, qui devront assurer ensemble la traction à travers l'alimentation des quatre bogies moteurs et ses auxiliaires. La puissance crête totale a été spécifiée à 525 KW qui représente une puissance électrique utile et continue DC, qui a été obtenue suite au dimensionnement énergétique du système. La diversité des sources en présence justifie l'importance que nous accordons à la stratégie de gestion. Il ne s'agit pas seulement de procéder à un partage arbitraire de la mission entre ces sources, mais plutôt d'assurer au mieux la compatibilité entre les parts de mission et les sources mises en face d'assurer une bonne longévité de ces dernières et une meilleure efficacité énergétique de la locomotive tout en respectant les contraintes système (encombrement). Nous avons proposé pour cela une stratégie d'énergie entre le moteur Diesel, le pack des batteries et le pantographe 1500 V DC, qui favorise la réduction de la consommation et de la pollution.

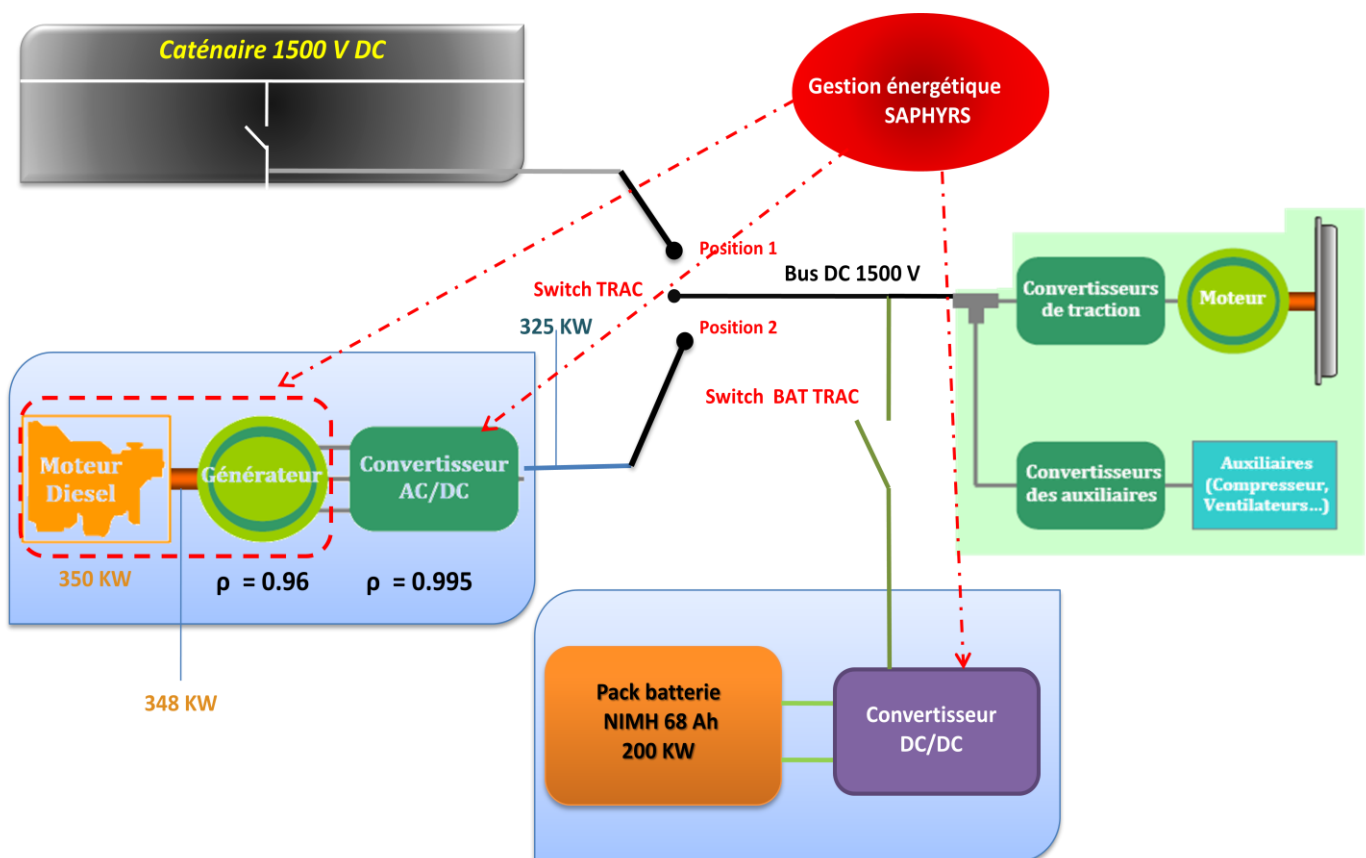


Figure 44.1 Architecture Fonctionnelle de locomotive électrique à option du groupe hybride

La convention de signe relative aux flux de puissance est la suivante : pour les générateurs de puissance (éléments de stockage), une puissance positive correspond à une décharge et une puissance négative à une charge ; pour les générateurs d'énergie la puissance est constamment positive et correspond à une fourniture de puissance ; enfin, pour la mission de puissance (traction + auxiliaires + pertes), une puissance positive correspond à une consommation d'énergie et une puissance négative à un rejet d'énergie (la récupération au freinage par exemple).

Comme nous avons démontré, dans le chapitre 2, que notre power pack hybride se compose d'un moteur Diesel de puissance nominale de 350 KW thermique, soit 325 KW électrique utile DC, avec un réservoir de gasoil de 406 Litres, et d'un pack de batteries de NiMH de puissance 200 KW électrique utile, et d'énergie de 32 KWh avec 1350 Cycles/an.

Le moteur Diesel est accouplé à un alternateur/redresseur pour avoir une tension en sortie de 1500 V DC comme tension nominale, sachant que cette tension varie entre 1000 V minimum et 1800 V maximum. Le pack de batteries est accouplé à un convertisseur bidirectionnel pour pouvoir les décharger et les recharger pendant le parcours. La tension de sortie de ce convertisseur est 1500 V DC. La tension du bus du pack des batteries ne doit pas être trop élevée afin de limiter aussi son dimensionnement. Notre kit autonome est donc considéré comme un cinquième pantographe virtuelle 1500 V DC dans la locomotive électrique.

Son interface fonctionnelle (Figure 3.1) est caractérisée par deux SWITCHS :

1. **SWITCH TRAC** : qui représente le lien entre la caténaire 1500 V DC PT3, s'il est en **position 1**, et/ou le moteur diesel – alternateur/redresseur s'il est en **position 2**, et la chaîne de traction électrique continu 1500 VDC présenté dans **la figure 2**.
2. **SWITCH BAT TRAC** : qui représente le lien entre le pack de batteries NIMH et le bus continu 1500 V Continu.

La boîte de gestion d'énergie de notre source hybride embarquée est la boîte intelligente qui a pour rôle la gestion de la source hybride entre la caténaire, le moteur thermique et le pack des batteries. La sortie de cette boîte grise de gestion d'énergie va représenter l'interface contrôle – commande de la locomotive « interface PT3 virtuelle : PT5 ». Les détails de la gestion d'énergie vont se présenter dans le chapitre 4.

Pour synthétiser le fonctionnement de la locomotive électrique à option du groupe hybride embarqué, nous avons modélisé un schéma fonctionnel représentant les différents blocs agissant lors de la traction de la locomotive. Partant de la cabine de conduite, le conducteur sélectionne un des pantographes présent, y compris l'interface de notre kit autonome. Le bloc « chaîne de traction » sera alors activée, ensuite le bloc TCU⁽¹⁾ autorise au modèle dynamique de se mettre en route (Présence d'un courant I_{max} sous station activant le bloc TCU et alimentant ainsi le modèle dynamique). D'un autre côté, un consigne d'activation sera envoyée à la boîte de gestion d'énergie de la source hybride, qui commandera de son côté le moteur thermique et/ou les batteries en activant les SWITCHS « TRAC et BAT TRAC »; la sortie de cette boîte va communiquer les informations nécessaires à la cabine de conduite (état du système instantané en temps réel), et ainsi de suite (Voir Figure 3.2).

⁽¹⁾TCU signifie Train Control Unit

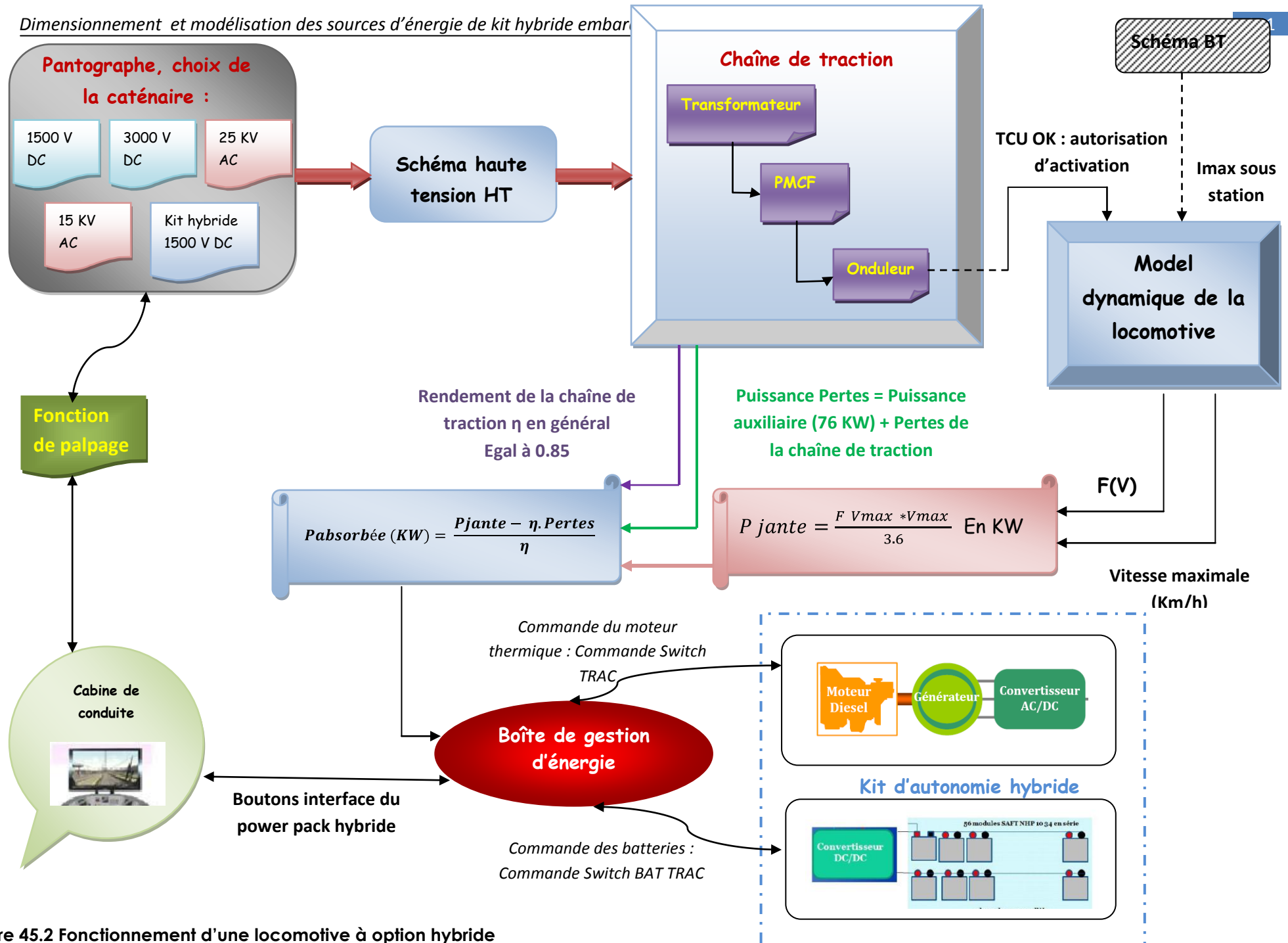


Figure 45.2 Fonctionnement d'une locomotive à option hybride

3.2. Dimensionnement des sources d'énergie du kit hybride

3.2.1. Dimensionnement du groupe Electrogène

Le groupe Diesel est l'élément central de notre power pack hybride. Il fournit la totalité de l'énergie, pertes comprises, nécessaire au déroulement des missions. De plus, le groupe Diesel est au centre des préoccupations de réduction de la consommation de fuel, de la pollution et des nuisances sonores. A lui seul, le groupe Diesel est un système extrêmement complexe. Il convient donc, dans une vision système, de focaliser uniquement sur les interactions entre le groupe Diesel et son environnement.

La figure 3.3 montre une représentation système du groupe électrogène Diesel. Le contrôle du groupe se fait à travers la puissance fournie PGE et la vitesse de rotation du moteur thermique N (tr/min). En sortie du modèle, il y a la consommation spécifique CS (g/kWh) et les émissions polluantes (CO_2 , NO_x , HC , CO et les particules) émises. Généralement, les cartographies issues d'essais expérimentaux ou fournies par les constructeurs permettent d'établir la courbe de consommation optimale du groupe Diesel. Les essais de pollution sont onéreux et leur importance stratégique les rend inaccessibles. Aussi notre étude se limite-t-elle aux émissions de CO_2 et à la consommation de gasoil. Sachant que ces deux éléments sont directement liés⁽¹⁾, nous retenons la consommation spécifique comme l'unique sortie du sous-système groupe Diesel [2, 25, 50].

Les moteurs diesels bénéficient de bonne recherche et évolution car ils sont actuellement très utilisés dans l'industrie et dans les transports. Ils sont anciens et très utilisés et bénéficient donc d'une très grande fiabilité. La facilité de mise en œuvre peut-être considérée comme très bonne. Cette technologie est également celle qui a les meilleures caractéristiques de densités massique et volumique. Le stockage sous forme diesel est également le plus compact. Le gros inconvénient du moteur diesel est lié à son carburant. En effet, le défaut de jeunesse du gazole est que lors de sa combustion, il y a formation de NO_x et de particules. Aujourd'hui, ces défauts de jeunesse tendent à être corrigés mais au prix de gros efforts. Il existe plusieurs méthodes d'optimisation des pollutions d'un moteur diesel :

EGR (« Exhaust Gas Recirculation »)

SCR ("Selective Catalytic reduction")

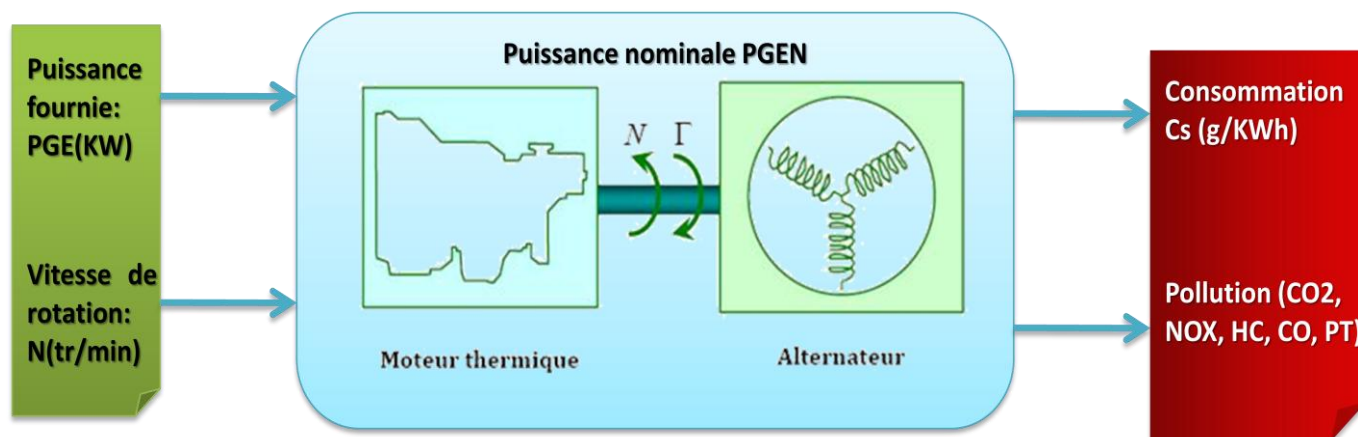
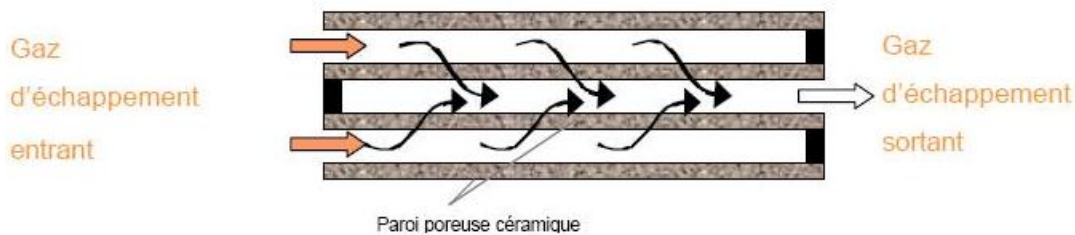


Figure 46.3 Une représentation système du groupe électrogène Diesel

✿ Filtre à particules

Les filtres à particules sont employés pour traiter les gaz d'échappement des moteurs fonctionnant avec des Diesels à faible teneur en soufre. L'objectif d'un FAP est de capturer physiquement les particules solides et de les garder jusqu'à une régénération qui permettra de les brûler. Les filtres les plus communément employés sont les ceux de type monolithes wall flow. La particularité de ces filtres est qu'un canal sur deux est bouché alternativement à chaque extrémité de façon à forcer les gaz d'échappement à circuler à travers les parois poreuses séparant les canaux.

Le schéma suivant explique le fonctionnement d'un tel dispositif :



Principe de fonctionnement d'un FAP

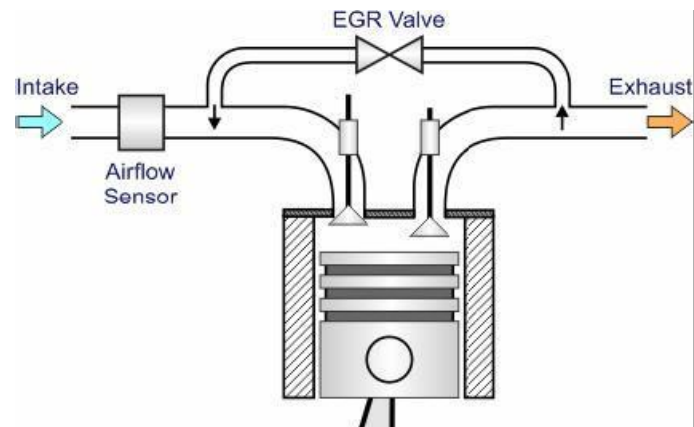
Les gaz chargés de particules et autres polluants arrivent du moteur par le côté gauche du schéma ci-dessus. Comme chaque canal a une extrémité fermée, les gaz sont obligés de passer à travers les parois. En traversant, les particules sont bloquées par le filtre. Son efficacité de filtration est de 70 à 95% de la masse totale de particules. Cette valeur dépendra des matériaux utilisés. Mais la plus grosse difficulté ne réside pas dans la filtration mais dans la régénération du filtre. Les différentes techniques de régénération sont :

- ✓ L'utilisation d'un catalyseur sur les surfaces du filtre. Un métal tel que du platine, du cuivre,...réduit la température de combustion nécessaire à l'oxydation des suies.
- ✓ L'utilisation d'un catalyseur en amont qui transforme le NO en NO₂ qui favorise l'oxydation des suies et permet d'augmenter la température des gaz.
- ✓ L'utilisation d'un additif dans le carburant qui permet de diminuer la température de régénération passive du filtre.
- ✓ L'injection de gasoil à l'échappement qui permet de brûler les suies.

✿ EGR

Cette introduction de gaz d'échappement a plusieurs effets sur la combustion :

- La quantité d'air frais entrant donc d'oxygène diminue, ce qui réduit, pour une température donnée, la formation des NO_x.
- La présence de CO₂ augmente la capacité calorifique du mélange, la température de flamme sera donc plus faible pour une même quantité d'énergie libérée.
- Les gaz d'échappement étant normalement plus chauds que l'air, il va donc falloir utiliser des systèmes de refroidissement de l'air recyclé pour diminuer la température des gaz d'échappement.



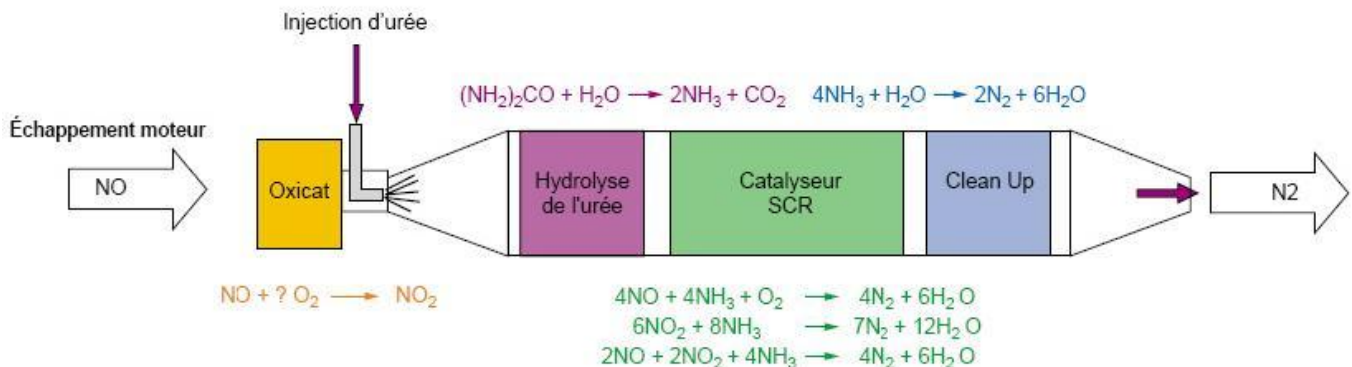
Principe de EGR

La mise au point de ce système sur des moteurs lourds se heurte à plusieurs difficultés de type :

- ☞ Réglementaire, car les moteurs lourds sont homologués sur l'ensemble de leur plage d'utilisation. La mise au point de ce système doit donc se faire en optimisant son fonctionnement sur l'ensemble des plages. Mais à pleine charge, ce système provoque une émission accrue de particules.
- ☞ Technologique, car ces moteurs fonctionnent bien souvent avec du fioul lourd (forte teneur en soufre) qui peut entraîner l'apparition de dépôt acide à l'échappement. Or comme une partie de ces gaz est réutilisée, ils pourraient donc endommager les organes du moteur.

✿ SCR

Le schéma suivant explique de façon simplifiée ce système. Ici, le réducteur employé n'est pas de l'ammoniac mais une solution aqueuse d'urée (NH_2CONH_2) qui injectée à l'échappement va libérer de l'ammoniac par une réaction d'hydrolyse.



Principe SCR

Le catalyseur d'oxydation placé en amont permet d'augmenter le rapport NO_2/NO des gaz d'échappement et ainsi d'accroître l'efficacité de conversion notamment à basse température en tenant compte du fait que la réaction de NO_2 avec NH_3 est plus rapide que la réaction de NO avec NH_3 . Le catalyseur dit de « clean-up » placé en aval du système permet de traiter les éventuels rejets d'ammoniac excédentaires, notamment pendant les phases transitoires. La mise au point du système pour une application véhicule va nécessiter de calibrer très précisément la quantité d'urée injectée en fonction de la quantité de NO_x émis par le moteur, de la température d'échappement, des caractéristiques du catalyseur.

Ensuite, on a conclu que le filtre à particule est un système peu coûteux et qui demande peu de modification puisqu'il prend généralement la place du silencieux. De plus, son efficacité et son utilisation ont déjà été testées sur des applications routières (bus, poids lourds) et ces dispositifs se sont révélés satisfaisants. Son application dans le domaine ferroviaire est donc fortement envisageable.

Les émulsions permettent d'obtenir des réductions moyennes avec un coût d'investissement très faible. Mais cette solution n'a pas été beaucoup testée, elle demeure une méthode de contrôle des émissions pertinentes. Malgré le prix élevé, les hybrides se révèlent être une solution d'avenir comme le montre le cas Canadien avec la Green Goat. Cette méthode peut donc être conseillée dans le cas d'un renouvellement de matériel contenu de son coût élevé. De même, l'EGR est pour le moment plus conseillé dans le cas d'un changement de moteur que lors d'une seconde monte. Des constructeurs comme MAN utilisent déjà cette solution sur leur moteur. Les systèmes d'arrêt et de démarrage automatique sont plus utilisés dans les pays froids puisqu'ils sont souvent combinés à un système de puissance auxiliaire pour maintenir le moteur à température de fonctionnement. Les données utilisées sont celles de fournisseurs, il serait donc intéressant de réaliser des mesures embarquées sur une locomotive circulant dans des zones tempérées.

La recirculation des gaz d'échappement EGR consiste à alimenter le moteur par un mélange d'air frais et de gaz d'échappement. SCR s'agit du système le plus performant pour la réduction en NOx puisqu'il atteint une efficacité de 90% lorsque les gaz sont situés dans la fenêtre du catalyseur (200-500°C). Le bloc SCR consiste à faire recirculer les gaz, d'échappement dans le dans le moteur diesel afin que ce dernier soit gavé avec un air faible en O₂. Cette méthode permet donc une diminution des NOx par réduction de la teneur en O₂ dans la chambre de combustion. La combustion s'effectue donc jusqu'à son maximum possible mais demeure cependant incomplète. En contre partie à une forte diminution des émissions de Nox, cette technologie entraîne une augmentation des émissions de particule (PM) et d'hydrocarbure (HC). Ces problèmes peuvent être résolus grâce à la technologie SCR. Il faut également noter qu'une diminution d'O₂ entraînera également une diminution de la puissance de l'explosion, donc du moteur. D'autres technologies sont en cours de développement, comme par exemple du reformage d'hydrogène et génération de puissance électrique à partir de l'énergie contenue dans les gazes d'échappement.

Les travaux de M. Osenga et de W. Koczara démontrent qu'il est plus intéressant en termes d'efficacité énergétique, de faire fonctionner le groupe Diesel en régime variable (vitesse variable) qu'en régime constant. Les essais publiés par W. Koczara sont assez probants (voir figure 3.4). Ces essais ont été faits sur un moteur thermique de 2.8 L. Le régime variable présente une économie non négligeable de gasoil par rapport au régime constant, surtout pour les faibles charges. Globalement, quel que soit le régime, le BSFC⁽²⁾(g/kWh) qui correspond au coût, en quantité de fuel, par kilowattheure produit (L/kWh ou g/kWh) est d'autant meilleur que le groupe fonctionne au voisinage de sa puissance nominale.

⁽¹⁾ Un Litre de gasoil produit environ 2.662 kg de CO₂.

⁽²⁾ BSFC signifie "Brake specific fuel consumption".

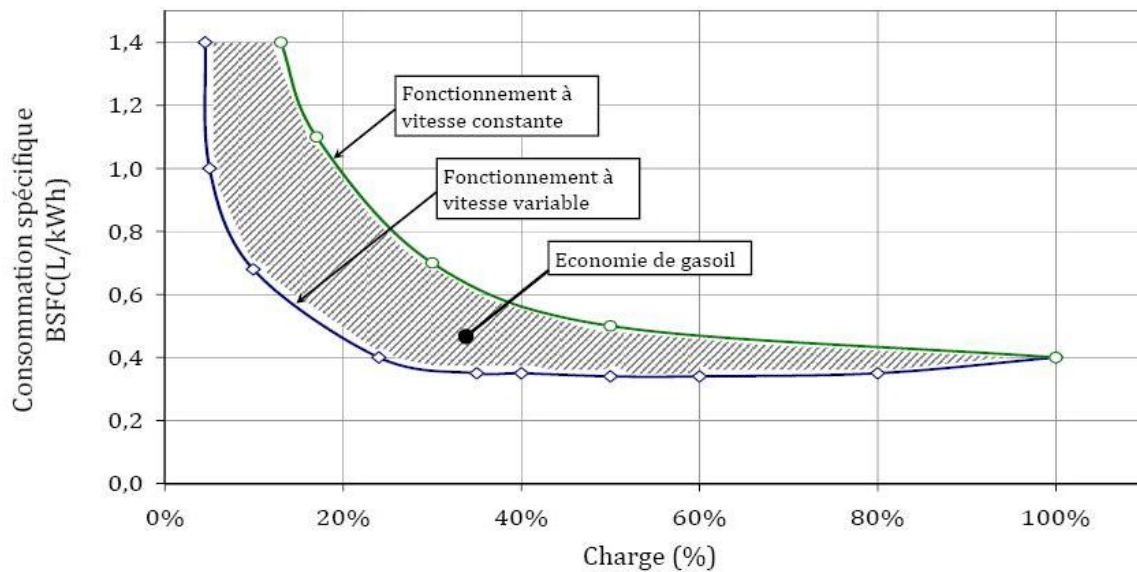


Figure 47.4 Facteurs d'influence de l'efficacité énergétique d'un groupe Diesel [25]

La figure 3.4 montre, qu'à vitesse constante, la consommation spécifique est optimale à la charge nominale et se dégrade rapidement lorsque la charge diminue. On note par contre, dans le cas d'un fonctionnement en régime variable, que cette dégradation est présente mais retardée.

Les performances de notre groupe Electrogène doit fournir une puissance électrique utile DC de 300 KW, correspondante à sa puissance nominale. Sa tension de sortie doit-être comprise entre 1000 V minimum et 1800 V maximum, soit 1500 V DC comme tension nominale. Le volume de réservoir de gasoil est égal environ à 406 Litres. Ces caractéristiques obtenues donnent naissance au dimensionnement du groupe électrogène.

Le dimensionnement du groupe électrogène dépend de deux paramètres : $P_{moyenne}$ et de l'encombrement disponible dans la locomotive, avec un volume environ de 4 m³ (une hauteur de 1900 mm, une longueur de 1650 mm et une profondeur de 950 mm), et une masse de 1500 Kg qui est une contrainte très primordiale pour notre étude, comme les normes européennes limitent la masse de la locomotive⁽¹⁾. Soit on peut écrire :

$$Dim_{Gr_Electrogène} = f(P_{moyenne}, volume_{encombrement})$$

✿ Le Moteur Diesel

Plusieurs fournisseurs potentiels ont été contactés pour avoir choisir la meilleure motorisation répondant à notre cahier des charges. Les normes actuelles imposent aux motoristes de fournir le moteur avec les systèmes d'anti-pollution, en utilisant les systèmes SCR (Injection d'urée dans les gaz d'échappement), et EGR (réutilisation des gaz d'échappement dans la combustion), pour réduire les émissions polluantes des moteurs diesels.

L'utilisation d'un EGR a un avantage de consommation et d'échauffement donc nous devons agrandir le système de refroidissement, sans ajouter un réservoir d'urée. La sortie des moteurs avec un tel système est programmée pour l'année 2012 voire 2014.

L'utilisation d'un système SCR réduit la consommation. L'utilisation d'un réservoir d'urée est nécessaire. La sortie des moteurs avec un tel système est programmée dès 2011.

Notre projet de power pack hybride est planifié aujourd'hui pour 2010. Nous devons cependant prendre en compte les nouvelles normes d'anti-pollution en considération, car notre objectif est de rendre la locomotive interopérable en Europe.

Nous avons sélectionné deux fournisseurs potentiels, parmi la liste cités convoqués, M1 et M2, grâce à leurs conceptions et leurs encombrements qui sont compatibles avec notre cahier charges, spécialement les longueurs de leurs moteurs (longueur disponible = 2000 mm).

Au départ nous sommes focalisés sur l'apport en puissance et l'encombrement, puis nous devons prendre en compte le respect des normes futures d'environnement et finalement les performances (fiabilité-ferroviaire).

Notre premier choix du moteur diesel s'est porté sur le moteur s'est porté sur le moteur M1 six cylindres en lignes (Figure 3.5.a)). Il se caractérise par :

- Sa puissance maximale de 338 KW
- Vitesse de rotation : entre 1800 tr/min et 2100 tr/min ; soit une vitesse nominale de 1500 tr/min



a) Moteur M1



b) Moteur M2

Figure 48.5 Motorisations M1 et M2 choisies

- Son volume : 853 mm de profondeur × 1438 mm de longueur × 993 mm de hauteur.
- Normes : respect de la norme Euro 5 et stage III B suivant un programme d'essais chez le fournisseur.
- Le fournisseur M1 équipe ces moteurs par les nouveaux systèmes (SCR et EGR).

Notre deuxième choix du moteur diesel s'est porté sur le moteur M2 est un moteur vertical 6 cylindres (Figure 3.5.b)). Il se caractérise par :

- Le système EGR, système de recirculation des gaz d'échappements, et l'utilisation d'un PM-KAT (pot catalytique) permettant de se passer de la technologie AdBlue tout en

⁽¹⁾ La masse de la locomotive en Allemagne ne doit pas dépasser 88 Tonnes, et en France la masse de la locomotive est limitée à 90 Tonnes.

retrouvant les mêmes performances et respectant la norme Euro 5.

- La régulation de vitesse intégrée. Il s'agit d'un système à common rail de Bosch intégré dans le moteur
- La vitesse de rotation variable entre 1800 tr/min et 2100 tr/min.
- Le respect de la norme Euro 5, son utilisation nous permet de laisser un large choix sur l'utilisation ou non du filtre à particules.
- Puissance qui varie entre 300 KW et 390 KW, sachant que sa puissance nominale est égale à 360 KW.
- Couple nominale de 2080 Nm

Ces deux moteurs correspondent aux contraintes de dimensionnement. Pour effectuer notre choix final entre eux, nous étudierons tout d'abord le choix de l'alternateur/redresseur qui sera accouplé au moteur diesel, ensuite nous effectuerons une étude comparative d'encombrement total (2000 mm environ de longueur).

✿ Alternateur/Redresseur

En ce qui concerne la caractéristique d'alternateur, nous nous sommes dirigés vers les alternateurs à aimants permanents. Ils présentent un intérêt certain comme générateur embarqué (compacité, réduction de l'entretien, fiabilité, rendement élevé, performances accrues, minimisation

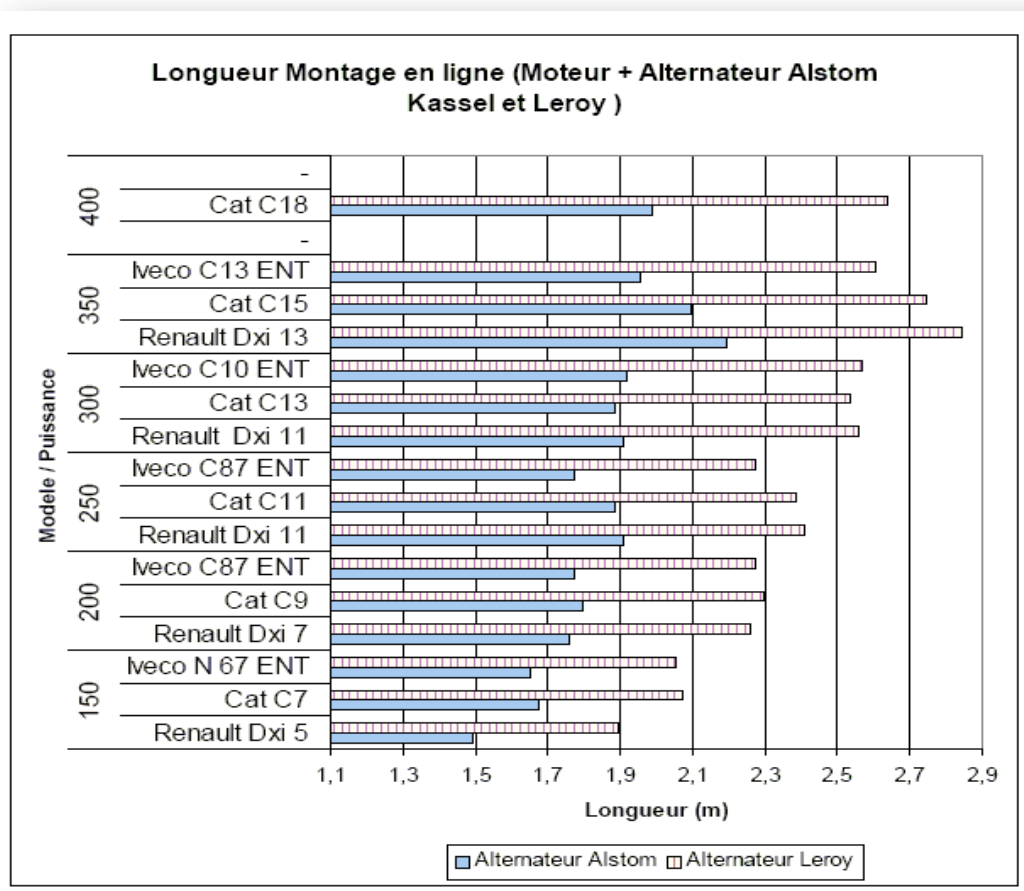


Figure 49.6 Montage en ligne du Moteur + Alternateur Kassel et Leroy Somer

du coût) par rapport aux autres types de machines. La figure 3.6. présente une comparaison dimensionnelle entre un alternateur à aimant permanent produit par ALSTOM Transport Ornans nommé KASSEL, et un autre alternateur qui est une machine généralisée produit par Leroy SOMER. Cette comparaison se base sur la longueur du groupe électrogène en ligne (Moteur diesel +alternateur). Il apparaît clairement qu'il est très intéressant d'utiliser l'alternateur Alstom « Kassel » du fait de sa compacité. D'un point de vu coût, ce petit alternateur (40 K€) ne coûte quasiment pas plus chère qu'un Leroy Somer (30 K€). Sachant que les vitesses de rotation du Kassel sont plus adaptées au type de moteur qu'il serait projeté d'utiliser (2000 tr/min) et que le produit est bien connu et adapté aux contraintes ferroviaires, aux performances électriques (rendement, vitesse adaptée au moteur thermique)

Cet alternateur forme un cylindre de 554 mm de diamètre, deux longueurs différentes sont proposées : 554 mm avec un système de refroidissement à eau, et 700 mm avec un système de refroidissement à air.

Le redresseur est monté complet sur l'alternateur dans la zone de connexion. Le circuit de refroidissement est commun avec l'alternateur.

Il faut noter qu'au début, nous avons envisagé de mettre un redresseur à pont IGBT afin de pouvoir fixer notre bus continu et pouvoir alimenter un ou plusieurs moteurs de traction électrique. Avec les alternateurs synchrones à excitation séparée on met un simple pont à 6 diodes, la tension de sortie DC peut alors être maintenue quasiment constante avec la charge en réglant le courant d'excitation du rotor de l'alternateur. Avec des alternateurs ASYNCHRONES (comme fait Bombardier sur AGC), il faut absolument mettre en sortie un vrai onduleur triphasé et un filtre DC sinon ça ne marche pas, il faut pouvoir magnétiser l'alternateur asynchrone par sa sortie, c'est plus compliqué qu'un simple pont à diodes mais la machine est plus courte. Avec les alternateurs à aimants permanents, nous ne pouvons pas régler la tension de sortie qui va baisser progressivement avec la charge. Nous pourrions mettre alors un redresseur triphasé à IGBT pour maintenir la tension constante. Mais comme notre objectif est de développer une solution technico-économique, nous choisissons donc un redresseur à pont diode triphasé. Donc sur Kassel ou autre réalisation bi-mode avec alternateur synchrone à aimant, nous gardons un simple pont à diode, dans ce la tension de sortie peut varier entre 0 et pleine charge de 15% environ, c'est en général tolérable, il suffit de le prévoir dans le dimensionnement des charges.

L'alternateur Kassel à aimant permanent est donc associé à un redresseur à pont diode. La tension de sortie est de 1500 V DC continu comme notre source hybride fonctionne comme un pantographe virtuel 1500 V DC. Sa fréquence varie entre 80 et 180 HZ, avec un courant de sortie e 200 A. et un volume de 210 mm de profondeur × 520 mm de largeur × 620 mm de hauteur. Sa masse est égale à 28 Kg.

Validation du dimensionnement du groupe électrogène

Après avoir identifié les dimensions des deux moteurs diesels M1 et M2 et du groupe alternateur/redresseur KASSEL à aimant permanent, nous avons effectué dans le tableau 3.1. Une étude comparative de dimensionnement du groupe électrogène complet avec les deux types de motorisations, afin d'effectuer un choix de fournisseur final. Notons que l'alternateur à eau est moins long qu'un alternateur et plus compact de 12%. Deux contraintes principales nous consolident notre choix final du groupe électrogène et défini ainsi ses caractéristiques techniques, qui s'est porté sur le moteur M2 accompagné d'un alternateur KASSEL refroidi à eau, et accouplé à un redresseur à pont

diode. La première contrainte correspondant à la longueur du groupe (moteur M2 +alternateur) qui vaut 1594 mm, et qui est bien plus petite que la longueur du groupe (moteur M1 +alternateur) qui vaut 1940 mm, sachant que la longueur de l'encombrement disponible dans la locomotive est de 2000 mm.

Motoriste	V6 M2 avec SCR	L6 M1 avec SCR ou EGR
Longueur (mm) moteur	1014	1360
Alternateur à eau	580	580
Alternateur à air	710	710
Largeur (mm)	940	850
Masse (Kg) moteur	995	1125
Alternateur à eau	540	540
Alternateur à air	590	590

Tableau XIII.1 Comparaison d'encombrement entre les groupes électrogène M1 et M2

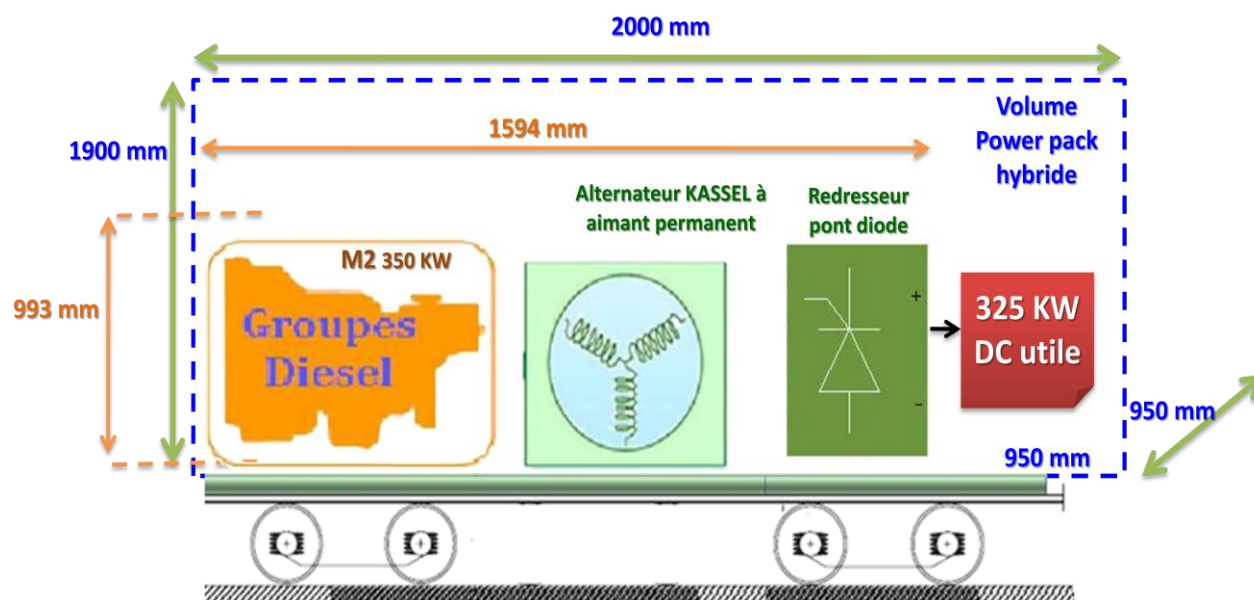


Figure 50.7 Dimensionnement du groupe électrogène du kit hybride

La deuxième contrainte est la masse totale du groupe électrogène M2 correspondant à 1535 Kg, et qui est bien plus petite que la masse du groupe électrogène M1 correspondant à 1665 Kg, sachant que la masse limite de l'encombrement ne doit pas dépasser 1500 Kg. Il reste à vérifier la largeur minimale autorisée du côté couloir car le moteur M2 a une largeur de 940 mm qui est très limite de 950 mm présenté dans le cahier des charges, afin de pouvoir laisser l'espace nécessaire pour le coffre du groupe complet y compris ses auxiliaires, sachant que dans l'architecture interne de la locomotive, il y a certains blocs qui dépassent en largeur la ligne des blocs, donc qui dépassent les 950 mm (profondeur d'encombrement).

Nous interrogeons dans le chapitre 5 sur la conception technique détaillée du groupe électrogène et ses auxiliaires, y compris son intégration dans la locomotive. Notre choix doit se porter sur le moteur M2 accouplé à un alternateur Kassel à aimant permanent refroidi à eau qui est associé à un redresseur à pont diode.

Pour conclure, le groupe électrogène de notre power pack hybride se compose, d'un moteur M2 D2676, avec une puissance de 350 KW et une vitesse de rotation variable entre 1800 tr/min et 2100

tr/min (couple de 2080 Nm), et d'un alternateur à aimant permanent KASSEL associé à un redresseur à pont diode. Le rendement d'alternateur vaut 0.96 et le rendement de son redresseur vaut 0.995. la puissance en sortie du groupe électrogène est égale à 325 KW utile électrique DC. Les dimensions du groupe électrogène sont : 1594 mm de longueur × 940 mm de largeur × 993 mm de hauteur, soit un volume de 1.48 m³, et une masse de 1535 Kg (Voir figure 3.7). La partie auxiliaire du groupe électrogène sera détaillée dans le chapitre 5.

3.2.2. Dimensionnement du pack de batteries NiMH

Dans le cadre de ce projet, nous avons identifié dans le chapitre 2, la source de stockage d'énergie correspondant le plus à notre cahier des charges, et qui est la batterie NiMH. Traditionnellement, les batteries sont utilisées dans des applications où c'est la capacité de stockage et le courant de décharge nominal qui importent. Le courant de charge nominal est très rarement un facteur déterminant. Mais dans une application de véhicule hybridé par du stockage, tous ces paramètres sont déterminants. De plus, il existe des couplages entre certains de ces paramètres. Le processus de dimensionnement des batteries se trouve alors bien plus complexe, dans un contexte d'hybridation, que dans une application classique. Nous proposons, dans la suite de cette section, une technique de dimensionnement qui permet de découpler les différents paramètres dimensionnants.

Pour dimensionner notre pack de batteries, nous devons choisir un module existant dans le marché industriel. Or, ALSTOM traite ses commandes avec deux fournisseurs de batteries pour ces engins ferroviaires et pour les applications hybrides ferroviaires. La locomotive hybride de Stendal comprend un pack de batteries NiCd fourni par un fournisseur de batteries F1, et le Tramway CITADIS de Nice comprend un pack de batteries NiMH fourni par un fournisseur de batteries F2. En contre partie, HOPPECKE ne produit pas des batteries NiMH pour les applications ferroviaires. Du coup, nous choisissons un fournisseur de batteries comme fournisseur des batteries NiMH NHP 10-340 (Figure 3.8), sachant qu'elle répond aux contraintes ferroviaires.

Concernant notre module NHP, c'est un pack qui est composé en lui-même de 10 cellules en série, avec une tension nominale de 12 V (1.2 V par cellule), avec une capacité de 34 Ah.

Un accumulateur peut être considéré comme une pile ayant la propriété de réversibilité des phénomènes chimiques dans certaines conditions (régénération des électrodes et de l'électrolyte par passage d'un courant inverse à celui qui a été débité).

Comme il existe un terme prenant en compte la température dans les équations caractéristiques de l'accumulateur, les définitions suivantes sont à prendre en compte avec la condition d'une température constante.

Capacité nominale C/3 à 20°C	34	Ah
Tension nominale	12	V

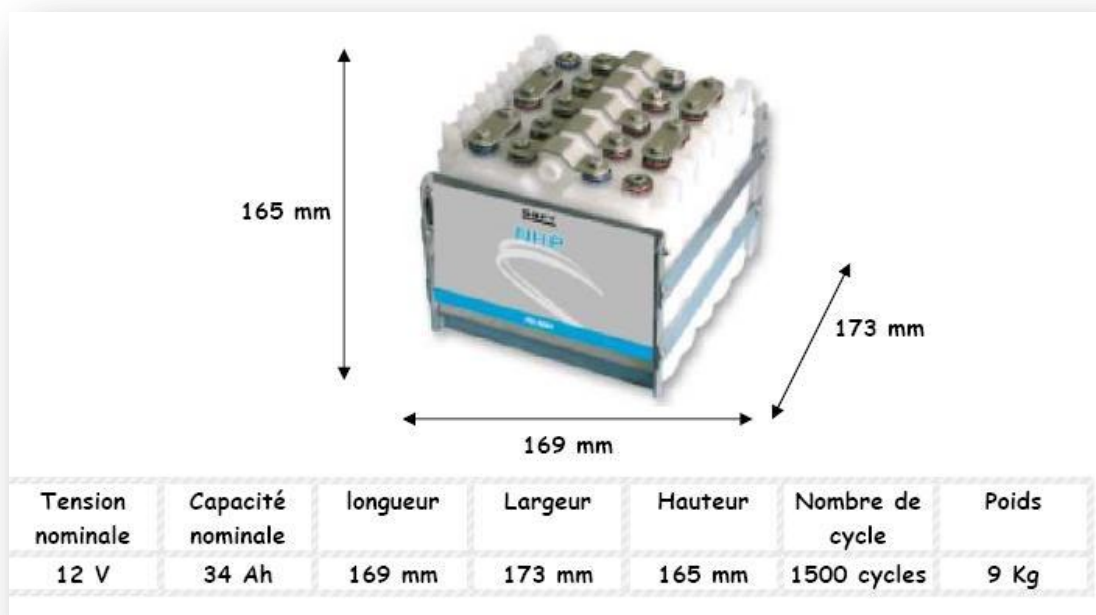


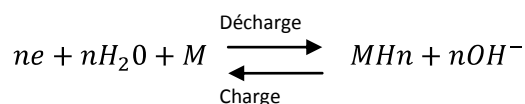
Figure 51.8 Caractéristique d'un module NiMH Du fournisseur de batteries 12 Volts 34 Ah (10 cellules en série)

3.2.2.1. Caractéristiques générales de la batterie NiMH

La batterie Ni-MH recombine les gaz comme l'hydrogène sur des alliages métalliques pour former des oxydes. Ils offrent des performances encore supérieures au Ni-Cd (capacité environ 1,8 fois supérieure) mais son prix est encore dissuasif pour les applications industrielles habituelles.

Le couple nickel-métal hydrure comporte une anode (négative) constitué d'alliage métallique capable d'absorber et de désorber l'hydrogène, associée à une cathode (positive) d'hydroxyde de nickel, immergées dans une solution alcaline (électrolyte) composée de potasse, soude et lithine. Les éléments sont rechargeables et délivrent 1,2 V [12, 19, 20, 23].

Les éléments nickel-métal hydrure qu'ils soient de type 'étanches' pour les plus petites capacités (< 60 Ah) ou 'ouvert' pour des capacités plus importantes (>60 Ah), ne nécessitent pas de maintenance mais un contrôle précis de la charge. Ce contrôle permet notamment de maîtriser les échanges gazeux de l'élément avec l'extérieur et donc la consommation d'eau, pour les éléments ouverts qui sont faiblement pressurisés du fait de leur taille. Il permet également de minimiser l'échauffement lors de la charge permettant ainsi de maximiser capacité et durée de vie.



✿ La capacité

On appelle capacité d'un accumulateur ou d'une pile, la quantité maximale d'électricité que ce générateur peut fournir. Cette capacité est limitée par la consommation des électrodes (généralement la négative) ou de l'électrolyte. Pour un accumulateur, cette capacité est également

limitée par les conditions de réversibilité des phénomènes électrochimiques. Cette quantité est de la forme :

$$Q = \int_0^T i dt$$

t : Durée de passage du courant en seconde

i : intensité en Ampères (constant)

Q : exprimé en Coulombs ou Ampère-heure (1Ah = 3600 C)

La capacité est une grandeur non mesurable et difficilement représentable car sa définition oblige à fixer certains paramètres d'influence pour les tests. C'est pourquoi nous distinguerons 3 types de capacité.

La capacité nominale en n heures : Cn

La capacité nominale Cn représente l'énergie que peut délivrer la batterie à partir de son état de pleine charge et dans un environnement de référence pour terminer à la tension d'arrêt. Cette mesure s'effectue lors d'une décharge à courant constant à $I=Cn/n$ à la température nominale θ_n pendant n heures. Les valeurs utilisées habituellement par les constructeurs sont n=20, 10, 5 ou 3 heures et 1,75V ou 1,8V pour la tension d'arrêt. Chaque constructeur utilise des conditions de tests différentes.

La capacité nominale est donnée par $C_n = \int_{t_0}^{t_a} I \cdot dt$ à $\theta_a = \theta_n$

Avec

t_a : temps pour atteindre la tension d'arrêt (généralement 1.75V par élément)

I : intensité constante de décharge $I=Cn/n$

Le module NHP 10-340 est caractérisé par une capacité nominale de 34 Ah.

La capacité stockée : Qs

Elle représente l'énergie que pourrait débiter la batterie à l'instant t si elle devait le faire dans les conditions de références. Elle est de la forme :

$$Q_s(t) = \int_0^t n_1(t) \cdot i \cdot dt$$

Avec i =courant batterie ($i>0$ si charge et $i<0$ si décharge)

La fonction $n_1(t)$ représente la fonction de transposition tenant compte des paramètres d'influence à l'instant t pour évaluer l'efficacité de la charge.

$$n_1 = f(i(t), Q_s(t), \theta(t))$$

La capacité récupérable : Qr

Elle représente l'énergie que pourra restituer l'accumulateur dans les conditions actuelles si elles restent constantes. Elle est la transposition de la capacité stockée Qs donnée pour un environnement de référence dans l'environnement actuel.

$$Q_r(t) = n_2(t) \cdot Q_s(t)$$

La fonction $n_2(t)$ représente la fonction de transposition tenant compte des paramètres d'influence à l'instant t pour évaluer l'efficacité de la décharge.

$$n_2(t) = f(i(t), Q_s(t), \theta(t))$$

✿ Le rendement énergétique

Lors de la charge, l'énergie W_c est fournie à l'accumulateur et l'énergie utile restituée à la décharge W_d pendant un temps T est donnée par :

$$w_d = \int_0^T u i \cdot dt$$

Avec u différence de potentiel aux bornes de l'accumulateur.

Il est possible de définir le rendement énergétique w comme le rapport de W_d et W_c .

$$w = \frac{W_d}{W_c}$$

Ce rendement est typiquement de 70 à 80% dans les meilleures conditions.

✿ Le rendement en courant

Il est possible de définir le même type de rendement sur les quantités de courant. On notera q le rapport entre la quantité d'électricité restituée lors de la décharge Q_d et celle fournie lors de la charge Q_c .

$$q = \frac{Q_d}{Q_c}$$

✿ Cellules, modules et pack design

L'ordre 8 à 15 mohm, et une résistance interne $\Delta V/\Delta I$ qui varie entre 15 à 30 mohm. En revanche, une cellule de 100 Ah de NiMH a une impédance AC égale à 0.4 mohm, et une résistance interne de 0.9 mOhm. En dépit du bas la résistance interne de la batterie est toujours un souci dû aux impulsions extrêmement à forte intensité résultant du freinage rétroactif et pendant l'accélération de véhicule. Même les effets thermiques d' I^2R à ces courants élevés sont petits par rapport au surchauffement lors des courants de surcharge. En conséquence, un aspect essentiel de NiMH lors de sa conception de batterie est la phase de la création d'une gestion thermique [43].

La gestion thermique appropriée commence à l'électrode négative d'hydrure en métal, par l'identification de la laquelle la chaleur de surcharge est produit sur la surface de l'électrode d'hydrure où l'oxygène est recombinaé. La chaleur doit émigrer de l'électrode négative à la caisse de cellules et donc la bonne conductivité thermique dans le paquet d'électrode et de pile d'électrode est très importante.

Des cellules sont habituellement empaquetées dans un module de 12 volts, avec le concept important étant les cellules sont liées ensemble dans un arrangement dos à dos. Une caractéristique de conception importante est que les cellules à chaque extrémité auront un montant beaucoup plus élevé de disponible extérieur exposé pour le refroidissement convecteur, et soulèvent l'inquiétude du déséquilibre thermique dans un module et de l'état résultant de déséquilibre de charge qui mènera à l'échec prématuré. Par conséquent, la conception appropriée de module doit inclure des considérations de plaque d'extrémité et de radiateur dans un module.

Des modules sont empaquetés dans une série de configurations. Dans les divers arrangements des empaquetages, les considérations importantes de conception sont de créer une distance minimum entre les différents modules lors de leurs assemblages comme : air ou canaux

d'écoulement d'eau et les caractéristiques de radiateur de plateau de batterie pour égaliser le refroidissement d'un module à un autre.

Concernant notre module du fournisseur de batteries NHP 10-340, c'est un pack qui est composé en lui-même de 10 cellules en série, avec une tension nominale de 12 V (1.2 V par cellule), avec une capacité de 34 Ah (Voir Figure 3.8).

☀ Effet de la température

À la basse température, NiMH a réduit la capacité et la puissance de décharge comparées à NiCd parce que l'électrode d'hydrure en métal est due polariser à la génération de l'eau sur la décharge. D'autre part, part, tandis que NiCd a une certaine difficulté avec le remplissage aux températures froides, et en particulier la charge à la température froide, NiMH est beaucoup moins sensible à cet effet. L'efficacité à hautes températures de charge est une question d'importance significative pour des applications de propulsion. Des véhicules électriques et hybrides seront utilisés dans des climats chauds de temps, où la gamme de véhicule en été est d'importance critique pour l'utilisateur. Les batteries de NiMH de première génération pour l'application d'EV perdraient presque 50% de capacité de température ambiante une fois chargées à 60°C (Figure 3.9) [43].

Le problème avec l'acceptation à hautes températures de charge est les caractéristiques d'évolution de l'oxygène de l'électrode de positif d'hydroxyde de nickel. Normalement, à la température ambiante, l'électrode d'hydroxyde de nickel a l'acceptation presque complète de charge jusqu'à ce que la charge environ de 80% ait entré quand la réaction de concurrence de l'évolution de l'oxygène commence.

La pleine charge, le remplissage continué cause l'évolution 100% de l'oxygène à l'électrode d'hydroxyde de nickel, et la migration de l'oxygène à l'électrode d'hydrure ou de cadmium en métal fournit le mécanisme bien connu de surcharge de recombinaison de l'oxygène. Aux températures

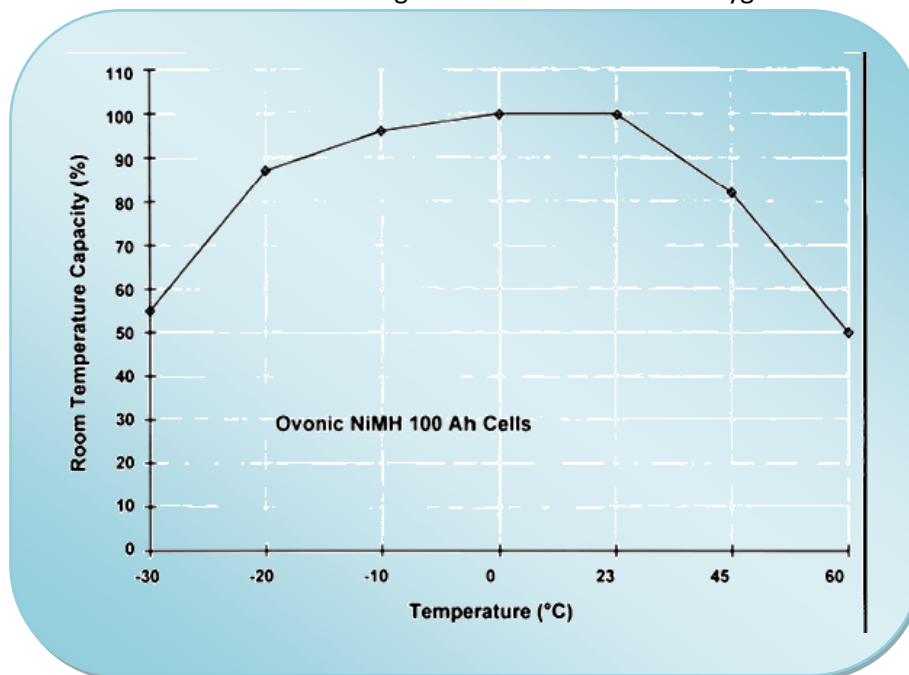


Figure 52.9 Effet de la température sur la batterie NiMH 100 Ah [43]

élevées, l'issue est donc cette évolution de l'oxygène se produit aux états beaucoup inférieurs de charge, et l'acceptation de charge de total est réduite.

✿ Limites technologiques des batteries NiMH

Les batteries de NiMH sont extrêmement flexibles en acceptant des méthodes diverses de charge. Le facteur de conception principal est d'empêcher la surcharge excessive, particulièrement aux taux élevés, afin d'éviter des pertes de mise à l'air libre d'habillage et d'électrolyte de la chaleur. Plusieurs méthodes de sentir la surcharge sont communes, y compris la température absolue, le ΔT , dT/dt , $-\Delta V$ et l'élévation de pression. Dans tous les cas, le mécanisme de /recombinaison d'évolution de l'oxygène qui crée la chaleur sert de base à chaque méthode de détection.

L'énergie totale que peut stocker un élément de batterie NiMH est donnée de façon approximative par :

$$E_{BAT} = C_{nominal} \cdot V_{module_nominal}$$

Les courants nominaux de décharge et de charge spécifiés sont ceux d'une utilisation "nominale". Pour un véhicule hybride, la batterie est sollicitée dans des limites plus "sévères", ce qui entraîne un vieillissement plus rapide.

Soit, avec la convention génératrice :

$$\begin{cases} I_{dch} = C_{nominal} \text{ temps}_{dch} \\ I_{ch} = C_{nominal} \text{ temps}_{ch} \end{cases}$$

Sachant que $I_{Bmin} \leq I_B \leq I_{Bmax}$

En faisant l'approximation de la tension constante⁽¹⁾, les limitations en puissance de décharge et de charge peuvent s'écrire :

$$\begin{cases} P_{dch_BAT} = I_{dch} \times V_{module_nominal} \\ P_{ch_BAT} = -I_{ch} \times V_{module_nominal} \end{cases}$$

Considérons une batterie dimensionnée à une capacité de stockage EBT. Les contraintes technologiques imposent une limite en puissance de charge Pch et de décharge Pdch. Nous allons introduire deux variables temps_{dch} et temps_{ch} représentant respectivement le temps minimum de décharge⁽¹⁾ et le temps minimum de charge⁽²⁾. Ce sont ces deux nouvelles variables qui lient les puissances et la capacité de stockage⁽³⁾ (attention à la convention des signes).

$$\begin{cases} \text{temps}_{dch} \leq \frac{E_{BAT}}{P_{dch_BAT}} \\ \text{temps}_{ch} \leq -\frac{E_{BAT}}{P_{ch_BAT}} \end{cases}$$

Ces inéquations délimitent une région dans le plan énergie – puissance, que nous appelons le domaine de validité du dimensionnement des batteries. Nous parlerons de graphe des contraintes

technologiques, pour se référer à l'ensemble du plan énergie — puissance contenant le domaine de validité du dimensionnement des batteries.

Il faut imposer une contrainte de maintien de l'état de charge de la batterie. Il est nécessaire de restreindre l'évolution de l'état de charge relatif SOC de telle manière que l'état de charge absolu SOC reste dans la plage préconisée par le constructeur de la batterie, $[SOC_{min}; SOC_{max}]$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$$

Dans une mission de batterie, il est important de faire la différence entre les phases de charge et les phases de décharge. Pour le pack de batteries, l'expression "passer la mission" ne signifie pas l'intégration de la mission entière, mais simplement que le pack fournit toute la puissance demandée pendant les phases de décharge (partie positive d'après la convention de signe). Les phases de charge sont certes utiles pour éviter de trop "creuser" l'état de charge des batteries en cours de mission mais leur prise en compte n'est pas une obligation. Cette remarque est très importante car dans les configurations où la puissance nominale du groupe Diesel est élevée, la prise en compte sans discernement de toute l'énergie "stockable" peut conduire à un surdimensionnement excessif du pack de batteries.

3.2.2.2. Méthode analytique de dimensionnement des batteries de traction NiMH

Dans cette section, nous détaillons une méthode analytique de dimensionnement du pack de batteries NiMH pour effectuer la traction hybride ferroviaire. Pour cela, nous avons considéré un hacheur bidirectionnel DC-DC, associé à notre pack de batteries. Les caractéristiques du circuit équivalent entre le hacheur et la batterie sont représentées dans la figure 3.10.

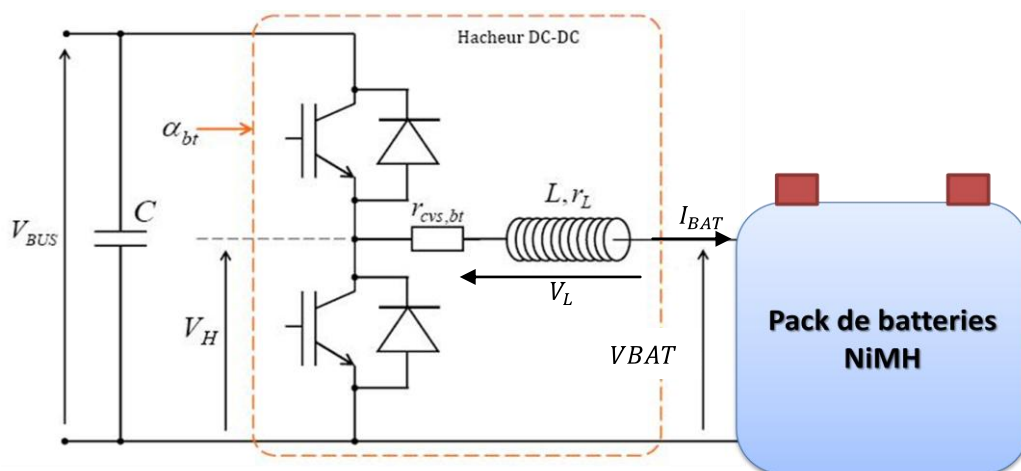


Figure 53.10 Circuit électrique équivalent du pack de batteries et son hacheur bidirectionnel

Pour cela, nous sommes partis de plusieurs hypothèses nécessaires pour notre dimensionnement, et qui sont :

- ☞ Connaître la tension du bus principal V_{BUS} , qui est égale dans notre cas à 1500 V DC

- ☞ Choisir un module de batteries existant dans le marché ; pour notre kit hybride embarqué, il s'agit d'un module NHP 34 Ah, ayant une tension nominale de 12 V sachant que le module se compose de 10 cellules en série, soit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{cellule_nominale} = 1.2 V \\ V_{cellule_minimale} = 0.9 V \text{ Et } V_{cellule_maximale} = 1.5 V \\ C_{cellule_nominale} = 34 Ah \end{array} \right.$$

- ☞ Limiter le rapport cyclique du hacheur. Pour limiter les pertes entre le bloc des batteries et le bus continu, il ne faut pas choisir une petite valeur pour le rapport cyclique, ni une très grande valeur pour ne pas avoir un surdimensionnement du pack en série. Le meilleur rapport cyclique pour le hacheur bidirectionnel tourne autour de 0.45 à 0.5. Ainsi, on peut donc supposer le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{mini} = 7\% \text{ donnée générale pour les hacheurs bidirectionnels} \\ \alpha_{maxi} = 84\% \text{ donnée générale pour les hacheurs bidirectionnels} \end{array} \right.$$

$$\text{Et donc : } \alpha_{moyenne\ nominale} = \frac{\alpha_{mini} + \alpha_{maxi}}{2} = \frac{0.07 + 0.84}{2} = 0.45$$

A partir ces trois hypothèses, nous pouvons donc progresser dans notre dimensionnement. Notons qu'il a été considéré que le pack de batteries est dans une phase de chargement et donc le hacheur bidirectionnel fonctionne comme un abaisseur, d'après la figure 3.10, que :

$$\left. \begin{array}{l} VS = V_{BAT} + VL \\ VS = \alpha * V_{BUS} \end{array} \right\} \iff V_{BAT} + VL = \alpha * V_{BUS}$$

L'annexe C comporte les détails de la méthode analytique qui nous a permis d'obtenir les relations de calcul des nombres de cellules en série, et en parallèle, ainsi que la limite de notre état de charge du pack de batteries.

✿ Détermination du nombre de cellules en série $N_{s_{BAT}}$

Considérons que la tension du bus principal est fixe, et que notre rapport cyclique $\alpha \in [\alpha_{min}, \alpha_{max}]$. Soit donc :

$$\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max} \Rightarrow$$

$$\alpha_{min} * V_{BUS} \leq \alpha * V_{BUS} \leq \alpha_{max} * V_{BUS} \Rightarrow$$

$$\alpha_{min} * V_{BUS} \leq V_{BAT} + VL \leq \alpha_{max} * V_{BUS} \Rightarrow$$

VL représente la tension aux bornes de la bobine qui se trouve en série avec le pack afin de lisser le courant de charge et de recharge.

D'où :

$$NSbat_{moyen\ nominale} = \frac{\alpha_{moyenne}}{V_{cellule_{nominale}}} * VBUS$$

✿ Détermination du nombre de branches en parallèle N_{PBAT}

Pour définir le nombre de branches en parallèle, il faut mettre deux nouvelles hypothèses :

- ☞ Calculer la puissance maximale et la puissance minimale sollicitées de la batterie lors du programme de traction
- ☞ Calculer l'énergie maximale et l'énergie minimale sollicitées de la batterie lors du programme de traction

Ces deux hypothèses ont été déjà traitées dans le chapitre 2, comme elles représentent un dimensionnement énergétique de batteries.

Donc pour obtenir la relation qui nous donne le dimensionnement de nombre de branche qu'il faut avoir, nous partons de l'équation suivante :

$$PBAT = VBAT * IBAT \Rightarrow IBAT = \frac{PBAT}{VBAT}, \quad \text{soit aussi} \quad IBAT_{max} = \frac{PBAT_{max}}{VBAT_{max}}$$

De même, notons les équations suivantes :

$$\left. \begin{array}{l} PBAT = NBAT_{totale} * P_{cellule_{batt}} \\ VBAT = NSBAT * V_{cellule_{batt}} \\ IBAT = NPBAT * i_{cellule_{batt}} \\ NBAT_{totale} = NSBAT + NPBAT \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{NSBAT est le nombre total des cellules en série} \\ \text{NPBAT est le nombre total des branches en parallèle} \end{array}$$

Ensuite, nous exprimons le courant de la batterie IBAT en fonction de la capacité nominale de la batterie, car cette information est donnée dans la DATA SHEET d'un fournisseur de batterie ; d'où :

$$CBAT_{nominale} = IBAT * \text{temps de décharge}$$

$$\text{or } IBAT = \frac{PBAT}{VBAT} = \frac{NPBAT * C_{batt_{cellule}}}{\text{temps}_{décharge}}$$

Grâce à cette identification, nous exprimons le temps de décharge de la batterie en fonctions des paramètres connus, avec :

$$CBAT_{nominale} = (NPBAT * C_{batt_{cellule_nominale}})$$

$$\Leftrightarrow \text{temps}_{décharge} = \frac{NSBAT * NPBAT}{NSBAT + NPBAT * P_{cellule_{batt}}} * C_{batt_{cellule}} * V_{cellule_{batt}}$$

Comme nous le remarquons, le temps_{décharge} s'exprime en fonction de NSBAT et NPBAT, sachant que NSBAT a déjà été déterminé. Il reste alors deux inconnues à déterminer. C'est pour cela, la variable temps_{décharge} peut-être obtenue suite au cahier des charges élaborés après avoir déterminé la valeur énergétique minimale et maximale, ainsi que la valeur de la puissance minimale et maximale ; nous pouvons écrire donc :

$$EBAT = PBAT * temps_{décharge} \Leftrightarrow \begin{cases} EBAT_{mini} = PBAT_{mini} * temps_{décharge_{mini}} \\ EBAT_{maxi} = PBAT_{maxi} * temps_{décharge_{maxi}} \end{cases}$$

Avec :

- **EBAT (mini)** : représente la valeur énergétique totale et minimale du cahier de charges élaboré du système de stockage d'énergie.
- **EBAT (maxi)** : représente la valeur énergétique totale et maximale du cahier des charges élaboré du système de stockage d'énergie
- **PBAT (mini)** : représente la valeur absolue d'un pic de puissance minimum présentée dans le cahier des charges
- **PBAT (maxi)** : représente la valeur absolue d'un pic de puissance maximale présentée dans le cahier

$$temps_{décharge} = temps_{décharge_{moyen}} = \frac{temps_{décharge_{mini}} + temps_{décharge_{maxi}}}{2}$$

$$\text{Or: } icellule_{batt} = \frac{Cbatt_{cellule}}{temps_{décharge}}$$

Avec $IBAT = NPBAT * icellule_{batt}$;

Il s'agit ensuite de déterminer un régime connu dans notre cahier des charges pour pouvoir obtenir le nombre de branche en parallèle ; c'est pour cela nous avons pris en compte le régime le plus sévère qui dimensionne les contraintes maximales de consommation énergétique. D'où le **régime de puissance consommatrice maximale** avec :

$$IBAT_{max} = \frac{PBAT_{max}}{VBAT_{max}} \text{ Et } IBAT = NPBAT * icellule_{batt}$$

Avec $VBAT_{max} = NSBAT * Vcellule_{batt_{max}}$

Ce qui nous donne :

$$IBAT_{max} = NPBAT * \frac{Cbatt_{cellule_{max}}}{temps_{décharge_{moyen}}$$

D'où :

$$NPBAT = \frac{PBAT_{max} * 1000}{VBAT_{max}} * temps_{décharge_{moyen}} * \frac{1}{Cbatt_{cellule_{max}}}$$

✿ Détermination des limites de l'état de charge SOC

Il faut imposer une contrainte de maintien de l'état de charge de la batterie. Il est nécessaire de restreindre l'évolution de l'état de charge relatif SOC de telle manière que l'état de charge absolu SOC reste dans la plage préconisée par le constructeur de la batterie, $[SOC_{min}; SOC_{max}]$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$$

L'état de charge de la batterie se limite généralement entre 0% et 100%, mais la profondeur de décharge de la batterie limite son état de décharge minimale, et la fonction de la surcharge de la batterie limite son état de charge maximale. Soit donc :

$$\text{Et} \quad \begin{aligned} SOC_{min} (\%) &= f(\text{profondeur de décharge}) \\ SOC_{max} (\%) &= f(\text{surcharge de la batterie}) \end{aligned}$$

$$\text{Avec} \quad SOC_{\%} t = 100 * \left(1 - \frac{t_{initial} i_{BAT} * dt}{CBAT_{nominale}}\right)$$

Dans notre méthode analytique, nous calculons les deux limites de SOC, en se basant sur les résultats de dimensionnement énergétique du système de stockage d'énergie présentés dans le chapitre 2. Nous retirons de ces résultats, les valeurs de consommation énergétique utile pour le dimensionnement de notre source, spécialement la valeur maximale, soit $Energie_{utile\ maximale} (KWh)$, et la valeur minimale, soit $Energie_{utile\ minimale} (KWh)$.

$$\left\{ \begin{aligned} & \mathbf{Energie_{utile\ maximale} KWh} \\ & = NP_{BAT} + NS_{BAT} * V_{cellule_{batt_{max}}} * icellule_{batt_{max}} * 1000 * temps_{décharge\ moyen} \\ & \mathbf{Energie_{utile\ minimale} KWh} \\ & = NP_{BAT} + NS_{BAT} * V_{cellule_{batt_{minimale}}} * icellule_{batt_{minimal}} * 1000 * temps_{décharge\ moyen} \end{aligned} \right.$$

D'où :

$$\text{Et} \quad \begin{aligned} SOC_{min} \% &= \frac{Energie_{utile\ minimale} KWh}{Energie_{totale\ BAT}} * 100 \\ SOC_{max} \% &= \frac{Energie_{utile\ maximale} KWh}{Energie_{totale\ BAT}} * 100 \end{aligned}$$

Avec $Energie_{totale} BAT \text{ KWh} = \frac{NSBAT * V_{cellule_{batt_{nominal}}} * NPBAT * C_{batt_{cellule_{nominal}}}}{1000}$ qui représente l'énergie totale nominale des batteries.

3.2.2.3 Analyse et validation des résultats de dimensionnement

Après avoir développé les différentes équations permettant de calculer dimensionner un pack de batteries de traction, nous allons valider nos résultats par le module d'un fournisseur de batteries NHP34 Ah. Il dépend d'une tension nominale de 12 Volts, soit une tension nominale de cellule de 1.2 Volts, et a une capacité nominale de 34 Ah.

✿ Calcul de NSBAT pour le pack de batteries du power pack hybride

Comme :

$$NSbat_{moyen \text{ nominale}} = \frac{\alpha \text{ moyenne}}{V_{cellule_{nominale}}} * VBUS$$

Nous obtenons ainsi : $NSBAT = \frac{0.45}{1.2} * 1500 \Rightarrow \text{NSBAT} = 562.5 \text{ cellules}$

Or chaque module du fournisseur de batteries est composé de 10 cellules de batteries NiMH associées en série, nous obtenons donc le nombre des module en série = $(NSBAT/10) = 56.2 \text{ modules}$ = 56 modules en série.

Pour conclure, nous aurions besoins pour notre pack de batteries du kit autonome embarqué 56 modules en série.

✿ Calcul de NPBAT pour le pack de batteries du power pack hybride

Comme nous l'avons présenté précédemment, nous utiliserons les résultats de dimensionnement énergétique de la source de stockage, et nous identifions ainsi :

- **EBAT (mini)** = 29 KWh obtenu dans le tableau du cahier des charges de batterie
- **EBAT (maxi)** = 32 KWh obtenu dans le tableau du cahier des charges de batterie
- **PBAT (mini)** = 100 KW obtenu dans le tableau du cahier des charges de batterie
- **PBAT (maxi)** = 200 KW obtenu dans le tableau du cahier des charges de batterie
- **VBAT (max)** = $(NSBAT * \text{tension nominale du module}) = 56 * 12 = 672 \text{ volts}$
- **Cbatt_cellule (max)** = capacité d'une cellule qui est équivalente à la capacité du module = 34 Ah pour une cellule de tension 1.2 V, soit 34 Ah pour un module en tension de 12 Volts

D'où : $temps_{décharge_{mini}} = \frac{29}{100} = 0.29 \text{ heures}$

Et $temps_{décharge_{maxi}} = \frac{32}{200} = 0.16 \text{ heures}$

Comme :

$$temps_{décharge_{moyen}} = \frac{0.29 + 0.16}{2} = 0.226 \text{ heures}$$

$$NPBAT = \frac{PBAT_{max} * 1000}{VBAT_{max}} * temps_{décharge\ moyen} * \frac{1}{Cbatt_{cellule\ max}}$$

Nous obtenons ainsi : $NPBAT = \frac{200*1000}{672} * 0.226 * \frac{1}{34} = 1.9783$, soit $NPBAT \approx 2$

Pour le pack de batteries de notre groupe hybride, nous aurions donc besoin de deux branches en parallèle, dont chaque branche se compose de 56 modules en série.

✿ Calcul des limites de SOC pour le pack de batteries du power pack hybride

Pour effectuer le calcul des limites de SOC, nous avons identifié tout d'abord :

- L'énergie minimale utile de ce pack de batteries est égale à 8.13 KWh pour une puissance de 200 KW, correspondant au besoin de la locomotive FRET en transit vers un autre point commercial.
- l'énergie maximale utile de ce pack est égale à 32 KWh (voir bilan cycle charge/décharge) pour la même puissance de 200 KW, correspondant au cycle de besoin « chargement de port avec Eu = 24 KWh » + « besoin transit locomotive en haut le pied vers un nouveau point commercial avec Eu = 8.13 KWh ».

Calculant tout d'abord :

$$\begin{aligned} \text{Energie}_{totale\ BAT} \text{ KWh} &= \frac{NSBAT * V_{cellule\ batt\ nominal} * NPBAT * Cbatt_{cellule\ nominal}}{1000} \\ &= \frac{560 * 1.2 * (2 * 34)}{1000} = 45.696 \text{ KWh} \approx 46 \text{ KWh} \end{aligned}$$

D'où:

$$SOC_{\min} \% = \frac{\text{Energie}_{utile\ minimale} \text{ KWh}}{\text{Energie}_{totale\ BAT}} * 100 = \frac{8.13}{46} * 100 = 18\% \approx 20\%$$

qui correspond à une marge de sécurité pour la décharge des batteries

Et

$$SOC_{\max} \% = \frac{\text{Energie}_{utile\ maximale} \text{ KWh}}{\text{Energie}_{totale\ BAT}} * 100 = \frac{32}{46} * 100 = 69.8\% \approx 70\%$$

Donc pour le pack de batteries de notre source hybride embarqué, le SOC $\in [20\%; 70\%]$

✿ Validation des résultats de dimensionnement

La méthode analytique de dimensionnement du pack de batteries a été validée avec le fournisseur de batteries, en lui fournissant le cahier des charge représentant le dimensionnement énergétique des missions⁽¹⁾ ayant sollicitées d'un système de stockage d'énergie.

⁽¹⁾ trois missions sont pris en compte: chargement de port 1800 Tonnes, transit d'une FRET en haut le pied vers un nouveau point commercial et desserte locale proche du terminal 400 Tonnes. Le besoin desserte loin de terminal 1800 Tonnes a été exclu de notre dimensionnement car il sollicite un réservoir de gasoil de 500 Litres minimum.

chargement en port	1 ^{er} pic de puissance	2 ^{ème} pic de puissance	3 ^{ème} pic de puissance	4 ^{ème} pic de puissance	5 ^{ème} pic de puissance	6 ^{ème} pic de puissance	Performance SSE totale Selon le besoin
P_{max}^{SSE}	160 KW	50 KW	21 KW	190 KW	20 KW	20 KW	200 KW
durée du pic	290 seconds	45 Seconds	200 Seconds	150 Seconds	150 Seconds	150 Seconds	200 KW
E_u	12 KWh	0.625 KWh	1.66 KWh	7.91 KWh	0.833 KWh	0.833 KWh	24 KWh

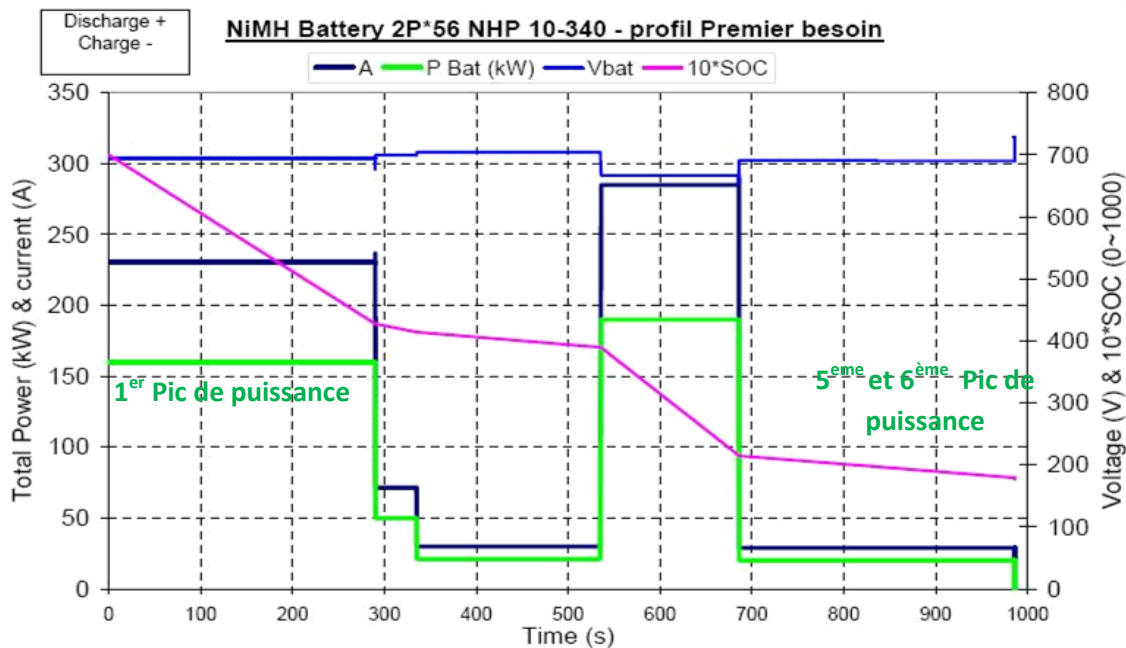


Figure 54.11 Batteries NIMH du kit hybride en fonction du profil de puissance –

Suite à la réception du cahier des charges, une première évaluation électrique est réalisée par le fournisseur de batteries pour permettre, si elle correspond bien à la demande, de donner un dimensionnement mécanique. La demande en terme de température d'utilisation est de $[-20^{\circ}\text{C} ; 70^{\circ}\text{C}]$. Il sera nécessaire de mettre en place un groupe de régulation thermique qui est à dimensionner. Le fournisseur donc nous a proposé un pack de batteries qui se composent de 56 Modules NHP 10-340 en série et 2 branches en parallèle. Le fournisseur de batteries a considéré pour le dimensionnement un état de charge initial à 70%, correspondant au départ d'un état de charge de 90% et à un fading en vieillissement de 10%, plus un talon de 10% pour rester dans un mode de fonctionnement de type hybride (avec de nombreux cycles lors de la vie de la batterie). Soit un SOC_{\max} de 70° et un SOC_{\min} de 20%. Des simulations d'un modèle équivalent moyen et théorique de la batterie ont été réalisées par un fournisseur de batteries dans un premier temps pour les trois profils de missions du système de stockage de notre power pack hybride, afin d'étudier la réponse du pack de batteries s'il correspond bien à notre dimensionnement effectué. Nous présentons dans la figure 3.11, la réponse de la batterie de notre source hybride embarquée en fonction de profil de mission du chargement de port. Le résultat obtenu valide le dimensionnement de notre pack de batteries, comme le montre la courbe. En fonction du profil de pics de puissance en fonction de temps, l'état de charge de la batterie décroît de 70% à 20%, et la tension moyenne de la batterie est de 672 V. pour un pic de puissance maximal de 190 KW, nous débitons un courant de 280 A.

La validation de dimensionnement du pack de batteries ne se limitera pas qu'aux résultats obtenus par le fournisseur, car si nous le remarquons, la courbe dans la figure 3.11 est un modèle théorique. Nous effectuerons des essais expérimentaux à échelle réduite qui nous valideront le dimensionnement du pack de batteries ainsi que ces performances, et qui seront présentés dans la quatrième section de ce chapitre.

3.2.2.4. Comparaison de dimensionnement entre batteries NiMH et Li-ion

Dans le chapitre 2, nous avons identifié deux technologies de batteries potentielles pour notre projet, NiMH et Li-ion, sachant que notre choix définitif était les batteries NiMH comme elles sont des produits présentes dans le marché industriel, par rapport aux batteries Li-ion.

Nous avons un bilan comparatif d'encombrement entre ces deux types, tout simplement car les batteries Li-ion constitue une solution potentielle pour le futur produit de notre kit hybride, pour le long terme, les batteries NiMH sont une solution à court terme.

L'électrochimie lithium-ion est fondée sur l'emploi de composés d'insertion du lithium. L'électrode négative (anode) est constituée de graphite et l'électrode positive (cathode) est un composé métallique comportant du lithium. Le Li-ion doit son exceptionnelle aptitude au cyclage à la préservation de la structure de ses électrodes : la charge et de la décharge se traduisent seulement par un échange d'ions lithium entre les électrodes par l'intermédiaire de l'électrolyte. Du fait de la tension élevée (jusqu'à 4,2 V), il s'agit d'un électrolyte non aqueux, constitué principalement d'un mélange de carbonates organiques.

Différentes matières actives pour la positive sont employées: oxydes lithiés de cobalt, de nickel, d'aluminium ou de manganèse ou phosphate de fer et de lithium. Le fournisseur de batteries bénéficie d'une expérience sans égale de plus de 15 ans avec l'oxyde de nickel dopé (NCA) qui présente la meilleure aptitude en termes de cyclage et de durée d'utilisation, nécessaires aux applications professionnelles.

Le fournisseur de batteries a développé des éléments de moyenne et grande taille, cylindriques ou quasi-prismatiques, en particulier en variant le compromis énergie-puissance, de 150 W/kg pour une décharge complète en 2 heures à 65 Wh/kg pour une décharge complète en 15 secondes. Parmi les autres propriétés remarquables, le rendement faradique de charge (proche de 100%), la durée de vie calendaire (plus de 20 ans à température ambiante), la faible autodécharge (moins de 5 % par an), le fonctionnement entre - 30 et + 60 °C et la possibilité de connaître l'état de charge grâce à la mesure de la tension.

Les caractéristiques spécifiques des éléments Li-ion exigent un système adapté de gestion et de contrôle de la batterie. Le contrôle de la charge et de la décharge, le système d'interface avec l'application, la communication et la sécurité doivent être considéré comme un tout et doivent être optimisés en fonction du type d'application et des conditions de fonctionnement.

L'offre de Le fournisseur de batteries inclut la fabrication des divers types d'éléments (listés ci-dessous), des systèmes de management des batteries, y compris la régulation thermique et l'interface mécanique avec l'application, ainsi que son savoir-faire en électronique, en architecture systèmes et en gestion de projet.

Les éléments VLV très haute puissance rechargeables lithium-ion (Li-ion) de Le fournisseur de batteries sont particulièrement adaptés à une variété d'applications demandant une très forte puissance et une très forte impulsion de courant. La gamme VLV comprend 3 éléments de différentes

tailles et capacités : VL4V (4 Ah), VL12V (12 Ah), VL22V (22 Ah). Ils sont fournis uniquement sous forme d'un système de batteries personnalisé totalement intégré. Leurs Avantages sont : très haute puissance, capacité de délivrer une puissance à faible température, sans maintenance, cyclabilité étendue, très longue durée en service.

Nous avons choisi une batterie Li-ion du fournisseur de batteries nommé VL12V dont les caractéristiques sont présentes dans la figure 3.12., qui est un produit en phase d'industrialisation et de validation. Sa température de fonctionnement est limitée entre -60°C et 60°C.

Tension nominale	3.65 V
Capacité nominale	14 Ah
Hauteur	173 mm
Diamètre	47 mm
poids	0.64 Kg
Volume	0.27 Litres




Figure 55.12 Caractéristique du module Li-ion VL12V de SAFT

Nous calculons donc le nombre de cellules en série avec la batterie Li-ion pour l'application, et qui est :

$$NSbat_{moyen\ nominale} = \frac{\alpha_{moyenne}}{V_{cellule\ nominale}} * VBUS$$

$$\text{Nous obtenons ainsi : } NSBAT = \frac{0.45}{3.6} * 1500 \Rightarrow \mathbf{NSBAT = 185\ cellules}$$

Le nombre de branches en parallèle est :

$$NPBAT = \frac{PBAT_{max} * 1000}{VBAT_{max}} * temps_{décharge\ moyen} * \frac{1}{Cbatt_{cellule\ max}}$$

$$\text{Et } VBAT_{max} = 185\ cellules * 3.65 = 675.25V$$

$$\text{Nous obtenons ainsi : } NPBAT = \frac{200 * 1000}{675.25} * 0.226 * \frac{1}{14} = 4.78, \mathbf{\text{soit } NPBAT \approx 5\ branches}$$

Nous remarquons, après avoir dimensionné le pack de batteries Li-ion pour notre source hybride, et d'après le bilan comparatif établi dans le Tableau 3.2., que les batteries Li-ion sont beaucoup plus compactes que les batteries NiMH.

Technologies de Batteries	Température de fonctionnement	NSBAT	NPBAT	Nombre total de cellules	Poids	Volume
NiMH NHP 340-10	[-20°C ; 70°C]	560 cellules	2 branches	1120 cellules	1008 Kg	0.54 m ³
Li-ion VL12V	[-60°C ; 60°C]	185 Cellules	5 branches	925 cellules	592 Kg	0.25 m ³

Tableau XIV.2 Bilan comparatif entre NiMH NHP 340-10 et Li-ion VL12V pour le kit hybride

Nous pouvons ainsi écrire que :

$$\left\{ \begin{array}{l} NBAT_{total_NiMH} = 1.2 \times NBAT_{total_Liion} \\ M_{NiMH} = 1.7 \times M_{Liion} \\ Vol_{NiMH} = 2.16 \times Vol_{Liion} \end{array} \right.$$

Avec : $NBAT_{total_NiMH}$ représente le nombre total des cellules de batteries NiMH
 $NBAT_{total_Liion}$ représente le nombre total des cellules de batteries NiMH
 M_{NiMH} représente la masse totale des cellules de batteries NiMH
 M_{Liion} représente la masse totale des cellules de batteries Li-ion
 Vol_{NiMH} représente le volume total des cellules de batteries NiMH
 Vol_{Liion} représente le volume total des cellules de batteries Li-ion

Nous pouvons ainsi confirmer, suite au bilan comparatif obtenu, que les batteries Li-ion sont très prometteuses pour les futures applications hybrides, surtout pour notre power pack hybride. Il faut donc remplacer les batteries NiMH par celles de Li-ion à long terme après l'avoir industrialisée, surtout que nous avons à peu près moins de moitié de la masse et deux fois moins de volume, comme notre contrainte principale dans le projet est l'encombrement disponible dans la locomotive.

3.2.2.5. Conclusion

Pour conclure, nous avons réussi à travers de cette section de développer une méthode de dimensionnement pour les batteries de traction. Cette méthode nous a permis de calculer le nombre total de cellules constituant le pack de batteries, sans prendre en compte dans un premier temps le dimensionnement des auxiliaires nécessaires pour le coffre complet car cette section va-être traitée dans le chapitre 5 (voir figure 3.13). Ainsi, grâce à cette méthode, nous avons pu déterminer les limites technologiques du pack de batteries NiMH.

Le dimensionnement correspondant à notre pack de batterie est d'assembler 56 modules en série de batteries NiMH NHP 340-10, et deux branches en parallèle, soit 112 modules de batteries. Les caractéristiques du pack de batteries NiMH de notre power pack hybride ont été regroupées dans le Tableau 3.3, en prenant en compte les missions⁽¹⁾ nécessitant un système de stockage.

⁽¹⁾ nous avons présenté dans le tableau 3.3 deux missions au lieu de trois car le profil de puissance du besoin transit FRET vers un autre point commercial est identique que celui de desserte proche du terminal 400 Tonnes. La deuxième mission correspond au chargement de port 7 Km 1800 Tonnes.

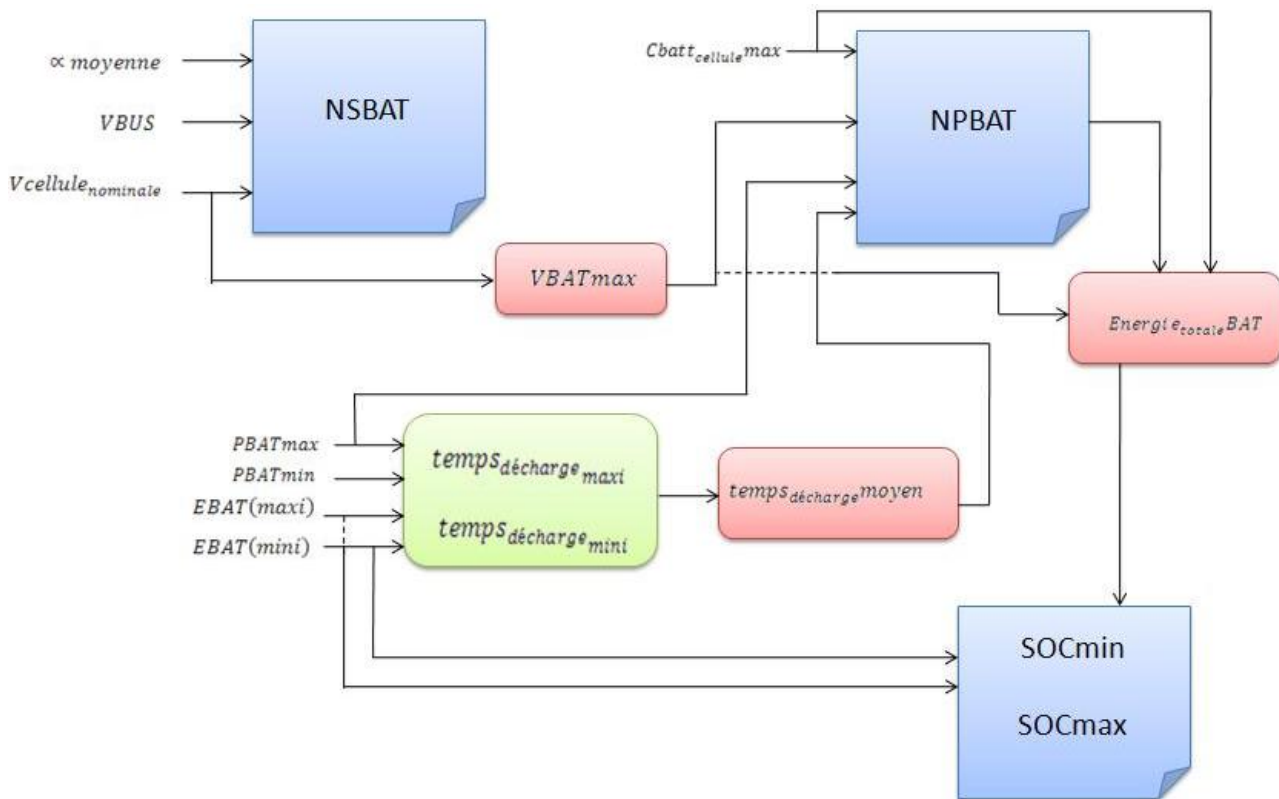


Figure 56.13 Schéma synthétique de la méthode de dimensionnement des batteries

En accord avec la société du fournisseur de batteries, nous avons choisi d'utiliser les batteries NiMH dans les limites $4.4 \cdot C_{\text{nominal}}$ en décharge et $0.32 \cdot C_{\text{nominal}}$ en charge. Soit, avec la convention génératrice :

$$\begin{cases} I_{dch} = C_{\text{nominal}} \text{ temps}_{dch} \\ I_{ch} = C_{\text{nominal}} \text{ temps}_{ch} \end{cases}$$

Soit $I_{dch} = 300$ A maximum et $I_{ch} = 22$ A pour le pack complet, soit 11 A pour chaque branche. Ce courant de charge est dimensionné en fonction du temps de charge de 2 heures en grandes lignes sous caténaire, pour effectuer un chargement complet de la batterie de 20% à 70% de SOC.

En faisant l'approximation de la tension constante⁽¹⁾, les limitations en puissance de décharge et de charge peuvent s'écrire :

$$\begin{cases} P_{dch_BAT} = I_{dch} \times V_{\text{module_nominal}} \\ P_{ch_BAT} = -I_{ch} \times V_{\text{module_nominal}} \end{cases}$$

Soit $P_{dch_BAT} = 200$ KW et $P_{ch_BAT} = -15$ KW

Caractéristiques du pack de batteries NiMH du kit hybride NHP 340-10	M1 : Chargement de port	M4 Transit haut le pied M5 Desserte proche du terminal
Nombre de module en série	56	56
Nombre de branches en parallèle	2	2
Capacité du pack	68 Ah	68 Ah
Tension nominale	672 V	672 V
Tension minimale	504 V	504 V
Tension maximale	509 V	509 V
Energie totale	47.6 KWh	47.6 KWh
Energie déchargée par cycle	24.29 KWh	8.19 KWh
DoD profondeur de décharge	52.1%	17.3%

Tableau XV.3 Caractéristiques techniques de la batterie NiMH du kit hybride embarqué

Dans une mission de batterie, il est important de faire la différence entre les phases de charge et les phases de décharge. Pour le pack de batteries, l'expression "passer la mission" ne signifie pas l'intégration de la mission entière, mais simplement que le pack fournit toute la puissance demandée pendant les phases de décharge (partie positive d'après la convention de signe). Les phases de charge sont certes utiles pour éviter de trop "creuser" l'état de charge des batteries en cours de mission mais leur prise en compte n'est pas une obligation. Cette remarque est très importante car dans les configurations où la puissance nominale du groupe Diesel est élevée, la prise en compte sans discernement de toute l'énergie "stockable" peut conduire à un surdimensionnement excessif du pack de batteries. Pour illustrer ce phénomène, nous avons représenté théoriquement le profil de mission de la batterie dans la figure 3.14. L'exemple marqué sur le graphe correspond à une batterie de 47.6 kWh qui peut être — avec les limites en courant de charge et de décharge précédentes — chargée à -15 kW et déchargée à 200 kW.

Dans les trois missions, le rendement du pack rdBT est estimé à 81% et la profondeur de décharge. Généralement, les batteries embarquées sur des véhicules hybrides sont sollicitées entre 20 et 40% en profondeur de décharge. Une profondeur de décharge de 50% peut donc paraître excessive, mais il y a une raison à cela. Pour le besoin « Chargement de port », notre mission est considérée la plus sévère et la plus importante et donc nous sollicitons d'une profondeur de décharge de 52%. Pour les deux autres missions, les autres missions ont une sollicitation beaucoup plus faible.

$$E_{tot_{BAT}} = \frac{Eu_{BAT}}{DoD_{BAT}}$$

La profondeur de décharge DoD_{BAT} affectant la durée de vie de la batterie, nous n'utiliserons pas dans la réalité l'ensemble de l'énergie disponible, par contre en terme de puissance la batterie devra pouvoir fournir les pointes demandées.

Nous avons abordé, dans cette section, le dimensionnement du pack de batteries. Nous avons montré la complexité du problème de dimensionnement des accumulateurs électrochimiques, due aux multiples contraintes liées à cette technologie.

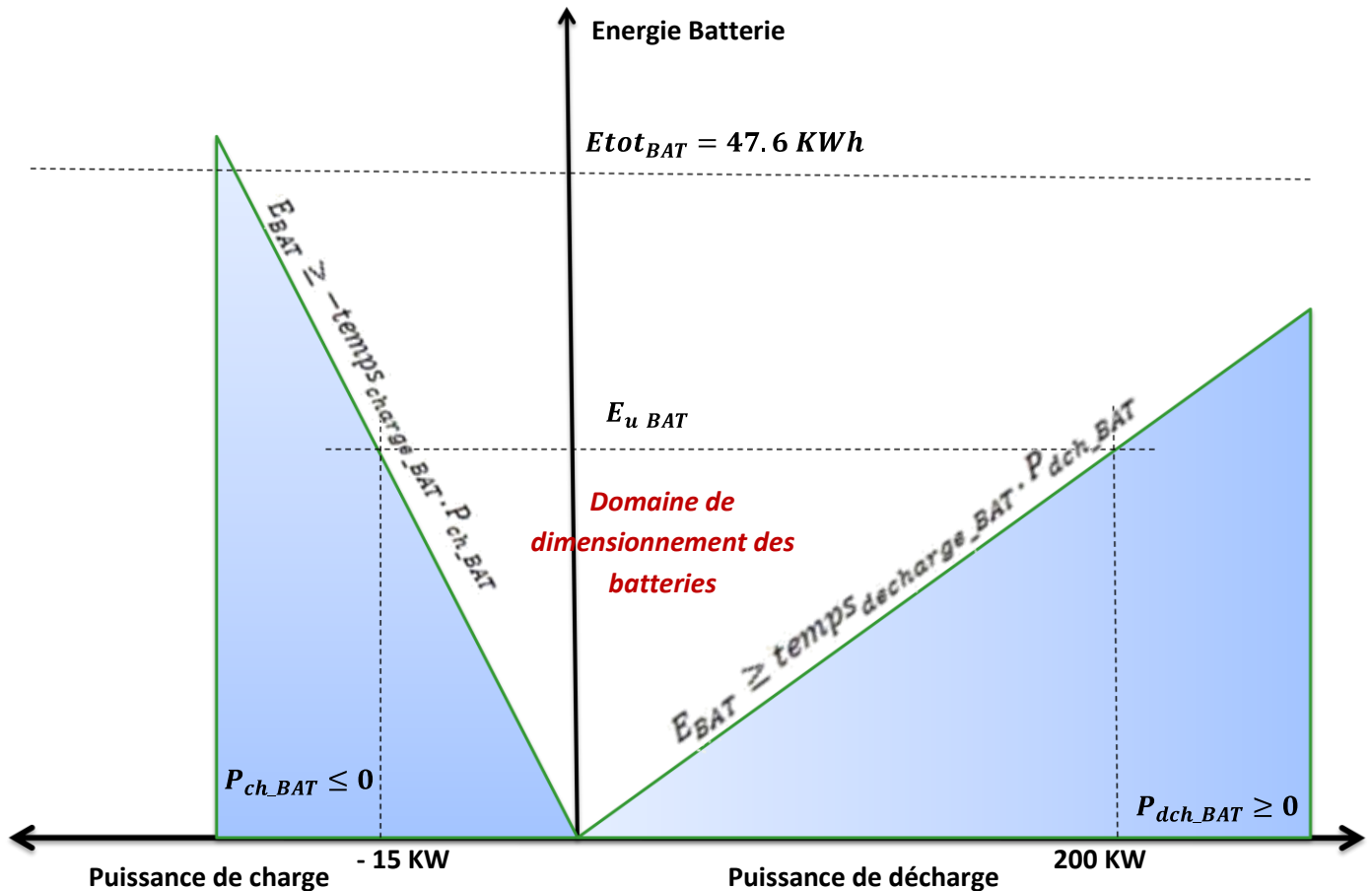


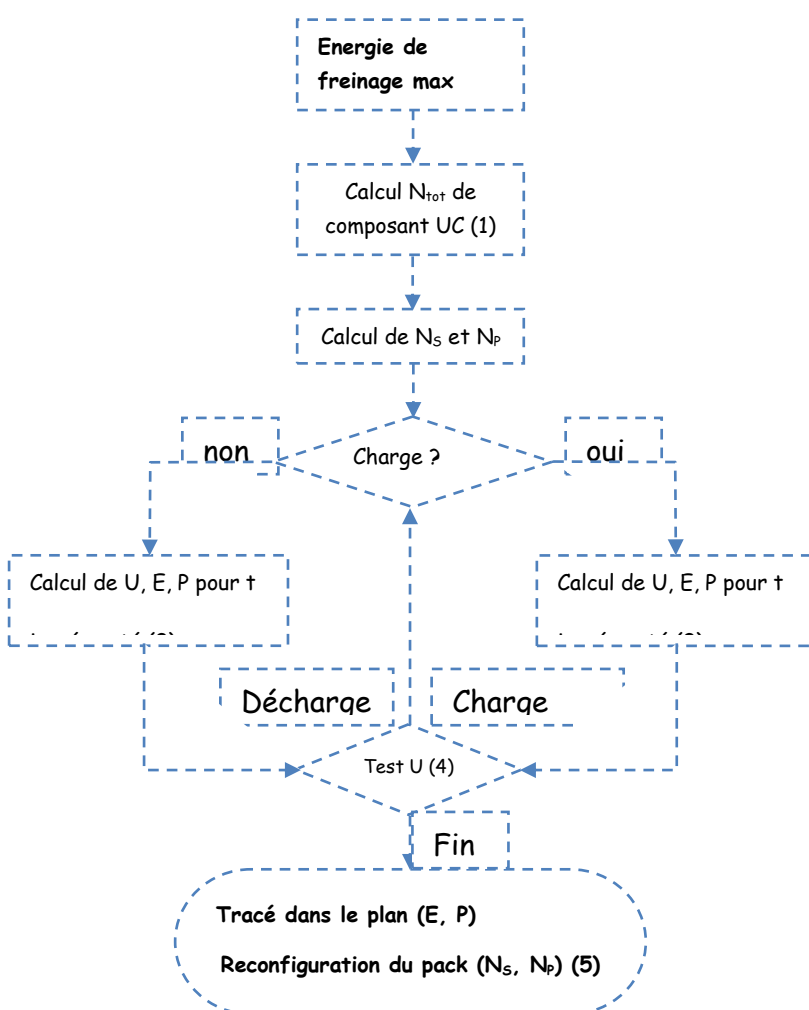
Figure 57.14 Graphe des contraintes technologiques des batteries

Après avoir validé la méthode de dimensionnement des batteries de traction en fonction des résultats obtenus avec le fournisseur, nous avons effectué une comparaison dimensionnelle entre une batterie NiMH et une batterie Li-ion pour notre application. Nous pouvons ainsi confirmer, suite au bilan comparatif obtenu, que les batteries Li-ion sont très prometteuses pour les futures applications hybrides, surtout pour notre projet de power pack hybride.

3.2.3. Méthode de dimensionnement des supercondensateurs

Nous présenterons ensuite, une méthode de dimensionnement d'un pack de supercondensateur qui sera exploitée à ALSTOM, pour la récupération d'énergie de freinage ainsi que pour booster les pics de puissance à faible consommation énergétique. Cette méthode sera utilisée aussi, dans le cas où ALSTOM décidera de remplacer la batterie de démarrage du moteur thermique par un pack de supercondensateur, qui peut aussi récupérer l'énergie de freinage [15, 38, 39].

Pour dimensionner un pack supercapacitif, il faut prendre en compte par rapport au fonctionnement des batteries la récupération de l'énergie en freinage. On réalise le dimensionnement en récupérant soit manuellement soit automatiquement la valeur maximale de l'énergie de freinage au niveau du bus de puissance. On réalise ensuite l'algorithme nécessaire qui est présenté dans la figure 3.15 :



REMARQUES SUR L'ALGORITHME

- $$\Delta E_{\max} = \frac{3}{4} E_{\max}$$

$$E_{\max} = \frac{1}{2} N_{\text{tot}} C_{\text{élem}} U_{\text{élem}}^2$$
- $$N_s \equiv \frac{U_{\text{pack}}}{U_{\text{élem}}}$$

$$N_p = \frac{N_{\text{tot}}}{N_s}$$

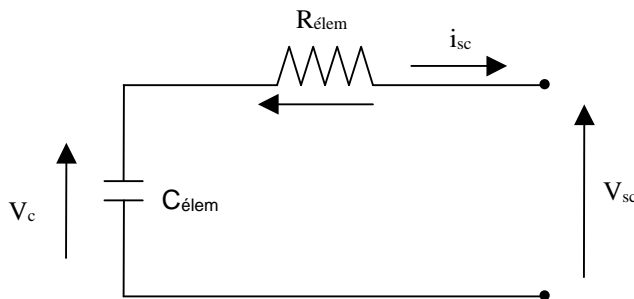
U_{pack} fixé par le concepteur du système SSE
- calcul U, E, P décrit dans la note de calcul
- test $U \Leftrightarrow U \geq N_s \times U_{\text{élem_max}}(\text{charge})$
 $\Leftrightarrow U \leq 0$ (décharge)
- après une charge /décharge complète : visualisation dans le plan (E,P) du pack designer

Figure 58.15 Algorithme du dimensionnement des supercondensateurs [38]

Le pack SC est constitué de supercondensateurs branchés en série et en parallèle.

3.2.3.1. Modèle d'un supercondensateur

Le modèle équivalent est une capacité en série avec une résistance :



$$P_{sc} = V_{sc} \times I_{sc}$$

$$P_c = V_c \times I_{sc}$$

Convention :

$P_{sc} > 0$ en traction (décharge du pack SC)

$P_{sc} < 0$ en freinage (charge du pack SC)

Soit Q la quantité de charge stockée sur l'armature du supercondensateur, elle s'écrit :

$$Q = C_{elem} \cdot V_c$$

Une spécificité du supercondensateur est la variation de sa capacité avec la tension :

$$C_{elem} = C_0 + KV_c$$

Ces caractéristiques électriques (I , P , E) du supercondensateur sont donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{sc}(t) = -\frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} [C_0 + KV_c(t)] \cdot V_c(t) \\ \boxed{I_{sc}(t) = -\left[C_0 + 2K|V_c(t)| \right] \frac{\partial V_c(t)}{\partial t}} \\ \\ p_c(t) = V_c(t) I_{sc}(t) \\ \boxed{p_c(t) = C_0 V_c(t) + 2KV_c^2(t) \frac{\partial V_c(t)}{\partial t}} \\ \\ E_{1 \rightarrow 2} = \int p_c(t) \cdot dt = \int \left[C_0 V_c(t) + 2KV_c^2(t) \right] dV_c(t) \\ E_{1 \rightarrow 2} = \left[C_0 \frac{V_c^2}{2} + \frac{2}{3} KV_c^3 \right]_{V_{c1}}^{V_{c2}} \\ \boxed{E_{1 \rightarrow 2} = \left[\frac{1}{2} \left(C_0 + \frac{4}{3} KV_c \right) V_c^2 \right]_{V_{c1}}^{V_{c2}}} \end{array} \right.$$

L'énergie maximale contenue dans un supercondensateur est calculée pour la tension de service :

$$E_{Max} = \frac{1}{2} \left(C_0 + \frac{4}{3} KV_{C_serv} \right) V_{C_serv}^2$$

L'énergie maximale utilisable est calculée entre la tension maximale de service et sa moitié :

$$E_{util} = \left[\frac{1}{2} \left(C_0 + \frac{4}{3} KV_C \right) V_C^2 \right]_{V_{C_serv}/2}^{V_{C_serv}} = \frac{3}{4} E_{Max} + K \frac{V_{C_serv}}{6} \frac{V_{C_serv}^2}{2}$$

En l'absence d'information détaillée du fournisseur et d'essai de caractérisation, le dimensionnement des supercondensateurs se fait pour l'instant en calculant l'énergie de façon classique :

$$E_{Max} = \frac{1}{2} \left(C_0 + KV_{C_serv} \right) V_{C_serv}^2$$

$$E_{elem} = \frac{1}{2} \left(C_0 + KV_{C_serv} \right) V_C^2$$

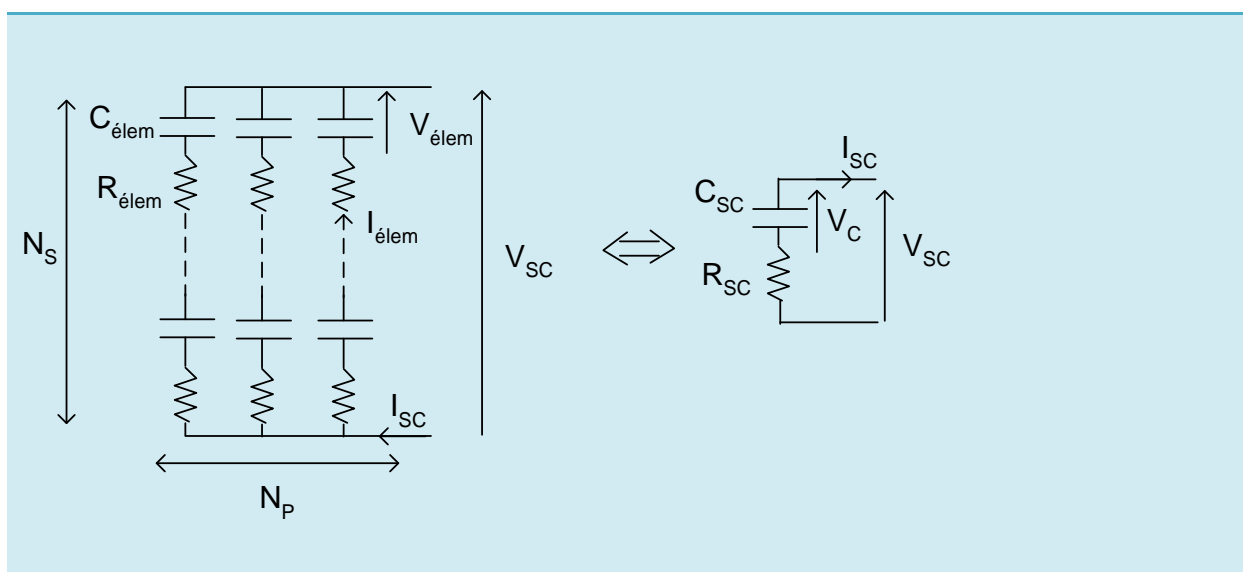
$$E_{util} = \frac{3}{4} E_{Max}$$

La valeur de la capacité est considérée comme constante à la valeur $C_{serv} = C_0 + KV_{C_serv}$.

Ce qui est une hypothèse pessimiste puisque l'énergie utile calculée ainsi est inférieure à celle calculée plus haut.

3.2.3.2. Modèle du pack SC

Le pack SC est constitué de supercondensateurs branchés en série (N_s) et en parallèle (N_p) dont le modèle équivalent est une capacité en série avec une résistance [38] :



Le nombre de supercondensateurs élémentaires constituant le pack vaut :

$$N_{\text{elem}} = N_P \cdot N_S$$

On écrit les équations vues en 3.1, pour un pack SC composé de N_S éléments en séries et N_P éléments en parallèle.

Cela donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{SC} = \frac{N_P}{N_S} C_{\text{elem}} \\ V_C = N_S V_{\text{elem}} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} R_{SC} = \frac{N_S}{N_P} R_{\text{elem}} \\ I_{SC} = N_P I_{\text{elem}} \end{array}$$

$$E_{\text{pack}} = \frac{1}{2} \cdot C_{SC} \cdot V_C^2 = N_P \cdot N_S \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot C_{\text{elem}} \cdot V_{\text{elem}}^2 \right)$$

De même :

$$P_{\text{pack}} = V_C I_{SC} - R_{SC} I_{SC}^2 = N_P \cdot N_S \cdot \left(V_{\text{elem}} \cdot I_{\text{elem}} - R_{\text{elem}} \cdot I_{\text{elem}}^2 \right)$$

Hypothèse de dimensionnement :

En attendant des essais de caractérisation électrique plus approfondis, la valeur de la capacité est considérée comme constante à la valeur $C_{\text{serv}} = C_0 + KV_{C_{\text{serv}}}$, elle est appelée C_{elem} .

3.2.3.3. Dimensionnement du pack supercondensateur

✿ Détermination du nombre d'éléments

Les simulations système permettent de déterminer l'énergie maximale transférée par le SSE, c'est-à-dire la différence de niveau d'énergie entre le moment où le SSE est le plus chargé et celui où il est le moins chargé.

Lorsque le SSE est un pack SC, le transfert maximal d'énergie réalisé est caractérisé par la relation suivante :

$$E_{\text{maxtransférée}} = \frac{1}{2} C_{SC} \left(V_{C_{\text{max}}}^2 - V_{C_{\text{min}}}^2 \right) = E_{\text{max}} - E_{\text{min}}$$

Une tension minimale d'utilisation du pack SC est fixée afin de limiter le courant I_{sc} , elle est définie

par la profondeur de décharge : $k = \frac{V_{C_{\text{min}}}}{V_{C_{\text{max}}}}$

Généralement la profondeur de décharge vaut $\frac{1}{2}$, soit $E_{\text{maxtransférée}} = \frac{3}{4} E_{\text{max}}$

La première étape de dimensionnement d'un pack SC consiste à déterminer le nombre de supercondensateurs élémentaires nécessaire pour fournir les demandes d'énergie requises par les simulations système :

$$N_{elem} = N_P \times N_S = \frac{E_{maxtransférée}}{C_{elem} V_{elemmax}^2} \frac{2}{1-k^2}$$

$$N_{elem} = N_P \times N_S = \frac{E_{maxtransférée}}{C_{elem} V_{elemmax}^2} \frac{8}{3} \quad \text{Pour } k=1/2$$

Pour réaliser, ce calcul on a besoin de connaître l'énergie maximale transférée par ce pack (simulations système) et la profondeur de décharge autorisée, généralement $k = 1/2$ [38].

✿ Etat de charge

L'état de charge, appelé SOC, caractérise la quantité d'énergie présente dans le pack SC. Il vaut 0 lorsque le pack est complètement chargé et 1 lorsqu'il est chargé à sa valeur minimale :

$$SOC = \frac{1}{1-k^2} \left(\frac{E}{E_{max}} - k^2 \right) = \frac{1}{1-k^2} \left(\frac{V_C^2}{V_{Cmax}^2} - k^2 \right)$$

En règle générale, $k = 1/2$, le SOC vaut alors :

$$SOC = \frac{4}{3} \left(\frac{E}{E_{max}} - \frac{1}{4} \right)$$

✿ Tension nominale du pack

Choisir la tension pack équivaut à déterminer le nombre N_P de supercondensateurs placés en parallèle dans le pack.

L'avantage d'augmenter la tension pack (réduction de N_P) est de limiter la valeur maximale du courant I_{SC} qui vaut au plus $N_P \times I_{elem_max}$. [37]

L'avantage de diminuer la tension pack, c'est à dire d'augmenter N_P , est de :

- assurer une redondance des branches de supercondensateurs en série
- faciliter l'équilibrage de tension

Pour le fonctionnement du hacheur, il faut déterminer un nombre de branches suffisant pour que la tension maximale pack SC soit toujours inférieure à la tension bus :

$$V_{SC} = \frac{N_{elem}}{N_P} \left(V_{elem} - R_{elem} I_{elem} \right) \leq V_{bus} \quad \forall I, V_{elem}$$

En l'occurrence, cette relation doit être vérifiée pour V_{elem_max} et I_{elem} maximal en freinage ($I_{elem} = -600A$) qui représente le pire cas pour la tension pack.

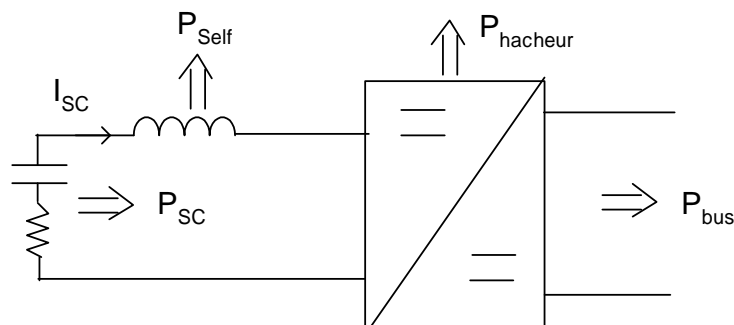
On peut donc augmenter le nombre de branches en parallèle tant que l'on respecte le courant accepté par le hacheur (courant max et courant thermique).

Il faut que :

$$N_P \langle I_{\text{elem_max}} \rangle < I_{\text{hacheur_max}}$$

✿ Courant et puissance pack SC

On appelle P_{sc} la puissance transférée par le pack SC et P_{bus} la puissance transférée sur le bus vers l'onduleur de traction :



Par convention : $P_{bus}, P_{sc} > 0$ en traction (décharge du pack SC)
 $P_{bus}, P_{sc} < 0$ en freinage (charge du pack SC)

$$P_{SC} = P_{bus} + Pertes_{hacheur} + Pertes_{self}$$

Soit :

$$V_C \times I_{SC} - R_{SC} \times I_{SC}^2 = P_{bus} + Pertes_{hacheur} + Pertes_{self}$$

Les pertes hacheur et self sont calculées en dimensionnant le hacheur du pack SC. Ce dimensionnement s'effectue en parallèle du choix du pack SC.

Pour tout point de fonctionnement de la chaîne de traction (P_{bus}) et du pack SC (Etat de charge donné par V_C), le courant pack et supercondensateur valent :

$$(1) \quad \langle I_{elem} \rangle = \frac{V_{elem} - \sqrt{V_{elem}^2 - 4 \frac{R_{elem}}{N_{elem}} (P_{bus} + P_{hacheur} + P_{self})}}{2R_{elem}}$$

$$(2) \quad \langle I_{SC} \rangle = N_P \langle I_{elem} \rangle$$

Seule solution cohérente de l'équation ($I_{sc}=0$ pour $P_{sc}=0$)

⇒ Pour un type de supercondensateur donné, le courant dans un supercondensateur du pack SC est uniquement fonction du nombre d'éléments qui le compose, de son état de charge et de la puissance demandée.

→ Première condition sur la puissance maximale fournie par le pack :

$$P_{SC\max_1} = \frac{V_C^2}{4R_{SC}} = N_{\text{elem}} \frac{V_{\text{elem}}^2}{4R_{\text{elem}}}$$

De plus, le courant dans le pack SC est limité par le courant maximal admis par un supercondensateur:

$$\langle I_{SC_max} \rangle = N_P \langle I_{\text{elem_max}} \rangle$$

→ Deuxième condition sur la puissance maximale du pack SC :

$$P_{SC\max_2} = V_C \times N_P \times I_{\max_elem} - R_{SC} \times N_P^2 \times I_{\max_elem}^2 = N_{\text{elem}} \left(V_{\text{elem}} I_{\max_elem} - R_{\text{elem}} I_{\max_elem}^2 \right)$$

On démontre facilement que $P_{SC\max_1} \geq P_{SC\max_2}$, donc la puissance maximale du pack SC est donnée par la relation suivante :

$$(3) \quad \boxed{P_{SC\max} = N_{\text{elem}} \left(V_{\text{elem}} I_{\max_elem} - R_{\text{elem}} I_{\max_elem}^2 \right)} \quad (I_{\max_elem} \text{ est négatif en freinage})$$

(4)

⇒ Pour un type de supercondensateur donné, la puissance maximale fournie par un pack SC est fonction du nombre d'éléments qui le compose et de son état de charge.

Si la puissance maximale calculée n'est pas suffisante, il faut donc augmenter le nombre d'éléments du pack.

L'annexe D comporte un exemple détaillant et validant cette méthode de dimensionnement des supercondensateurs, ainsi que le critère de vie limitant ce système de stockage d'énergie.

3.3. Modélisation des sources d'énergie du kit hybride

L'objectif de cette partie est de développer un modèle d'analyse, ceci en se basant sur des modèles plus au moins détaillés du système complet. Les modèles des différents composants peuvent-être employés pour prévoir des phénomènes avec une échelle de temps de moins d'un dixième d'une seconde. Modéliser et simuler sont de plus en plus important surtout pour l'analyse des systèmes complexes composés d'ensembles issus de différents domaines. Les outils spécifiques d'un domaine, tels que des simulateurs de circuits par exemple, ne peuvent pas manipuler des composants des autres domaines d'une manière raisonnable. Il y a traditionnellement un écart trop grand entre le problème de l'utilisateur et le modèle de description que le programme de simulation représente. Modéliser devrait-être beaucoup plus proche de la manière de construire un système réel [16, 17, 18]

L'objectif de la caractérisation est d'établir un modèle comportemental des sources embarquées. En effet, chacune des sources du système peut être modélisée comme un sous-système admettant des entrées et des sorties. La connaissance des relations entre les entrées et les sorties permet d'optimiser l'utilisation de la source concernée. Pour le groupe d'électrogène, la caractérisation consiste au repérage du point (ou de la zone) de fonctionnement donnant lieu à la meilleure efficacité énergétique et à la pollution minimale. Un modèle d'un système est un ensemble de relations mathématiques permettant de prédire certains aspects de son évolution. La qualité des modèles repose sur une analogie, plus ou moins étroite, entre le comportement des objets physiques et celui des êtres mathématiques. Il existe plusieurs types de modèles, principalement les modèles de connaissance et les modèles de représentation ou de conduite. Un modèle de connaissance est un modèle dont les caractéristiques et les équations ont été établies en faisant appel à des modèles plus généraux mettant en œuvre les lois de la physique: température, pression, courant, accélération, force... Ils sont beaucoup plus riches de signification que les modèles de représentation définis ci-dessous et contiennent toutes les informations utiles sur le système étudié. Par contre, ils sont en général difficiles à déterminer et de mise en œuvre complexe. De plus, la construction d'un modèle de connaissance est assez fastidieuse et le choix des hypothèses et l'écriture des équations de bilan

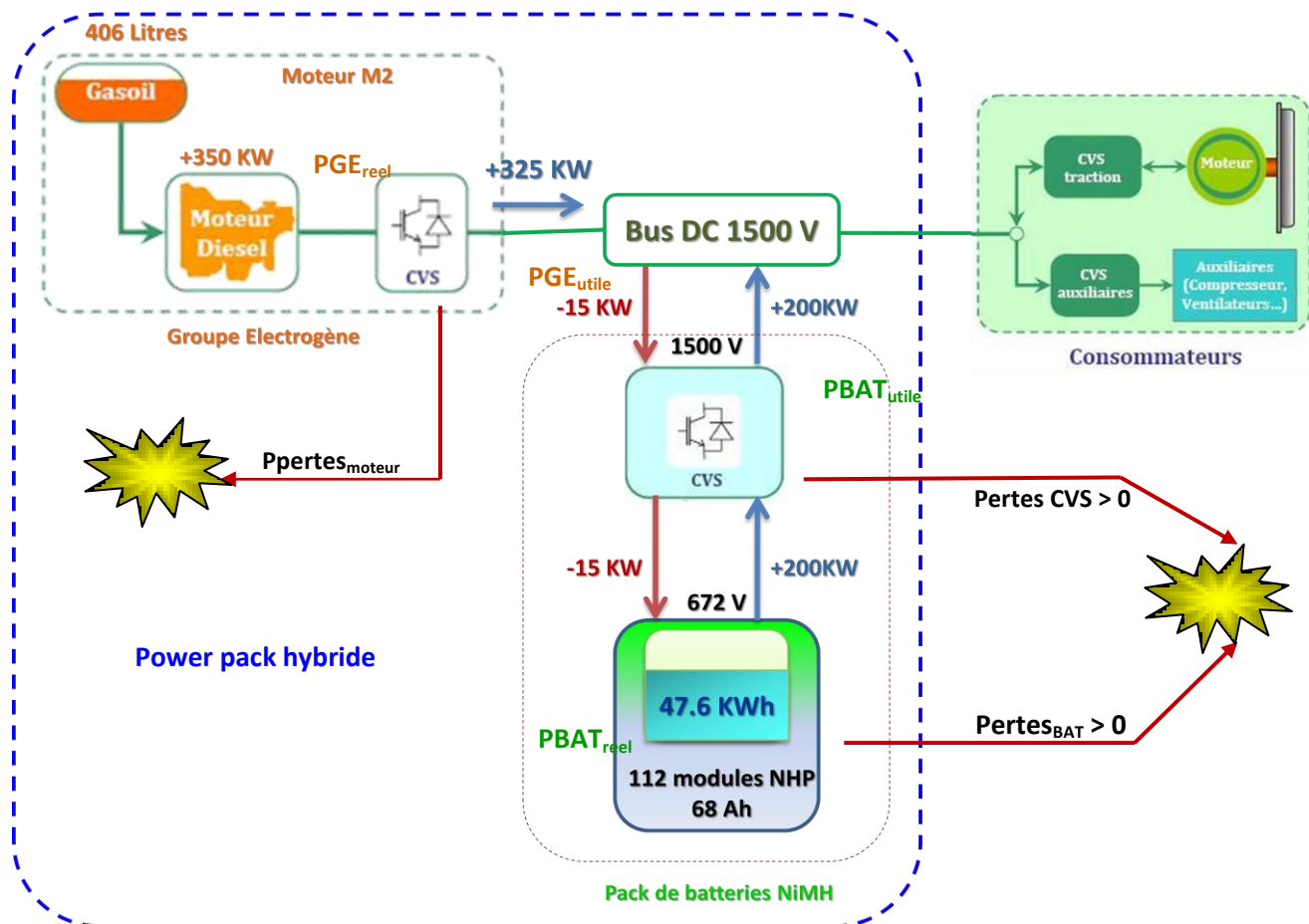


Figure 59.16 Configuration retenue pour le power pack hybride et son Bilan de puissance

requièrent une bonne compréhension du fonctionnement du système. Cette démarche n'est pas toujours la plus efficace pour obtenir un modèle traduisant l'évolution des sorties d'un procédé en réponse aux variations de ses entrées (variables de commande). En particulier, quand le procédé

étudié est complexe, l'établissement d'un modèle de connaissance peut constituer une entreprise considérable, sans commune mesure avec les avantages que l'on retirera de ce modèle. On peut également aboutir à une situation dans laquelle le modèle de connaissance obtenu est d'une telle complexité qu'il n'est pas possible de l'utiliser dans le cadre de l'application pour laquelle il a été conçu. Une démarche alternative consiste à utiliser un modèle de représentation, c'est-à-dire à choisir à priori la structure d'une expression mathématique liant les sorties et entrées d'un procédé. Dans la pratique, ce type de modélisation donne de bons résultats quand le procédé évolue dans un domaine restreint autour d'un point de fonctionnement nominal (domaine de linéarité). Par contre ce type de modèle a généralement un domaine de validité limité ; il est nécessaire de recalibrer ses paramètres quand on s'éloigne du point de fonctionnement initial. La nature physique de l'ensemble des processus dont le moteur Diesel est le siège, permet de le qualifier comme un système dynamique, continu, déterministe, non linéaire et à paramètres séparés. Les causes majeures de non linéarité du comportement d'un système sont: la saturation, le seuil, le tout ou rien et l'hystérésis [25].

La modélisation en flux de puissance est un moyen efficace permettant de simplifier au maximum le processus de dimensionnement énergétique de la locomotive hybride. Il permet de dimensionner les sources d'énergie sans se préoccuper, ni de la disposition en série ou en parallèle des cellules de batteries et de supercondensateurs, ni de la complexité électrique de ces éléments. Comme le montre la figure 3.16, le modèle en flux de puissance de la locomotive est basé sur un bilan de puissance détaillé prenant en considération les pertes énergétiques du système. Les éléments intervenant dans ce bilan de puissance sont la mission constituée des moteurs de traction et des auxiliaires, le groupe Diesel, le pack de batteries.

Le bilan de puissance au nœud énergétique s'écrit :

$$P(t)_{\text{utile}} = PGE_{\text{utile}} + PBAT_{\text{utile}}$$

La mission se réduit à la simple donnée de la puissance enregistrée $P(t)$. Cette puissance intègre a priori les pertes dans les convertisseurs de traction, les convertisseurs des auxiliaires, les moteurs de traction et les transmissions mécaniques. Nous détaillons les autres éléments du modèle dans les sous-sections qui suivent.

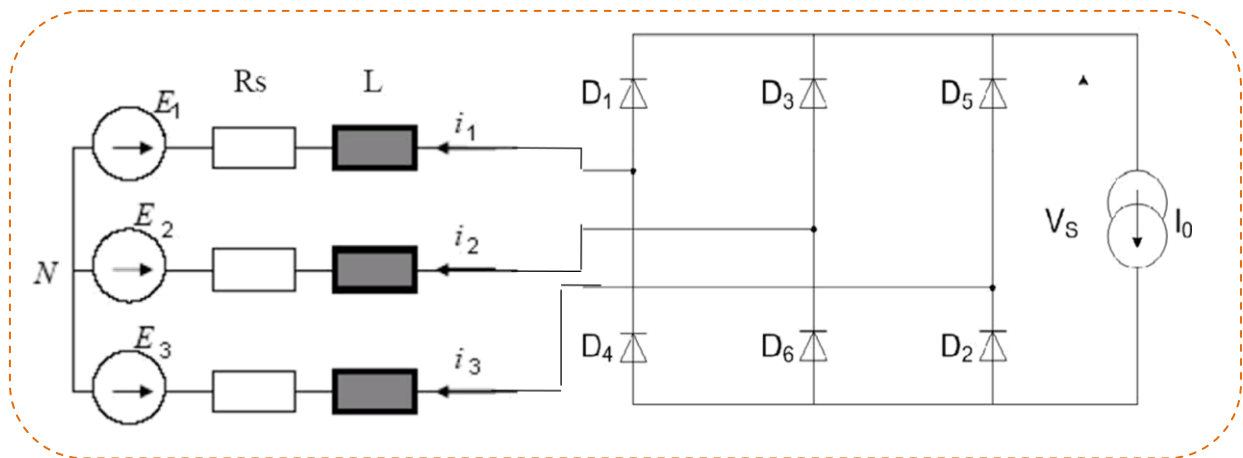
3.3.1. Modélisation du Groupe Electrogène

Modèle linéaire

Fonctions de transfert ou représentations d'état, ces modèles ne sont valables en général **qu'autour d'un point de fonctionnement**. L'exemple type dans le cas du diesel est la régulation de la vitesse de ralenti, dont la commande est un problème linéaire et monovarié. La fonction de transfert entre le débit et la vitesse de rotation est obtenue par identification (fréquentielle ou par Signal Binaire Pseudo Aléatoire SBPA) autour de la vitesse de consigne. On peut y trouver des interprétations physiques (inertie, frottement), mais ce n'est pas nécessaire à la commande. C'est un modèle "boîte noire". Kulkarni et al. ont étudié un moteur diesel turbocompressé. La relation débit \rightarrow vitesse est modélisée par une représentation d'état linéaire d'ordre 4. Bien que ce modèle soit linéaire, il est bâti à partir de considérations thermodynamiques et mécaniques simples. Il a l'intérêt

de souligner l'existence dans le modèle dynamique de dynamiques rapides et de dynamiques lentes. Cette classe de modèle est utile au contrôle moteur [16, 18].

Le modèle utilisé pour la machine à aimants permanents pour les trois phases accouplé à un redresseur à pont diode est schématisé dans la figure suivante :



L'équation électrique pour chaque phase k est donnée par la relation :

$$V_k t = R_s \cdot i_k t + L \frac{di_k t}{dt} + e_k t$$

$$e_k t = \sum_{i=1}^9 a_i \cdot \sin i \cdot \theta_{elec} + \varphi \times k_e \times p \times \Omega = E_k \times k_e \times p \times \Omega$$

$$\Omega = \frac{d}{dt} \theta_m$$

- V_k les tensions statoriques
- i_k les courants statoriques
- e_k les fem
- L l'inductance statorique
- R_s la résistance des enroulements statoriques
- P le nombre des paires de pôles
- Ω la vitesse de rotation de la machine
- a_i les coefficients de fourrier de la fem
- K_e le coefficient de la fem
- Φ le déphasage
- θ_m la position mécanique du rotor
- θ_{elec} la position angulaire électrique

Le couple est donné par : $\Gamma_{em} = (E1 \cdot i1 + E2 \cdot i2 + E3 \cdot i3) \times k_e \times p$

✿ Modèles non linéaires

Les modèles non linéaires de moteurs thermiques se sont développés dans les années 70. Dans ces modèles, le pas de calcul est le cycle, et tous les phénomènes qui se déroulent entre deux PMH (Points Morts Hauts) sont pris en valeur moyenne. Ainsi, le couple moteur est modélisé comme le produit du débit par un rendement global. Depuis 1989, Hendricks a étudié systématiquement cette classe de modèles, qu'il a dénommés modèles à valeurs moyennes. Il a étudié successivement le moteur diesel deux temps et le moteur diesel quatre temps en 1991.

Une modélisation fine du moteur thermique n'est pas l'objectif visé. Elle sortirait du cadre qu'on s'est fixé. Notre objectif est la gestion d'énergie qui met en œuvre des constantes de temps, nous nous plaçons dans une logique plus simple. Nous nous sommes contentés dans notre travail d'un modèle cartographié largement utilisé dans la littérature, qui ne représente que le fonctionnement statique du moteur. Ceci est suffisant pour valider l'étude sur la loi de répartition de puissance qui est présentée dans la figure 3.15. Le modèle dynamique du moteur a été nécessaire pour le réglage des paramètres et la mise au point du régulateur de vitesse.

Le rendement du moteur thermique est modélisé par une ou plusieurs matrices accompagnées de deux vecteurs donnant leur domaine d'utilisation. Ces matrices sont appelées « cartographies ». Par exemple, la cartographie de consommation instantanée en $g \cdot s^{-1}$ C_{MT} du moteur thermique est définie par rapport à un couple et un régime sur l'arbre du moteur thermique : $C_{MT} \Omega_{MT}, \Gamma_{MT}$. on néglige donc l'effet des autres paramètres pouvant influencer sur la performance des moteurs (e.g. température). Sous forme développée, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \Omega_{MT_1} \\ \Omega_{MT_2} \\ \vdots \\ \Omega_{MT_{n-1}} \\ \Omega_{MT_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Gamma_{MT_1} \Gamma_{MT_2} \dots \Gamma_{MT_{m-1}} \Gamma_{MT_m}] \\ C_{MT_{11}} & C_{MT_{12}} & \dots & C_{MT_{1,m-1}} & C_{MT_{1,m}} \\ C_{MT_{21}} & C_{MT_{22}} & \dots & C_{MT_{2,m-1}} & C_{MT_{2,m}} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ C_{MT_{n-1,1}} & C_{MT_{n-1,2}} & \dots & C_{MT_{n-1,m-1}} & C_{MT_{n-1,m}} \\ C_{MT_{n,1}} & C_{MT_{n,2}} & \dots & C_{MT_{n,m-1}} & C_{MT_{n,m}} \end{bmatrix}$$

Cette cartographie est établie grâce à des mesures en régime permanent sur banc d'essai. Elle n'est donc adaptée en théorie qu'à la description des régimes permanents. Elle sera néanmoins utilisée pour décrire les régimes transitoires (hypothèse quasi-statique) [12].

De plus, on suppose que l'établissement Γ_{MT} est suffisamment rapide par rapport à la dynamique du train, ce qui est toujours vrai. Dans cette cartographie, certains points (Vitesse, couple) sont irréalisables. Nous tiendrons compte de ceci en définissant des courbes de couple maximum et minimum pour les machines.

Le moteur thermique est donc modélisé par :

- Une cartographie de consommation $C_{MT}(\Omega_{MT}, \Gamma_{MT})$ fonction du régime et du couple, avec les vecteurs de définition Ω_{MT} et Γ_{MT} correspondants ;
- Des courbes de couple minimum et maximum fonction du régime $\Gamma_{MT_{min}}(\Omega_{MT})$ et $\Gamma_{MT_{max}}(\Omega_{MT})$, qui définissent l'enveloppe limite de la cartographie de consommation.

Les cartographies sont généralement mesurées pour un couple positif et extrapolés ensuite de manière linéaire pour les couples négatifs. Cela revient à dire que la consommation est nulle sur la courbe de couple minimum, et monte linéairement jusqu'au couple nul.

Considérons l'exemple de la cartographie de consommation d'un groupe Diesel de 325 kW électrique soit 350 kW thermique, fournie par le fournisseur. Cette cartographie est donnée à la figure 3.16. Afin d'alléger la démarche d'extrapolation, nous considérons trois fonctionnements en régime constant à 1200 tr/min, 1500 tr/min e 1800 tr/min. Les données de la cartographie nous permettent d'établir la courbe de consommation de la figure 3.17. Nous normalisons la consommation spécifique CS par sa valeur au point nominal (CSn) et la puissance fournie par la puissance nominale. La cartographie du moteur qui comprend la valeur de la vitesse en tr/min, la consommation en g/KWh et la puissance en KW :

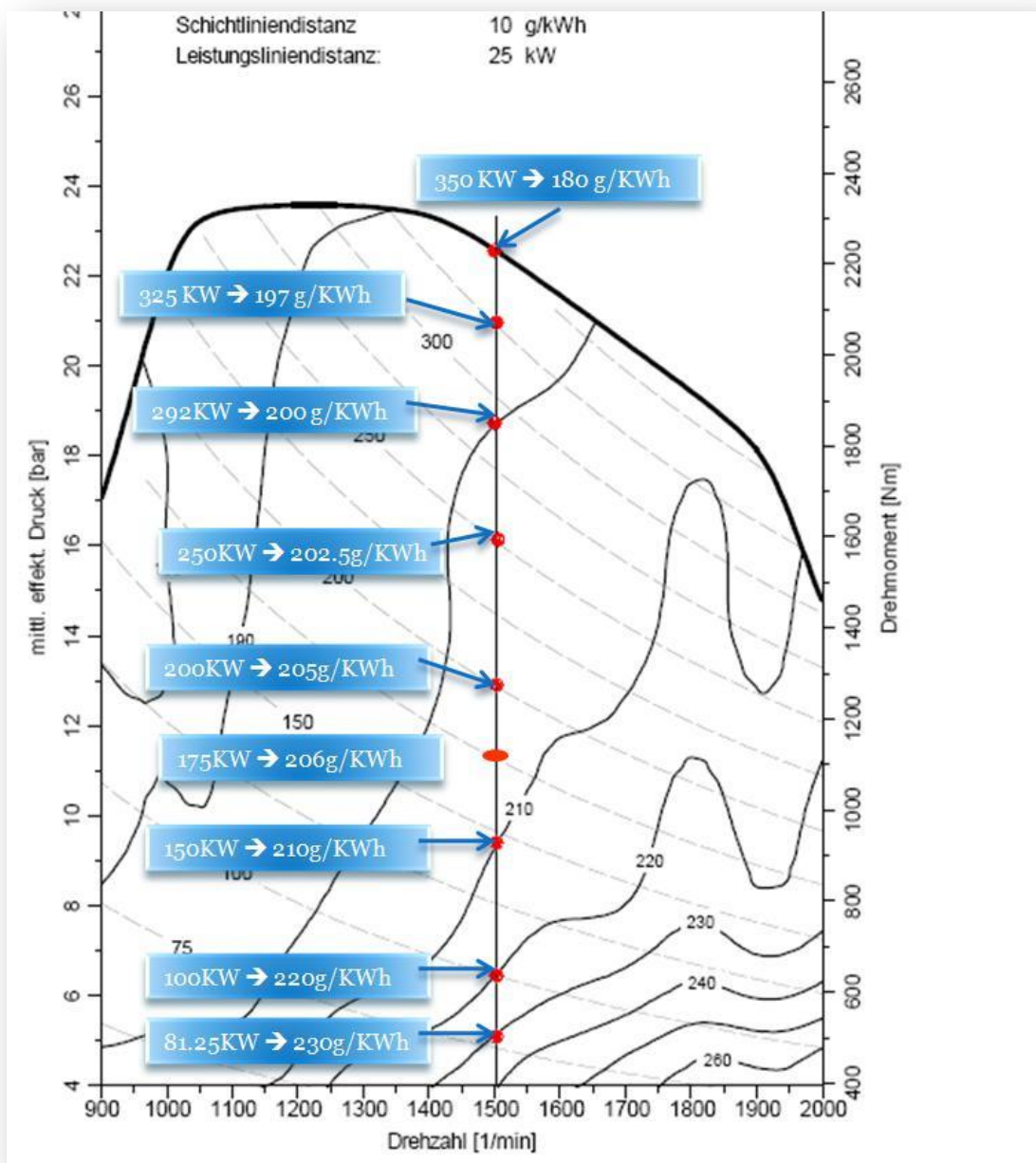


Figure 60.17 Cartographie de consommation du groupe Diesel M2 de 350 kW

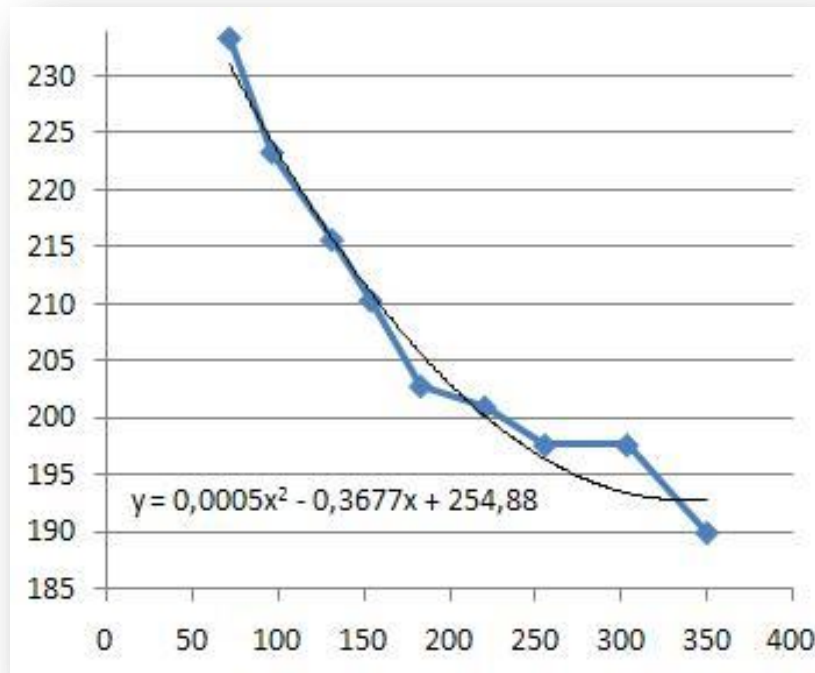


Figure 61.18 Motif de consommation spécifique adimensionnel d'un groupe de 350 KW

Notons que le domaine utile de fonctionnement du moteur avec la puissance en fonction de la vitesse. La courbe à vitesse variable correspond à la consommation minimale du moteur. Ces courbes de consommation $C_i(P_i)$ sont tracées ci-après. La consommation est donnée en g/KWh et la puissance en kW. Ces courbes ont été approximées avec des polynômes d'ordre 2. P_i est la puissance mécanique sur l'arbre du moteur thermique.

Après avoir prélevé pour les trois vitesses de rotation du moteur thermique, nous avons calculé une consommation moyenne entre les valeurs :

$$CS_{moyenne} \frac{g}{KWh} = \frac{CS_{vitesse1} + CS_{vitesse2} + CS_{vitesse3}}{3}$$

$$\text{Et } P_{thermique_{reel}} = \left(\int_0^3 P_{thermique_{reel_{vitesse}} \right) / 3$$

La figure 3.18. montre qu'en pratique la consommation de carburant du moteur thermique i peut être représentée par une fonction quadratique de la puissance générée définie par l'équation suivante et constitue un point d'entrée dans la phase d'optimisation :

$$C_i = \alpha_i + \beta_i \cdot P_i + \gamma_i \cdot P_i^2$$

Nous obtenons alors l'équation polynomiale suivante, et qui représente l'équation de consommation analytique pour le moteur thermique de notre source hybride embarquée :

$$CS \frac{g}{KWh} = 0.0005 \cdot P^2 - 0.3677 \cdot P + 254.88, \text{ avec } P \text{ en } KW$$

Où P représente la puissance thermique réelle du moteur thermique. Et pour avoir la consommation de g/KWh en fuel/litres, il suffit d'écrire :

$$C_s \frac{\text{litres}}{\text{secondes}} = \frac{(C_s(\text{g/KWh}) * P_{\text{thermique_reel}}(\text{KW}))}{(0.83 \times 1000 \times 3600)}$$

$$\text{Or: } Q_{\text{fuel}(\text{litres})} = C_s(\text{litres secondes}).dt$$

$$\Rightarrow Q_{\text{CO}_2} \text{ Kg} = Q_{\text{fuel}} \text{ litres} * 2.66$$

Où :

- $P_{\text{thermique_reel}}$ représente la puissance réelle du moteur thermique en fonction du temps lors de profil de mission.
- Q_{fuel} : représente la consommation du fuel en litres en fonction de temps de la réalisation de la mission (temps en secondes).
- Q_{CO_2} : représente la consommation du CO2 en Kg et qui s'exprime en fonction de la consommation de fuel en litres.

Le groupe Diesel est modélisé comme un transformateur qui traduit, en débit de fuel CS (consommation spécifique) exprimé en litre par heure, la puissance en sortie PGE. La cartographie de cette relation est établie à l'aide d'essais et intègre donc l'ensemble des pertes énergétiques dans le moteur thermique et l'alternateur. Le rendement du redresseur (commandé ou non) est le seul dont il sera tenu compte dans le modèle du groupe Diesel.

La puissance électrique utile en sortie du redresseur à diode est égale à 325 KW, et la puissance des auxiliaires du moteur est égale à 10 KW électrique avec un rendement des pertes équivalent à 0.955. Un réservoir de fuel a été prévu de volume 400 à 450 litres.

Globalement, nous considérons un rendement moyen entre 94% et 97% pour les convertisseurs statiques. 94% pour les convertisseurs à découpage et 97% pour les redresseurs à diodes. Nous avons préconisé un redressement non commandé pour le groupe Diesel, donc rend_{mot} vaut approximativement 97%. La consommation est calculée à partir de la puissance consommante $P_{\text{GE_reel}}$. Dans notre projet, le rendement de l'alternateur à aimant permanent est fixé à 96% et le rendement de notre redresseur à pont diode est égal à 99.5%.

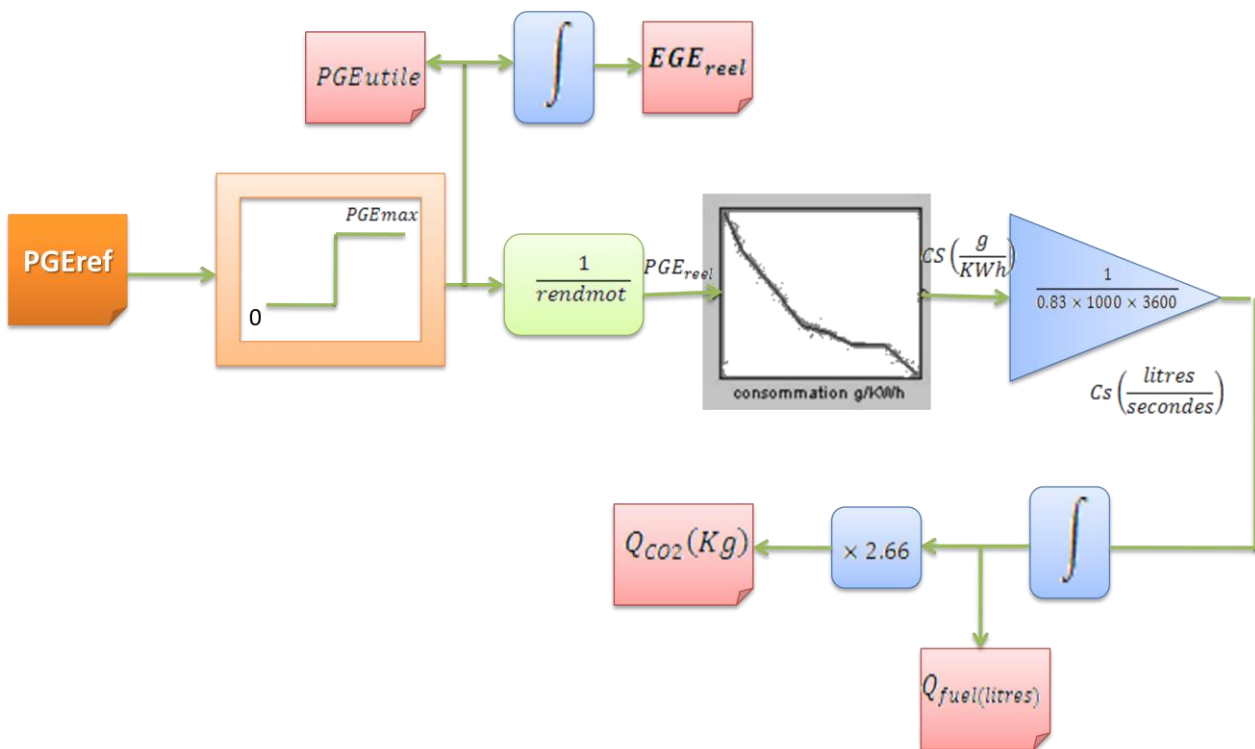


Figure 62.19 Modèle d'analyse du groupe Electrogène du kit hybride

Les équations représentant le flux de puissance entre le réservoir de fuel et la puissance utile électrique :

$$\begin{aligned}
 PGE_{reel} &= P_{pertes_{moteur}} + PGE_{utile} \\
 PGE_{utile} &= rend_{mot} * PGE_{reel} \\
 \text{soit : } P_{pertes_{moteur}} &= \frac{1}{rend_{mot}} - 1 * PGE_{utile}
 \end{aligned}$$

le modèle comportemental du groupe Diesel admet en entrée, la puissance fournie PGE et la vitesse de rotation du moteur thermique N(tr/min), et en sortie, la consommation spécifique CS (L/h ou g/kWh) et les émissions polluantes (CO₂, NO_x, HC, CO et les particules) émises.

le modèle comportemental du groupe Diesel admet en entrée, la puissance fournie PGE et la vitesse de rotation du moteur thermique N(tr/min), et en sortie, la consommation spécifique CS (L/h ou g/kWh) et les émissions polluantes (CO₂, NO_x, HC, CO et les particules) émises. Les difficultés d'accès aux cartographies, nous ont contraints à limiter notre étude à la consommation et aux émissions de CO₂. Le modèle d'analyse du groupe Diesel est calqué sur le modèle comportemental. La présence des batteries permet d'éteindre le groupe Diesel lorsque celui-ci n'est plus sollicité, ce qui réduit les phases de ralenti où la consommation et la pollution sont très mauvaises.

Comme le montre la figure 3.19, il y a une consigne d'entrée PGeref dans le bloc modélisant le groupe moteur. La consigne de puissance PGeref est écrêtée à l'aide d'un bloc de saturation, pour

prendre en compte la puissance maximale disponible PGEM. Notons que le moteur M2 a une puissance thermique nominale de 350 KW sachant qu'il peut atteindre une puissance maximale de 390 KW, donc nous pouvons noter que :

$$PGEmax = 1.06 \times PGEutile$$

En sortie de cette saturation, nous obtenons la puissance PGE fournie par le groupe Diesel au reste du système. L'intégration de cette puissance nous donne l'énergie totale EGereel fournie par le groupe Diesel. L'application du rendement $rend_{mot}$ à la puissance fournie PGE_{utile} donne la puissance réellement "consommante" $PGereel$. Le calcul de la consommation se fait à partir de la cartographie de consommation, qui traduit le flux de puissance $PGereel$ en débit de fuel CS (L/h). Ce débit de fuel est ensuite traduit par intégration, en quantité de fuel Q_{fuel} (L), ce qui permet de calculer la quantité de CO2 émise Q_{CO2} (kg).

3.3.2. Modélisation du pack de batteries NiMH

Le modèle d'analyse en flux de puissance du pack de batteries est donné à la figure 3.20. En entrée, le pack reçoit la consigne de puissance $PBTref$. Cette consigne subit une première saturation liée aux limites technologiques du pack, de façon à ne pas dépasser les limitations de puissance $Pdch_{max}$ et Pch_{max} . A l'issue de cette saturation, la mission est séparée en deux parties exclusives et complémentaires : la puissance de charge (Pch) d'un côté et la puissance de décharge ($Pdch$) de

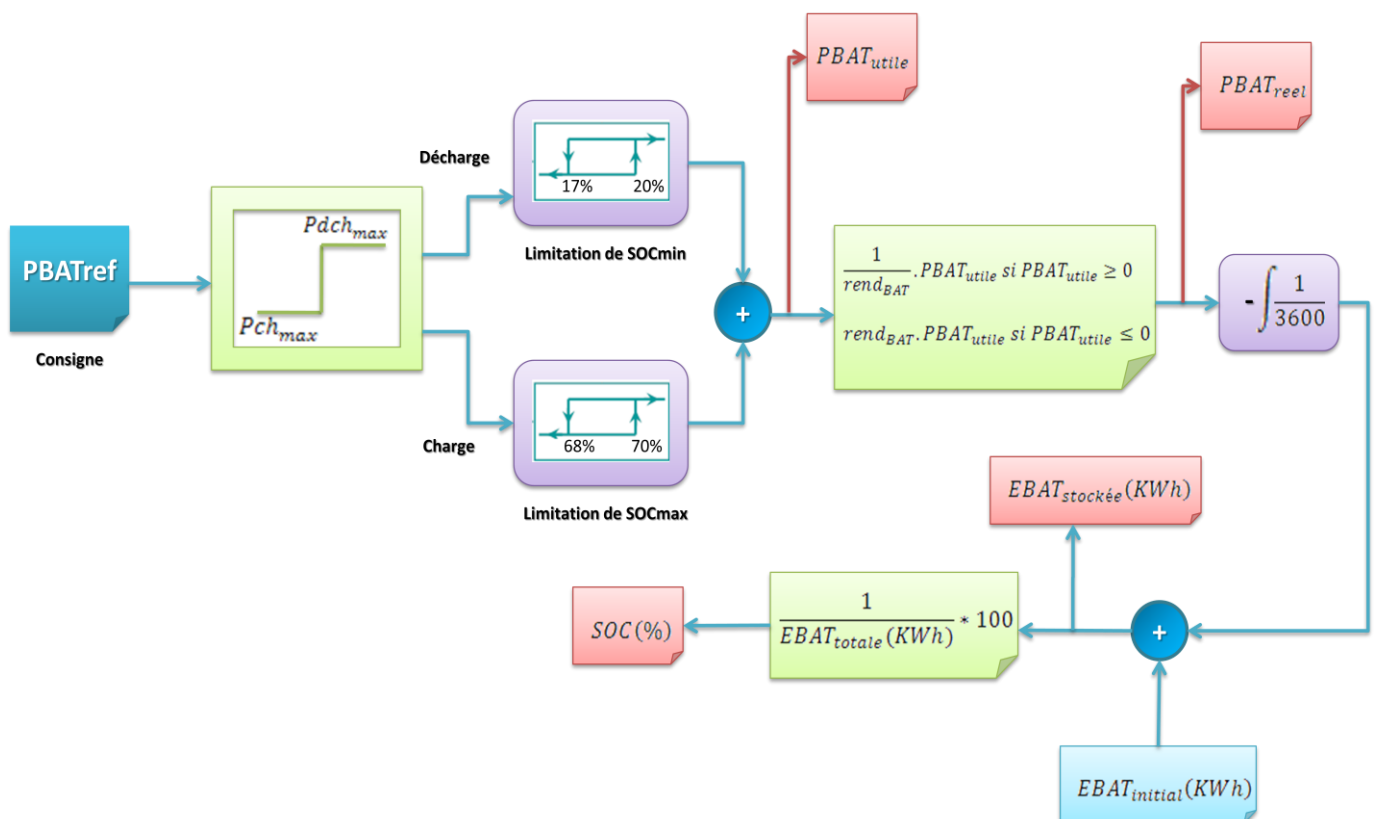


Figure 63.20 Modèle d'analyse du pack de batteries du kit hybride embarqué

l'autre. A chacune de ces deux parties, est appliqué un contrôle par hystérésis qui permet d'arrêter la charge, lorsque l'état de charge du pack atteint 70% (la charge n'est ré-autorisée qu'en dessous de 70% soit une largeur d'hystérésis de 2%) et d'arrêter la décharge lorsque l'état de charge du pack atteint 20% (la décharge n'est ré-autorisée qu'au-dessus de 17 % soit une largeur d'hystérésis de 2%). La sommation des deux flux de puissance permet d'obtenir la puissance PBT fournie par le pack au reste du système. Ensuite, vient l'application du rendement du pack permettant de calculer la puissance $PBAT_{reel}$ réellement transformée en énergie. L'énergie stockée EBT est obtenue par intégration de la puissance $PBAT_{reel}$ t .

La cellule de batterie étant caractérisée par sa capacité de stockage E_0 , sa puissance maximale de décharge $PBAT_{dch}$ et sa puissance maximale de charge $PBAT_{ch}$ sachant que la puissance de charge est < 0 .

Deux types de pertes énergétiques interviennent entre la mission vue du noeud énergétique. Il s'agit notamment des pertes dans les convertisseurs statiques (pertes $_{CVS}$), des pertes joules dans les résistances internes des cellules (pertes $_{BT}$). Nous n'impliquons pas le phénomène d'auto-décharge dans le modèle de dimensionnement pour une raison simple : l'auto-décharge n'a aucun effet direct sur les flux de puissance. Mais c'est plutôt un phénomène perceptible dans la durée. De fait, il a une importance relativement faible dans un contexte d'hybridation où les cycles de charges et de décharges sont assez rapprochés. Le bilan de puissance peut s'écrire alors de la façon suivante :

$$PBAT_{reel} = PBAT_{utile} + pertes_{CVS} + pertes_{BAT}$$

En respectant le bon fonctionnement de la batterie NiMH, et sa température de fonctionnement lors de la charge et de la charge, et en respectant ainsi la température entre 20° et 30° qui nous garantit une durée de vie de 10 ans en prenant en compte l'échauffement des modules « effet joules » à cause de la résistance interne, nous avons estimé un rendement moyen de 85%, sachant que cette valeur va être remplacée par une autre lors des essais expérimentaux sur les modules de batteries NiMH, en contrôlant alors la variation de la tension aux bornes du module lors de la charge ou la décharge. Et le rendement d'un convertisseur bidirectionnel en courant varie de 92% à 98%, d'où le choix final du rendement $_{CVS}$ qui égal à 94%.

Nous pouvons écrire ainsi :

$$PBAT_{reel} = \begin{cases} \frac{1}{rend_{BAT}} \cdot PBAT_{utile} & \text{si } PBAT_{utile} \geq 0 \text{ (décharge du pack)} \\ rend_{BAT} \cdot PBAT_{utile} & \text{si } PBAT_{utile} \leq 0 \text{ (charge du pack)} \end{cases}$$

Ce qui donne :

$$pertes_{CVS} + pertes_{BAT} = \begin{cases} \frac{1}{rend_{BAT}} - 1 \cdot PBAT_{utile} & \text{décharge du pack} \\ rend_{BAT} - 1 \cdot PBAT_{utile} & \text{charge du pack} \end{cases}$$

EBT0 est l'état de charge initial du pack. L'état de charge SOC % du pack est donné par le rapport de l'énergie stockée $EBAT_{stockée}$ sur la capacité totale de stockage $EBAT_{totale}$. Dans ce modèle, il y a deux types de butées : une butée de puissance et une butée d'énergie. La butée de puissance est liée aux limitations de puissance dues aux limites technologiques du pack. Elle est mise

en œuvre à travers le bloc de saturation en entrée du modèle. La butée d'énergie est liée aux limitations de puissance dues à l'état de charge. Elle est mise en œuvre à travers le contrôle par hystérésis de la charge et de la décharge, en fonction de l'état de charge du pack.

A noter aussi que la puissance de décharge maximale P_{BAT_utile} est égale à 200 KW, et la P_{BAT_utile} de charge est égale à -30 KW. Alors, la puissance P_{BAT_reel} peut-être calculée grâce à ces valeurs données en fonction de la P_{BAT_utile} totale produite en fonction du profil de mission. Ensuite, l'énergie stockée dans la batterie est calculée par l'intégration de la P_{BAT_reel} , soit :

$$EBAT_{stockée} \text{ KWh} = EBAT_{initial} \text{ KWh} - \left(P_{BAT_{reel}} t dt \right) \cdot \frac{1}{3600}$$

$EBAT_{initial}$ est l'état énergétique initial du pack des batteries que nous pourrions avoir lors du commencement de la réalisation de la mission. L'état de charge SOC du pack est donné par le rapport de l'énergie stockée $EBAT_{stockée}$ sur la capacité totale de stockage $EBAT_{totale}$, soit :

$$SOC \% = \frac{EBAT_{stockée}(KWh)}{EBAT_{totale}(KWh)} * 100$$

Sachant que $EBAT_{totale}$ correspond à la capacité énergétique totale que nous pourrions l'avoir dans le pack complet des batteries ; ce coefficient est égal dans notre cas de dimensionnement à 47 KWh.

3.3.3 Modèle électrique dynamique moyen de la batterie NiMH du kit hybride embarqué

Le modèle électrique dynamique moyen est un modèle électrique dans lequel les grandeurs physiques sont moyennées sur la période de découpage des hacheurs (d'où le qualificatif "moyen") et qui intègre les éléments physiques dynamiques et les organes de régulation ou de contrôle (d'où le qualificatif "dynamique"). Dans cette section, nous présentons les modèles électriques dynamiques moyens des modules de batteries NiMH de notre power pack hybride.

Cette section a un très grand intérêt pour aboutir à un schéma électrique équivalent du pack de batterie NiMH, et valider le résultat du fournisseur en fonction des différents pics de courants de décharge, en comparant les courbes de réponse de la batterie. Un autre intérêt à ajouter lors de validation d'un tel modèle théorique est de faire une autre validation expérimentale en fonction d'un cycle de courant de décharge. Nous avons considéré que le fournisseur a fourni des courbes de batteries NiMH en fonction des profils de puissance, car elles étaient linéaires et sans ondulations, donc ne dépendent ni d'une capacité, ni de la température de fonctionnement de la batterie...

3.3.3.1. Etat de l'art des modèles équivalents électriques de la batterie NiMH

Avant d'élaborer un circuit équivalent électrique de la batterie de traction de puissance, nous avons effectué dans un premier temps, une recherche des différentes applications et validations qui ont déjà eu lieu lors de ces dernières années, et ensuite proposer le circuit adopté pour valider les

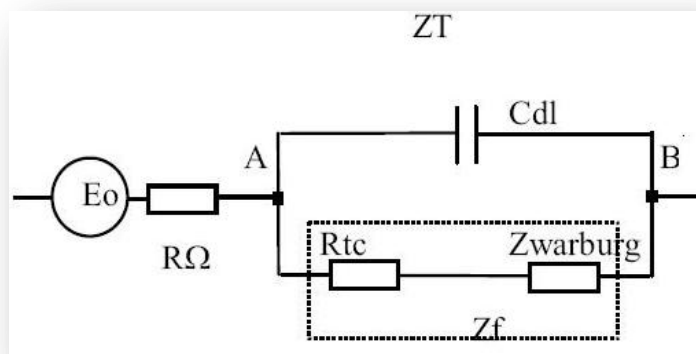
résultats. Nous sommes obligés de passer par cette phase, car tout simplement, nous n'avons pas réalisé une étude de caractérisation de la batterie NiMH avec des essais expérimentaux, comme ce n'est pas l'objectif de notre projet.

Un modèle a été fourni suite à une recherche élaboré au sein de l'Université de Compiègne, un deuxième élaboré par le fournisseur de LE FOURNISSEUR DE BATTERIES, et un troisième qui a été déduit en fonction des deux premiers résultats.

✿ Modèle NiMH adaptée au génie électrique par l'université de Compiègne: description et validation expérimentale

Le modèle élaboré utilise différents circuits électriques élémentaires pour représenter les phénomènes statiques et dynamiques présents au cœur de l'accumulateur. L'originalité des travaux effectués par l'université de Compiègne dans l'emploi de dérivées non entières pour modéliser l'impédance de Warburg associée aux phénomènes de diffusion. Cette étude réalisée permettra d'optimiser les lois de commande d'une chaîne de traction : Accumulateur – moteur électrique. Les validations proposées s'appuieront à la fois sur des essais effectués sur banc de cyclage et sur une chaîne de traction [41, 42].

Une première évolution d'un schéma électrique équivalent pour un accumulateur NiCd et qui a été réalisée par NOTTEN, consiste à regrouper les phénomènes électrochimiques d'une manière globale.



E0 correspond aux résistances de connectique et à la « résistance équivalente » de l'électrolyte.

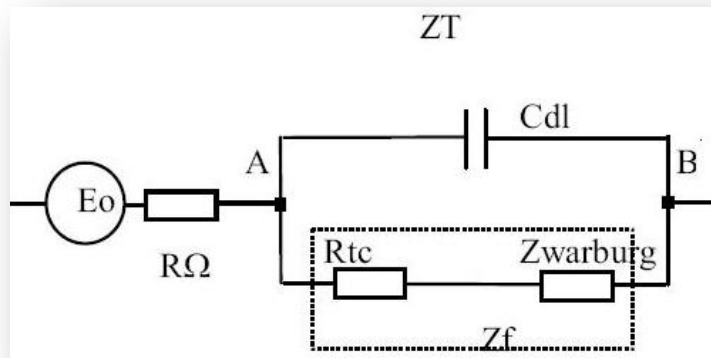
Cdl : capacité double couche équivalente aux deux électrodes.

Rtc : phénomène de transfert de charge linéarisé.

Zwarburg : impédance modélisant le phénomène de diffusion sur les 2 électrodes. Ce phénomène, non linéaire constitue la partie la plus délicate de la modélisation.

Ce nouveau schéma équivalent est parfois cité dans la littérature sous le nom « schéma de Randles ».

Dans le type d'accumulateur considéré, les constantes de temps $\zeta = R_{tc}C_{dl}$ propres aux phénomènes de transfert de charge sont inférieurs à celles des phénomènes de diffusion, de fait, nous pouvons simplifier le modèle de Randles en ramenant la capacité de double couche aux bornes de la résistance de transfert de charge :



Lorsque nous nous plaçons dans le cadre des régimes sinusoïdaux, nous pouvons exprimer notre modèle sous la forme d'une impédance équivalente $ZT(s)$ dont l'expression est :

$$ZT(s) = R\Omega + \frac{R_{tc}}{1 + sR_{tc}C_{dl}} + Z_w(s)$$

$Z_w(s)$ correspond aux phénomènes de diffusion au sein de la batterie, et se note impédance de Warburg. Une technique de caractérisation classique en électrochimie est l'impédancemétrie qui consiste en une simple analyse harmonique de la cellule.

☞ Présentation de la technique d'impédancemétrie

Elle est généralement utilisée comme un indicateur de l'état de charge et plus rarement pour des caractérisations dynamiques. Le principe de cette méthode est le suivant :

En mode potentiostatique, à une fréquence donnée $f = \frac{\omega}{2\pi}$, nous superposons au potentiel d'équilibre E_0 de la cellule une tension sinusoïdale $v(t) = V_{max} \cdot \sin(\omega t)$ de faible amplitude ($V_{max} < 10\text{mV}$). Nous pouvons alors exprimer l'impédance complexe de la cellule Z_t sous la forme :

$$ZT(s) = \frac{V_{max}}{I_{max}} \exp(j\phi)$$

Avec ϕ le déphasage entre la tension instantanée $v(t)$ et le courant $i(t)$ circulant à travers la cellule. En réitérant cette opération sur une zone de fréquences données, nous obtenons un ensemble de mesures dont la figure suivante représente l'impédance dans le plan de Nyquist :

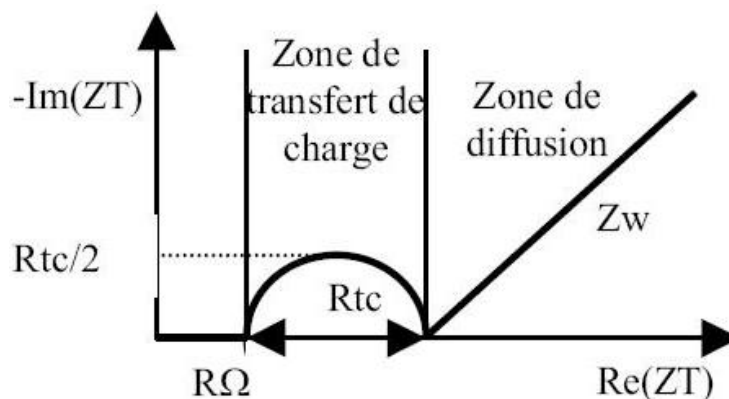


Figure 64.21 Plan de Nyquist de l'impédance de la batterie NiMH

☞ Modélisation de l'impédance de Warburg à l'aide de dérivées non entières

La représentation de l'impédance de Warburg par une fonction de transfert donnée dépend des conditions aux limites du système électrochimique étudié.

Ainsi dans le cas de diffusion semi-infinie l'impédance de Warburg admet pour expression :

$$Z_w j\omega = \sigma \omega^{-0.5} (1 - j)$$

Où σ est un paramètre dépendant des divers phénomènes électrochimiques présents. Ne connaissant pas à priori les conditions aux limites de notre système, ils ont réussi à tracer le Bode de l'accumulateur à différents états de charge afin d'établir la structure générale de $Z_w(s)$.

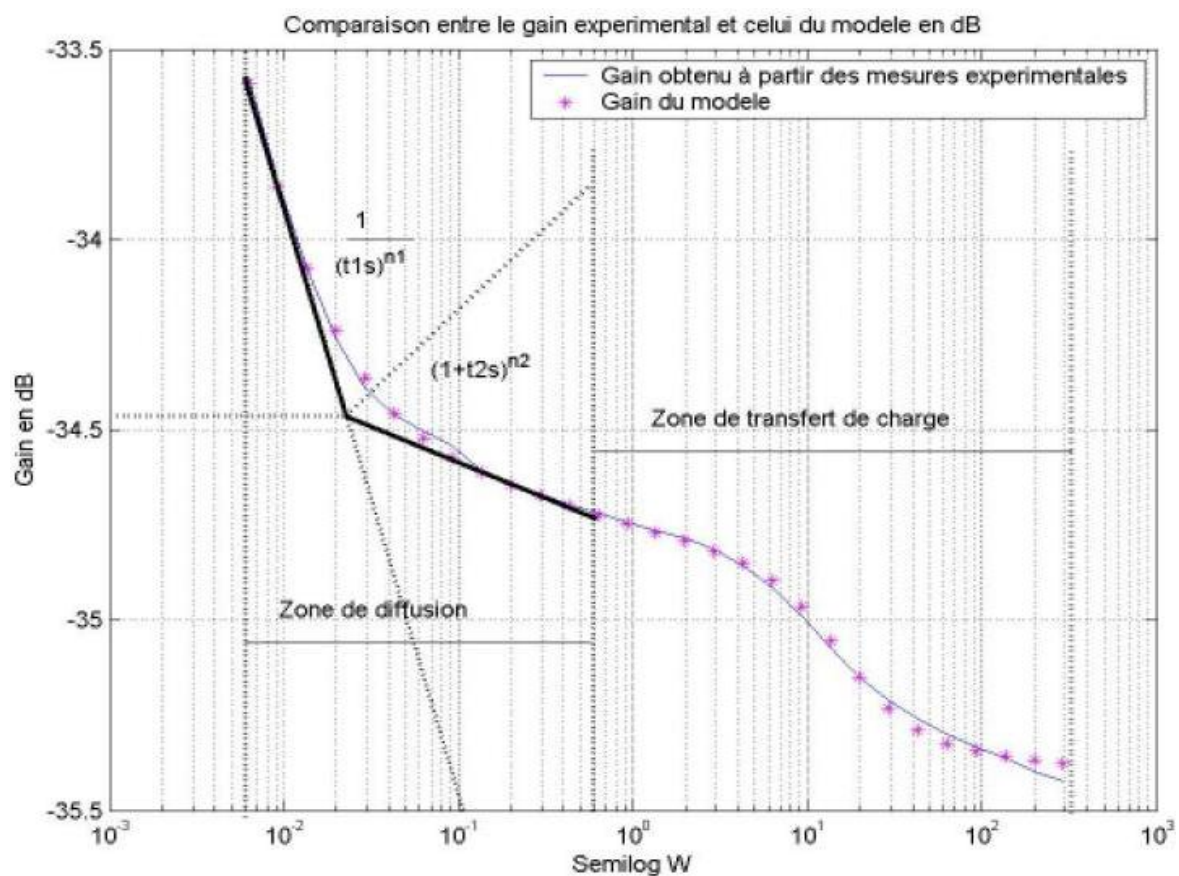


Figure 65.22 Modélisation de l'impédance de Warburg

Comme le montre la figure, le gain dans la zone de diffusion peut-être approché par une fonction de transfert $Z_w(s)$ en puissances non entières de la variable de Laplace s . l'expression finale retenue pour l'impédance de Warburg est :

$$Z_w s = \frac{(1 + \tau_2 s)^{n_2}}{(\tau_1 s)^{n_1}}$$

Où τ_1 et τ_2 sont les constantes de temps de $Z_w(s)$, n_1 et n_2 sont deux réels appartenant entre 0 et 1. La structure de $Z_w(s)$ étant déterminée, nous pouvons calculer la réponse en tension $V(t)$ du modèle à un échelon quelconque de courant $I(t)$; nous avons alors :

$$V(t) = E_0 + R\Omega I(t) + R_{tc} \left(1 - e^{-t/R_{tc}C_{dl}}\right) I(t) + L^{-1}\left(\frac{1 + \tau_2 s^{n_2}}{\zeta_1 s^{n_1}}\right)$$

Donc pour obtenir la tension complète du pack :

$$V_{pack} = E_{eqpack} + (NS * (R_{tc} \left(1 - e^{-t/R_{tc}C_{dl}}\right) I(t) + L^{-1}\left(\frac{1 + \tau_2 s^{n_2} I(s)}{(\tau_1 s)^{n_1}}\right)))$$

Où NS représente le nombre total des cellules de batteries en série. Dans notre cas, on a 56 modules en série de tension 12 V, soit 560 cellules en série de tension 1.2 V.

☞ Identification des paramètres du circuit équivalent

L'identification des paramètres s'effectue sous certaines hypothèses :

- ✓ Les réactions secondaires sont négligées
- ✓ L'accumulateur NiMH est considéré comme linéaire
- ✓ Les paramètres sont indépendants de l'évolution du courant et de la température. Ils ne dépendent que de l'état de charge de la batterie.

Aux états de charge 20%, 40%, 60%, 80%, 100%, ils ont balayé par impédancemétrie N fréquences telles que $46 \text{ Hz} < f < 0.001 \text{ Hz}$. Les paramètres R_{tc} , C_{dl} , n_1 , n_2 , ζ_1 , ζ_2 sont ensuite identifiés à l'aide d'un algorithme de minimisation au sens des moindres carrés.

✿ Modèle équivalent de la batterie obtenu par un fournisseur de batteries

La présente étude réalisée par un fournisseur de batteries lui-même donne un modèle électrique dynamique à 20°C de la batterie NiMH à l'état neuf destinée au TRAM de Nice. La batterie est composée de 68 blocs NHP 34Ah 12V séries soit de 680 alvéoles. Le modèle est réalisé par la réalisation de spectres d'impédance sur un bloc. Le modèle proposé est le suivant :

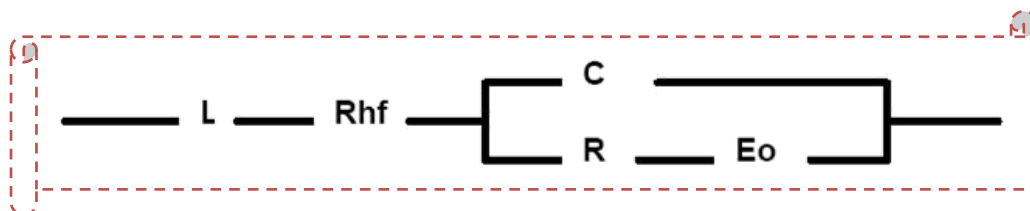
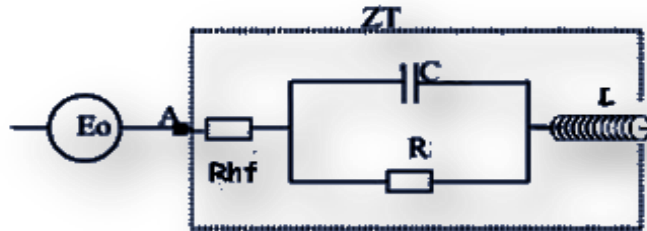


Figure 66.23 Schéma électrique équivalent de la batterie NiMH réalisé par le fournisseur

Les paramètres dynamiques du modèle sont l'inductance L (H), la résistance haute fréquence R_{hf} (Ohm) et la capacité C (F).

☞ Equation équivalente de la tension du pack

Dans le type d'accumulateur considéré, les constantes de temps $\zeta = R \cdot C$ propres aux phénomènes de transfert de charge sont inférieurs à celles des phénomènes de diffusion, de fait, nous pouvons simplifier le modèle de Randles en ramenant la capacité de double couche aux bornes de la résistance de transfert de charge :



$$: Z(S)_{equivalente_{totale}} = R_{hf} + \frac{R}{1+S.RC} + S.L\omega$$

D'où la tension d'une cellule de batterie NiMH peut s'écrire de la façon suivante :

$$V_{cellule_{batterie}} = E_0 + R_{hf} \cdot I \cdot t + R \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \cdot I \cdot t + \frac{L dI}{dt} \cdot t$$

Donc pour obtenir la tension complète du pack :

$$V_{pack} = E_{eqpack} + R_{hf} N_s \cdot I(t) \left(NS * \left(R \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) I \cdot t + \frac{L dI}{dt} \cdot t \right) \right)$$

Où NS représente le nombre total des cellules de batteries en série. Dans notre cas, on a 56 modules en série de tension 12 V, soit 560 cellules en série de tension 1.2 V.

☞ Identification des paramètres du circuit équivalent par la technique d'impédancemétrie

L'identification des paramètres s'effectue sous certaines hypothèses :

- ✓ Les réactions secondaires sont négligées
- ✓ L'accumulateur NiMH est considéré comme linéaire

Les paramètres sont indépendants de l'évolution du courant et de la température. Ils ne dépendent que de l'état de charge de la batterie.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs des paramètres R_{hf} et C pour une température de 20°C en fonction de l'état de charge (SOC).

R (mOhm)	alvéole	0,3
	bloc (10 alvéoles)	3
	batterie (68 blocs)	204
Eo (V)	alvéole	1,3
	bloc (10 alvéoles)	13
	batterie (68 blocs)	884

SOC		20%	50%	100%	évaluation de la précision
C (F)	alvéole	54	60	72	+/-10%
	bloc (10 alvéoles)	5,4	6	7,2	
	batterie (68 blocs)	0,079	0,088	0,106	
Rhf (mOhm)	alvéole	0,5			+/-5%
	bloc (10 alvéoles)	5			
	batterie (68 blocs)	340			

Tableau 3.XVI Paramètres du circuit équivalent NiMH par la technique d'impédancemétrie-Fournisseur de batteries

Il est à noter que la capacité C est déterminée au point de résonance à 100Hz. La valeur de cette capacité évolue avec la fréquence d'observation du fait de la porosité des électrodes. La capacité à 5 Hz est environ 50% plus élevée que la capacité donnée à 100 Hz.

Les paramètres énergétiques R et Eo à température ambiante sont à paramétrer de façon nominale

L'inductance de la batterie est plus délicate à évaluer car la contribution majoritaire provient du câblage à l'intérieur de la batterie et non de la caractéristique intrinsèque des blocs. L'inductance L sera prise égale à 8,2 μ H pour le modèle. Aucune précision sur cette valeur ne peut être donnée avec l'expérience actuelle.

✿ Synthèse générale de deux modèles équivalents

Après avoir exposé les deux méthodes modélisant le pack de batteries aux bornes d'une cellule ou de la tension d'un pack, nous constatons que :

- Les deux schémas blocs se ressemblent énormément, à une différence prêle qui est l'impédance de warburg $Z_w(s)$ et l'inductance du circuit.
- J'ai considéré que la tension à vide de la batterie est en série avec le modèle d'impédance équivalent, en considérant que les constantes de temps $\zeta = R \cdot C$ propres aux phénomènes de transfert de charge sont inférieurs à celles des phénomènes de diffusion, de fait, nous pouvons simplifier le modèle de Randles en ramenant la capacité de double couche aux

bornes de la résistance de transfert de charge, et comme ça j'ai effectué la séparation entre la partie résistance équivalente et la partie tension à vide.

- Nous obtenons donc les deux équations suivantes :

$$V_{pack_{model_{warburg}}} = E_{eqpack} + (NS * (R_{tc} \cdot 1 - e^{-t/R_{tc}C_{dl}}) I t + L^{-1}(\frac{1 + \tau 2s^{-n2} I(s)}{(\tau 1s)^{n1}})$$

$$V_{pack_{model_{fournisseur}}} = E_{eqpack} + R_{hf} Ns_{equivalent} \cdot I(t) (NS * (R \cdot 1 - e^{-t/RC}) I t + \frac{LdI t}{dt})$$

- Les valeurs des résistances internes, des capacités, des selfs et de la tension à vide a été obtenue grâce à aux essais expérimentaux en utilisant la méthode de spectres d'impédance. Comme notre pack de batterie est composé de 560 alvéoles, soit 56 modules composé de 10 alvéoles, nous identifions alors les paramètres suivants :

$$R_{hf_{pack}} = NS * R_{10alvéole} = 56 * 5 \text{ mohm} = 0.28 \text{ Ohm}$$

$$C_{pack} = \frac{C_{10alvéoles_{moyenne}}}{NS} = \frac{6.2}{5.6} = 0.11 \text{ Farad}$$

$$\text{avec } C_{SOC} C_{10alvéoles_{moyenne}} = \frac{C_{20\% 10alvéoles} + C_{50\% 10alvéoles} + C_{100\% 10alvéoles}}{3}$$

$$E_{0_{pack}} = NS * E_{10alvéoles} = 56 * 13 = 728 \text{ volts}$$

$$R_{pack} = NS \cdot R_{10alvéoles} = 56 * 3 = 168 \text{ mohm}$$

$$L_{pack} = NS \cdot L_{10alvéoles} = 6.2 \mu H$$

3.3.3.2. Modélisation et validation du modèle dynamique moyen des batteries NiMH

Après avoir réalisé un état d'art des différents modèles équivalents de la batterie NiMH, nous avons essayé dans cette section, de modéliser le pack de batteries NiMH de notre source hybride embarquée. Il sera ensuite validé par les courbes faites par le fournisseur.

✿ Modélisation du pack de batteries NiMH

Le bloc de batterie met en application un modèle générique paramétré pour représenter la plupart des types populaires de batteries rechargeables. Le circuit équivalent de la batterie est montré ci-dessous :

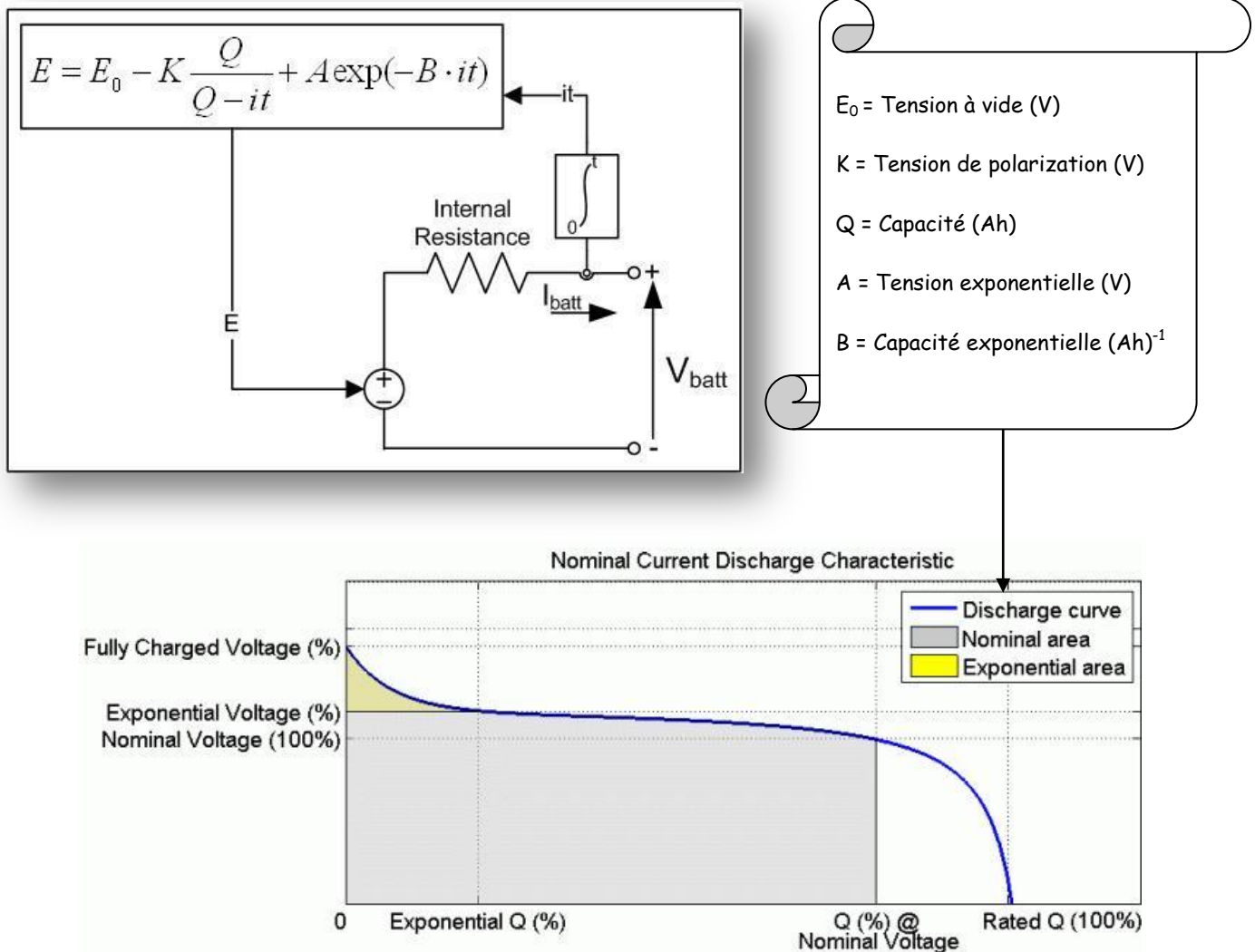


Figure 67.24 Schématisation d'une courbe de décharge de la batterie

Tous les paramètres du circuit équivalent peuvent être modifiés pour représenter un type particulier de batterie, basé sur ses caractéristiques de décharge. Une courbe de décharge typique se compose de trois sections représentées dans la figure 3.24. La première section représente la chute de tension exponentielle quand la batterie est entièrement chargée. La largeur de cette région dépend du type de batterie. La deuxième section représente la charge qui peut être extraite à partir de la batterie jusqu'aux chutes de tension au-dessous de la tension nominale de batterie. En conclusion, la troisième section représente toute la décharge de la batterie, quand les chutes de tension rapidement.

Quand le courant de batterie est négatif, la batterie rechargera suivant une caractéristique de charge comme montré ci-dessous :

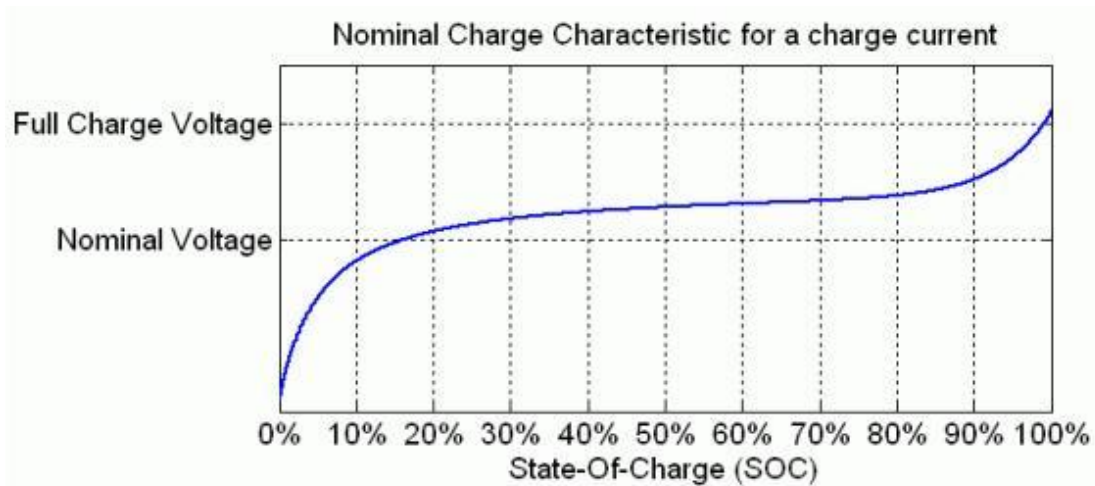


Figure 68.25 Courbe équivalente de charge de la batterie

Notez qu'on assume que tous les paramètres du modèle sont déduits des caractéristiques de décharge et sont les mêmes pour le remplissage :

1. La résistance interne est constante supposée pendant la charge et les cycles de décharge et ne varie pas avec l'amplitude du courant.
2. On assume que les paramètres du modèle sont déduits des caractéristiques de décharge et sont les mêmes pour le remplissage.
3. La capacité de la batterie ne change pas avec l'amplitude du courant (aucun effet de Peukert).

Donc, grâce à ces données et ces informations détaillées, nous pouvons écrire :

$$V_{pack_{batterie}} = \begin{cases} E - R_{interne} * I_{BAT}, & \text{si on décharge le pack } P_{BAT} > 0 \\ E + R_{interne} * I_{BAT}, & \text{si on charge le pack } (P_{BAT} < 0) \end{cases}$$

$$\text{Avec } E = E_0 - K * \frac{Q}{Q - q t_{Ah}} + A * \exp(-B * q t_{Ah})$$

Et Q représente la capacité nominale totale du pack des batteries. Dans notre pack, on a Q égale à 68 Ah.

$$\text{Or : } q t_{Ah} = \int_{t_{initial}}^{t_{final}} I_{BAT} \cdot dt \quad \text{avec } q t_{initial} = \left(\frac{1 - SOC_{\%initial}}{100} \right) * Q * 3600$$

Une autre contrainte doit être prise en compte, est la limitation de la valeur de la capacité instantanée $q(t)$ maximale qui ne doit pas dépasser le produit de $Q * 0.99$.

Ensuite l'équation de l'état de charge s'exprime en fonction de la capacité $q(t)$ stockée par rapport à sa valeur initiale ; du coup on a :

$$SOC_{\%} t = 100 * \left(1 - \frac{\int_{t_{initial}}^{t_{final}} i_{BAT} * dt}{Q} \right)$$

✿ Simulation et Validation du pack de batteries NiMH du kit hybride sous MATLAB Simulink

Après avoir défini les équations nécessaires à la modélisation du pack de batteries, un modèle équivalent a été validé sous SIMULINK, dont le but principal est de faire une comparaison entre les résultats du bloc SIMULINK et les résultats fournis par le fournisseur LE FOURNISSEUR DE BATTERIES. L'objectif principal de réaliser un modèle équivalent moyen est de pouvoir faciliter les tâches lors des essais expérimentaux du pack de batteries à échelle réduite, afin de valider le dimensionnement et le comportement de la batterie en fonction des différents profils de courant afin de valider le choix technique identifié.

La simulation du block de batterie a été faite sous MATLAB Simulink dont son modèle est représenté dans la figure 3.26.

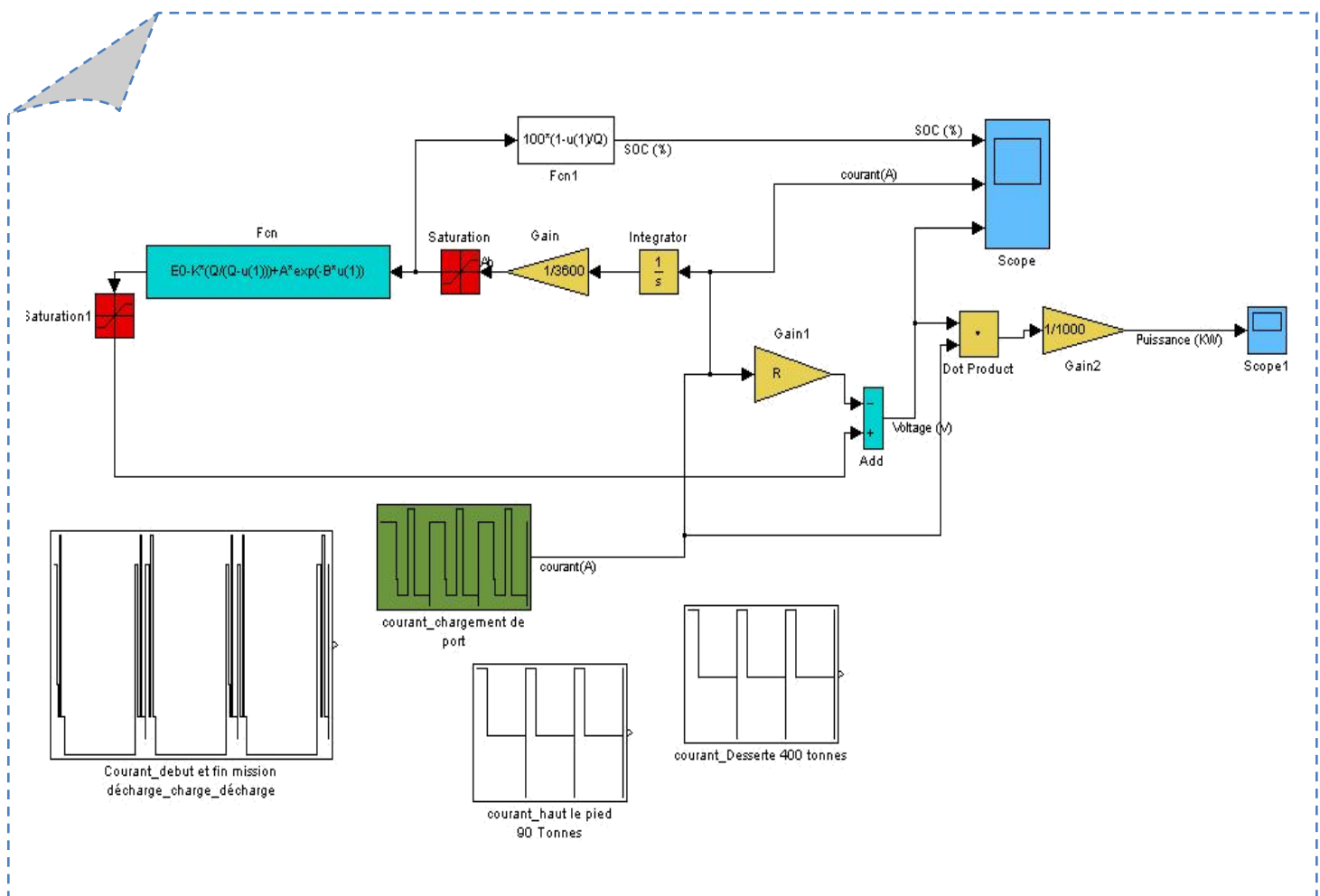


Figure 69.26 Model de pack de batteries NIMH du kit hybride sous MATLAB Simulink

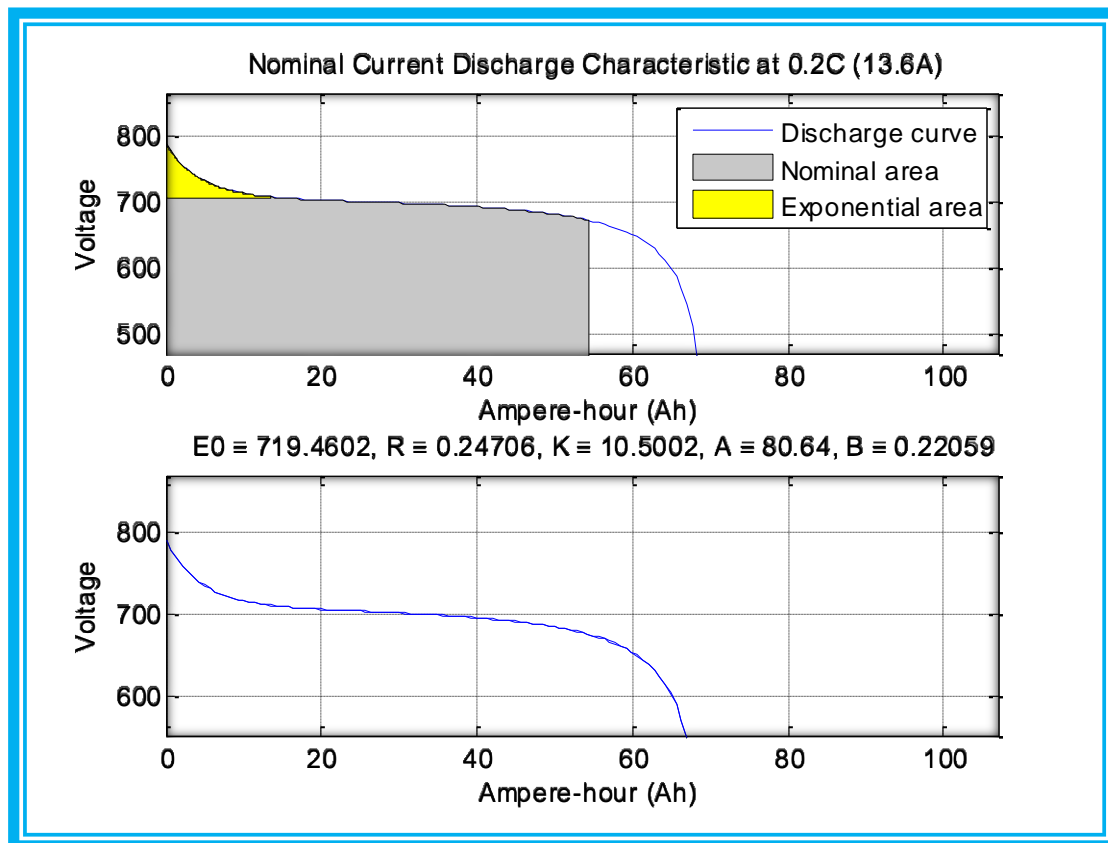


Figure 70.27 Courbe équivalent de décharge du pack de batterie NiMH – power pack hybride

Il faut noter que les caractéristiques du pack de batteries NiMH de notre source hybride embarquée est composé de 56 modules en série et deux branches en parallèle, ce qui nous donne une valeur de tension nominale de pack $V_{\text{pack_Batt}}$ égale à 672 Volts. En ce qui concerne l'état de charge initiale du pack, nous avons fixé un état de charge initial égal à 70%, sachant que SOC_{min} est égal à 20% et le SOC_{max} est égal à 70%. En ce qui concerne des valeurs des autres paramètres, nous avons identifié les différents paramètres nécessaires en se basant sur la courbe de décharge de la batterie NiMH NHP 340-10, et en la généralisant ainsi au pack complet. Ces paramètres sont représentés dans la figure 3.27.

Nous remarquons, d'après la figure 3.26 et les résultats d'identification obtenus dans la section 3.3.3.1. que :

- E_0 est égale à 720 Volts d'après la courbe ci-joint, et égale à 728 Volts d'après les résultats du model précédent
- R_{interne} qui représente la résistance interne du pack complet a une valeur de 0,247 Ohm d'après ma courbe ci-joint, et égale à 0.170 Ohm d'après les résultats du model obtenu précédemment.

Ceci confirme la validation de l'analyse effectuée lors de modélisation, et confirme le bon choix de paramètres. Le but de valider la réponse de la batterie est de se rapprocher au plus de son comportement réel, après avoir testé le modèle avec un profil de courant, et pour valider les courbes de réponse de pack de batteries fournies par le fournisseur LE FOURNISSEUR DE BATTERIES. Cette

validation va se compléter après par essai expérimental à échelle réduite d'un module de batteries qui va se présenter dans la 4^{ème} section du ce chapitre.

☞ Comparaison et validation des résultats

Afin de tester le bloc créer, et valider ces paramètres équivalentes, nous introduisons les profils de puissance des trois besoins sollicitons un pack de batterie NiMH. Les profils de pics de courant ont été fournis au fournisseur auparavant afin de pouvoir valider le bon choix de dimensionnement du pack de batterie NiMH. Essai chargement de port

- Essai desserte 400 Tonnes
- Essai Haut le pied/Essai Desserte FRET proche du terminal⁽¹⁾
- Essai durée « début et fin de mission du chargement de port »⁽²⁾

Les figures 3.28 et 3.29 présentent les courbes fournies par LE FOURNISSEUR DE BATTERIES et les résultantes de la simulation du modèle dynamique équivalent du pack de batteries NiMH du kit autonome.

Dans la figure 3.28, Nous constatons que les courbes sont à 99% compatibles, ce qui valide notre modèle dynamique élaboré dans la partie précédente. La première partie du besoin correspond au début de ligne non-électrifiée, dans un chargement de port avec une distance d'autonomie de 7 Km et une charge remorquée de 1800 Tonnes. La batterie de décharge, à partir de son état initial SOCmax de 70%, jusqu'à sa valeur minimale SOCmin de 20%. Le profil présenté est le profil nécessaire au système de stockage d'énergie, qui représente les différents pics de puissance lors de la mission. La deuxième section correspond à la mission sous caténaire dans les grandes lignes. Nous avons considéré que le temps de mission est de 2 heures minimum, sachant que les missions grandes lignes électrifiées durent entre 14 heures et 16 heures. Lors de ce parcours, le pack de batterie se recharge au fur et à mesure pendant 2 heures grâce à un courant de recharge de 22 A, soit 11 A chaque branche de batteries comme nous avons 56 modules en série et deux branches en parallèle. Enfin, le SOC arrive à sa valeur limite maximale de 70% après 2 heures de mission. Enfin, la troisième section correspond à la fin de mission non-électrifiée pour rejoindre les sites industriels des exploitants ferroviaires. Nous démarrons notre parcours avec un état de charge maximal de 70%. A la fin de la mission, le pack de batteries est déchargé. Notons aussi que la tension du pack VBAT a une valeur moyenne de 680 V, qui est bien compatible avec sa valeur commerciale. Pour une puissance crête maximale de 190 KW, la batterie tire un courant de valeur 280 A, sachant que la valeur limite de décharge de courant est de 300 A.

Dans la figure 3.29, notre modèle dynamique équivalent est aussi validé en se référant à la courbe de réponse de la batterie en fonction des deux profils de mission, transit FRET en haut le pied vers un nouveau point commercial et la desserte locale FRET proche du terminal avec une distance d'autonomie de 50 Km et une charge remorquée de 400 Tonnes, sollicitant d'un pack de batterie associé à notre groupe électrogène. Nous considérons que nous démarrons notre parcours avec un pack de batteries complètement chargé, soit un SOC de 70%. A la fin de mission, la valeur de notre état de charge est de 50%, le pack de batteries est donc capable de répondre à notre besoin jusqu'à rejoindre les grandes lignes, et même de continuer sa mission à la fin de ligne non-électrifiée comme nous consommons 30% de réserve de charge de batteries. La tension moyenne du pack est de 680 V, et pour un pic maximal de puissance de 200 KW, le courant de décharge de 300 A.

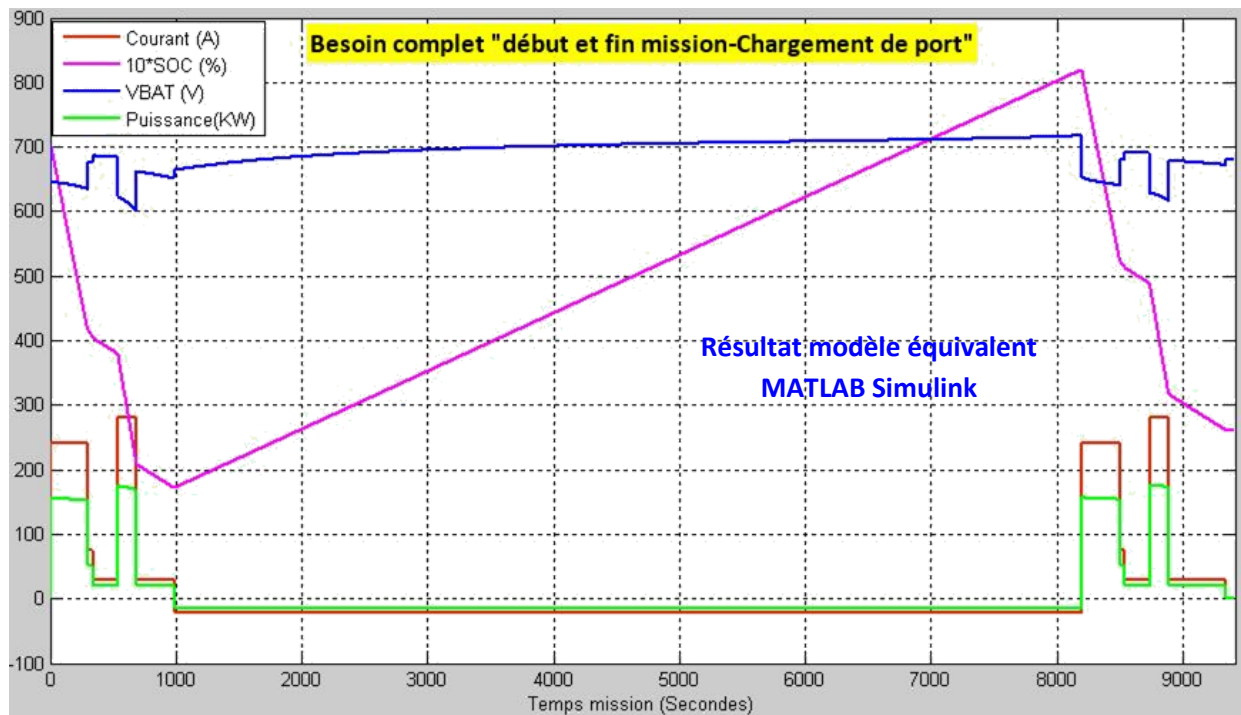
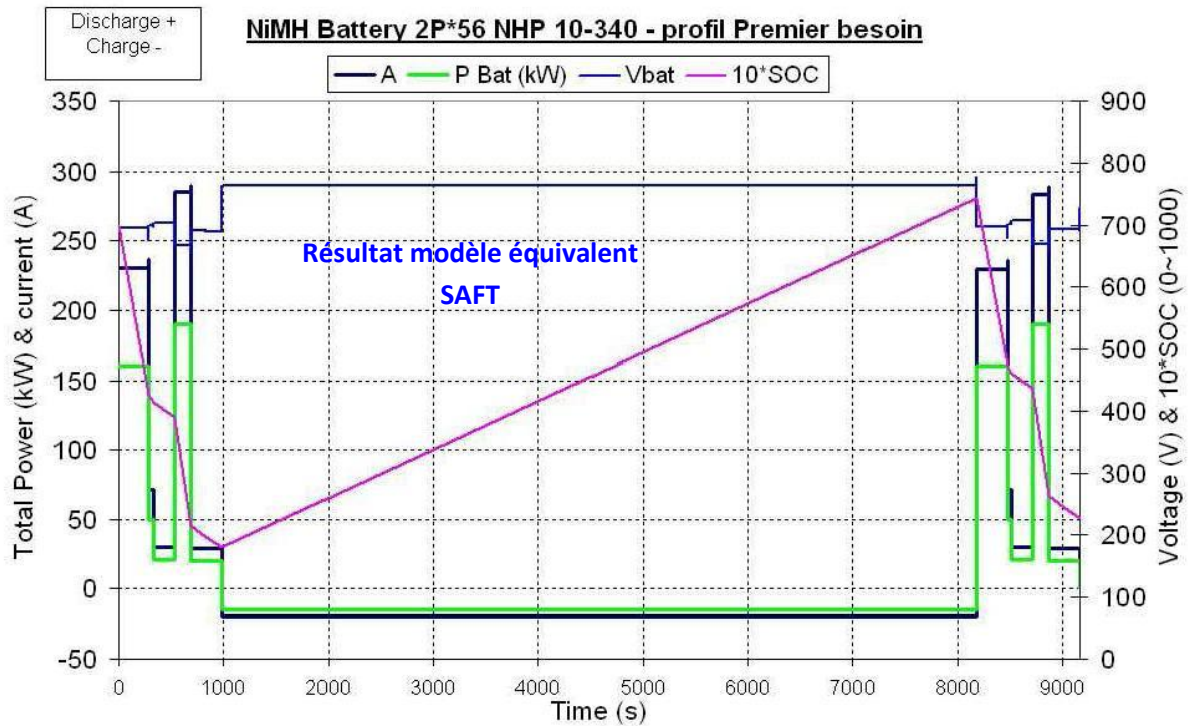


Figure 71.28 Comparaison entre deux modèles de batteries NiMH- Profil complet chargement de port

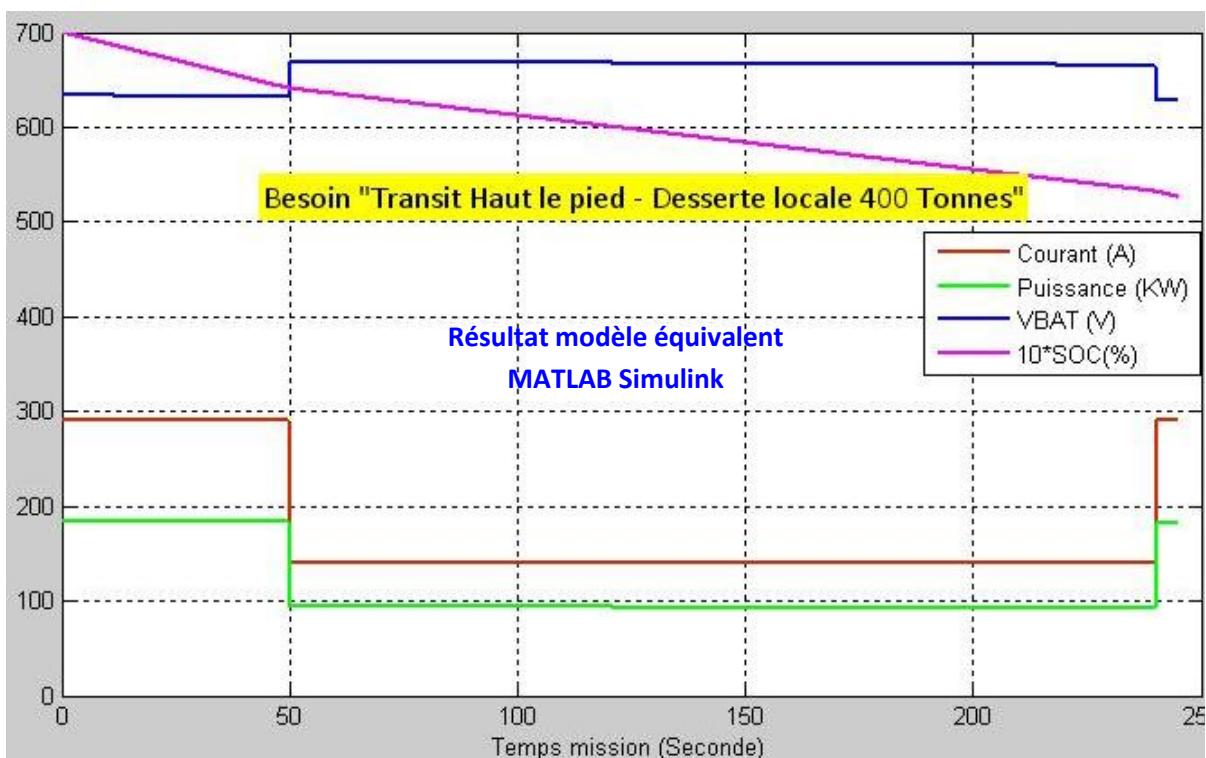
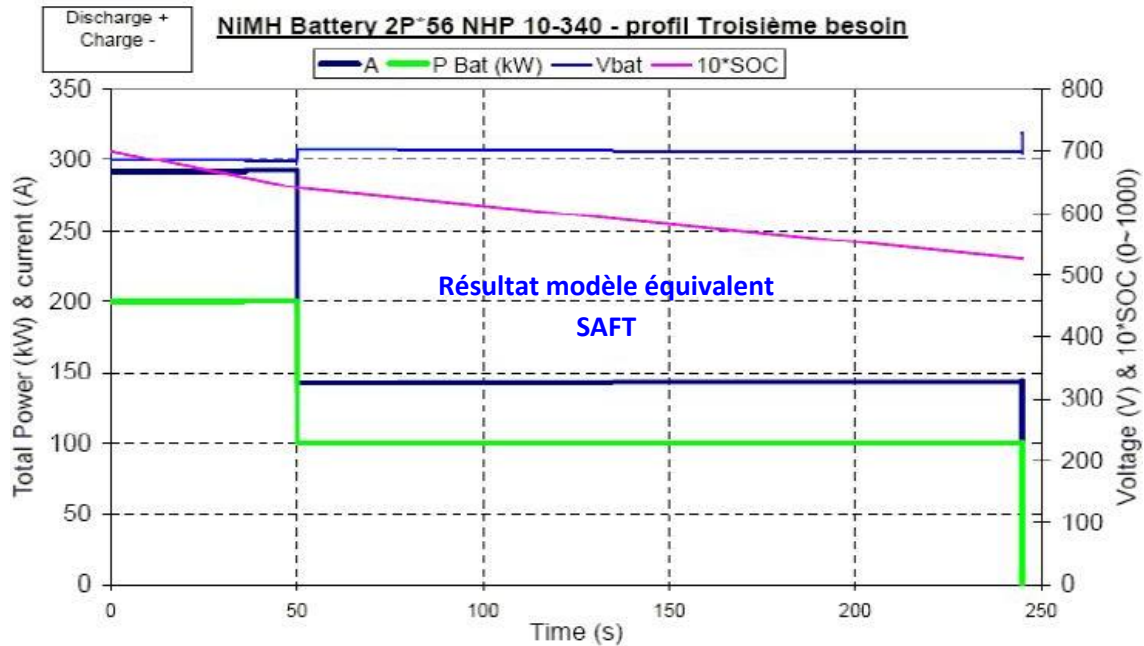


Figure 72.29 Comparaison entre deux modèles de batteries NiMH- Profil Transit haut le pied – desserte locale proche du terminal

Les résultats obtenus valident deux hypothèses principales de notre cahier des charges. La première est que le dimensionnement théorique du pack de batteries répond bien à notre dimensionnement énergétique du système de stockage d'énergie, en répondant aux différents pics de puissances lors des missions. La deuxième est la validation d'un modèle dynamique équivalent

d'une batterie NiMH, spécialement le pack complet de batteries pour notre kit autonome. L'objectif principal de cette modélisation est de pouvoir effectuer notre prochain pas d'étude de validation, concernant les essais expérimentaux à échelle réduite des modules NiMH NHP 340-10, pour valider le dimensionnement du pack de batteries NiMH, ainsi que son comportement en fonction des différents pics de courant des différents profils de missions. La section quatre de ce chapitre va nous détailler les différents résultats obtenus.

3.4. Validation expérimentale du modèle de la batterie NiMH à échelle réduite

Cette section présente les essais expérimentaux à échelle réduite du pack de batterie NiMH pour notre power pack hybride. Ils permettent la validation de dimensionnement de notre système de stockage d'énergie, les aspects autonomie et réserve d'énergie, et le fonctionnement général du système. Cette phase est très essentielle pour la validation du pack de batteries complet à échelle unitaire, avant la phase de création du prototype de notre kit

Concernant la partie du groupe électrogène de notre source embarquée, la validation va être faite par l'équipe de TRAM CITADIS à Reichshoffen en collaboration avec ALSTOM Belfort.

3.4.1. Description du banc d'essai

Le banc d'essais expérimental représenté dans la figure 3.30 se compose essentiellement d'une part :

- ☞ D'un circuit de refroidissement composé d'un circuit d'eau glycolée à 15°C
- ☞ Deux modules de batteries NiMH NHP 340-10 de tension 12 V
- ☞ D'un système d'acquisition pour contrôler la décharge de la batterie en fonction des différents profils de courant, grâce à une Interface Labview
- ☞ D'une charge électronique active pouvant tirer jusqu'à 1200 A de courant de décharge.
- ☞ D'une alimentation électrique de caractéristiques : 130V, 9 KW et $I_{max} = 80A$.

Et d'autre part, les équipements de mesures sont :

- ☞ Une sonde de tension permettant de prélever la forme de la tension aux bornes de notre monobloc au cours de la décharge et de la charge.
- ☞ Une sonde de courant pour mesurer le courant de décharge.

Les essais expérimentaux se présentent sous forme de tests de charge et de décharge des différents profils de courant pour les trois missions sollicitant d'un pack de batteries NiMH, à température constante comme il ne s'agit pas d'identifier les paramètres des batteries, ni d'identifier son modèle de circuit équivalent.

Des essais qui sont relativement lents parce que la durée de la charge et l'attente pour la stabilisation de la tension avant la décharge prennent environ 16h.

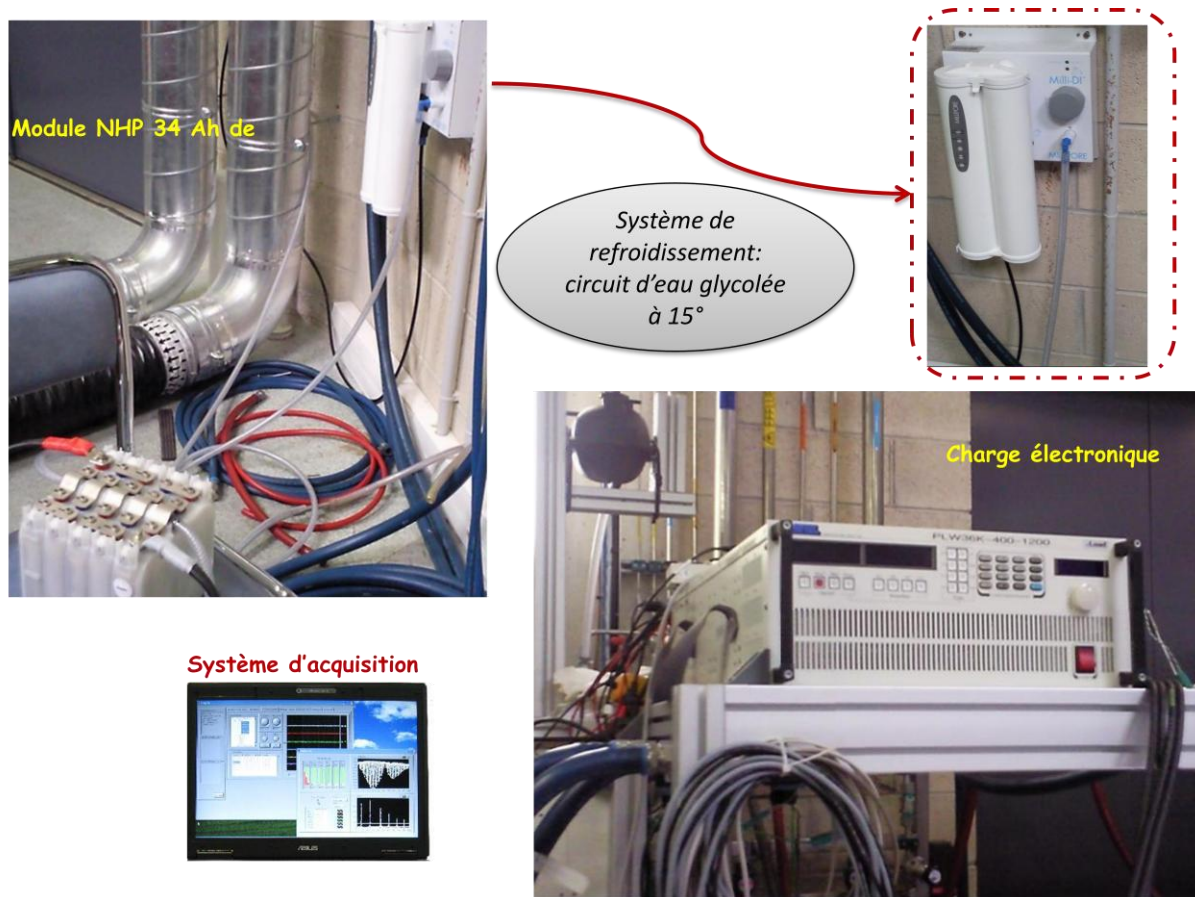


Figure 73.30 Description du banc d'essai de la batterie NiMH du kit hybride embarqué

Lors des essais, les modules des batteries sont reliés à un circuit de refroidissement pour lui imposer une température ambiante constante d'environ 15 C° pendant les tests de chargement et de déchargement, car nous devons garder une température constante, en fonction des différents pics de courants. La décharge est assurée par une charge électronique active qui permet de lui extraire un profil de courant commandé par un programme sous le logiciel de programmation graphique « Labview », et la charge est assurée par une alimentation électrique. L'intérêt de l'interface à temps réel Labview est donc de nous permettre d'imposer le pas d'échantillonnage avec lequel on sauvegarde nos données (tension et courant), imposer le profil de courant. Dans ce contexte, un système d'acquisition est utilisé pour sauvegarder les données mesurées (tension, courant).

3.4.2. Réalisation et validation des essais expérimentaux

❁ Objectifs et contraintes d'essais

L'objectif principal des essais est de valider le dimensionnement du pack de batteries, et comparer les courbes réalisées par le fournisseur de batteries et par le modèle dynamique moyen par les résultats expérimentaux. Un autre objectif principal est de valider le fonctionnement de la batterie en fonction des différents profils afin de valider si la batterie correspond bien aux performances recherchées, et arrivent à bien suivre les différents pics de puissance.

Comme nous le remarquons, notre banc d'essai ne contient pas un système qui nous permet d'estimer et de calculer notre état de charge de la batterie. D'où la nécessité d'utiliser le modèle électrique dynamique développée dans la partie précédente, après l'avoir validé en fonction des résultats du fournisseur, pour estimer notre SOC de batterie. Il s'agit de calculer la tension à vide du module de batterie après l'avoir chargée sur le banc expérimental, et ensuite de l'intégrer dans le modèle dynamique équivalent sous MATLAB Simulink comme il nous permet de calculer le SOC.

A la réception de nos deux modules NHP 34 Ah de batterie, ils étaient déchargés à 5% (SOC initial = 5%), donc la première étape était de les charger pendant 36 heures, avec une tension de charge $V_{charge} = 1.47$ V/cellule et un courant $I_{charge} = 1$ A.

Afin d'éviter le court-circuit entre les deux modules, nous avons utilisé chaque module pour chaque profil de courant, et qui a été divisé donc par 2. Le premier module a été chargé d'un SOC initial de 5% jusqu'à SOC max = 97%, soit une tension à vide de 13.56 V. Le deuxième module quant à lui, était chargé jusqu'à SOC max = 88%, soit une tension à vide de 12.8 V. Notons que les valeurs des SOC max ont été définies en se basant sur le modèle théorique équivalent validé par rapport aux résultats du fournisseur de batteries, et la tension maximale d'un module NHP 340-10 est égale à 15 V et sa valeur minimale est égale à 9 V, avec une tension nominale de 12 V.

Nous avons consacré les essais expérimentaux pour les trois profils de courants suivant : Haut le pied - Desserte 400 Tonnes, comme ils ont un profil de courant similaire, et le Chargement de port. Les profils de courants ont été divisés par deux et intégrés dans l'interface LabView de la charge électronique, et pour éviter le court circuit entre les deux modules, nous avons exploité chaque module à part pour chaque profil de courant.

✿ Premier essai – Profil de chargement de port

La figure 3.31 présente le résultat comparatif entre une courbe expérimentale d'un module de batterie NiMH NHP et une courbe du modèle théorique équivalent du module lui-même. Cette comparaison se base sur le profil de courant du besoin primordial de notre étude, et qui est le besoin de chargement de port d'une locomotive à 7 Km proche des lignes électrifiées et qui tractent 1800 Tonnes.

Notre banc se compose de deux modules de batteries NHP 12 V, donc chaque module a été exploité dans chaque profil de courant. Après avoir chargé les modules, nous avons réalisé notre premier essai avec le module avec SOC_{max} égal à 97%, soit une tension à vide de 13.56 V. Cette tension est identique pour les deux modèles théorique et expérimentale. Le module est une échelle réduite d'une branche complète de 56 modules en série, et pour prendre en compte la branche en parallèle, nous avons divisé par deux le profil des pics de courant. Cet effet donne naissance à un essai à échelle réduite du pack de batterie.

Pour un pic de courant de 140 A, VBAT expérimental est égale à 10.3 Volts et VBAT théorique vaut 11.2 Volts. Cette petite ondulation de tension est très normale comme ceci est dû à la résistance interne de la batterie et à la température de fonctionnement. L'état de charge décroît ainsi d'un pourcentage de 50% à partir de sa valeur maximale, avec SOC_{final} est égale à 40%. Nous pouvons aussi constater que le fournisseur nous a validé un modèle dynamique moyen par rapport à notre cahier des charges et non pas un modèle réel, comme la courbe expérimentale nous décrit une variation de tension qui varie le pic de courant. Cette variation se caractérise par la présence d'une capacité en interne en parallèle de la tension batterie pour la filtrer. Notons, que la courbe expérimentale est presque identique à la courbe théorique dynamique moyenne, avec une petite différence

d'ondulation de tension de 1 V causée de résistance interne, qui est une valeur maximale lors d'un pic de courant élevé. Cet essai expérimental nous démontre ainsi le grand intérêt d'une telle technologie par rapport aux autres types de batteries comme par exemple batterie au plomb ou batterie NiCd où l'ondulation peut atteindre 5 à 7 V, à cause de sa valeur de résistance interne qui est assez importante, ce qui leurs réduisent leurs durée de vie et augmentent les pertes.

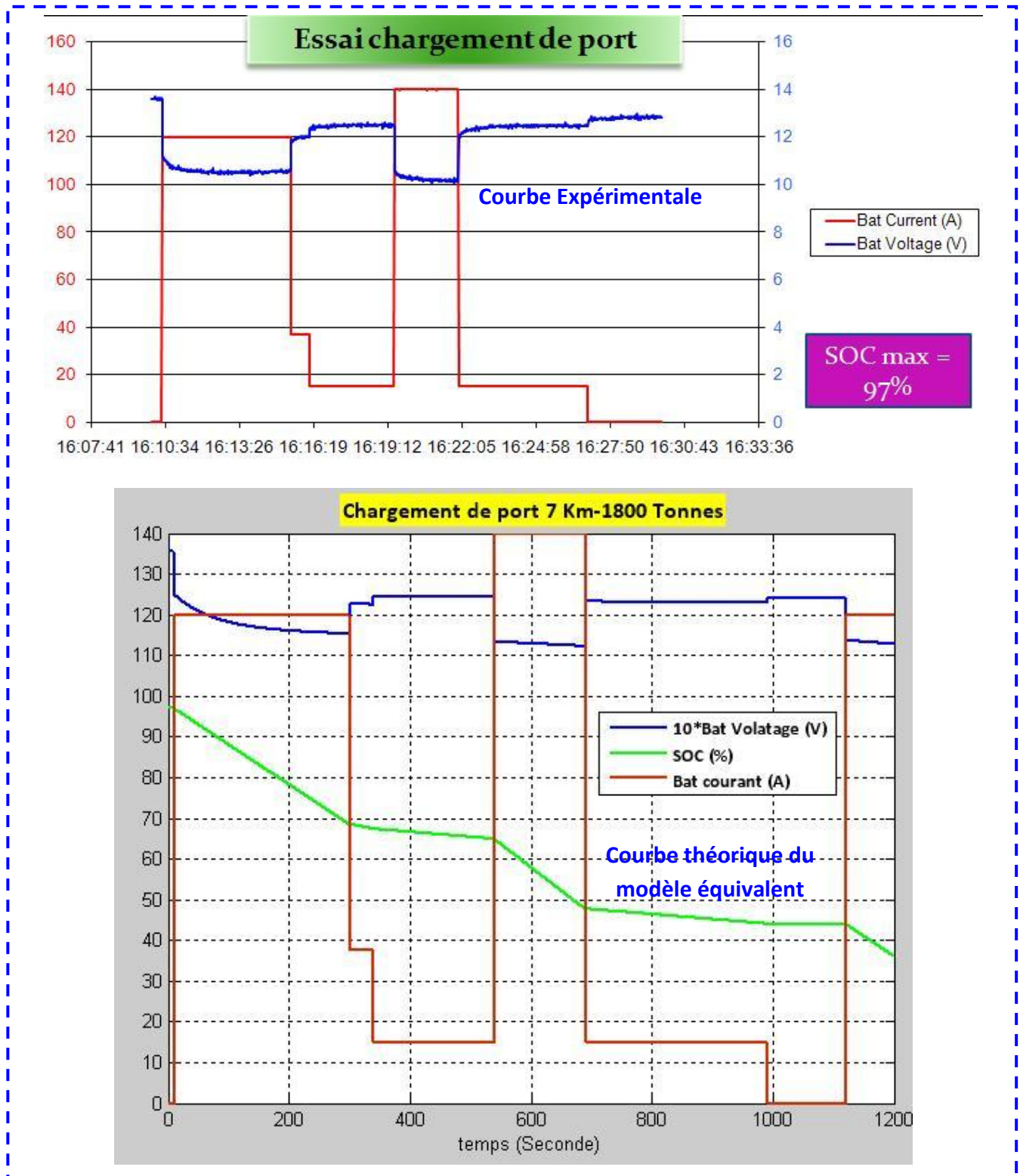


Figure 74.31 Premier Essai-Cycle de besoin chargement de port à échelle réduite entre la théorie et l'expérimentale

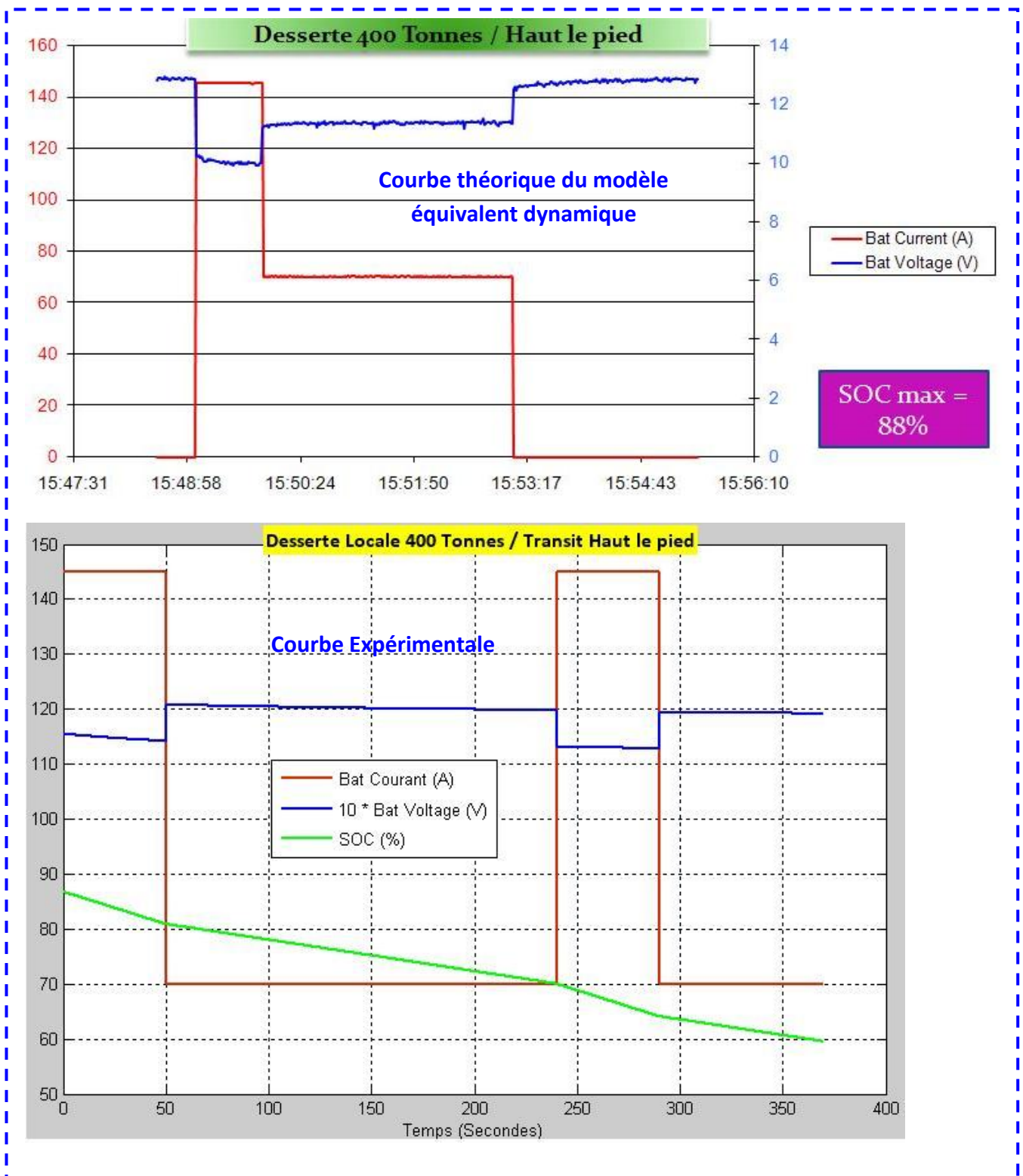


Figure 75.32 Deuxième Essai-Cycle de deux besoins- Desserte locale/Transit haut le pied- à échelle réduite entre la théorie et l'expérimentale

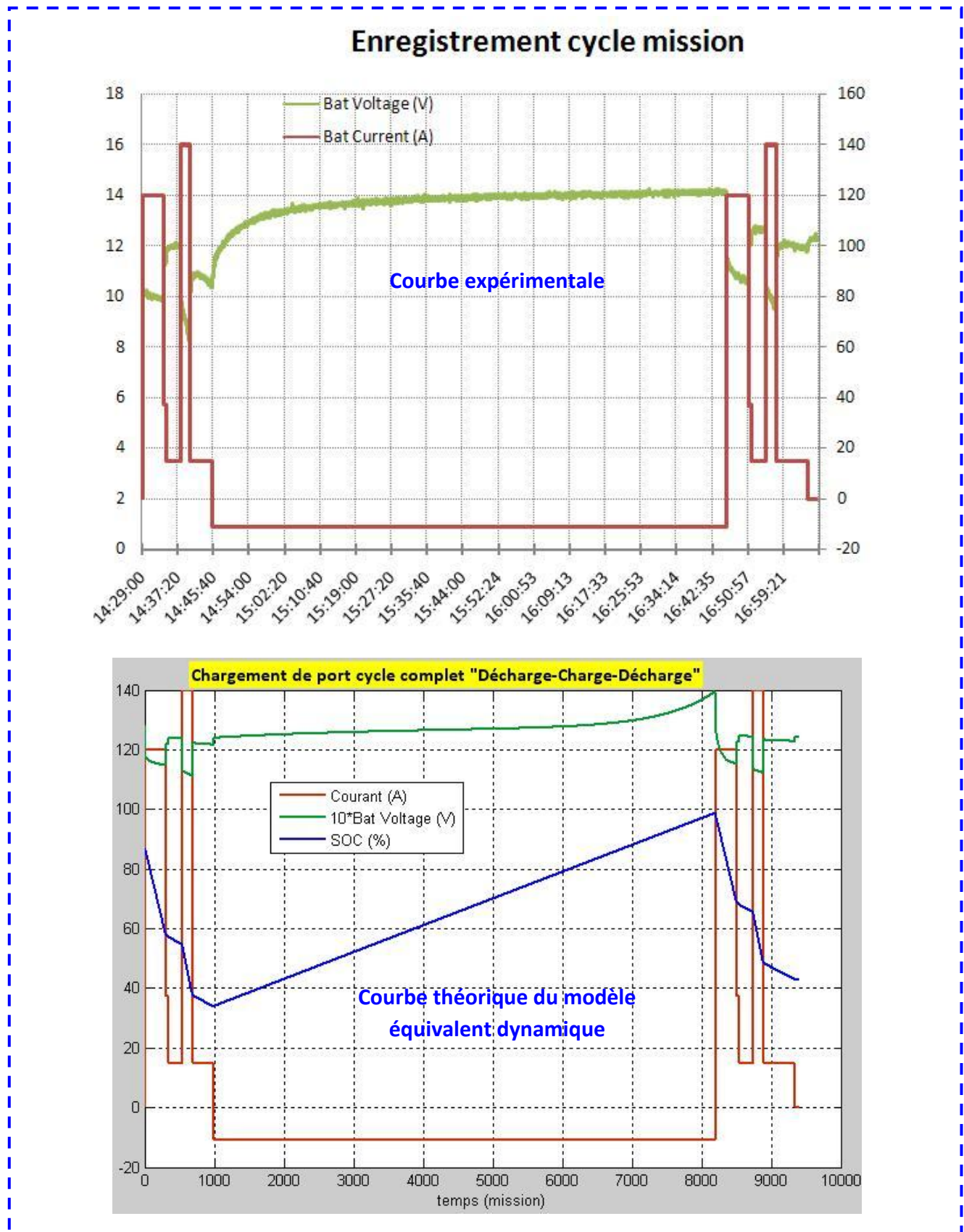


Figure 76.33 Troisième Essai-Cycle chargement de port/cycle complet « Décharge Charge Décharge »- à échelle réduite entre la théorie et l'expérimentale

❁ Deuxième essai : Cycle de deux besoins- Desserte locale/Transit haut le pied

La figure 3.32 présente le résultat comparatif entre une courbe expérimentale d'un module de batterie NiMH NHP et une courbe du modèle théorique équivalent du module lui-même. Cette comparaison se base sur le profil de courant deux besoins qui dépendent d'un même profil des pics de courant. Il s'agit d'un besoin de desserte locale proche du terminal avec 400 tonnes d'une charge remorquée et une distance d'autonomie de 50 Km, et d'un besoin de transit d'une locomotive FRET en haut le pied vers un nouveau point commercial pour une distance d'autonomie de 118 Km.

Après avoir chargé les modules, nous avons réalisé notre premier essai avec le module avec SOC_{max} égal à 88%, soit une tension à vide de 12.8 V. cette tension est identique pour les deux modèles théorique et expérimentale. Le module est une échelle réduite d'une branche complète de 56 modules en série, et pour prendre en compte la branche en parallèle, nous avons divisé par deux le profil des pics de courant. Cet effet donne naissance à un essai à échelle réduite du pack de batterie.

Pour un pic de courant de 150 A, VBAT expérimental est égale à 10.05 Volts et VBAT théorique vaut 11.5 Volts. Cette petite ondulation de tension est très normale comme ceci est dû à la résistance interne de la batterie et à la température de fonctionnement. L'état de charge décroît ainsi d'un pourcentage de 28% seulement à partir de sa valeur maximale, avec SOC_{final} de 60%.

Notons, que la courbe expérimentale est presque identique à la courbe théorique dynamique moyenne, avec une petite différence d'ondulation de tension de 1.5 V causée de résistance interne, qui est une valeur maximale lors d'un pic de courant élevé. La variation de la tension est ainsi caractérisée par la présence d'une capacité en interne en parallèle de la tension batterie pour la filtrer

A la fin de l'essai, et après avoir appliqué le dernier pic de courant, nous obtenons une tension à vide E0 (finale) de 12.8 V et sous modèle théorique, E0 (finale) de 12.6 V. ceci montre la compatibilité des deux modèles, sachant que le modèle théorique est un modèle moyen (E-R.I).

❁ Troisième essai : Cycle chargement de port/cycle complet Décharge-Charge-Décharge

La figure 3.33 présente le résultat comparatif entre une courbe expérimentale d'un module de batterie NiMH NHP et une courbe du modèle théorique équivalent du module lui-même. Cette comparaison se base sur le profil de courant du besoin complet de notre étude et le plus sévère, qui est le besoin de chargement de port d'une locomotive à 7 Km proche des lignes électrifiées et qui tractent 1800 Tonnes au début et fin de mission. Il s'agit d'un cycle complet qui se compose de trois parties : une première partie correspondant à un cycle de décharge de la batterie sous lignes non-électrifiées, une deuxième partie correspondant à un cycle de charge de la batterie sous des grandes lignes électrifiées et enfin la troisième partie correspondant à un deuxième cycle de décharge de la batterie sous des lignes non-électrifiées. Cet essai est très intéressant et complète ainsi les deux autres essais réalisés, car nous allons traiter le comportement de la batterie en fonction de trois cycles successifs, sachant que nous avons gardé une température constante de 30°.

Pour cela, nous avons chargé un des deux modules NHP 34 Ah pendant 12 heures, avec une tension de charge V_{charge} égal à 1.47 V/cellule et un courant $I_{charge} = 1$ A. nous pouvons bien remarquer que le temps est plus court que celui de la première recharge, car tout simplement notre SOC n'est plus égal à 5%, mais plutôt entre 40% et 60%.

Notons que notre essai dépend des contraintes suivantes:

- Les caractéristiques d'alimentation sont 130 V, 9 KW et $I_{max} = 80$ A
- La charge électronique peut tirer jusqu'à 1200 A
- Le SOC max à $t = 0$ Secondes est égal à 86.8 %
- La tension à Vide $E0 = 12.83$ Volts
- La Température de refroidissement à eau = 15°

Dans la première partie du cycle, Pour un pic de courant maximal de 140 A, VBAT expérimental est égale à 9.1 V et VBAT théorique est égale à 11.1 V, soit une ondulation de tension de 2 V. nous constatons que l'ondulation a augmenté de 1 V par rapport au premier essai réalisé du chargement de port. Nous pouvons donc écrire que :

$$\left. \begin{array}{l} \Delta V1 = \Delta V0 + 1 \\ \Delta V2 = \Delta V1 + 1 \\ \vdots \\ \text{soit, } \Delta V_n = \Delta V_{n-1} + 1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Avec } n \in [0, Nbre_{cycle\ total}] \text{ correspond au nombre d'essai} \\ \text{réalisé} \\ \Delta V \text{ Correspond à la tension ondulée} \\ Nbre_{cycle\ total} \text{ Correspond au nombre de cycle total de la} \\ \text{batterie pendant sa durée de vie} \end{array}$$

Le SOC_{final} pendant un cycle de décharge est égal à 36%, qui décroît donc d'un pourcentage de 50% et ce qui correspond exactement au dimensionnement du pack complet.

La deuxième partie du cycle consiste à recharger le module de batterie avec un courant constant de 11 A comme il s'agit d'un seul module (le courant de rechargement du pack complet est égal à 22 A, soit de deux modules en parallèle). VBAT expérimentale croît de 10.4 V jusqu'à 11.7 V après 2 heures de chargement à courant constant et à une température de refroidissement de 15°, tandis que VBAT théorique croît de 12.1 V jusqu'à 13.9 V. L'ondulation de tension est donc de 2 V et le SOC augmente de 36 % jusqu'à 98.74 après 2 heures de rechargement.

La troisième partie du cycle est le cycle de décharge qui se répète à la fin de la ligne. Pour un pic de courant de 140A, VBAT expérimentale est égal à 9.44 V et VBAT théorique est égal à 11.2 V. En comparant des valeurs par rapport à la première partie du cycle, nous trouvons que :

$$VBAT_{\text{expérimental}} \text{ déch1} = VBAT_{\text{expérimental}} \text{ déch2}$$

$$VBAT_{\text{théorique}} \text{ déch1} = VBAT_{\text{théorique}} \text{ déch2}$$

Le SOC final est égal à 42.99 %, qui est plus grand que le SOC final de 36% dans le premier cycle de décharge. Ceci est bien logique comme notre SOC_{max} au départ du premier cycle est égal à 86.8% et le SOC_{max} au départ du deuxième cycle de décharge est égal à 98.74%.

Notons, que la courbe expérimentale est presque identique à la courbe théorique dynamique moyenne, avec une petite différence d'ondulation de tension de 1.5 à 2 V causée de résistance interne, qui est une valeur maximale lors d'un pic de courant élevé. La variation de la tension est

ainsi caractérisée par la présence d'une capacité en interne en parallèle de la tension batterie pour la filtrer.

Conclusion

Pour conclure, les essais expérimentaux des différents profils de mission nous ont permis de consolider notre choix technique final de système de stockage d'énergie et son dimensionnement. Nous remarquons que les résultats expérimentaux et les résultats du modèle dynamique moyen théorique, se confondent et sont identiques à une proportion près dû à l'ondulation de la tension de la batterie NiMH. Cette ondulation varie entre 0.7 V et 2 V maximum, qui est causée par la résistance interne de la batterie. Ces essais nous démontrent ainsi le grand intérêt d'une telle technologie par rapport aux autres types de batteries, comme par exemple la batterie au plomb ou la batterie NiCd comme l'ondulation de la tension peut atteindre 5 à 7 V, à cause de sa valeur de résistance interne qui est assez importante, ce qui leurs réduisent leurs durée de vie et augmentent les pertes. Nous pouvons donc noter que :

$$\left. \begin{aligned} \text{VBAT}_{\text{utile_module}} &= \text{VBAT}_{\text{Reel_module}} - \Delta V_{\text{module}} \\ \text{VBAT}_{\text{utile_pack}} &= 56 \times (\text{VBAT}_{\text{Reel_module}} - \Delta V_{\text{module}}) \\ \text{VBAT}_{\text{utile_pack}} &= 56 \times (E_{\text{Reel_module}} - R \cdot I) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{Avec : } 0.5 \leq \Delta V \leq 2 \\ &\text{Soit, } \Delta V \approx R \times I \text{ (L'ondulation de la} \\ &\text{tension est proportionnelle à la résistance} \\ &\text{interne de la batterie)} \end{aligned}$$

Le modèle dynamique moyen théorique de la batterie ne prend en compte de la description électrique détaillée du module de batterie, car notre objectif principal ne se concentre pas dans l'identification des paramètres interne du circuit électrique. Grâce aux essais expérimentaux, nous avons réussi à démontrer que le pack de batteries NiMH répond à 95% aux performances attendues du système de stockage d'énergie dans notre kit autonome. D'un autre côté, le dimensionnement réalisé du pack de batteries, qui se compose de 56 modules en série et 2 branches en parallèle, est bien validé, et donc les courbes théorique du fournisseur de batteries sont aussi validées.

Après l'analyse des courbes expérimentales, la variation de la tension est ainsi caractérisée par la présence d'une capacité en interne en parallèle de la tension batterie comme fonction de filtration.

La variation de la tension est ainsi caractérisée par la présence d'une capacité en interne en parallèle de la tension batterie pour la filtrer.

Les résultats obtenus nous encouragent à pousser études de validation plus loin et plus profondes pour la validation complète du pack de batteries de notre power pack hybride à échelle unitaire, afin de traiter l'influence de la température de refroidissement sur le comportement de la batterie NiMH, surtout que l'assemblage des différentes modules dans un seul coffre doit-être étudiée et validée. Dans le cadre du projet de la locomotive hybride de Stendal, le coffre de batteries NiCd a été changé deux fois car l'assemblage des différents modules n'était pas bien validé et du coup les batteries ont perdu leurs durées de vie si rapidement à cause de la température du coffre. Ils ont ensuite proposé d'assembler les différents modules en laissant quelques millimètres libres entre chaque module. Or, les batteries NiMH sont plus sensibles et plus influencées par la température que les batteries NiCd.

Enfin, les essais nous permettent aussi de prendre en compte les paramètres nécessaires à notre développement de gestion d'énergie du système, et qui comprend une tâche primordiale du contrôle de l'état de charge de la batterie. Ce sujet sera traité dans le chapitre 4.

3.5. Conclusion

Ce chapitre vient de compléter le chapitre 2 consacré au dimensionnement énergétique et la solution envisagée pour le système autonome hybride de la source hybride embarquée. Nous avons complété dans un premier temps l'architecture de la chaîne de traction de la locomotive électrique à option hybride. Ensuite, nous avons détaillé le dimensionnement des deux sources d'énergie de notre power pack hybride, du groupe électrogène (moteur Diesel M2 V6 + alternateur à aimant permanent/redresseur pont diode) d'une puissance électrique utile DC de 325 KW, et d'un pack de batteries NiMH associé à un convertisseur bidirectionnel (56 modules en série/2 branches en parallèle, NiMH NHP 340-10) d'une puissance utile de 200 KW DC et d'une capacité énergétique de 68 Ah. Nous avons effectué une comparaison dimensionnelle entre une batterie NiMH et une batterie Li-ion pour notre kit autonome. Nous pouvons ainsi confirmer, suite au bilan comparatif obtenu, que les batteries Li-ion sont très prometteuses pour les futures applications hybrides, surtout notre power pack hybride.

Nous avons aussi abordé dans ce chapitre la modélisation du système se basant sur un bilan de puissance complet permet de prendre en compte les pertes du système. Nous avons aussi développé le modèle dynamique moyen équivalent du pack de batteries NiMH, et le validé dans un premier temps par les résultats du fournisseur, et dans un deuxième temps par les essais expérimentaux à échelle réduite du pack de batteries NiMH, qui nous ont permis de consolider notre choix technique final de système de stockage d'énergie et son dimensionnement. Les essais expérimentaux nous permettent aussi de prendre en compte les paramètres nécessaires à notre développement de gestion d'énergie du système, et qui comprend une tâche primordiale du contrôle de l'état de charge de la batterie. Ce sujet sera traité dans le chapitre 4.

Chapitre 4

Développement du contrôle-commande et de la gestion d'énergie du kit hybride embarqué

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une démarche de dimensionnement appliquée à la conception d'une source d'énergie embarquée à intégrer dans une locomotive électrique. Cette étude nous a permis de créer une modélisation des deux sources d'énergie, source de tension et source de courant, d'une part avec un modèle d'analyse en flux de puissance qui permet de jouer les missions du cahier des charges, avec la configuration et l'architecture issues. Un modèle dynamique moyen du pack de batteries NiMH a été réalisé et validé grâce aux essais expérimentaux à échelle réduite, qui nous a permis de consolider deux objectifs primordiaux, le dimensionnement du pack de batteries et le choix technique effectué répondant aux performances recherchées et au comportement réel de la batterie NiMH. A la suite de cette analyse, un choix de configuration a été fait : un groupe Diesel M2 V6 300/390 KW avec une puissance nominale de 350 KW et 56 modules de batteries NiMH NHP 340-10 disposés en série et deux branches en parallèle, soit 112 modules. Dans ce chapitre, nous abordons la dernière phase du développement de la source d'énergie hybride embarquée par le développement du contrôle-commande et la mise en œuvre de la gestion d'énergie. Ce chapitre est organisé en plusieurs sections. La première section fait l'état de l'art de différentes méthodes de gestion d'énergie et la mise en œuvre de la gestion choisie pour notre problématique. Il s'agit d'un côté de déterminer les contraintes présentées dans notre application et

les deux modes de fonctionnement de la gestion, mode normal et mode dégradé. Un algorithme fonctionnel a été réalisé dans le cadre de cette section et nous avons déterminé les différentes fonctions de contrôle-commande à intégrer dans l'interface de commande de la locomotive électrique. Dans la deuxième section, nous présentons le modèle d'analyse en flux de puissance des deux sources d'énergie et de la boîte de gestion d'énergie basé sur la gestion énergétique développée, puis nous étudions quelques résultats de simulation. Ce modèle nous permet de déterminer la part de mission destinée à chacune des sources embarquées. Viennent ensuite le dimensionnement préliminaire du hacheur bidirectionnel de stockage, son modèle électrique dynamique moyen et l'architecture électrique globale de notre source hybride embarquée y compris les calculs des régulateurs de tension et de courant. Et enfin la dernière section aborde les critères de faisabilité. Il s'agit notamment du volume et du coût d'investissement du système, de la durée de vie des batteries et les auxiliaires nécessaires

4.1. Développement de la gestion d'énergie

Dans cette section, nous allons développer la stratégie de la gestion d'énergie de notre power pack hybride en déterminant la méthode adoptée correspondante à notre problématique. Il s'agit de présenter les deux modes de fonctionnement lors de la gestion, de développer l'algorithme et les différentes fonctions nécessaires à intégrer dans l'interface contrôle-commande de la locomotive électrique. Mais dans un premier temps nous présenterons les différentes lois de gestion d'énergie existantes dans la littérature [8, 9, 12].

4.1.1. Loi de gestion en ligne : problématique et état de l'art

Dans un véhicule hybride, la détermination de la répartition de la puissance demandée par le conducteur entre le moteur électrique et le moteur thermique est assurée via une loi de gestion. Elle peut être aussi bien appliquée dans logiciel de type forward que backward. Lors de sa conception, deux objectifs sont à respecter :

- Le contrôle de l'état de charge de la batterie sur un cycle de conduite vitesse-temps. Ceci peut être considéré comme une contrainte.
- La réduction de la consommation de carburant, l'objectif étant de tendre vers l'optimum (néanmoins impossible à atteindre). ceci peut être considéré comme un critère.

Pour un même véhicule (notamment mêmes architecture et dimensionnement) et sur cycle considéré, il sera possible de proposer une multitude de lois de gestion en ligne, contrairement à la loi optimale de l'énergie sur ce cycle, qui est unique.

Comparaison de stratégies

Delpart insiste sur la difficulté de comparer des stratégies entre elles vis-à-vis du critère consommation, car souvent chacune nécessite une phase de réglage qui peut être plus ou moins

longue. L'idéal est donc de les comparer lorsque leurs paramètres respectifs sont optimisés, ce qui est un problème complexe dont la résolution paraît difficilement envisageable.

Une condition sine qua non à la comparaison de stratégies, est d'annoncer les consommations de carburant pour une différence d'état de charge nulle entre le début et la fin du cycle de conduite envisagé :

- S. Delprat introduit un critère permettant de comparer des stratégies fournissant des différences d'état de charge variables. Les résultats de consommation pour ΔSOC donné sont rapportés à la consommation fournie par l'optimisation pour ΔSOC . Il faut alors prendre en compte le fait que la variation de consommation sur le cycle par unité de ΔSOC pourrait dépendre de la stratégie considérée
- Une autre possibilité pour annoncer la consommation est de faire travailler la stratégie directement à iso-état de charge. nous verrons que cela est possible si celle-ci respecte un certain nombre de conditions suffisantes.

✿ Revue des lois de gestion d'énergie proposées dans la littérature

☞ **Lois de gestion basées sur des règles empiriques ou issues de l'analyse énergétique du système véhicule hybride**

Lois de gestion empiriques On trouve dans la littérature un grand nombre de lois de gestion en ligne de conception empirique. Parmi celles-ci, on trouve beaucoup de lois utilisant la logique floue. La plupart de ces stratégies sont telles que la batterie est déchargée, plus la stratégie a propension à la recharger ; ceci afin de maintenir l'état de charge batterie dans des limites raisonnables.

On peut reprocher à ce type de démarche d'être parfois difficilement justifiable. Néanmoins, elles peuvent fournir de bons résultats.

Thermostat la stratégie du thermostat consiste à se placer en mode hybride lorsque l'état de charge atteint une valeur de seuil bas, et en mode électrique lorsqu'il atteint une valeur de seuil haut. Entre ces deux valeurs, le mode courant est conservé. Cela revient donc à une stratégie oscillant entre mode hybride et mode tout électrique avec une hystérésis sur l'état de charge. Les seuils de déclenchement peuvent être fixés ou variables.

Cette stratégie présuppose que le mode tout électrique est possible. D'autre part, celui-ci ne doit pas l'être que sporadiquement :

- D'une part, le moteur électrique et la batterie doivent être suffisamment puissants pour subvenir aux besoins à la roue en usage moyen ;
- D'autre part, l'énergie disponible dans la batterie doit être suffisante pour que le mode tout électrique dure assez longtemps

Cela restreint donc l'intérêt du thermostat aux architectures et dimensionnements fortement hybridés (« full hybrid »). De telles stratégies ont été utilisées notamment pour les véhicules hybrides série, pour lesquels elles sont bien adaptées.

☞ **Lois de gestion basées sur l'analyse des flux énergétiques dans le système véhicule hybride**

Minimisation instantanée des pertes : dans cette loi de gestion (loss Minimization strategy : LMS), la somme des pertes dans la chaîne de traction est évaluée pour une valeur de couple et de vitesse à la roue, et pour chaque rapport de boîte possible. L'objectif est de choisir la répartition de puissance et le rapport qui minimisent ces pertes. Cependant, dans ces conditions l'état de charge n'est pas contrôlé. Il est donc nécessaire d'introduire une fonction de sensibilité qui va déplacer ce point de fonctionnement en faveur de la charge ou décharge batterie.

Calcul de la consommation équivalente : si l'on envisage de travailler en charge sustaining, la décharge de la batterie à un instant donné sera compensée par une recharge ayant lieu plus tard, provenant :

- D'une part, de la récupération au freinage ;
- D'autre part, de recharge directe par le moteur thermique (flux série).

Dans la loi de gestion ECMS (Equivalent consumption Minimization strategy), une consommation de carburant équivalente à la recharge future de la batterie est calculée. L'objectif est de choisir le rapport de boîte et le couple moteur thermique minimisant à chaque instant la consommation instantanée de carburant plus la consommation équivalente à la décharge batterie. Sans quoi l'état de charge batterie ne ferait que diminuer.

☞ Méthodes basées directement sur des résultats d'optimisation globale

Les algorithmes d'optimisation globale permettent :

- ▶ De définir des consommations de référence. A modèle identique et sur le cycle considéré, une stratégie en ligne ne pourra donner une consommation plus faible
- ▶ Dans certaines circonstances, et avec certaines modifications, il est possible d'utiliser plus ou moins directement les résultats de l'optimisation sans passer par la phase d'analyse des différentes phases de fonctionnement par un humain ;
- ▶ De faciliter la constitution de lois expertes via l'analyse des résultats d'optimisation. Cette expertise pourra ensuite être mise à profit dans l'élaboration de stratégies en ligne.

☞ Utilisation directe des résultats de l'optimisation

A. Dubray s'attache à l'architecture hybride série, dans le cas d'un bus. Sur un cycle vitesse-temps donné, elle obtient via le principe du maximum de Pontriaguine, une cartographie $P_g = f(P_R, K)$ donnant la puissance du groupe électrogène en fonction de la puissance demandée à la roue et d'un paramètre scalaire K définissant la propension à plus ou moins décharger la batterie sur le cycle. Chaque valeur de K correspond à une différence d'état de charge ΔSOC sur le cycle, la répartition instantanée de puissance entre la batterie et le groupe électrogène état optimale, et donc la consommation de carburant sur le cycle minimale. Par dichotomie est obtenue la valeur de K qui réalise l'iso-état de charge sur le cycle. Cette valeur correspond à un profil d'état de charge optimal sur le cycle. Le véhicule étudié étant un bus, il est possible de connaître avec précision le chemin emprunté, ce qui rend possible la régulation de l'état de charge par rapport à la valeur optimale placée en mémoire du calculateur. Notons que :

- ▶ Cette cartographie est valable pour un usage donné (cycle, charge en passagers, etc.) ;
- ▶ La cartographie donnant la puissance du groupe électrogène fonction de la valeur de K et de la puissance demandée à la roue est une fonction. Notons que certaines des résultats fournis montrent que ce n'est pas toujours le cas (il n'y a pas de raison a priori que ce le soit) ; suivant l'instant dans le cycle vitesse-temps, il est possible qu'à un point de couple et vitesse à la roue, deux répartitions différentes soient optimales. En particulier, pour une répétition d'un même cycle élémentaire :
 - Soit un cycle élémentaire est tel que l'état de charge entre le début et la fin de celui-ci est le même, en considérant l'état de charge optimal sur la succession de cycles élémentaires ;
 - Soit celui-ci est différent, et alors pour travailler à iso-état de charge sur le cycle complet, il est nécessaire qu'à un moment ou un autre la répartition de couple sur un cycle élémentaire diffère de son successeur (par exemple en réalisant plus de flux série).

Pour pouvoir utiliser ce type de cartographie en ligne sur un cycle vitesse-temps inconnu, il est intéressant de faire varier le cycle et d'observer l'évolution de $P_g = f(P_R, K)$. Soit celle-ci varie peu et alors il est possible de l'utiliser directement en ligne, soit dans le cas contraire il est nécessaire de choisir un jeu de cycles couvrant tous les usages possibles du véhicule (urbain, routier, autoroutier), et d'établir sur chacun d'entre eux la cartographie optimale correspondante. Il reste à savoir en conditions de fonctionnement :

- ▶ Quelle cartographie utiliser (urbain, routier, autoroutier) ;
- ▶ Avec quelle valeur de K , c'est-à-dire en visant quel état de charge sur le cycle.

☞ Utilisation indirecte des résultats de l'optimisation

S. Delprat utilise un algorithme d'optimisation globale modifié pour satisfaire les contraintes d'une utilisation en ligne (« version instantanée »). Celui-ci est paramétré par un paramètre λ analogue au K utilisé par A. Dubray, c'est-à-dire qu'il régit la propension de la batterie à se décharger. Cette stratégie est nommée λ -control, car la valeur de λ est régulée de manière à ce que l'état de charge de la batterie reste compris dans une certaine plage de valeurs. Le régulateur est de type proportionnel-intégral.

Soulignons le fait que cette stratégie dérivée de l'algorithme d'optimisation globale n'est pas celle qui donne la consommation la plus faible. En effet, une stratégie de type thermostat (donc empirique) testée par S. Delprat s'avère donner des consommations plus proches de l'optimum dans un facteur 2. Cela est compréhensible, dans la mesure où un algorithme d'optimisation globale n'est adaptable pour l'usage en ligne qu'avec des modifications substantielles.

N. Venot utilise un thermostat avec des seuils d'état de charge variables. Ceux-ci sont déterminés à partir des résultats de l'optimisation globale menée sur une succession de dix cycles représentatifs de l'usage général d'un véhicule. N. Venot n'aborde pas la problématique de la pertinence de cette stratégie par rapport au dimensionnement du véhicule.

Pour notre part, une méthode d'utilisation des résultats d'optimisation hors ligne via une approche par réseaux de neurones. Celle-ci a pour avantage de nécessiter un minimum de réglages.

✿ Analyse des résultats pour élaboration de lois expertes

Une autre voie est d'analyser les résultats d'optimisation afin d'éventuellement observer des comportements récurrents qu'il serait possible de reproduire en ligne.

Pour ce faire, il paraît important de choisir attentivement les cycles à utiliser lors de l'optimisation globale, afin de faciliter l'analyse des résultats.

☞ **Première tentative : application de la méthode statistique des centres mobiles**

Une première idée a été de se placer dans le plan puissance roue / état de charge et d'examiner pour chacun des points correspondants la répartition de puissance entre le moteur électrique et le moteur thermique. La question est alors de savoir si des points proches dans ce plan correspondent à des répartitions moteur électrique / moteur thermique proches. Afin de traiter les données de manière systématique, nous avons utilisé la méthode statistique des centres mobiles.

Un nombre de classes correspondant à une valeur de répartition de la puissance entre le moteur électrique et le moteur thermique est fixé. En quelques itérations, l'algorithme en question permet de minimiser la variance interclasses.

Il aurait été intéressant de voir apparaître une localisation des classes de répartition suivant la valeur d'état de charge et de puissance à la roue. En particulier, une utilisation plus importante du moteur électrique quand l'état de charge et la puissance à la roue augmentent. En réalité, aucune tendance exploitable n'a pu être mise en évidence sur les cycles testés.

☞ **Deuxième tentative : examen des résultats sur des cycles de types créneaux**

L'idée est ici de faciliter l'analyse des résultats. On peut penser que les paramètres entrant en jeu dans la détermination de la stratégie optimale sur un cycle sont :

- ▶ La succession des vitesses sur ce cycle, et leur valeur ;
- ▶ Les accélérations correspondantes.

Ces deux paramètres traduisant la puissance à la roue .comme on envisage de représenter les points de fonctionnement du véhicule dans le plan P_R, P_{ME} , il est intéressant d'obtenir suffisamment de points distincts sur un cycle donné. Une possibilité est de choisir une puissance augmentant (respectivement diminuant) de manière linéaire dans les phases d'accélération (resp. décélération), ce qui peut s'écrire, à une constante multiplicative près :

$$\Omega_R t \frac{d\Omega_R}{dt} = A. t$$

Qui donne :

$$\Omega_R t = B. t$$

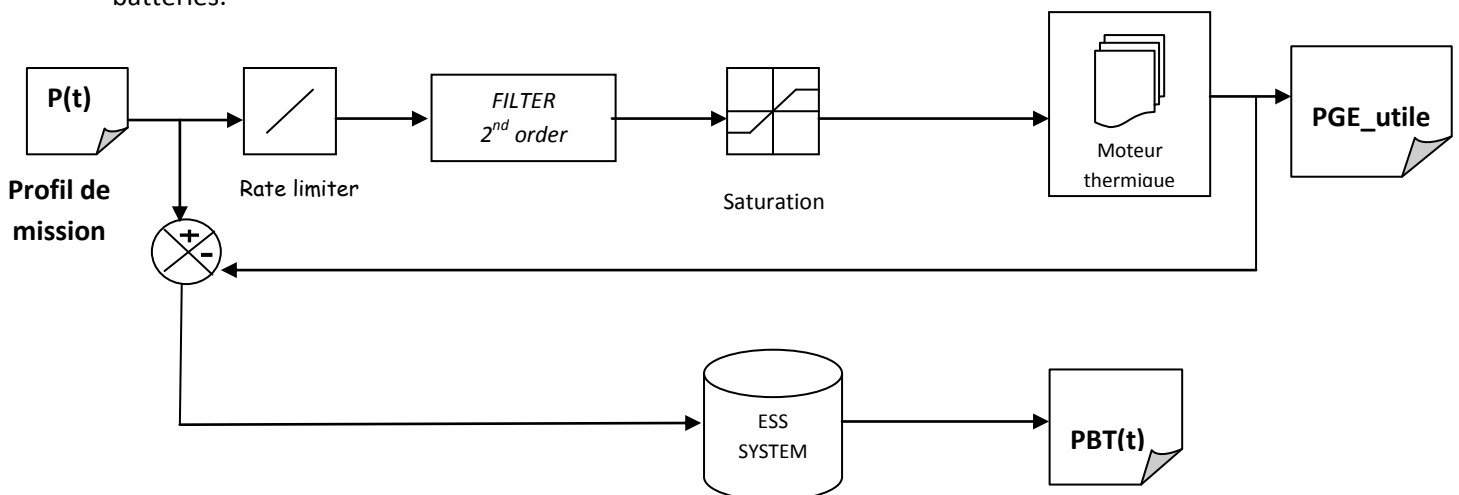
Cela revient à parcourir un créneau de vitesse.

4.1.2. Choix de la gestion adoptée

Telle qu'elle est présentée traditionnellement, la conception séquentielle d'un système électrique hybride consiste à définir son architecture, à le dimensionner, puis à proposer la gestion qui permet d'assurer les missions du cahier des charges. Cette approche traditionnelle est illustrée à la figure suivante :



Le principe de la gestion à appliquer dans notre source hybride telle qu'elle est mise en œuvre pour commander les sources embarquées. Notons que dans ce modèle n'interviennent que des flux de puissance. Il s'agit en effet d'un modèle en flux de puissance. Ce type de modèle nous permet de faire la synthèse énergétique de l'engin sans entrer dans les complications électriques. La mission de puissance $P(t)$ est filtrée par un filtre passe-bas. La partie constituée d'harmoniques de basses fréquences de laquelle est soustraite la puissance nominale du groupe Diesel, est utilisée pour dimensionner le pack de batteries (PBT(t)). C'est donc le choix de la fréquence de filtrage F et de la puissance nominale P_{GEN} du groupe Diesel qui détermine les parts de mission destinées au pack de batteries.



Suite à ce schéma représentatif, on obtient les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} PGE_{utile} = \frac{2 \cdot \pi \cdot F}{2 \cdot \pi \cdot F + S} \cdot P \cdot s \\ PBT_{utile} = P \cdot s - PGE_{utile} \cdot s = \left(\frac{S}{2 \cdot \pi \cdot F + S} \right) \end{array} \right.$$

Après avoir exposé les différentes méthodes de la gestion d'énergie, le choix effectué est de réaliser une gestion d'une boîte noire intelligente, qui dépend des informations et des données pour ses entrées, ensuite cette boîte va fonctionner comme un cerveau qui va pouvoir commander ses sorties. La méthode n'est pas faite à partir du réseau de neurones, mais elle prend aussi en compte la méthode d'optimisation et la commande optimale. Donc la méthode adoptée a mixée entre la

méthode de la boîte noire et la méthode analytique. Les entrées/sorties de la boîte de gestion d'énergie seront mises en œuvre en temps réel, grâce à la création des nouvelles fonctions d'intégration dans l'interface contrôle-commande de la locomotive, comme nous allons considérer que nous sommes en mode 1500 V DC, soit un pantographe virtuel. Nous garderons les fonctions existantes, et nous ajoutons les nouvelles fonctions nécessaires à la gestion d'énergie de notre power pack hybride.

Etant donné que notre kit hybride comportera un groupe diesel et un pack de batteries NiMH, et que nos piques de puissances ne sont pas des piques instantanés (larges au niveau de durée de temps), Le groupe électrogène sera la source d'énergie principale, soit une source de tension, et les batteries seront la source de courant. Il assurera tant qu'il le peut un fonctionnement à consommation/pollution optimale. Pour plus d'optimisation de consommation du carburant, nous avons choisit un moteur à régime variable. Au-delà d'une puissance de 325 KW, les batteries seront sollicitées pour compléter la puissance demandée pour la traction et pour les auxiliaires, en contrôlant son état de charge SOC.

La fonction objective de notre gestion d'énergie est à respecter :

- Le contrôle de l'état de charge de la batterie sur un cycle de mission et la consommation du fuel, afin de parcourir les bouts de lignes non-électrifiées au début et fin de mission ferroviaire avec le kit autonome.
- La rédaction de la consommation de carburant lors de la réalisation des missions.

4.1.3. Détermination des contraintes

Les chapitres précédents mettent en œuvre et détermine les contraintes de la gestion d'énergie. Le dimensionnement énergétique et le choix de la solution adoptée nous mettent en clair les différentes contraintes nécessaires, pour une conception réussite de la gestion d'énergie.

La détermination des contraintes se fait après l'analyse fonctionnelle du système. Notre stratégie d'énergie dépend de plusieurs contraintes. La gestion et l'optimisation optimale du système sont limitées par l'espace disponible dans la locomotive qui a imposé la gestion nécessaire à notre système. La contrainte majeure de notre cahier des charges, qui est l'encombrement disponible dans la locomotive électrique, nous a imposés dans un premier temps le choix des profils de missions, l'architecture fonctionnelle de la source et le dimensionnement énergétique du système, et dans un deuxième temps, elle nous a imposés le choix de la solution technique à adopter et son dimensionnement nécessaire (voir figure 4.1). Les étapes d'étude réalisées sont tous en relief et en cohérence pour élaborer une stratégie d'énergie complète, et prendre en compte les contraintes nécessaires.

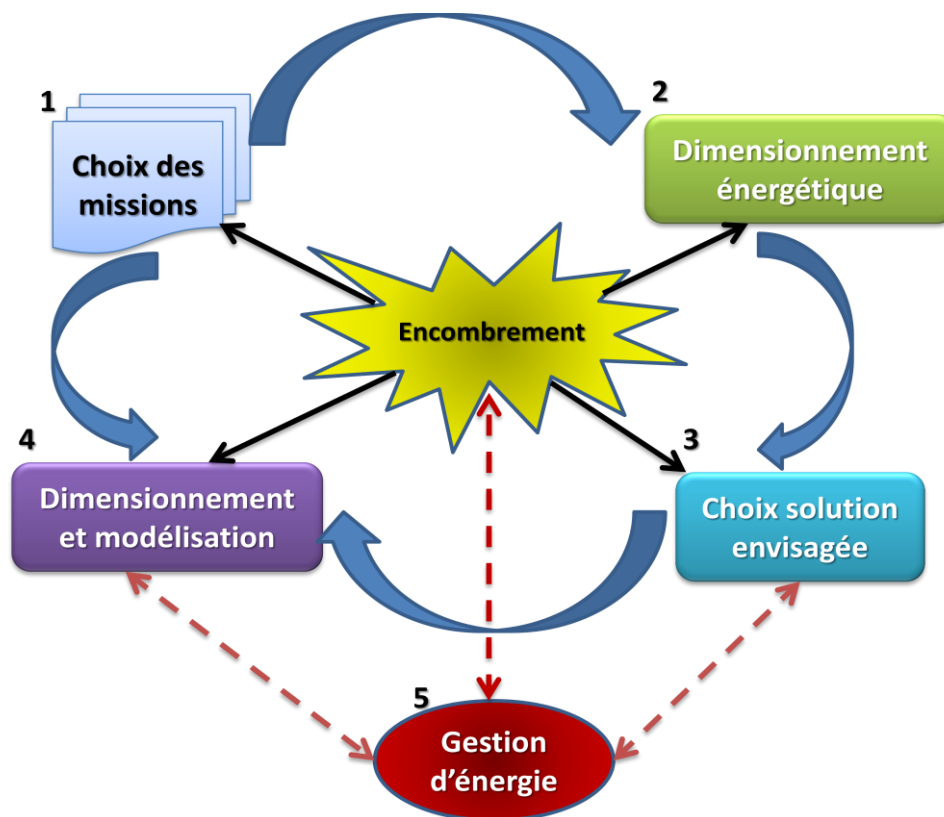


Figure 77.1 Synthèse du fonctionnement du développement de la source hybride embarquée

Les principales contraintes à prendre en compte sont :

- ✚ L'encombrement disponible dans la locomotive (limitation du réservoir de gasoil ce qui implique la limitation de la consommation du carburant,...) limitant le fonctionnement de la source principale et la source secondaire. Comme l'objectif de notre projet est de parcourir les bouts de lignes non-électrifiées pour rattraper les grandes lignes sous caténaire, le temps d'attente et d'arrêt sont donc très limités. Nous comptons dans notre stratégie d'énergie sur la source principale d'énergie qui est une source de tension, qui est le groupe Diesel, pour fournir la puissance moyenne de la traction. En ce qui concerne les pics de puissance au-delà de la puissance moyenne, la source secondaire qui est la source de courant, prenant le fonctionnement nécessaire pour supporter le groupe Diesel.
- ✚ L'énergie qu'on peut stocker dans les batteries ne dépasse pas 32kwh.
- ✚ Gérer le contrôle de l'état de charge de la batterie entre SOC_{min} et SOC_{max} tout au long de la mission.
- ✚ Limiter le courant circulant dans le pack de batteries entre sa valeur maximale de décharge égale à 300 A, et sa valeur minimale de charge de 22 A.
- ✚ Le moteur thermique fournit une puissance maximale utile de 325 KW
- ✚ Les batteries NiMH fournit les pics de puissance nécessaire pour compléter la puissance de traction ; la puissance maximale utile est égale à 200KW, avec une capacité énergétique de 68 Ah, soit une valeur énergétique totale de 46 KWh).
- ✚ Les batteries se déchargent jusqu'à son SOC_{min} de 20%.

- ✚ Les batteries sont chargées soit par la caténaire si nous sommes sous 1500 V DC, soit par le groupe Diesel si notre mission sera effectuée sous des lignes non-électrifiées ou sous des lignes électrifiées différentes de 1500 V DC.
- ✚ Le Groupe Diesel charge les batteries lors de la mission, si la puissance sollicitée est moins que 295 KW et si le SOC est moins que le SOC_{max} pour se préparer pour la prochaine mission à la fin des lignes non-électrifiées.
- ✚ Si la locomotive est sous alimentation caténaire 1500 V DC, les batteries se chargent grâce à un chargeur branché entre la caténaire et les batteries.
- ✚ Si l'état de charge des batteries n'est pas suffisant pour effectuer la traction nécessaire, les batteries seront déconnectées, et le moteur essaie de compléter la mission nécessaire en essayant de réduire les vitesses de traction si c'est possible.
- ✚ Les batteries doivent effectuer la traction nécessaire, même si son état de charge n'est pas maximal, si le réservoir de fuel est presque vide, jusqu'à que son état de charge se rapproche de sa valeur minimal. Cette fonction est essentielle pour éviter le trafic en pleine de ligne et de conduire la locomotive à la station de réparation la plus proche.

4.1.4. Les modes de fonctionnement de la gestion d'énergie

Plusieurs hypothèses faites dans les phases de synthèse et d'analyse, notamment concernant la gestion de la charge des batteries et la gestion du groupe Diesel, doivent être affinées dans cette phase de gestion en temps réel.

Nous considérons deux modes de fonctionnement dans la gestion d'énergie qui sont présentés dans un organigramme synthétique dans la figure 4.2:

- Gestion en mode normal : cette fonction correspond au mode de démarrage, traction et arrêt de la locomotive.
- Gestion en mode dégradé : cette fonction correspond au mode de fonctionnement de notre kit hybride sous une fonction qui nommée « interruption », permettant d'effectuer le mode « PARKING » qui correspond à une fonction pour les batteries toutes seules sans activer le moteur thermique.

Après avoir exposé les différentes méthodes de la gestion d'énergie, le choix effectué est de réaliser une gestion d'une boîte noire intelligente, qui dépend des informations et des données pour ses entrées, ensuite cette boîte va fonctionner comme un cerveau qui va pouvoir commander ses sorties. La méthode n'est pas faite à partir du réseau de neurones, mais elle prend aussi en compte la méthode d'optimisation et la commande optimale. Donc la méthode adoptée a mixée entre la méthode de la boîte noire et la méthode analytique.

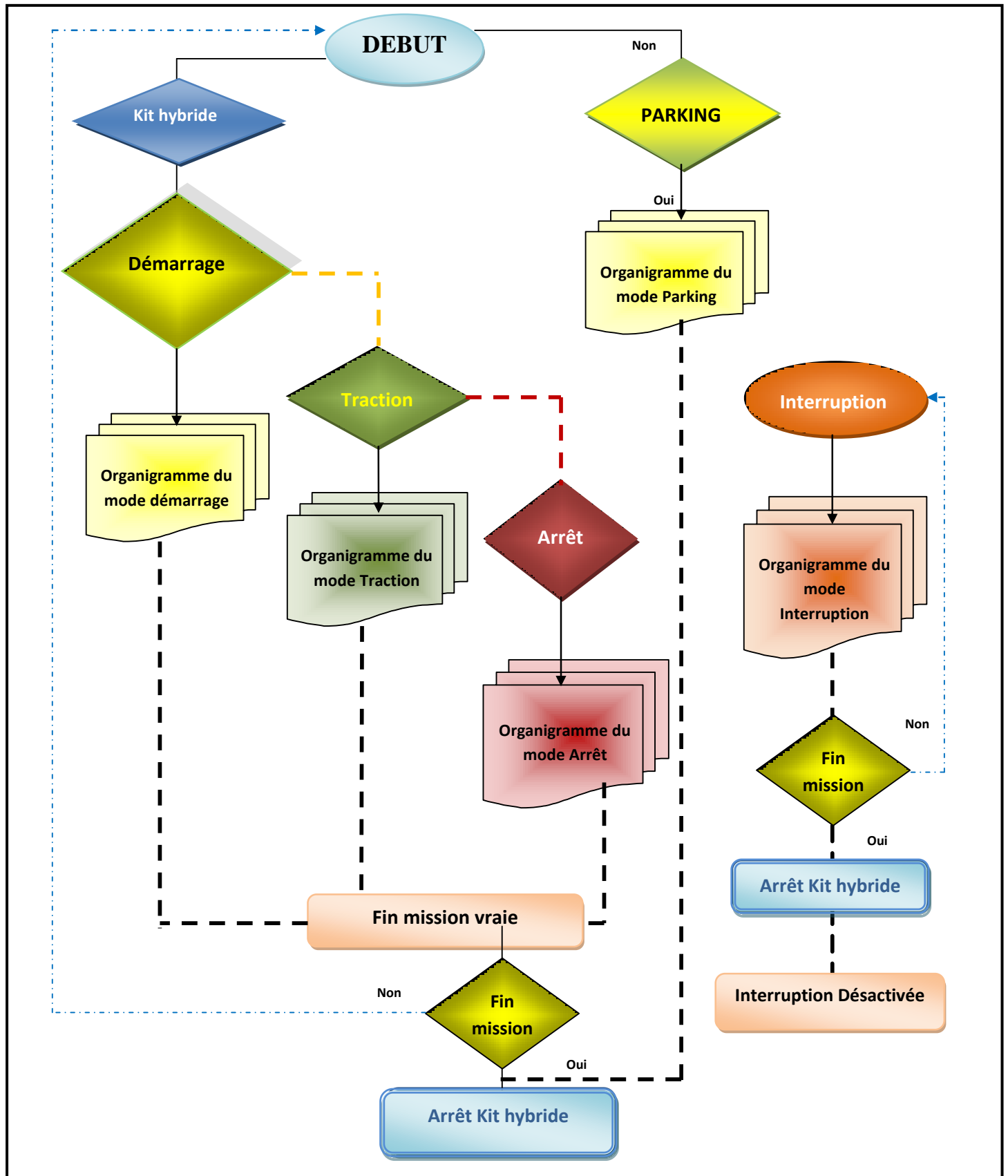


Figure 78.2 Synthèse des différents modes de la gestion d'énergie – Kit hybride embarqué

Nous considérons ainsi la figure 4.3. représentant l'architecture fonctionnelle de notre power pack hybride nécessaire au développement de l'interface de gestion d'énergie. Cette architecture est caractérisée par deux SWITCHS :

1. **SWITCH TRAC** : représentant le lien entre la caténaire 1500 V DC PT3, s'il est en position 1, et/ou le moteur diesel – alternateur/redresseur s'il est en position 2, et la chaîne de traction électrique continu 1500 VDC
2. **SWITCH BAT TRAC** : représentant le lien entre le pack de batteries NIMH et le bus continu 1500 V Continu.

Nous détaillerons dans cette partie les deux modes de fonctionnement, en décrivant l'algorithme nécessaire pour chaque fonction nécessaire au développement de la gestion d'énergie.

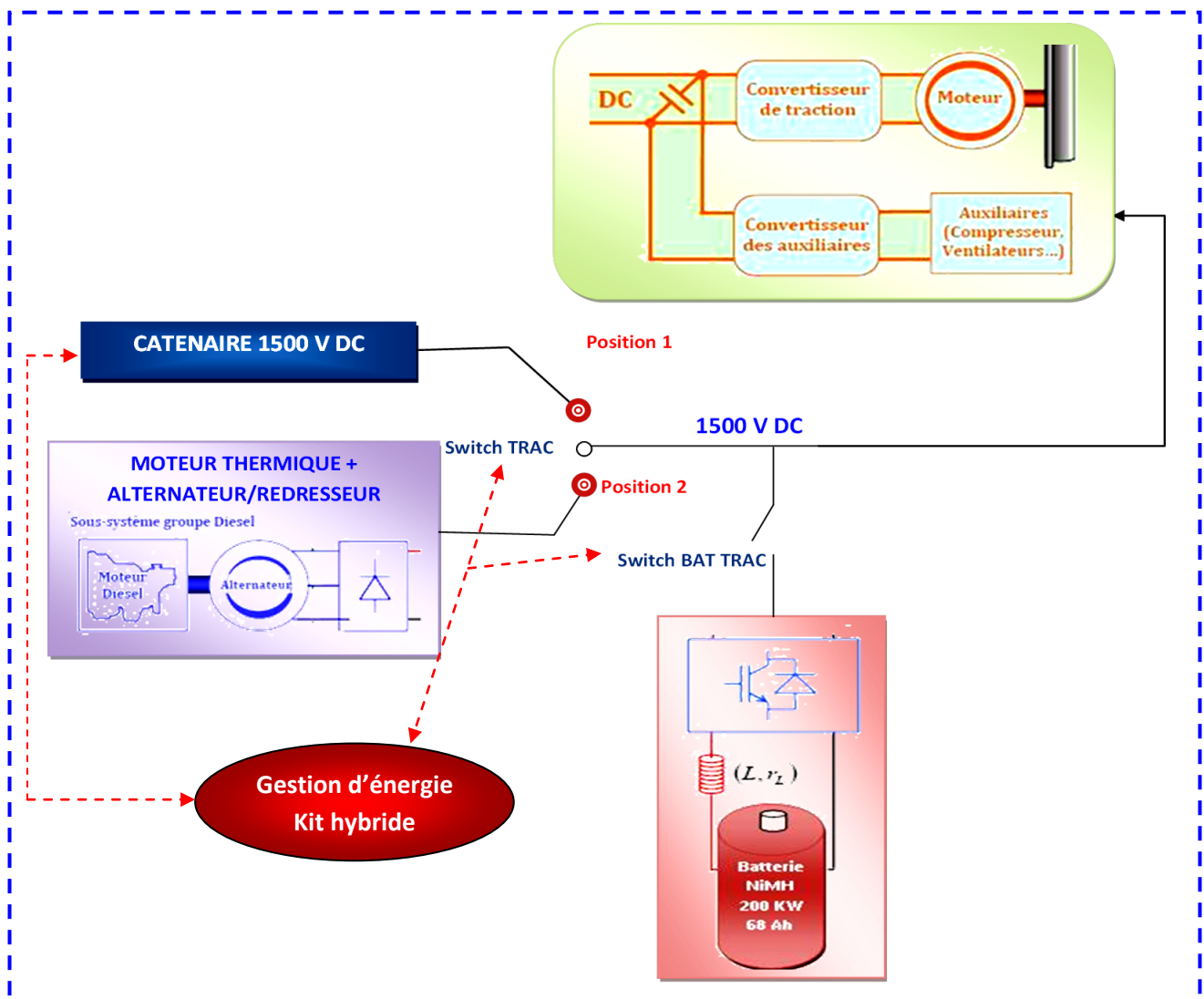


Figure 79.3 Architecture fonctionnelle du kit hybride embarqué- Gestion d'énergie

4.1.4.1. Mode de fonctionnement normal

Ce mode de fonctionnement se caractérise spécialement par un mode normal de la gestion d'énergie. Le mode normal comprend trois phases principales :

- Phase de démarrage
- Phase de traction
- Phase d'arrêt

La condition majeure pour permettre le bon fonctionnement du kit autonome est que les batteries doivent être chargées au maximum avant chaque utilisation. Plus concrètement, trois problématiques s'opposent : la sévérité de la mission, la durée de vie des batteries et la consommation de fuel. Le besoin en énergie utile de stockage des missions difficiles impose que les batteries soient chargées, en cours de mission, le plus rapidement possible à 70%.

Pour cela, nous insistons dans le fonctionnement normal de la gestion qu'il faut ajouter dans la boîte de contrôle commande l'indicateur de l'état de charge des batteries, permettant de contrôler l'état de charge des batteries au démarrage en mode « power pack hybride » si le SOC batterie n'est pas maximal. Aussi nous vérifierons la consommation du carburant lors des réalisations des missions.

D'ailleurs, plusieurs fonctions telles que le contrôle dynamique de la charge et de la décharge ou encore la gestion du groupe Diesel sont basées sur la connaissance de l'état de charge des packs de stockage. Dans le cas des batteries, la situation est beaucoup plus compliquée. En effet, pour une large plage de son état de charge (20% à 70%), la tension d'une batterie reste quasi stationnaire (ce qui rend difficile l'estimation de l'état de charge des batteries à partir de la mesure de leur tension).

De plus, la température a une influence sur la capacité et la tension des batteries. Plusieurs algorithmes existent qui permettent d'estimer l'état de charge des batteries à partir de l'historique du courant, de la tension et de la température. Mais ces algorithmes sont très complexes et demandent un paramétrage différent selon les technologies de batteries. Par conséquent, nous n'envisageons pas de les utiliser pour cette application. En général, on estime l'état de charge des batteries en calculant en temps réel l'énergie stockée, sur la base du modèle R, E de la batterie. Le calcul est réinitialisé à chaque fois que l'on repère la fin de charge (grâce à la tension de la batterie). Cette technique souffre de quelques insuffisances : d'une part, elle ne tient pas compte de la température ; d'autre part, l'estimation des pertes étant nécessairement approximative, plus on s'éloigne du point de repérage de la pleine charge, plus on s'écarte de l'état de charge réel des batteries. Pour prendre en compte cette incertitude sur l'estimation des états de charge, tous les étages de décision basés sur cette estimation prennent en compte le taux d'imprécision : $SOC_{max} \in [68\%, 70\%]$.

Pour notre gestion d'énergie en mode de fonctionnement normal, nous avons opté la solution de dimensionner les batteries pour qu'elles assurent les missions les plus contraignantes sans être chargées, à condition qu'elles soient au maximum de leurs charges au début de la mission, avec un $SOC_{max} \in [68\%, 70\%]$. Pour garantir que les batteries soient au maximum de leurs charges (Voir figure 4.4), à l'aide de notre contrôle commande :

- Au démarrage en mode « kit hybride », nous contrôlons les niveaux de charge des batteries, s'il n'est pas au maximum « SOC_{max} », nous fixerons le chargement des batteries soit à l'aide du moteur thermique ou à l'aide de la caténaire 1500 V DC.

- En fin de chaque mission, nous assurons la recharge des batteries, afin d'assurer le fonctionnement de la prochaine mission sans risque de décharge complet.
- En mode de traction, nous assurerons le contrôle de l'état de charge des batteries et leurs rechargement avec le groupe Diesel si ce dernier fournit une puissance maximale de 295 KW, comme la puissance de chargement des batteries est égale à 15 KW, sachant que le courant de charge est égal à 22 A, sous une tension nominale de 672 V.

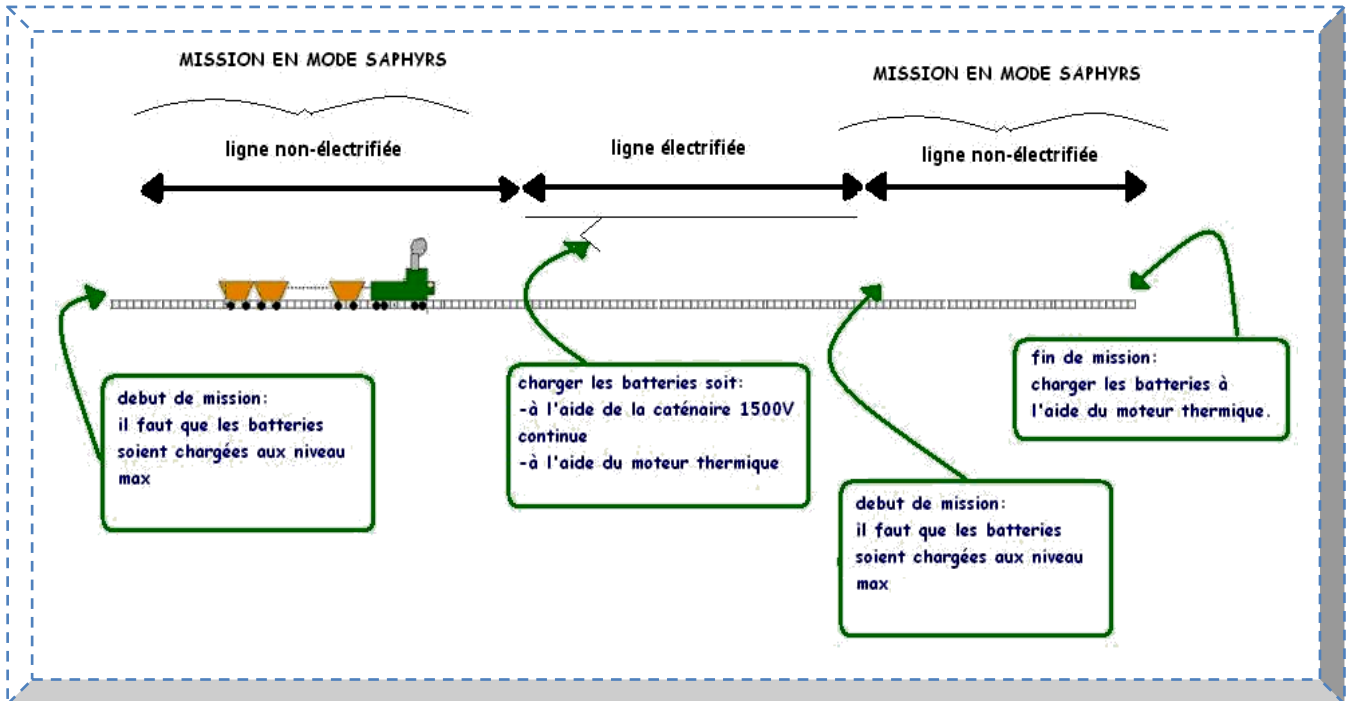


Figure 80.4 Contrôle de l'état de charge sur un cycle de mission

✿ Notion du contrôle de l'état de charge sur un cycle de mission

Pour un cycle ne représentant pas des conditions d'usage extrêmes propices à l'apparition du mode dégradé, il est de bon aloi que l'état de charge batterie reste dans les limites préconisées par le constructeur.

L'architecture de la source d'énergie hybride embarquée nommée A étant connue, fixons une chaîne de traction C. la puissance demandée par les accessoires est connue à chaque instant.

Notons alors $S(A,C)$ l'ensemble des stratégies de gestion possibles S pour le véhicule C, l'architecture A étant définie. Une stratégie associée à un état de charge initial SOC_i un cycle vitesse-temps donné V, et un profil de demande accessoires P_{ACC} un profil d'état de charge sur le cycle SOC :

$$s \in S(A,C) : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \times 0;1 \rightarrow \mathbb{R}^{n+1}$$

$$V, P_{ACC}, SOC_i \rightarrow s(V, P_{ACC}, SOC_i) = SOC$$

Ici, on suppose que le profil d'état de charge ne dépend que de l'état de charge initial et du cycle de mission. Evidemment, on a $SOC(t=0) = SOC_i$. Notons I_{SOC} le courant batterie sur le cycle (en considérant par exemple un modèle $E(SOC) + R \cdot I(SOC)$ sans rendement faradique correspondant au vecteur SOC :

$$I: \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}^n$$

$$SOC \rightarrow \forall i \in [0; n-1], I_{SOC} i = \frac{SOC i + 1 - SOC i}{t_{i+1} - t_i} = \frac{SOC i + 1 - SOC i}{T_e}$$

Notons ΔSOC la différence d'état de charge de la batterie entre le début et la fin du cycle :

$$\Delta: \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}$$

$$SOC \rightarrow \Delta SOC = SOC n - SOC(0)$$

Nous avons considérons donc que :

- Lorsque l'état de charge du module est inférieur à 20%, il est urgent de recharger les batteries
- Lorsque l'état de charge du module évolue entre 20% et 40%, l'urgence pour recharger les batteries est moins importante et la limitation du courant de charge évolue
- Lorsque l'état de charge du module évolue entre 40% et 60%, l'urgence à recharger les batteries s'amenuisant
- Lorsque l'état de charge du module évolue entre 60% et 70%, il n'y a plus d'urgence à recharger les batteries
- Lorsque l'état de charge du module évolue entre 70% et 75%, sur les recommandations, une procédure de fin de charge est lancée qui assure la charge par la tension (floating charge) avec compensation de la température.

✿ **Phase de démarrage**

Au démarrage en mode « power pack hybride », le but principal est de contrôler les niveaux de charge des batteries, s'il n'est pas au maximum « SOCmax », on doit forcer le chargement des batteries soit à l'aide du moteur thermique ou à l'aide de la caténaire 1500 V continue.

Il faut noter que sous la zone électrifiée, il faut isoler la mode SAPHYRRS de la chaîne de traction. Donc le SWITCH TRAC sera en position 1. En ce moment il faut vérifier l'état des batteries, si leurs état est maximal alors nous continuons la mission. Dans le cas contraire, il faut activer le chargement des batteries a travers la caténaire (1500 V) en activant le Switch TRAC à la position 1, et on continu le chargement jusqu'à que leurs états arrive à son SOCmax.

Si la caténaire est différente de celle de 1500 V DC, le Switch TRAC qui la relie avec la chaîne de traction de notre source embarquée sera en position 2, et le chargement des batteries s'effectue grâce au moteur thermique, sachant qu'il faut vérifier le niveau de fuel disponible, avec une réserve minimum de 2 litres, pour effectuer le chargement et garder la réservation pour la phase suivante qui peut-être la traction. En contrepartie, le cas contraire le chargement des batteries serait en phase Off, soit le SWITCH BAT TRAC est en position off.

Comme notre objectif de gestion d'énergie est réaliser une gestion d'une boîte noire intelligente, qui dépend des informations et des données pour ses entrées, qui fonctionnera comme un cerveau pouvant commander ses sorties. La méthode n'est pas faite à partir du réseau de neurones, mais elle prend aussi en compte la méthode d'optimisation et la commande optimale. L'algorithme nécessaire à cette phase de fonctionnement est représenté dans la figure 4.5, qui nous constitue la boîte noire de notre phase de démarrage, dépendant des entrées, et gérant l'énergie nécessaire.

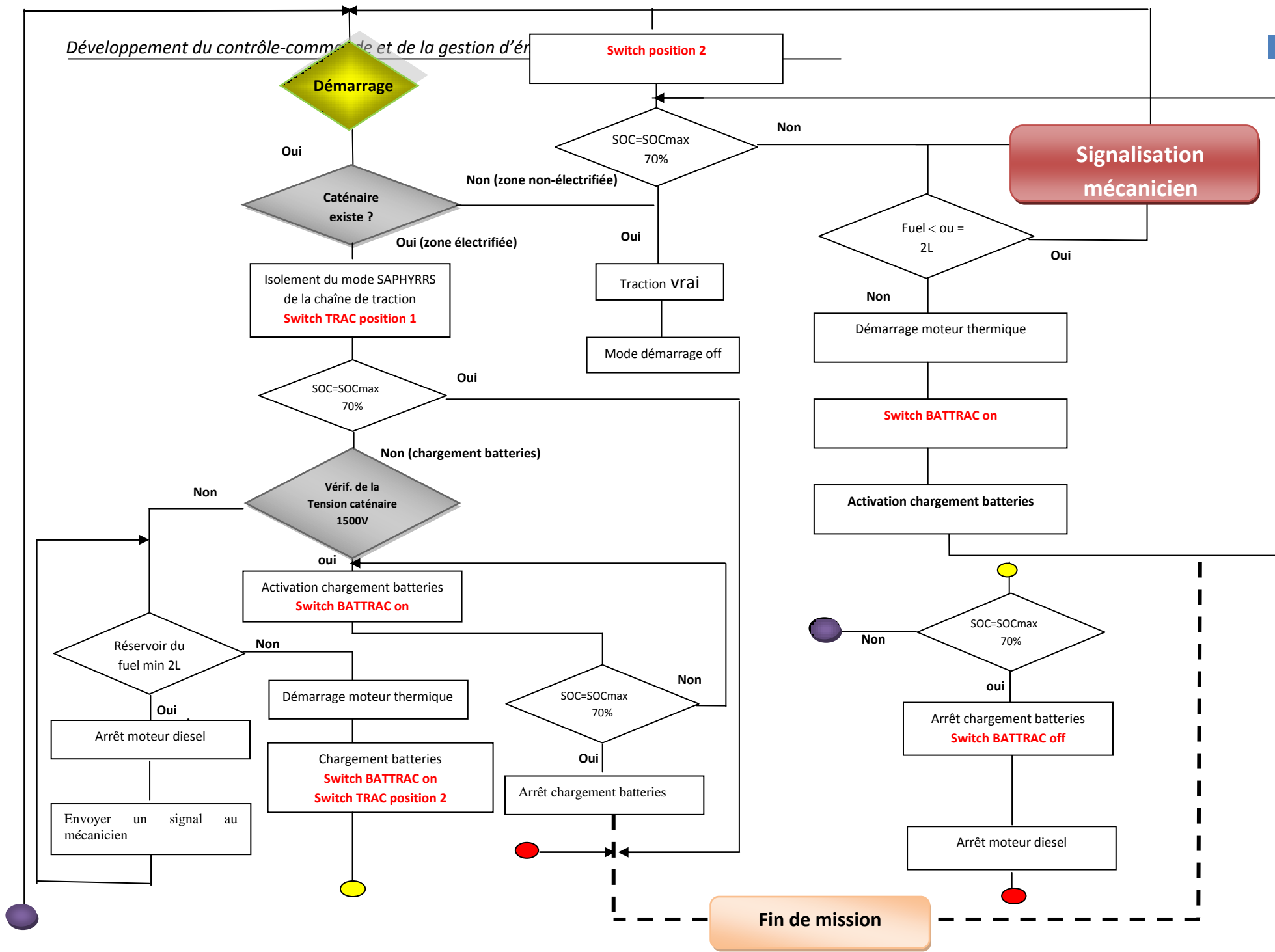


Figure 81.5 Organigramme de l'algorithme – boîte noire de la phase démarrage

Phase de traction

La phase de traction se caractérise spécialement par la puissance de traction sollicitée. L'algorithme nécessaire à cette phase de fonctionnement est représenté dans la figure 4.6, qui nous constitue la boîte noire de notre phase de traction, dépendant des entrées, et gérant l'énergie nécessaire. Cette boîte prend en considération les fonctions suivantes :

1. Un premier test s'effectue au niveau du réservoir du carburant. Comme nous sommes dans la phase de traction, nous devons avoir suffisamment du fuel pour parcourir la mission de lignes non-électrifiées. Suite à notre dimensionnement énergétique, nous considérons un réservoir de 406 litres capable de parcourir un cycle complet en début et fin de mission. Or, nous sommes en mode normal de fonctionnement, si le réservoir de gasoil est moins que 406 litres, la traction sera soumise à des contraintes et un signal sera envoyé au conducteur, jusqu'au remplir le réservoir fuel

2. Si le réservoir du carburant est > 405 litres, un test de puissance d'effectuera. Si cette puissance est supérieure à 325 KW, alors le Switch TRAC se met en position 2 et le moteur thermique s'active, ensuite le Switch des batteries s'active ; donc la puissance sollicitée est égale à la somme de la puissance du moteur thermique et la puissance des batteries. Dans le cas où les batteries se déchargent avant que la mission termine, et la puissance est toujours supérieur à 325 KW, le moteur thermique va essayer de faire quand même la traction tout seul, mais en ajoutant cette fois-ci une fonction de réduction de vitesse en fonction des masses remorquées. Si la masse de la charge remorquée est ≤ 1800 tonnes, la vitesse se limite à 2 Km/h. avec une masse de charge remorquée ≤ 400 tonnes, la vitesse de la locomotive se limitera à 10 Km/h et enfin si cette charge est ≤ 90 tonnes, la vitesse se limite à 25 Km/h. Dans le cas où cette puissance ne se limitera pas à 325 KW, le kit hybride s'arrêtera et envoie ainsi un signal d'urgence au pupitre de conduite.

3. Si cette puissance est supérieure à 300 KW, le Switch TRAC se met en position 2 et le moteur thermique s'active, ensuite le Switch des batteries BAT TRAC reste en position off. Le moteur thermique ne charge pas les batteries même si son état de charge est inférieur à son état maximal, car il faut au moins une puissance de charge de 15 KW au moins.

4. Si cette puissance est inférieure à 300 KW, le Switch TRAC se met en position 2 et le moteur thermique s'active, ensuite le Switch BAT TRAC se met en position ON, mais cette fois-ci pour les charger et non pas pour les décharger ; cette recharge se fait grâce au moteur thermique si le réservoir de fuel est au moins égal à 12 litres afin de pouvoir faire les deux fonctions : la traction, et le rechargement des batteries. Le courant de charge de batteries est limité à 22 A pour les deux branches en parallèle, soit 11 A pour chaque branche.

5. Si le réservoir de fuel est inférieur ou égal à 2 litres, le Kit d'autonomie s'arrête et un signal d'urgence s'envoie au conducteur. Cette phase s'effectue spécialement en mode normal dans les zones non-électrifiées, et avant d'arrêter

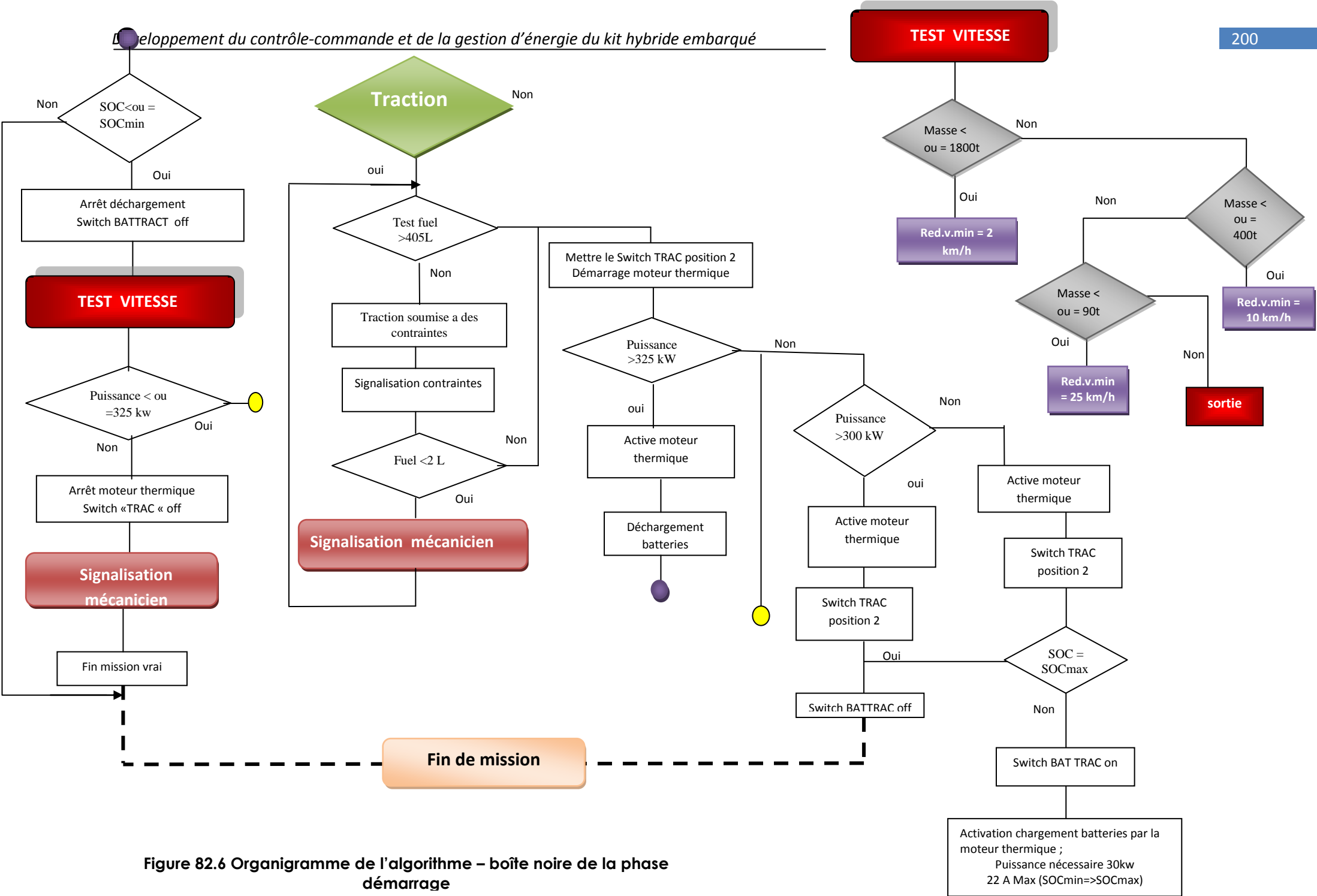


Figure 82.6 Organigramme de l'algorithme – boîte noire de la phase démarrage

Phase d'arrêt

La phase d'arrêt est la dernière phase du fonctionnement en mode normal. L'algorithme nécessaire à cette phase de fonctionnement est représenté dans la figure 4.7, qui nous constitue la boîte noire de notre phase d'arrêt, dépendant des entrées, et gérant l'énergie nécessaire. Cette boîte prend en considération les fonctions suivantes :

Arrivant à la fin de mission ferroviaire, le conducteur arrêtera la locomotive à option. Le kit lui-même ne se mettra pas en arrêt avant de vérifier l'état de charge de la batterie, pour les préparer à la nouvelle mission lors du prochain démarrage.

- Si le SOC est inférieur à son état maximal de 70%, le moteur thermique rechargera les batteries, sachant qu'un « test fuel » aura lieu, afin de contrôler la consommation du fuel et d'estimer le niveau du carburant s'il est moins que 12 litres. les deux Switch TRAC et BAT TRAC s'activent
- Si son état est égal à son SOCmax de 70%, une dernière vérification s'effectue concernant la fin de mission pour le power pack hybride. Si c'est le cas, le bouton de fin mission s'active et le kit d'autonomie s'arrêtera après avoir désactivés les deux SWITCHS TRAC et BAT TRAC.

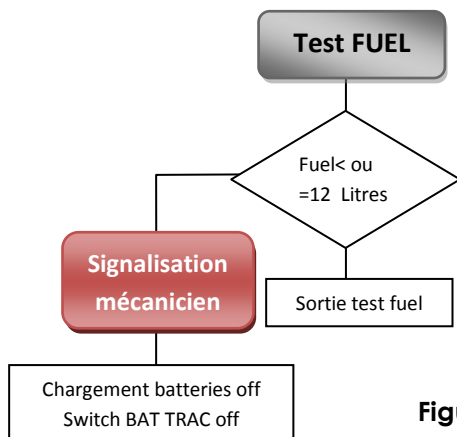
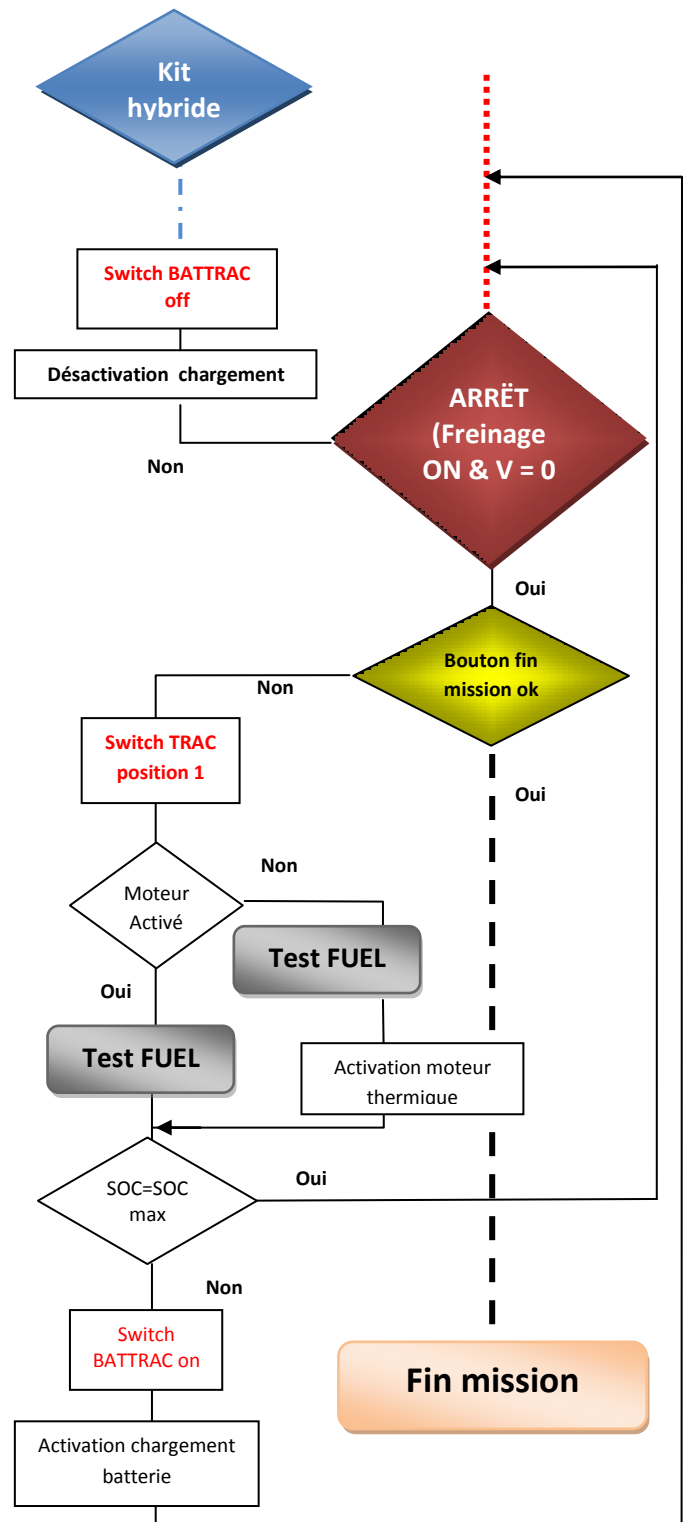


Figure 83.7 Organigramme de l'algorithme – boîte noire de la phase d'arrêt

4.1.4.2. Mode de fonctionnement dégradé

D'une façon générale, le mode dégradé intervient pour éviter la détérioration des batteries. En effet, il faut éviter qu'un élément de la batterie n'atteigne sa tension d'arrêt. Cela se traduit sur le bus continu par une tension très basse. Ce niveau peut être associé à un seuil de l'état de charge de la batterie qui est défini en fonction de l'état de fonctionnement des groupes électrogènes. Si l'un des groupes ou les deux tombent en panne et que l'état de charge est trop bas, ce mode sera activé, et le conducteur prévenu. Le système de gestion va intervenir sur la commande électrique des moteurs de traction en baissant la consigne (ou en la divisant par 2) allant même jusqu'à n'utiliser que 2 moteurs de traction (avant ou arrière) au lieu des quatre dans un fonctionnement normal. Ce mode est prévu pour permettre au véhicule de rejoindre son lieu d'entretien afin de recharger complètement les batteries, faire le plein de carburant ou éventuellement réparer l'un ou les groupes électrogènes.

Dans notre projet d'étude, Ce mode de gestion comprend deux modes de fonctionnement : interruption et Parking. Nous allons détailler dans ce chapitre les deux qui nous constituent la boîte noire de notre phase de démarrage, dépendant des entrées, et gérant l'énergie nécessaire

Phase de parking

La phase d'arrêt est la dernière phase du fonctionnement en mode normal. L'algorithme nécessaire à cette phase de fonctionnement est représenté dans la figure 4.8, qui nous constitue la boîte noire de notre phase PARKING, dépendant des entrées, et gérant l'énergie nécessaire. Cette boîte prend en considération les fonctions suivantes :

La fonction principale de ce bouton est de pouvoir garer la locomotive ou la faire avancer pour une petite distance, en utilisant cette fois-ci le pack de batteries seulement, pour réduire la consommation du fuel et réduire la pollution atmosphérique, au lieu de démarrer le moteur thermique pour des missions réduites. Un test de contrôle de l'état de charge de la batterie sera effectué. Si le $SOC < (SOC_{urgent} = 22\%)$, un signal sera envoyé au conducteur, et nous déchargeons les batteries pour effectuer la traction nécessaire jusqu'à arriver à un SOC_{min} de 20%, où les batteries

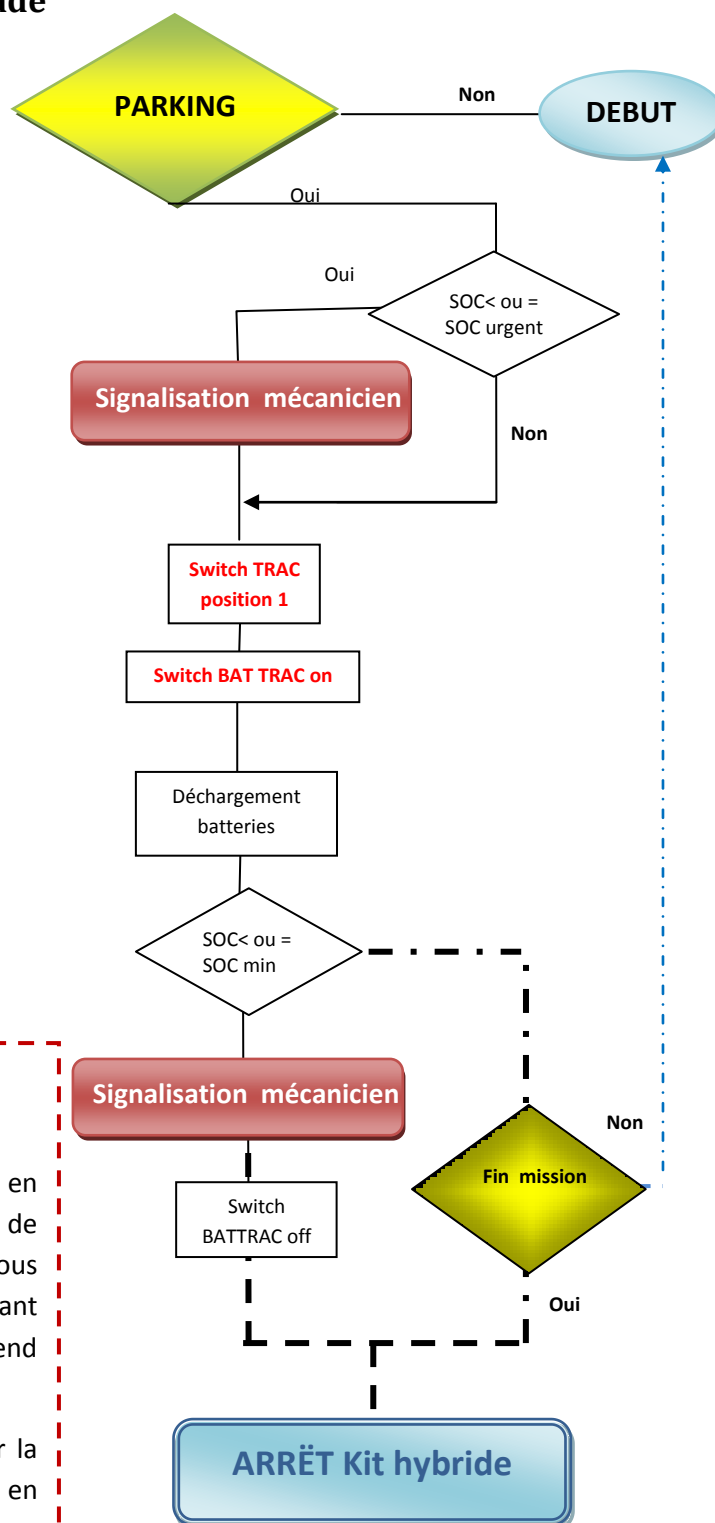


Figure 84.8 Organigramme de l'algorithme – boîte noire de la phase PARKING

✿ Mode d'interruption

La phase d'arrêt est la dernière phase du fonctionnement en mode normal. L'algorithme nécessaire à cette phase de fonctionnement est représenté dans la figure 4.9, qui nous constitue la boîte noire de notre phase d'interruption, dépendant des entrées, et gérant l'énergie nécessaire. Cette boîte donne naissance à la traction dans des conditions et sous des contraintes bien différents qui fonctionne indépendamment des modes de fonctionnement normal. Le démarrage, la traction et l'arrêt en mode dégradé sont regroupés tous la phase d'interruption, en considérant les fonctions suivantes :

1. Au démarrage, si le réservoir du carburant est inférieur à 2 litres, nous ferons la traction avec le pack de batteries, soit le SWITCH BAT TRAC en mode ON et le Switch TRAC est en position neutre. Un contrôle d'état de charge sera effectué. Si le $SOC < SOC_{min}$, un signal sera envoyé au conducteur, et le pack de batteries s'arrêtera le déchargement. Le power pack hybride s'arrêtera donc de fonctionner et le mode d'interruption se désactive.

2. Si le réservoir du carburant est supérieur à 2 litres, le moteur thermique sera activé et le Switch TRAC se met en mode ON. Un contrôle d'état de charge s'effectuera. un test de puissance d'effectuera. Si cette puissance est supérieure à 325 KW, alors le Switch TRAC se met en position 2 et le moteur thermique s'active, ensuite le Switch des batteries s'active ; donc la puissance sollicitée est égale à la somme de la puissance du moteur thermique et la puissance des batteries. Dans le cas où les batteries se déchargent avant que la mission termine, et la puissance est toujours supérieur à 325 KW, le moteur thermique va essayer de faire quand même la traction tout seul, mais en ajoutant cette fois-ci une fonction de réduction de vitesse « Test Vitesse » en fonction des masses remorquées, qui a été déjà utilisé dans le mode de fonctionnement normal – traction. Dans le cas où cette puissance ne se limitera pas à 325 KW, le kit d'autonomie s'arrêtera et envoie ainsi un signal d'urgence au pupitre de conduite.

3. Si cette puissance est supérieure à 300 KW, le Switch TRAC se met en position 2 et le moteur thermique s'active, ensuite le Switch des batteries BAT TRAC reste en position off. Le moteur thermique ne charge pas les batteries même si son état de charge est inférieur à son état maximal, car il faut au moins une puissance de charge de 15 KW. Un premier « Test Fuel 2 » contrôlant le réservoir du carburant s'il est inférieur à 2 litres. La traction s'effectuera donc avec le moteur thermique et le Switch TRAC se met en position 2. Dans le cas inverse, nous désactiverons le moteur thermique et la mission arrive à sa fin.

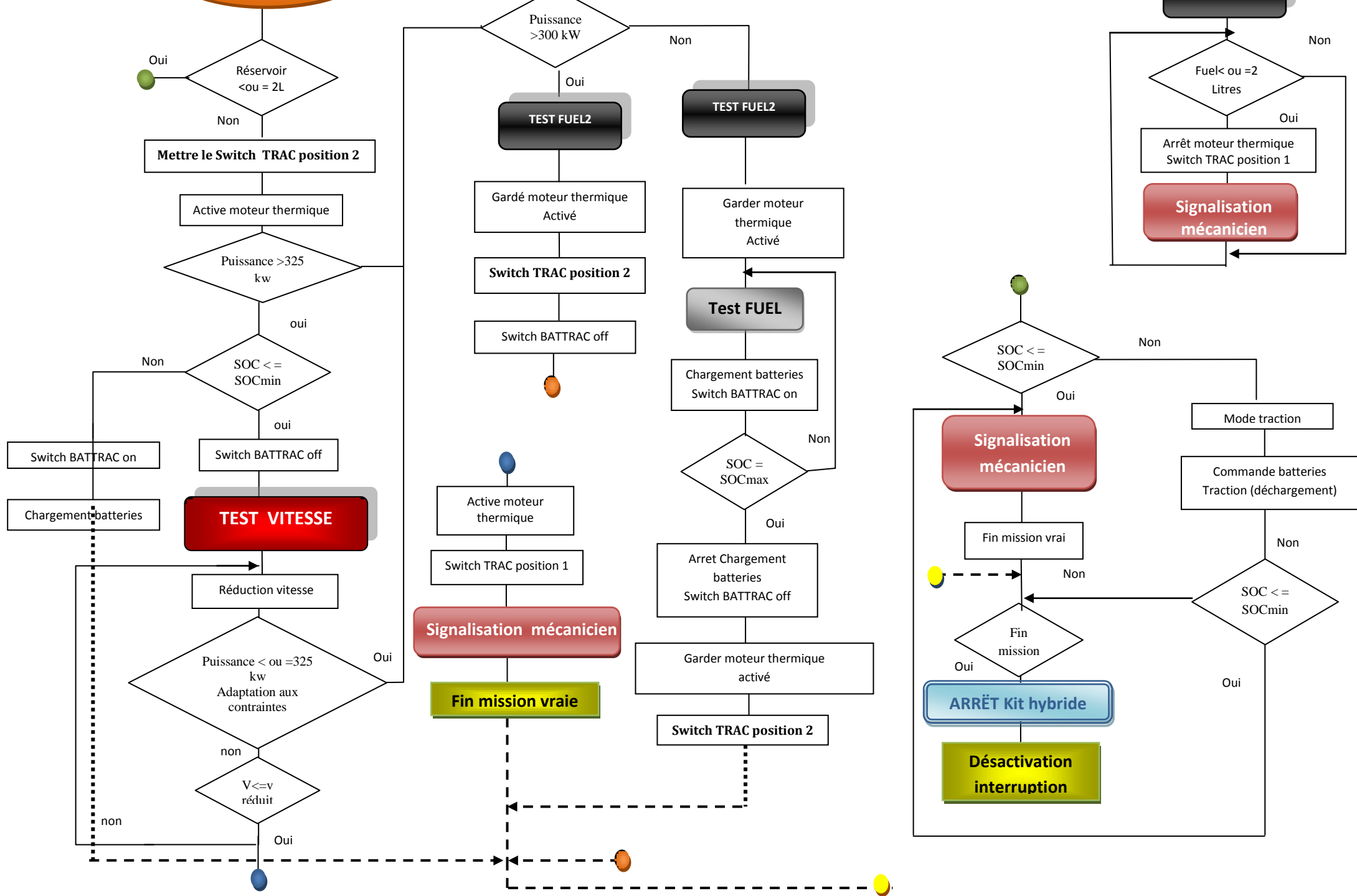
4. Si cette puissance est inférieure à 300 KW, le Switch TRAC se met en position 2 et le moteur thermique s'active après avoir effectué encore une fois le « Test fuel 2 ». Un deuxième test aura lieu, le « TEST FUEL », qui active le mode chargement de batteries si nous avons au moins 12 Litres dans le réservoir du carburant. Le Switch BAT TRAC se met en position ON pour charger les batteries s'ils ont un $SOC < 70\%$. Cette recharge se fait grâce au moteur thermique. Le courant de charge de batteries est limité à 22 A pour les deux branches en parallèle, soit 11 A pour chaque branche.

5. Arrivant à la fin, et si la fin de la mission est vraie, le moteur thermique se désactive, soit le Switch TRAC est en position neutre, le power pack hybride est en mode d'arrêt et ne fin la phase d'interruption se désactivera.

Interruption

Figure 85.9 Organigramme de l'algorithme – boîte noire de la phase

Commande et de la gestion d'énergie du kit hybride embarqué



4.1.5. Intégration de la gestion d'énergie dans l'interface contrôle commande de la locomotive

L'objectif de cette partie est de traiter de l'intégration de la gestion du kit d'autonomie, avec le TCMS Train Control & Monitoring System des locomotives de la gamme P6 EL II. Il y a nécessité de prendre en compte un mode spécifique d'alimentation autonome, et d'affiner la stratégie de pilotage des auxiliaires liées à la chaîne de traction afin de fonctionner sur un seul bloc moteur.

Nous devons intégrer notre bloc de gestion de notre source hybride embarquée dans l'interface TCMS du mode 1500 V DC en ajoutant le Switch TRAC séparant le groupe Diesel du pantographe 1500 V DC. Les blocs contrôle-commande de la chaîne de traction garderont les mêmes caractéristiques et le même paramétrage. Par ailleurs, des nouvelles fonctions doivent-être prises en compte concernant les blocs de démarrage, traction, arrêt, parking et interruption, de la gestion d'énergie.

Structure du système Contrôle Commande TCMS P EL II

Le Système TCMS « Train Control monitoring system » de la locomotive se décompose en sous ensembles fonctionnels

- fonction Superviseur : MPU
- fonction Interface Homme Machine : DDU
- fonction Commande Rapprochée Traction : TCU
- fonction Commande Rapprochée Auxiliaire : ACU
- Modules d'entrées / sortie déportées : MESD
- GATEWAY de communication niveau Train WTB : GWU

La commande Superviseur est constituée d'un calculateur et de modules entrées / sorties déportés (MESD). Ces modules permettent les interfaces physiques des entrées / sorties, les calculateurs réalisant la gestion des réseaux et le séquençement des algorithmes.

Un réseau informatique Mvb permet le lien de communication entre ces différentes fonctions.

Les différents équipements du Système Contrôle Commande en interface avec le sous système du kit d'autonomie sont situés:

- En cabine sur le pupitre
- En armoire de commande du sous système et panneau de démarrage diesel en secours
- Dans les blocs du compartiment machine
 - 1 bloc traction : TCU 1&2
 - 1 bloc auxiliaire : ACU
 - 1 armoire système : AS
- Sous caisse pour ce qui concerne l'implantation des batteries et du réservoir diesel.

Interface de la gestion d'énergie en temps réel

L'ensemble des fonctionnalités de la locomotive électrique sont conservées mais certaines sont adaptées afin de prendre en compte les spécificités de Conduite et les verrouillages nécessaires par

l'intermédiaire d'un MODE de conduite SPECIFIQUE correspondant à la mise en service de l'ENERGIE hybride. Le calculateur Principal MPU assure également le lien avec le sous système de notre kit d'autonomie par l'intermédiaire de l'interface POWER PACK. L'interface Management d'énergie est répartie dans la mesure où le MPU gère le délestage des charges auxiliaires, les convertisseurs de traction gèrent les PMCF d'entrée, et les convertisseurs auxiliaires gèrent les chargeurs de batterie. L'ensemble des défauts est traité comme le restant du contrôle commande locomotive par les mêmes mécanismes et les mêmes interfaces de maintenance. Seule la liste des défauts et des sous systèmes concernés diffère.

Après avoir défini les différents modes de fonctionnement de la gestion d'énergie, normal et dégradé, dans la partie précédente, nous avons défini les entrées/sorties des différents blocs nécessaires à l'intégration dans le système TCMS, quand nous décidons d'intégrer la source hybride embarquée en échelle unitaire.

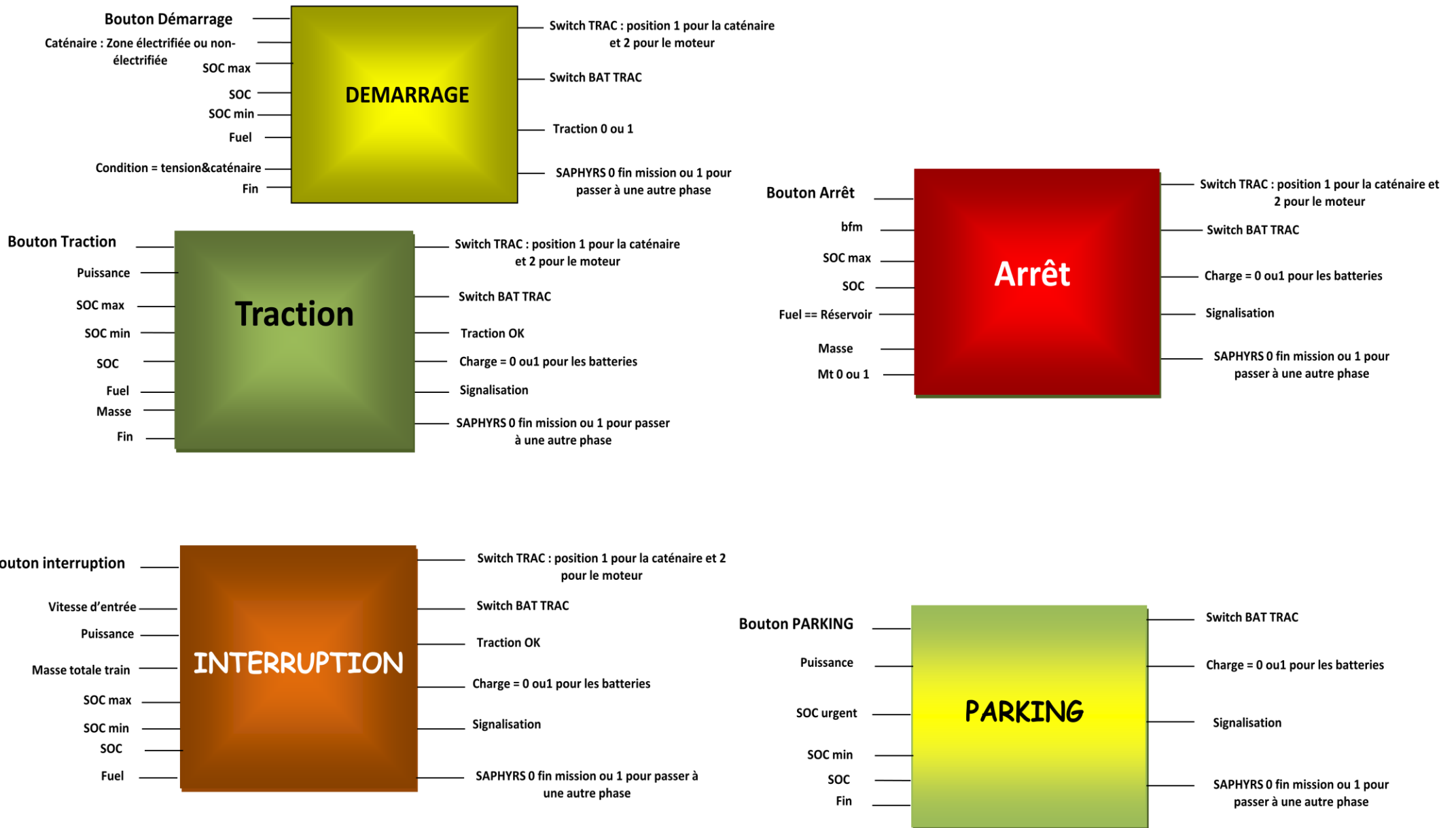
La figure 4.10 présente les différents blocs synthétisant les deux modes de fonctionnement de la gestion d'énergie. Ils ont été identifiés grâce aux organigrammes réalisés précédemment. Les entrées des blocs dépendent spécialement de 3 contraintes principales : le contrôle de l'état de charge SOC, la valeur du réservoir du carburant soit la consommation du fuel en cours, et enfin la valeur de la puissance consommée. Les sorties de ces blocs présentent la commande des deux SWITCHS TRAC et BAT TRAC, et les différentes signalisations affichées dans le pupitre de conduite. Ces boîtes constituent des boîtes noires de gestion d'énergie de notre power pack hybride.

Les interfaces Homme / Machine sont assurées par des commandes et des signalisations. Les commandes s'effectuent soit par des touches fonctions ou par des appareils BT (commutateurs, interrupteurs, boutons poussoir) La signalisation s'effectue soit sur des voyants, soit sur un écran. Chaque console comprend des Touches Fonctions permettant l'entrée des données non figées et les différentes commandes du train, commandes pouvant être effectuées soit à l'arrêt, soit de façon non urgente. Le dialogue s'établit par menus déroulants.

En ce qui concerne l'interface Homme/Machine à option du kit d'autonomie, nous avons considéré une nouvelle interface de commande à intégrer dans l'interface contrôle-commande de la locomotive, et qui va aussi avoir naissance à une nouvelle interface de conduite à intégrer dans la cabine de conduite, et qui dépend de 5 boutons de fonctionnement présentant dans la figure 4.11 suivante:

L'intérêt de créer une telle interface indépendante de celle qui est déjà existante est de faciliter l'accès à notre kit autonome d'un côté, et de faciliter au conducteur son utilisation lors de la conduite d'un autre côté. Or, notre power pack hybride est une option qui peut-être intégrer dans n'importe quelle locomotive électrique existante, l'objectif principal est de ne pas toucher ou de ne pas effectuer des modifications que ça soit dans l'architecture de la locomotive elle-même ou dans son interface contrôle commande, une telle interface est bien définie et fonctionne en boîte noire intelligente où chaque bouton de fonctionnement est une boîte noire intelligente en elle-même et qu'elles seront activées en appuyant tout simplement sur le bouton choisi.

Figure 86.10 Blocs de gestion d'énergie à intégrer dans le système TCMS de la locomotive



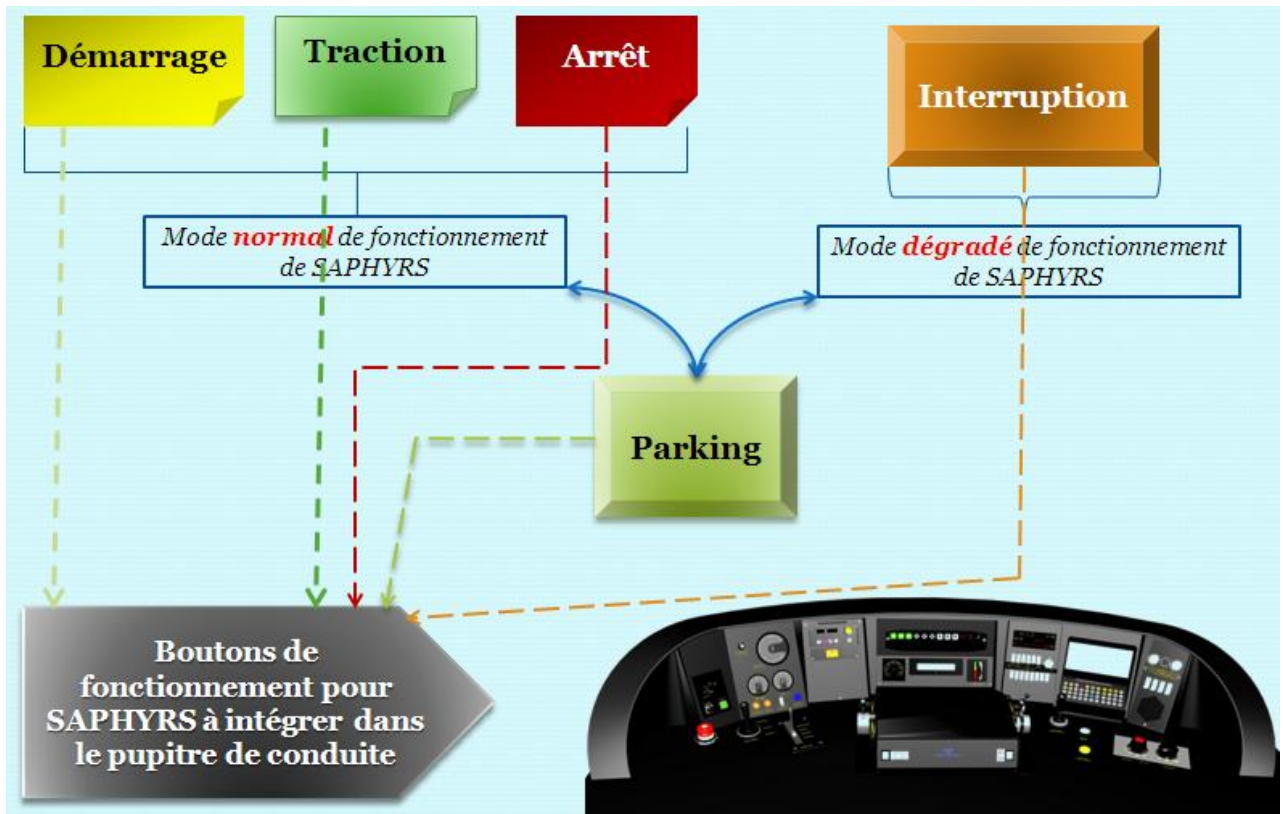


Figure 87.11 Nouvelle interface Homme/Machine à intégrer dans l'interface contrôle-commande

4.1.6. Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté la méthodologie de la gestion d'énergie de notre système. Dans un premier temps nous avons présenté une étude d'art des différentes méthodes de gestion d'énergie existantes dans la littérature. Dans un deuxième temps, nous avons fixé les différentes contraintes définies à notre système, qui nous aide à réussir notre développement de gestion d'énergie. L'encombrement disponible dans la locomotive, est la contrainte primordiale définissant le dimensionnement, le choix technique de la solution adoptée, sa modélisation et en fin la gestion d'énergie du système. Notons que cette gestion se compose de deux modes de fonctionnement, un premier normal contenant la phase de démarrage, la traction et l'Arrêt, et enfin un deuxième dégradé contenant la phase d'interruption et de parking de la locomotive. Ces phases ont été développées sous forme des boîtes noires de gestion d'énergie grâce au développement des algorithmes représentant leurs fonctionnements. Nous avons abordé à la fin la phase d'intégration de la gestion dans l'interface TCMS de la locomotive.

Afin de concrétiser notre gestion d'énergie, nous allons présenter dans la prochaine section de ce chapitre, une modélisation synthétisant la gestion d'énergie du système avec les deux modèles du groupe Diesel et le pack de batteries définies dans le troisième chapitre, et réaliser des simulations et des différents profils de puissance consommée totale en fonction du temps de la mission, pour concrétiser cette gestion en fonction de l'état de charge et la consommation du carburant.

4.2. Modèle d'analyse de la gestion d'énergie

L'objectif de cette partie est de développer un modèle d'analyse, ceci en se basant sur des modèles plus au moins détaillés du système complet. Les modèles des différents composants peuvent-être employés pour prévoir des phénomènes avec une échelle de temps de moins d'un dixième d'une seconde. Ces simulations permettent de comprendre le fonctionnement de chaque partie séparément et d'analyser le système dans sa globalité afin de prévoir d'éventuels dysfonctionnements.

Modéliser et simuler sont de plus en plus important surtout pour l'analyse des systèmes complexes composés d'ensembles issus de différents domaines. Les outils spécifiques d'un domaine, tels que des simulateurs de circuits par exemple, ne peuvent pas manipuler des composants des autres domaines d'une manière raisonnable. Il y a traditionnellement un écart trop grand entre le problème de l'utilisateur et le modèle de description que le programme de simulation représente. Modéliser devrait-être beaucoup plus proche de la manière de construire un système réel [44].

Ce chapitre est organisé en plusieurs sections. Nous présentons le modèle d'analyse en flux de puissance des différentes composantes du kit d'autonomie. La modélisation synthétise la gestion d'énergie du système avec les deux modèles du groupe Diesel et le pack de batteries définies dans le troisième chapitre, puis nous étudions quelques résultats de simulation sous MATLAB Simulink des différents profils de puissance consommée totale en fonction du temps de la mission, pour concrétiser cette gestion en fonction de l'état de charge et la consommation du carburant.

4.2.1. Modèle d'analyse du groupe Diesel

Comme nous l'avons expliqué à la section 3.3.1, le modèle comportemental du groupe Diesel admet en entrée, la puissance fournie PGE et la vitesse de rotation du moteur thermique $N(\text{tr}/\text{min})$, et en sortie, la consommation spécifique CS (L/h ou g/kWh) et les émissions polluantes (CO_2 , NOx, HC, CO et les particules) émises. Les difficultés d'accès aux cartographies, nous ont contraints à limiter notre étude à la consommation et aux émissions de CO_2 .

Le modèle d'analyse du groupe Diesel est calqué sur le modèle comportemental présenté à la section 3.3.1. La présence des batteries permet d'éteindre le groupe Diesel lorsque celui-ci n'est plus sollicité, ce qui réduit les phases de ralenti où la consommation et la pollution sont très mauvaises.

Le groupe Diesel est modélisé comme un transformateur qui traduit, en débit de fuel CS (consommation spécifique) exprimé en litre par heure, la puissance en sortie PGE. La cartographie de cette relation est établie à l'aide d'essais et intègre donc l'ensemble de pertes énergétiques dans le moteur thermique et l'alternateur. La puissance électrique utile en sortie du redresseur à diode est égale à 325 KW, et la puissance des auxiliaires du moteur est égale à 10 KW électrique avec un rendement des pertes équivalent à 0.955. Un réservoir de fuel a été prévu de volume environ 400 à 450 litres. Nous considérons que le groupe fonctionne à régime constant, car ce régime est plus facile à mettre en œuvre. Le calcul de la consommation se fait à partir de la cartographie de consommation, qui traduit le flux de puissance PGE_reel en débit de fuel CS (L/h). Ce débit de fuel est ensuite traduit par intégration, en quantité de fuel Q_{fuel} (L), ce qui permet de calculer la quantité de CO_2 émise Q_{CO_2} (kg).

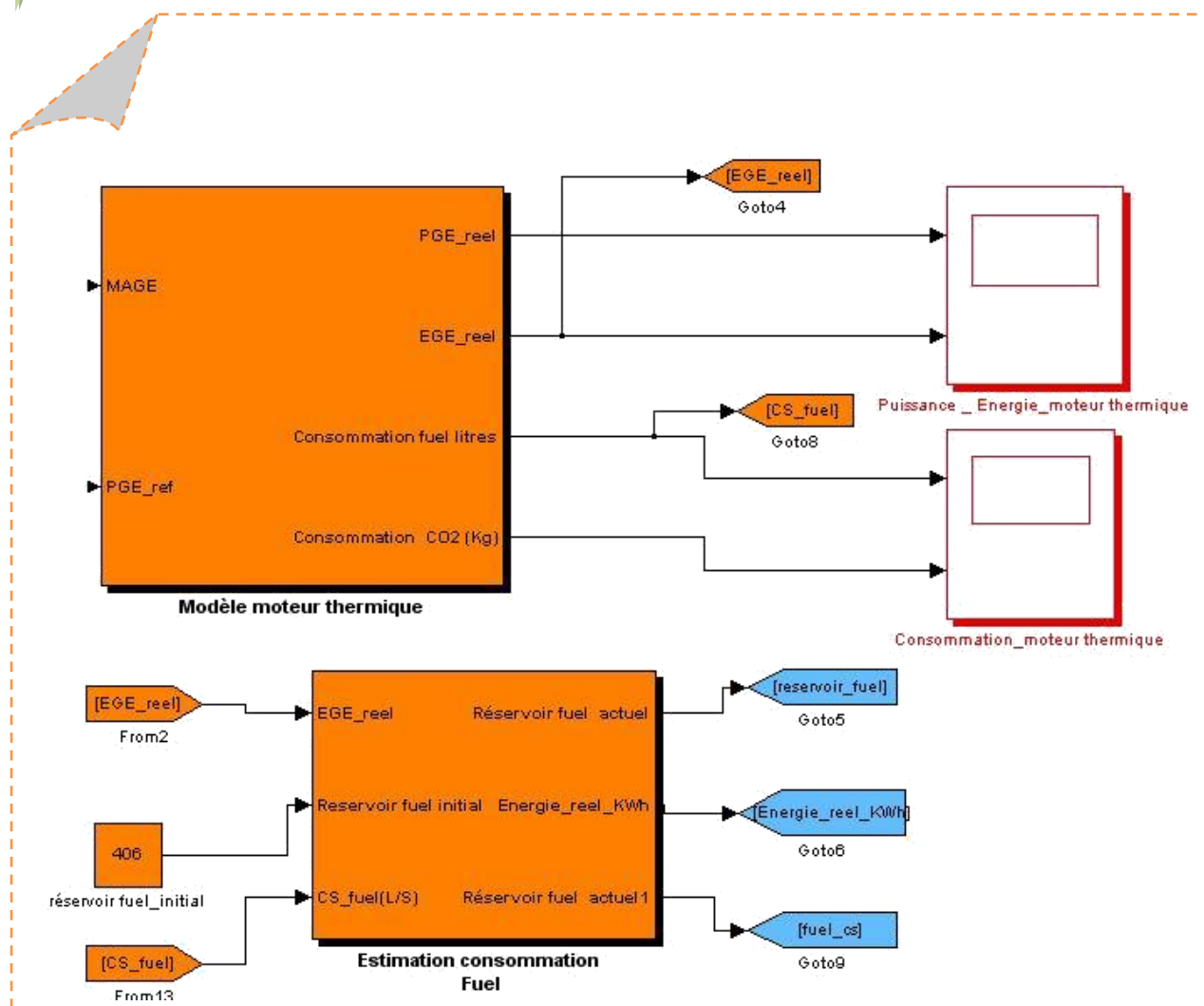
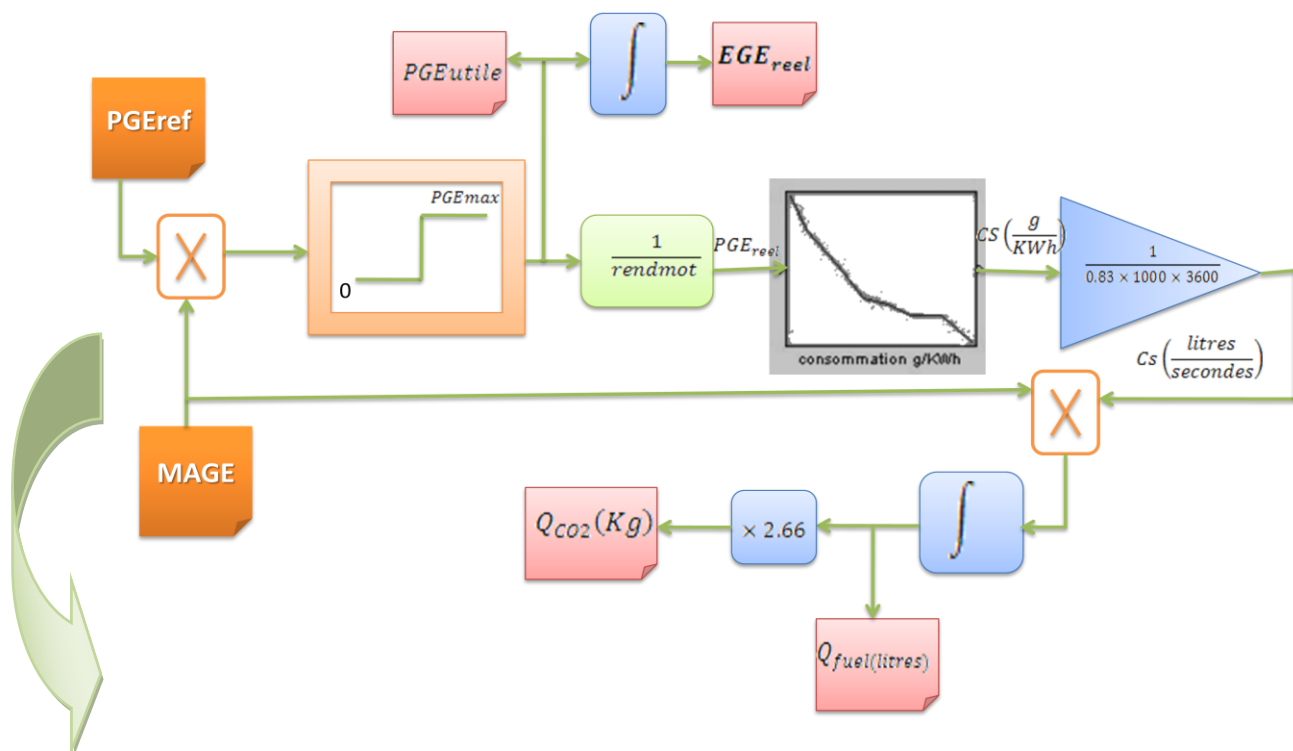


Figure 88.12 Modélisation du bloc groupe Diesel

Comme le montre la figure 4.12. Dans la section 3.3.1, nous avons présenté les détails du modèle équivalent du pack de batteries. Le modèle du groupe Diesel se caractérise par :

☞ **Entrées Bloc moteur :**

- **MAGE** qui représente la commande de Marche/arrêt du moteur thermique et qui a pour valeur « 0 » pour l'arrêt et « 1 » pour la marche. Cette commande correspond à la sortie du bloc de la gestion d'énergie de notre kit d'autonomie. Réellement, elle correspond au Switch TRAC.
- **PGE_référence** : qui correspond à la puissance utile du moteur thermique en prenant en compte la puissance de consommation de profil de mission et la puissance de charge des batteries qui est égale à 15 KW (courant de charge du pack complet est égal à 22 A), si la puissance sollicitée du moteur est égale au maximum à 295 KW.

☞ **Sorties Bloc moteur :**

- **PGE_reel** qui représente la puissance réelle du moteur thermique et qui est égale à 350 KW thermique dans notre cas, après avoir pris en compte les pertes nécessaires et les auxiliaires nécessaires estimées à 10 KW.
- **EGE_réel** qui représente la consommation énergétique réelle en KWh.
- **Consommation fuel** : qui représente la consommation en litres en fonction de la puissance réelle fournie du moteur thermique
- **Consommation CO2** : qui représente la quantité de CO2 dégagé lors de la consommation du moteur thermique.

4.2.2. Modèle d'analyse du pack batteries

Le modèle d'analyse en flux de puissance du pack de batteries est donné à la figure 4.13. Dans la section 3.3.2, nous avons présenté les détails du modèle équivalent du pack de batteries. Le modèle du pack de batteries se caractérise par :

☞ **Entrées Bloc**

- **PBAT** : qui représente la puissance utile du pack de batteries lors de la réalisation de la gestion d'énergie ; cette entrée correspond à une des sorties du bloc « GESTION D'ENERGIE » qui va être présenté dans la partie suivante.
- **MABAT** : qui représente la commande liée au pack de batteries, et qui a pour valeur « 0 » lors d'arrêt du pack, et « 1 » lors d'activation du pack (charge et/ou décharge du pack). **MABAT** est une fonction qui se met en route pendant la charge et/ou la décharge du pack. cette entrée correspond à une des sorties du bloc « GESTION D'ENERGIE » qui va être présenté dans la partie suivante. Réellement, elle correspond au Switch BAT TRAC.
- **Charge_Batt** : qui représente la puissance de charge nécessaire pour le pack de batteries et qui ne s'active que si la commande de charge s'active, qui a pour valeur 0 (Chargement désactivé) ou 1 (chargement activé); cette entrée correspond à une des sorties du bloc « GESTION D'ENERGIE » qui va être présenté dans la partie suivante.

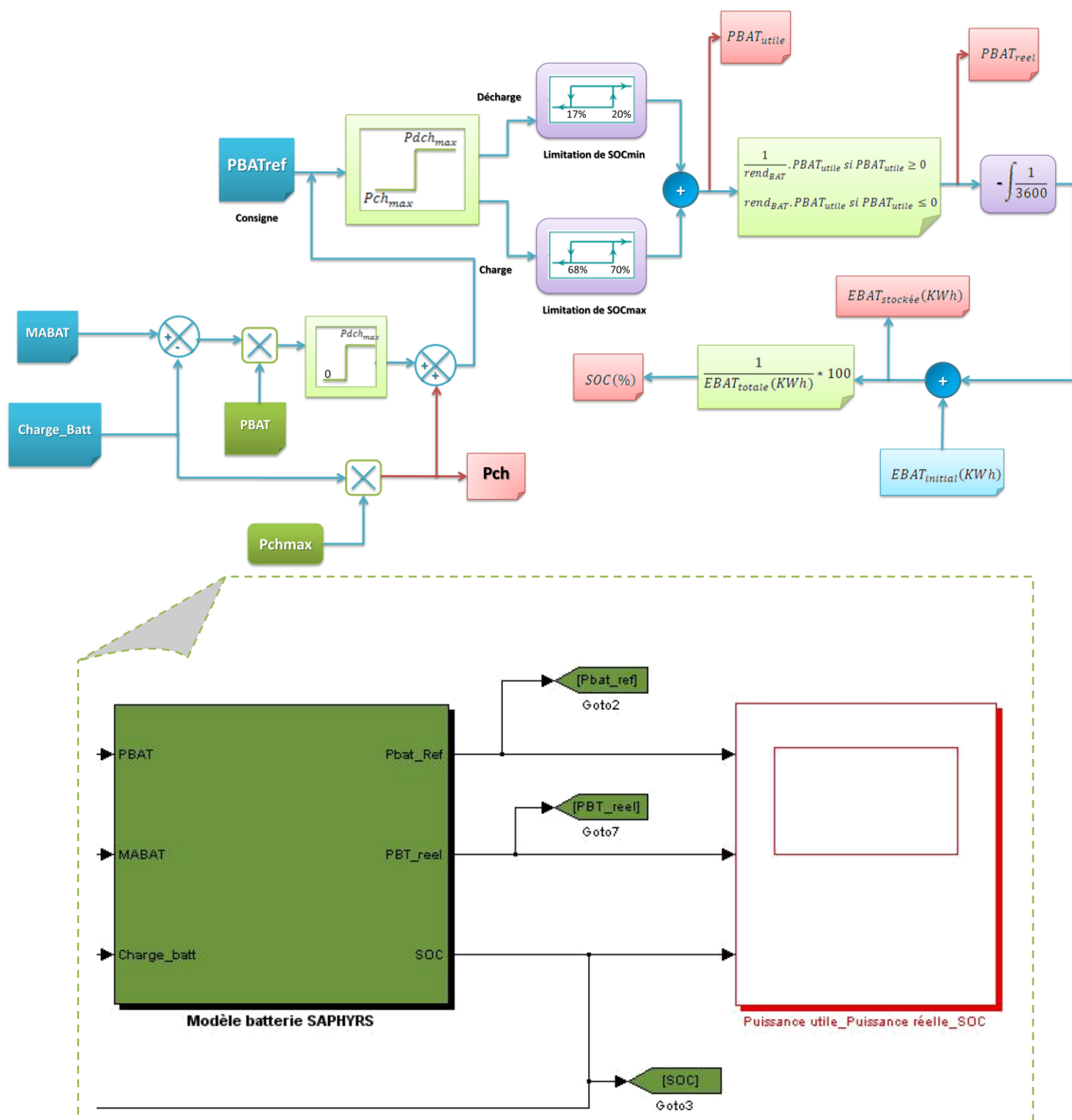


Figure 89.13 Modélisation du bloc pack de batteries

🔗 Sorties Bloc

- **PBAT_ref** : qui représente la puissance P_{BAT_utile} de la batterie, et peut être une puissance négative si c'est une puissance de charge ($P_{ch_max} = -15$ KW), soit une puissance de décharge si elle est positive ($P_{dch_max} = 200$ KW). La valeur obtenue en sortie de P_{BAT_ref}

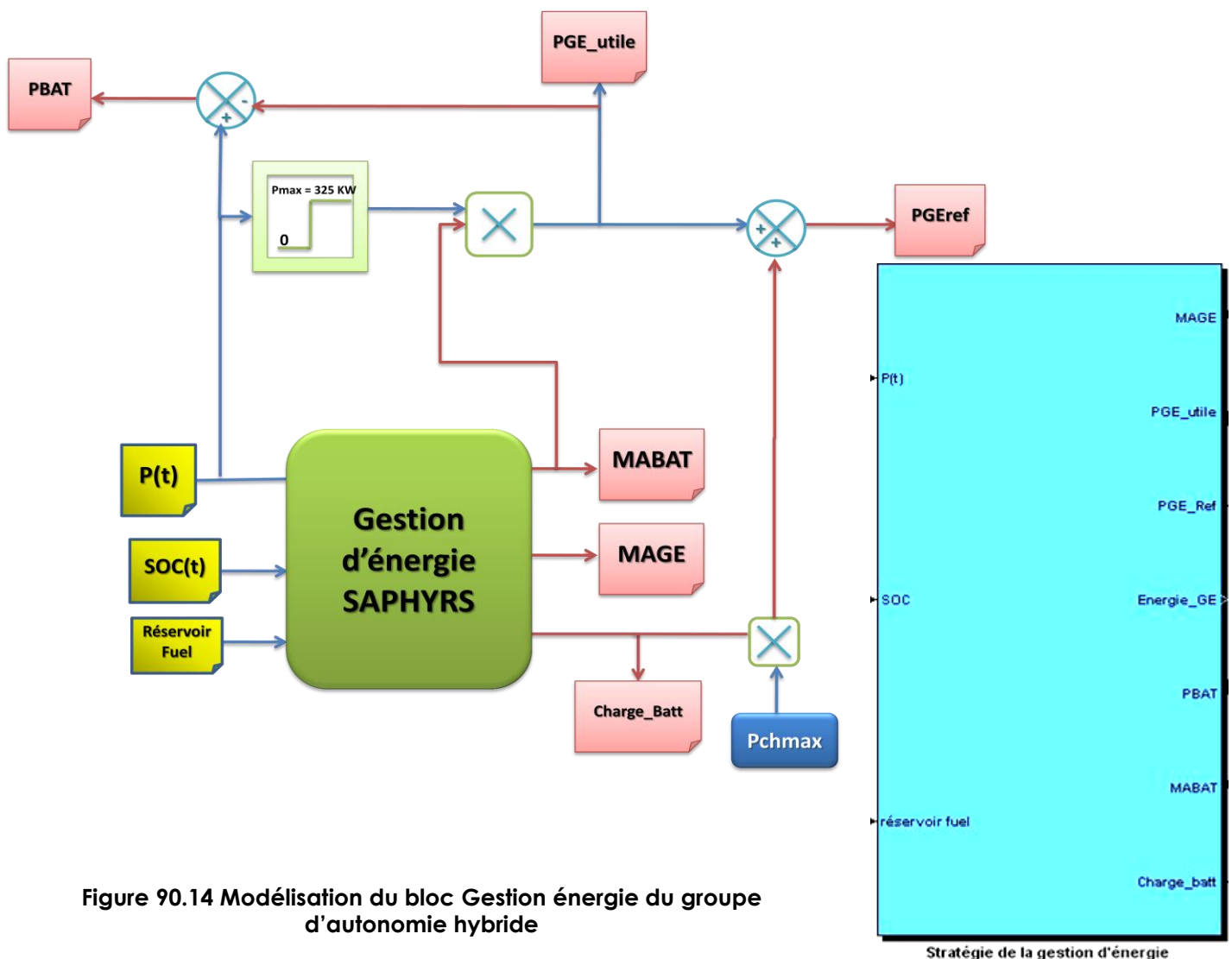
est obtenue grâce au commande MBAT et charge_Batt qui nous donne successivement la valeur de la puissance en fonction du profil de mission utilisé.

- **PBAT_reel** : qui représente la puissance réelle du pack de batterie et qui dépend du rendement du coefficient rend_BAT et de la valeur de PBAT_ref.
- **SOC** : qui représente l'état de charge de la batterie, et qui est obtenue de la valeur de l'énergie réelle de la batterie stockée, et d'une valeur énergétique initiale.

Dans ce modèle, il y a deux types de butées : une butée de puissance et une butée d'énergie. La butée de puissance est liée aux limitations de puissance dues aux limites technologiques du pack. Elle est mise en œuvre à travers le bloc de saturation en entrée du modèle. La butée d'énergie est liée aux limitations de puissance dues à l'état de charge. Elle est mise en œuvre à travers le contrôle de la charge et de la décharge, en fonction de l'état de charge du pack.

4.2.3. Modèle d'analyse de la gestion d'énergie

Le modèle d'analyse de la gestion d'énergie dépend spécialement du profil de la puissance en fonction du temps de la mission, de l'état de charge des batteries et enfin la quantité du carburant restante dans le réservoir. Il doit gérer la consigne de marche/arrêt du groupe Diesel MAGE correspondant au Switch TRAC, la consigne d'activation des batteries (chargement/déchargement) correspondant au Switch BAT TRAC et enfin la consigne de chargement des batteries Charge_Batt.



Notons, que les sorties du block de modèle d'analyse de la gestion d'énergie, présenté dans la figure 4.14, sont des paramètres d'entrée du modèle du groupe Diesel et celui des batteries. Le bloc de gestion d'énergie prend en compte les contraintes nécessaires de notre power pack hybride, et analyse plusieurs aspects présentant dans les organigrammes de la première section de ce chapitre, comme le « Test Fuel 1 et 2 », Test de puissance nécessaire à la traction, test du contrôle de l'état de charge... les fonctions principales sont :

- ✚ Le moteur thermique fournit une puissance maximale utile de 325 KW.
- ✚ Les batteries NiMH fournit les pics de puissance nécessaire pour compléter la puissance de traction ; la puissance maximale utile est égale à 200KW.
- ✚ Le moteur thermique charge les batteries NiMH.
- ✚ Si la locomotive est sous alimentation caténaire 1500 V DC, les batteries se chargent grâce à un chargeur branché entre la caténaire et les batteries.
- ✚ Si l'état de charge des batteries n'est pas suffisant pour effectuer la traction nécessaire, les batteries seront déconnectées, et le moteur essaie de compléter la mission nécessaire en essayant de réduire les vitesses de traction si c'est possible.
- ✚ Les batteries doivent effectuer la traction nécessaire, même si son état de charge n'est pas maximal, si le réservoir de fuel est presque vide, jusqu'à que son état de charge se rapproche de sa valeur minimale. Cette fonction est essentielle pour éviter le trafic en pleine de ligne et de conduire la locomotive à la station de réparation la plus proche.
- ✚ L'énergie qu'on peut stocker dans les batteries ne dépasse pas 32kwh.
- ✚ Le moteur peut fournir une puissance utile peut arriver jusqu'au 325 KW.
- ✚ Il ne faut pas décharger les batteries plus que le SOC_{min} égal à 20% .
- ✚ Garder un taux de chargement pour le bon fonctionnement des batteries entre un SOC_{max} 70% et SOC_{min} 20%.

Le modèle du block de la gestion d'énergie présenté dans la figure 4.14 se caractérise par :

✚ Entrées Bloc

- **P(t)** : qui représente la puissance totale absorbée électrique (Puissance à la jante + Puissance des auxiliaires + Pertes des différents blocs de la chaîne)
- **SOC** : qui représente l'état de charge du pack des batteries dont sa valeur sera communiquée par la sortie du bloc de batterie. Cette entrée est très intéressante pour la commande du pack.
- **Réservoir du fuel** : qui représente la quantité du réservoir de fuel restante lors de la mission et qui le met à jour par rapport à sa valeur initiale au fur et à mesure de la consommation du moteur thermique, en fonction de la puissance P(t) de mission globale ; la taille du réservoir fuel maximale prévue est de 406 litres. Soit, nous pouvons écrire :

$$R\acute{e}servoir_{fuel} = Q_{fuel_{initiale}} - Q_{fuel \text{ litres}}$$

$$R\acute{e}servoir_{fuel} = Q_{fuel_{initiale}} - CS(\text{litres secondes}).dt$$

✿ **Sorties Bloc :**

- **MAGE** : qui représente la commande Marche/Arrêt du groupe de moteur thermique. Elle est de valeur 0 si le moteur est en arrêt et/ou si le réservoir de fuel a une valeur maximale de 2 litres. Elle est de valeur 1 si le moteur thermique est en marche et/ou pour recharger le pack des batteries si la puissance $P(t)$ est égale au maximum de 295 KW.
- **PGE_utile** : qui représente la puissance du moteur thermique utile aussi appelée électrique en fonction de la puissance d'entrée $P(t)$, et qui a une valeur maximale de 325 KW ; on peut aussi écrire :

$$PGE_{utile} = MAGE * PGE_{utile\ électrique}$$

- **PGE_référence** : qui correspond à la puissance utile du moteur thermique où on prend en compte la puissance de consommation de profil de mission et la puissance de charge des batteries qui est égale à 30 KW (courant de charge du pack complet est égal à 44 A), si la puissance sollicitée du moteur est égale au maximum à 295 KW. cette puissance utile donc elle regroupe la puissance de décharge et la puissance de charge donc, elle dépend de la valeur de MAGE et de la sortie charge_Batt qui a pour fonction de fournir la commande de la puissance de charge ; on peut aussi écrire :

$$Pcharge_{Batt} = Charge_ * Pcharge_{maximale}, \quad \text{avec } Charge = \begin{cases} 1 \text{ si } P t \leq 295 \text{ KW} \\ 0 \text{ si } P t \geq 300 \text{ KW} \end{cases}$$

$$\text{Soit : } PGE_{référence} = Pcharge_{Batt} + PGE_{utile}$$

- **PBAT** : qui représente la puissance de la batterie utile électrique de décharge. sa valeur maximale est égale à 200 KW. comme l'objectif du pack des batteries est de supporter le moteur thermique pour une puissance totale $P(t)$ plus grande que 325 KW utile électrique, afin de limiter la pollution atmosphérique en limitant ainsi la consommation du fuel ; on peut aussi écrire :

$$PBAT = P t - PGE_{utile}$$

$$PBAT = P t - MAGE * PGE_{utile\ électrique}$$

- **MABAT** : qui représente la commande du pack de batterie : elle est égale à 0 si le pack de batterie est en arrêt que ça soit la charge ou la décharge du système, et elle est égale à 1, si on charge et/ou on décharge le pack des batteries
- **Charge_Batt** : qui représente la commande de la batterie si on charge le pack de batterie : elle est égale à 1 si c'est le cas, dans le cas contraire elle est égale à 0.

4.2.4. Simulation du Modèle d'analyse global du kit d'autonomie hybride

Le modèle d'analyse global de notre système est présenté dans l'Annexe E. Chacun des blocs "sources" reçoit une consigne de puissance de référence, plus la consigne de marche/arrêt pour le groupe Diesel. En sortie, le modèle des packs de stockage produit la puissance fournie par le pack et son état de charge. Le modèle du groupe Diesel produit en sortie la puissance et l'énergie totale fournies par le groupe Diesel, la consommation de fuel et la quantité de CO2 émise. Le bloc de gestion énergétique prend en entrée la mission de puissance et l'état de charge des batteries, pour calculer les consignes de puissance à l'endroit des sources. En comparaison au modèle de synthèse en flux de puissance, le modèle d'analyse est bâti sur le même principe.

Après avoir défini le modèle d'analyse global de notre kit d'autonomie, comprenant successivement les blocks de la stratégie énergétique, du groupe Diesel et du pack des batteries, nous allons présenter des simulations en fonction des trois profils de mission, correspondant aux besoins potentiels ayant sollicités d'un système de stockage d'énergie. Nous traiterons des conditions d'exploitation différentes, pour concrétiser le fond de la méthode d'énergie développée.

Les trois besoins sont :

- Chargement du port 1800 Tonnes, d'une distance Totale de 7 Km.
- Desserte locale besoin, 400 Tonnes et d'une distance de 60 Km.
- Locomotive en haut le pied besoin, 90 tonnes et d'une distance de 118 Km

Chargement de port avec un SOC initial de 68% - réservoir 406 Litres

Lors de cette simulation présentée dans la figure 4.15, nous avons supposé que le réservoir du carburant avant le démarrage est égal à 406 Litres. Les batteries sont considérées pleines avec un SOC initial de 68%. Le groupe Diesel dépend d'une puissance nominale de 325 KW nominal, les batteries correspondent à une puissance maximale de 200 KW. Dans l'ensemble, avec cette configuration, la mission est bien passée. Au départ, les batteries ont été sollicitées, l'état de charge

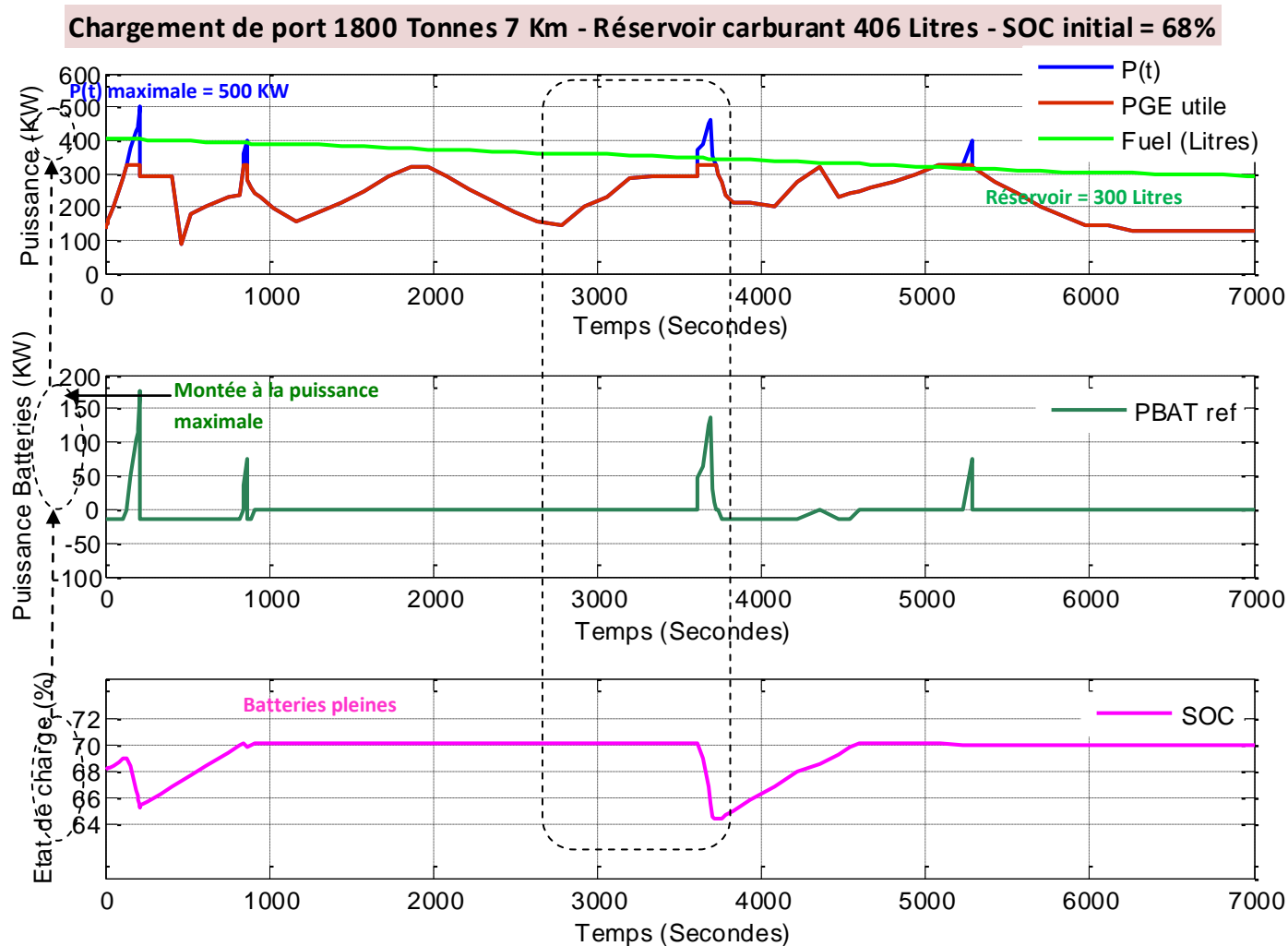


Figure 91.15 Analyse du comportement du groupe Diesel et des batteries – chargement de port

a atteint 65%. Dans la deuxième phase de profil, la puissance totale étant inférieure à 295 kW, du coup les batteries sont chargées par le groupe Diesel jusqu'à atteindre 70 % correspondant à son SOC maximale. A la fin du profil de ligne, il a eu une consommation de fuel de 120 Litres, sur les 7 Km réalisés sur le port. Si nous maîtrisons la gestion d'énergie nous réussissons à rejoindre les lignes électrifiées sans aucun problème avec un réservoir de fuel final de 300 litres, et un état de charge de batteries égale à 70%. Il faut remplir ainsi le réservoir de fuel, pour ne pas tomber en panne lors de l'exploitation. En effet, sur une locomotive, avec le groupe Diesel comme seule source, ce dernier doit rester en état de marche permanent, même lorsque la locomotive est en arrêt, pour fournir ne serait-ce que la puissance aux auxiliaires. Cela accroît la prédominance des phases de ralenti par rapport aux phases de sollicitations significatives

✿ Desserte locale 400 Tonnes 50 Km avec un SOC initial de 20% - réservoir 406 Litres

Lors de cette simulation présentée dans la figure 4.16, nous avons supposé que le réservoir du carburant avant le démarrage est égal à 200 Litres. Les batteries sont considérées à leur niveau minimum avec un SOC initial de 20 %. Le groupe Diesel dépend d'une puissance nominale de 325 kW

nominal, les batteries correspondent à une puissance maximale de 200 KW. Dans l'ensemble, avec cette configuration, la mission est bien passée dans un premier temps, ceci n'a pas duré toute

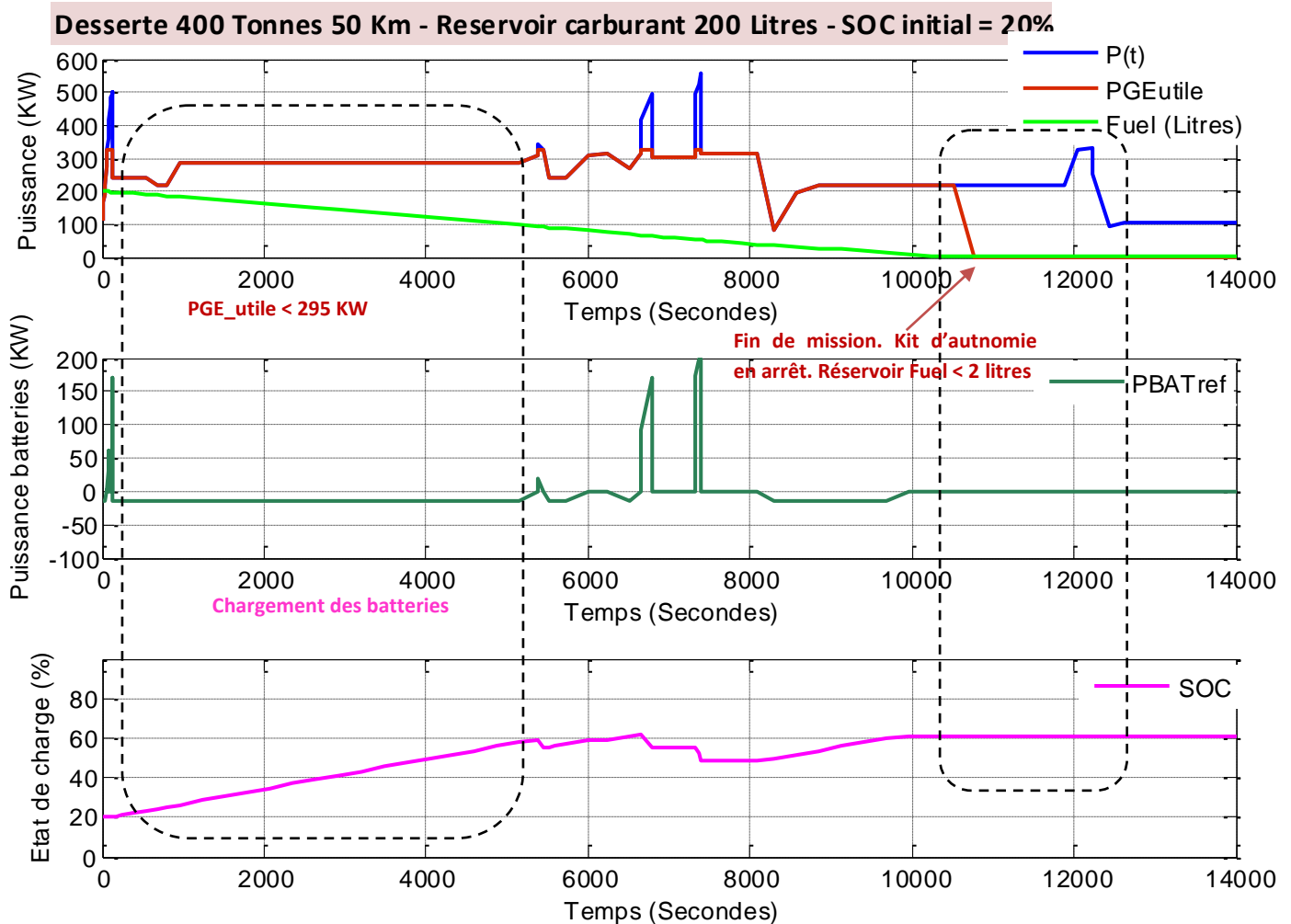


Figure 92.16 Analyse du comportement du groupe Diesel et des batteries – Desserte locale

la mission. Au départ, les batteries ont été sollicitées, l'état de charge étant minimale. Nous pouvons remarquer que la batterie fournit un pic de puissance au démarrage d'une puissance de 160 KW, mais ceci a été fait après avoir chargé la batterie les premières minutes avec le moteur thermique comme la puissance au départ est inférieure à 295 KW. À partir de cette puissance le moteur s'arrête le chargement, et fournit la puissance nominale quasi permanente pour le profil de mission. Avant la fin de la mission, le groupe Diesel arrête de participer à la mission globale car le réservoir du fuel a atteint la limite de 2 litres de carburant. Le pack de batteries étant désormais seul face à une mission qui dépasse ses performances énergétiques. La gestion réagit en mettant fin à la mission, après avoir envoyé un signal d'urgence à la cabine de conduite et le kit d'autonomie hybride s'arrêtera. D'où cette défaillance observée.

✿ Transit haut le pied 118 Km avec un SOC initial de 19 % - réservoir 406 Litres

Lors de cette simulation présentée dans la figure 4.17, nous avons supposé que le réservoir du carburant avant le démarrage est égal à 406 Litres. Les batteries sont considérées à leur niveau minimum avec un SOC initial de 19 %. Le groupe Diesel dépend d'une puissance nominale de 325 KW

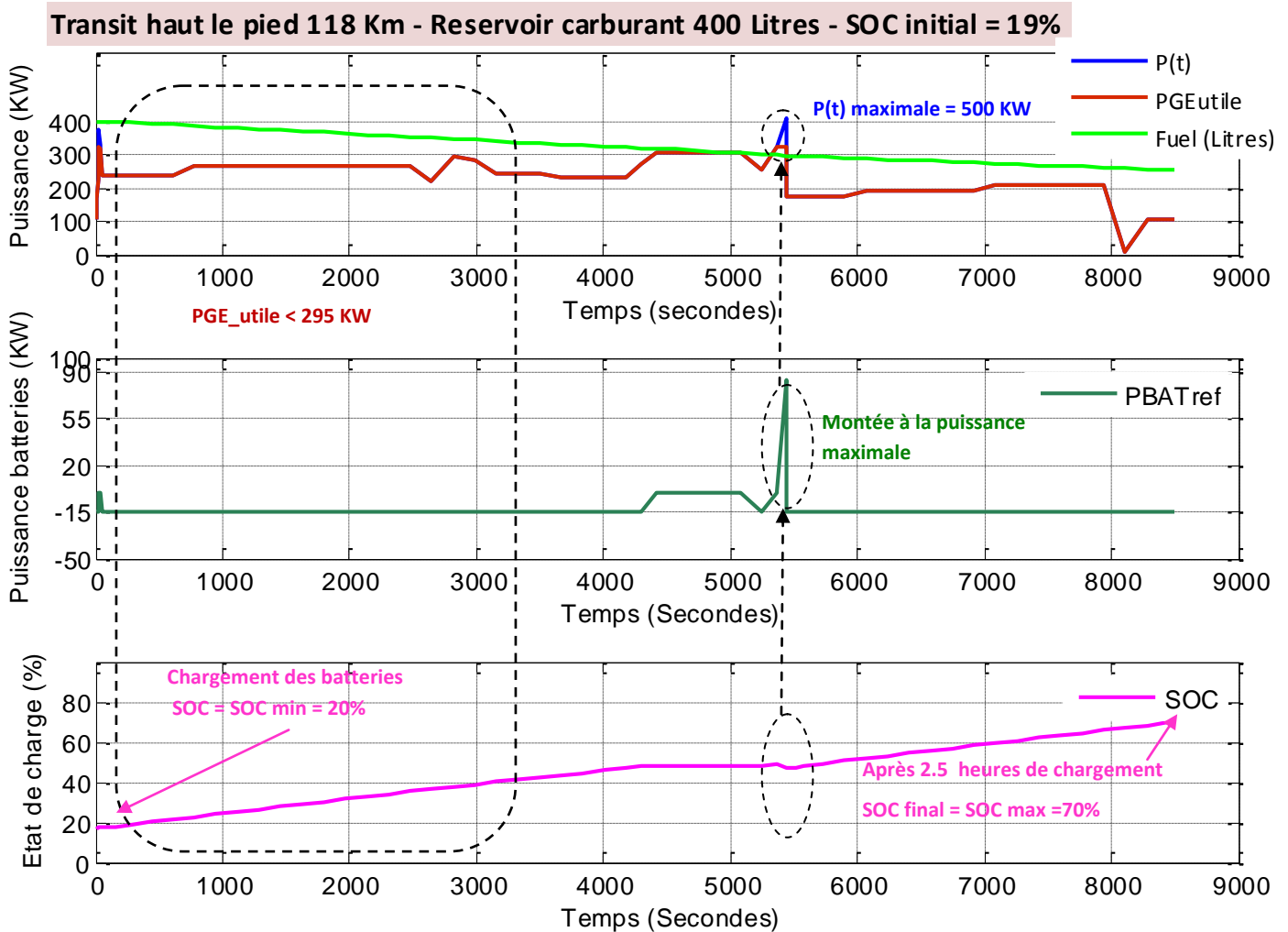


Figure 93.17 Analyse du comportement du groupe Diesel et des batteries – Transit haut le pied

nominal, les batteries correspondent à une puissance maximale de 200 KW. Dans l'ensemble, avec cette configuration, la mission est bien passée. . Au départ, les batteries ont été sollicitées, l'état de charge étant minimale. Nous pouvons remarquer que la batterie fournit un pic de puissance au démarrage d'une puissance de 70 KW, mais ceci a été fait après avoir chargé la batterie les premières minutes. Notons, que ce parcours ne sollicite pas énormément le pack de batteries. La puissance maximale est égale à 400 KW, or la batterie fournit une puissance de 100 KW après avoir été chargée par le groupe Diesel. Tout au long de la mission, la batterie a été sollicitée pour deux faibles pics, le premier d'une puissance de 65 KW et le deuxième de 100 KW. le groupe Diesel a donc chargé les batteries tout au long du parcours, soit pendant 2 heures et demi, d'où la valeur finale de l'état de charge de 70% car comme nous avons validé dans le troisième chapitre, pour le dimensionnement des batteries qu'il nous faut 2 heures pour charger les batteries de la valeur SOC min de 20% à la valeur max de 70%, en considérant que la locomotive circule sous caténaire sur les grandes lignes. D'où la validité de notre modélisation globale de notre système.

4.2.5. Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté les modèles d'analyse en flux de puissance du groupe Diesel, du pack de batteries et de la stratégie de gestion. En plus de la prise en compte des pertes, déjà intégrée dans les modèles de synthèse étudiés au chapitre 3, ces modèles sont plus complets et plus détaillés. Ils intègrent notamment, le contrôle statique des niveaux de puissance admissible par les packs, le contrôle dynamique des puissances de charge et de décharge en fonction de l'état de charge des packs, le calcul de la consommation de fuel et des émissions de CO₂, et surtout une version détaillée de la gestion énergétique. Les résultats de simulation montrés en exemple témoignent de la cohérence et de la pertinence de ces modèles. Les résultats de la simulation des configurations issues de la phase de synthèse nous ont amenés à élaborer les critères de faisabilité ayant permis d'analyser et de comparer ces configurations entre elles. La section qui suit présente la mise au point de ces critères de faisabilité.

4.3. Modèle dynamique moyen de la régulation Bus – Pack batteries

Nous abordons dans cette section dans un premier temps, le pré-dimensionnement du hacheur accouplé au pack batteries. Cette partie est très primordiale dans la nécessité du développement d'un modèle dynamique moyen de la régulation du courant entre le hacheur bidirectionnel et le pack de batteries d'un côté, et la régulation de la tension du bus principal à la sortie du groupe Diesel.

4.3.1. Pré-dimensionnement du hacheur bidirectionnel du pack batteries

Le Pré-dimensionnement du hacheur bidirectionnel ne correspond qu'à une étude préliminaire du dimensionnement technique du convertisseur associé au pack batteries. Comme la batterie dans notre système est une source de courant, durant la gestion d'énergie du système, il faut avoir une régulation de commande réelle en courant de ce bloc [25].

Le pack de batteries est composé de deux branches en parallèle dont chacune est composée de 560 cellules en série. La figure 4.18 présente la configuration entre le bus continu de la chaîne de traction 1500 V C et le pack de batteries associés au convertisseur bidirectionnel, commandé en courant.

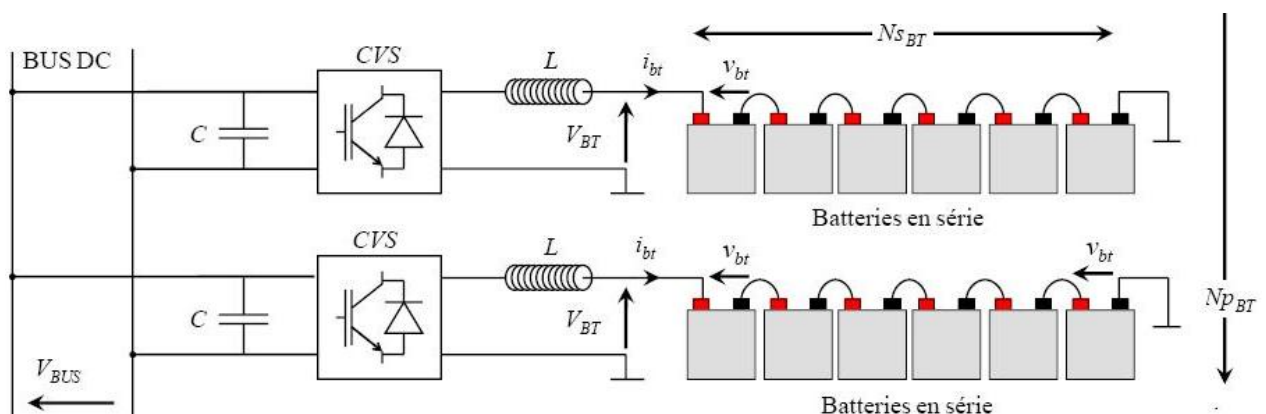


Figure 94.18 Architecture du pack de batteries associé au hacheur bidirectionnel

Dans le cadre de ce pré-dimensionnement, nous avons introduit une inductance L de résistance interne rL en entrée du pack de batterie, soit entre la sortie du convertisseur et l'entrée du pack de batteries, afin de pouvoir limiter les ondulations de courant qui peuvent avoir lieu lors de la charge ou la décharge du pack. Si nous ne choisissons pas un convertisseur avec des bras entrelacés (mis en place des inductances entre les deux bras), la valeur de l'inductance en entrée du pack doit avoir une valeur importante afin de pouvoir filtrer le courant.

Or la tension aux bornes de la charge varie entre 504 Volts et 879 Volts, soit d'une valeur nominale de 672 Volts, et la tension du bus nominale est égale à 1500 V DC. Du coup le rapport cyclique α varie entre 0.336 et 0.586. D'une façon générale la valeur du rapport cyclique varie entre 7% et 93%.

Comme c'est montré techniquement, l'ondulation de courant est maximale à la valeur 0.586 du rapport cyclique : donc la détermination de la fréquence de découpage va se fixer à cette valeur du rapport cyclique. En appliquant la loi des mailles dans Les figures 4.18 et 4.19, nous obtenons :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{hacheur} = V_{bus\text{régulé}} * \text{rapport cyclique} \\ \text{et } I_{BAT} = U_{hacheur} - V_{BAT} * \frac{1}{L.S + (rCVS + rL)} \end{array} \right.$$

Or le calcul de la résistance interne du convertisseur peut-être calculé grâce aux valeurs connues des tensions et courant maximales dans la batterie. Nous pouvons donc écrire :

$$r_{cvs,bt} = \frac{1 - rd_{cvs} \cdot V_{BTmax}}{I_{BTmax}}$$

$$\text{Application Numérique: } r_{cvs,bt} = 1 - 0.94 \cdot \frac{879}{300} = 176 \text{ mOhm}$$

En tâtonnant différentes valeurs de l'inductance L et sa résistance interne rL , ainsi que la valeur de la fréquence de découpage, nous avons réussi à converger vers une ondulation très limitée pour le courant de la batterie, sachant que le choix effectué correspond à une solution technico-économique. A noter que l'ondulation de courant est maximale pour la valeur d'un rapport cyclique de 0.586. A partir de cette valeur, nous avons augmenté les valeurs des paramètres (L et $F_{\text{decoupage}}$) au fur et à mesure, comme notre objectif est la diminution de cette ondulation. il faut augmenter soit L , soit F_{dec} , soit les deux. Il s'agit de la relation suivante :

$$\Delta i_s = \frac{\alpha_{cr}(1 - \alpha_{cr})V_{Bus}}{L \times F_{dec}}$$

Et donc notre choix effectué correspond aux paramètres suivants :

- Inductances de lissage font 900 μH
- Capacité d'entrée de convertisseur de 600 μF , soit une capacité totale qui comprend la valeur de la capacité d'entrée-convertisseur + capacité du bus continu 1500 V DC de la

locomotive + capacité de filtrage des auxiliaires + capacité de filtrage de moteurs de traction : donc une valeur de capacité totale de 25 mFarad.

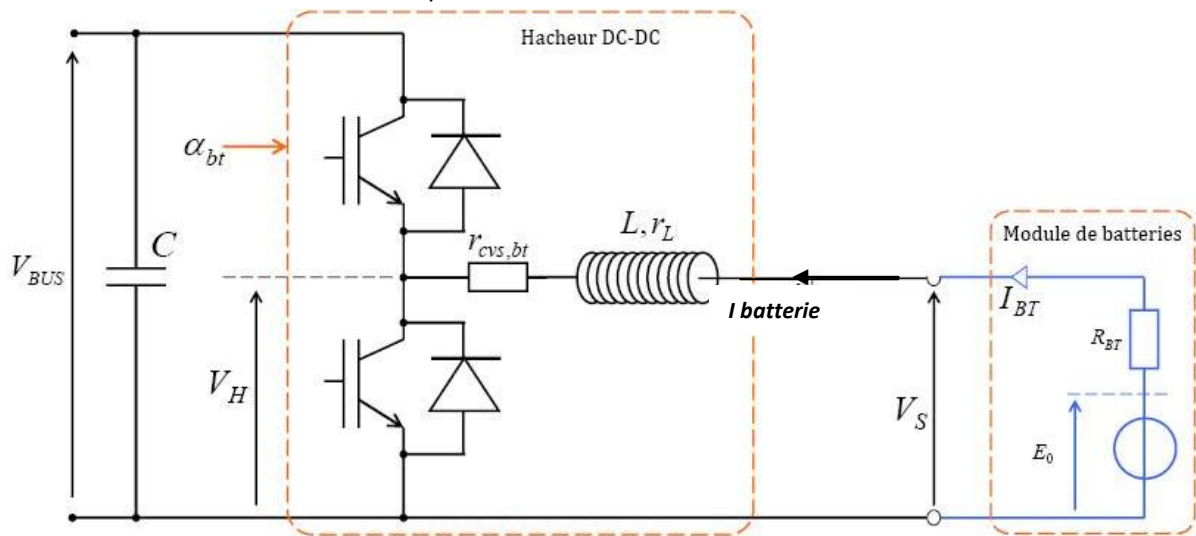


Figure 95.19 Modèle hacheur associé au pack de batteries

- La fréquence de découpage est de valeur 2 KHZ, soit une période de 0.5 msecondes.
- α_{cr} est fixée à 0.586

D'où : $\Delta i_{BAT} = 202 \text{ A}$ qui est une valeur bien inférieure à 300A

L'ondulation maximale de tension en entrée est donc :

$$\Delta V_{BUS} = \frac{\alpha_{cr}(1 - \alpha_{cr})i_{BAT}}{C \times F_{dec}} = 20 \text{ V}$$

4.3.2. Modèle hacheur associé au pack de batteries

La figure 4.19 montre le circuit électrique équivalent d'un module de batteries et son hacheur bidirectionnel dimensionné dans la partie précédente. Désormais, nous utiliserons la variable $i_{batterie}$ pour désigner le courant circulant dans le bras du hacheur correspondant au courant de la batterie. La tension moyenne V_H , à l'échelle temporelle de la période de découpage, s'écrit :

$$V_H = V_{BUS} * \alpha_{bt}$$

La résistance $r_{cvs, bt}$ matérialise les pertes dans le hacheur et l'inductance L admet une résistance interne r_L . A l'échelle temporelle de la période de découpage, les tensions V_H et E_0 peuvent être considérées comme constantes. Le circuit L, R constitué de la résistance $r_{cvs, bt}$, de l'inductance de L et sa résistance interne r_L et de la résistance R_{BT} , compte tenu de la convention générateur utilisée dans ce rapport, est régi par l'équation :

$$V_H - E_0 = V_{H0} = -L \cdot \frac{di_{BT}}{dt} - (r_{cvs, bt} + r_L + R_{BT})$$

Soit,

$$I_{BT} = \frac{-V_{H0}}{L.s + rcvs, bt + r_L + R_{BT}}$$

Par ailleurs, la tension du module de batteries s'écrit :

$$V_{BT} = E_0 - R_{BT} \cdot I_{BT}$$

La figure 4.19 montre le modèle électrique dynamique moyen d'un module de batteries qui a été identifié et détaillé dans le chapitre 3 et son hacheur bidirectionnel. Le modèle reçoit en entrée le rapport cyclique α_{bt} et la tension V_{BUS} du bus continu et produit en sortie la tension V_{BT} , le courant I_{BT} et l'état de charge q_{BT} du module.

Numériquement, l'inductance de lissage et sa résistance interne valent : $L = 600 \mu H$ et $r_L = 200 m\Omega$ calculé dans la partie précédente. Normalement, la résistance interne de la batterie évolue en fonction de l'état de décharge mais il est possible de travailler avec une valeur moyenne r_{bt} . D'après les résultats expérimentaux fournis par le fabricant, R_{BT} vaut approximativement $247 m\Omega$.

Il faut noter que la représentation des pertes (de conduction et de commutation) par une résistance $rcvs, bt$ placée en sortie du bras n'est qu'une vision très approximative, avec $rcvs, bt = 176 m\Omega$.

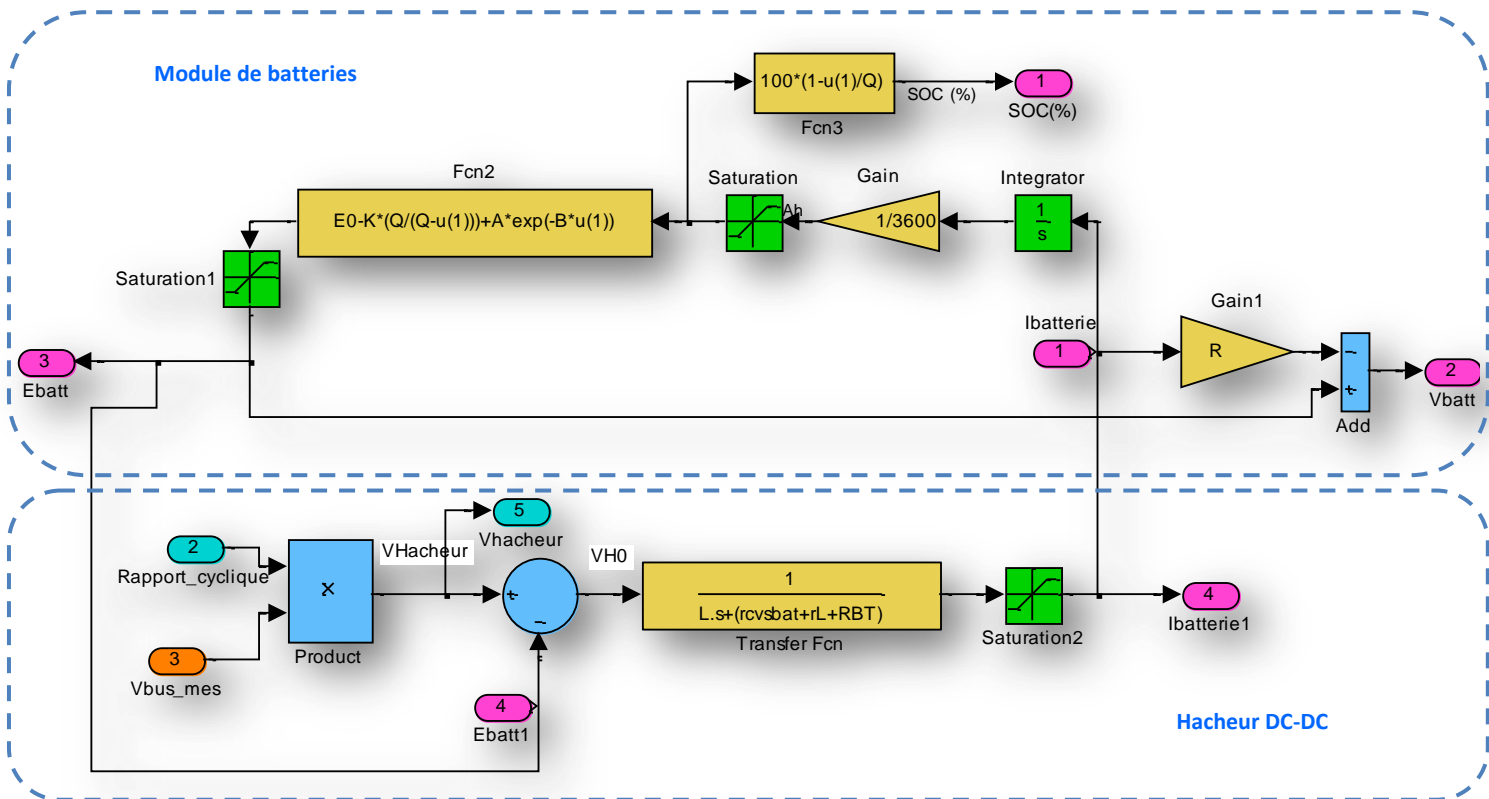


Figure 96.20 Modèle électrique dynamique moyen d'un module de batteries et son hacheur
Régulation du courant

4.3.3. Régulation de courant

La figure 4.20 montre le modèle du hacheur associé aux modules de batteries, piloté par un régulateur de courant. Le régulateur de courant calcule la tension V_L aux bornes de la résistance

rcvs,bt et l'inductance (L , rL). Un système de compensation permet de compléter la tension V_L par la mesure de la tension V_{BT} . La somme V_H obtenue est divisée par la tension du bus pour déduire le rapport cyclique α_{bt} . La variable α_{bt} est échantillonnée entre les limites 0.07 et 0.93 pour garder la contrôlabilité du système et respecter les temps morts entre commutations d'IGBTs. Ensuite, vient le modèle du hacheur que nous avons présenté à la section 4.3.1. Le régulateur de courant est de type PI de la forme :

$$PI_{(IBAT)} = Kp_{BAT} + \frac{Ki_{Bat}}{S}$$

Nous avons identifié les paramètres du régulateur de courant par tâtonnement des différentes valeurs. Les meilleures valeurs correspondantes à notre régulateur sont 0.01 pour Kp_{BAT} et 0.01 pour Ki_{Bat} . Notamment, il existe une méthode analytique pour l'identification de ces paramètres grâce aux rapports des équations de transfert entre $IBAT_{ref}$ et $IBAT_{mes}$. Nous garderons notre étude jusqu'à ce niveau car notre objectif est d'avoir une idée générale de l'interface de régulation de courant du convertisseur bidirectionnel associé au pack de batteries.

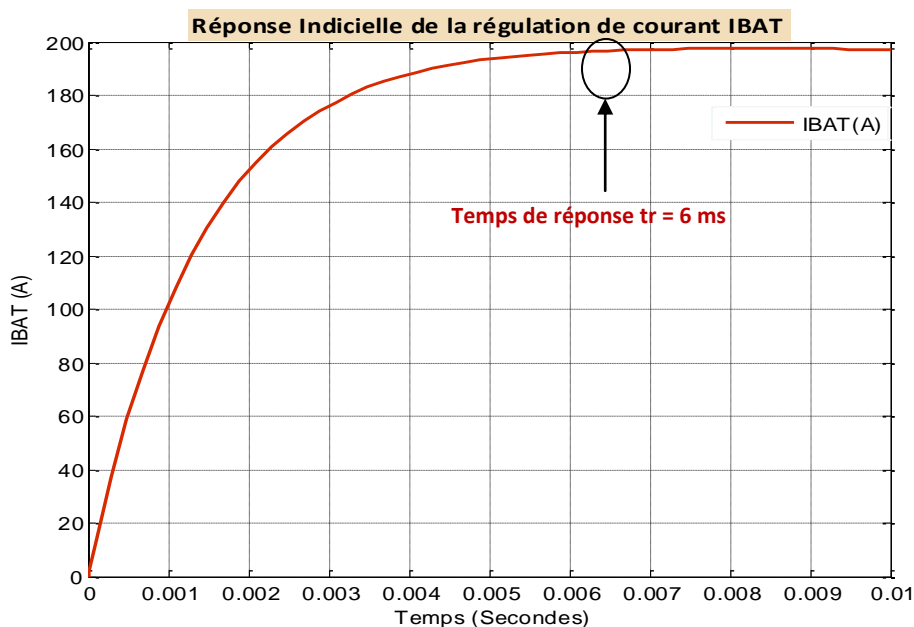


Figure 97.21 Réponse du courant $IBAT_{mes}$ en fonction de sa régulation

La figure 4.21 montre la réponse indicielle de la boucle de régulation de courant Reg_{IBT} ; nous obtenons un temps de réponse t_r égal à 6ms. Reg_{IBT} ne présente aucun dépassement. Ce résultat n'est pas lié à la nature des sources, mais plutôt au fait de la régulation de courant qui est très sensible à la résistance $rcvs$ matérialisant les pertes joules dans le hacheur : $rcvs,bt$ vaut 176 m Ω .

Notons que, le courant I_{bus} étant un courant côté "Bus", celui-ci doit être transformé en courant "batterie". Le courant "batterie" résultant de la transformation est communiqué à l'étage de contrôle de courant. Notons que l'étage de contrôle de la tension du bus est toujours en cascade avec l'étage de contrôle de courant. L'étage de contrôle de courant prend sa consigne de l'étage de contrôle de la tension du bus. La consigne de courant est ensuite comparée au courant mesuré. Puis, à travers un régulateur de courant et une compensation, le rapport cyclique α est déterminé.

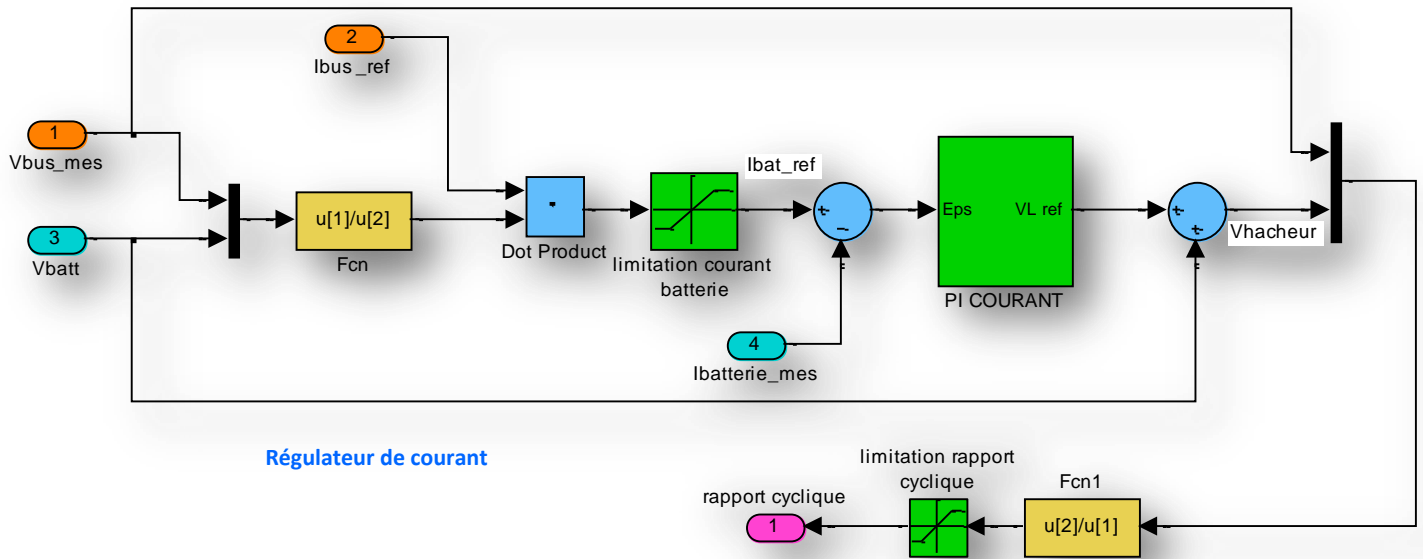


Figure 98.22 Modèle du hacheur et régulateur de courant associé

4.3.4. Régulation de tension

L'étage de contrôle de la tension du bus DC compare la tension du bus VBUS à la référence de tension VBUSref et en déduit, à travers un régulateur de tension, le courant Ibus à injecter sur le bus pour assurer sa régulation et sa stabilisation à sa valeur de référence (Voir Figure 4.22).

Soit Cbus est la somme des capacités de filtrage des convertisseurs montés sur le bus. Elle comporte la capacité d'entrée de convertisseur de 600 μ F, soit une capacité totale qui comprend la valeur de la capacité d'entrée-convertisseur + capacité du bus continu 1500 V DC de la locomotive + capacité de filtrage des auxiliaires + capacité de filtrage de moteurs de traction : donc une valeur de capacité totale de 25 mFarad.

Le régulateur de courant est de type PI de la forme :

$$PI_{(VBUS)} = Kp_{BUS} + \frac{Ki_{BUS}}{S}$$

Nous avons identifié les paramètres du régulateur de courant par tâtonnement des différentes valeurs. Les meilleurs valeurs correspondantes à notre régulateur sont 0.01 pour Kp_{BUS} et 10 pour Ki_{BUS} . Notamment, il existe une méthode analytique pour l'identification de ces paramètres grâce aux rapports des équations de transfert entre IBAT ref et IBAT mes. Nous garderons notre étude jusqu'à ce niveau car notre objectif est d'avoir une idée générale de l'interface de régulation de courant du convertisseur bidirectionnel associé au pack de batteries.

La figure 4.23 montre la réponse indicielle de la boucle de régulation de la tension du bus continu RegVBUS : avec la bande passante fixée à 20 Hz, nous obtenons un temps de réponse tr% égal à 30 ms sans présence d'un dépassement.

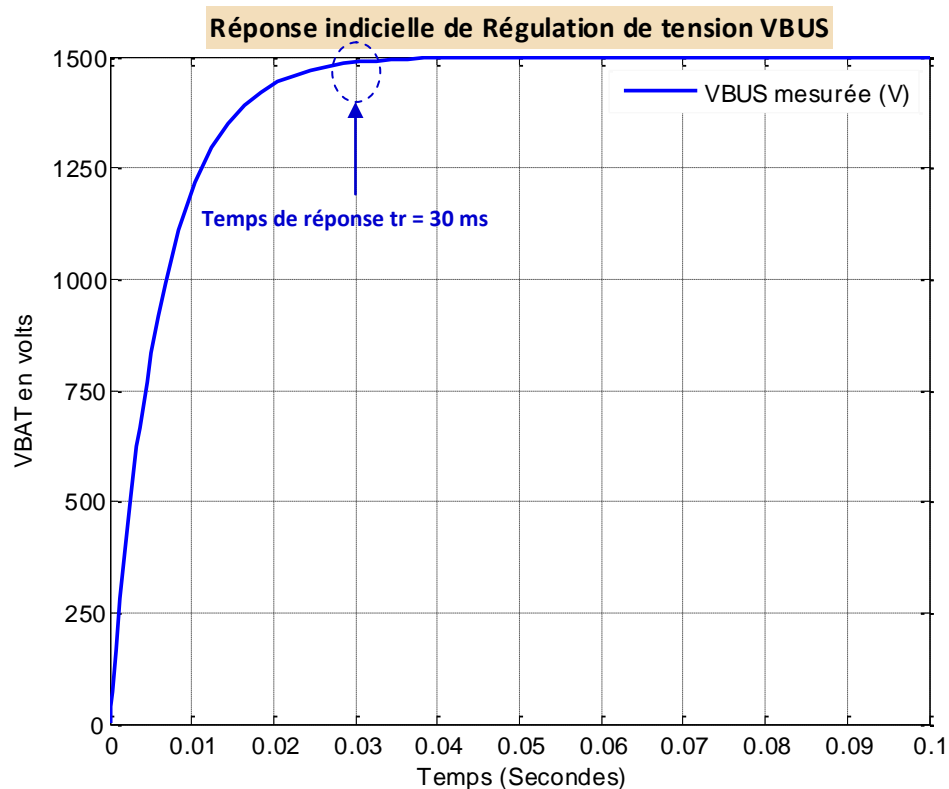


Figure 99.23 Réponse de la tension VBUS mes en fonction de sa régulation

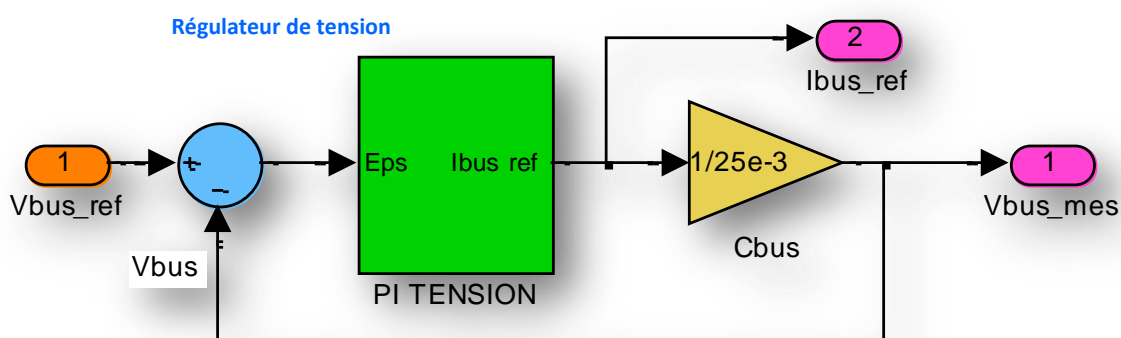


Figure 100.24 Modèle du bus et le régulateur de tension associé

La figure 4.24 montre le modèle du bus de tension et le régulateur associé.

4.3.5. Conclusion

Dans cette section, nous avons procédé au Pré-dimensionnement électrique hacheur bidirectionnel. Quelques valeurs clés liées au dimensionnement des convertisseurs ont été présentées. Dans un deuxième temps, nous avons identifié le modèle dynamique moyen de la régulation de courant entre le pack de batteries et le hacheur bidirectionnel DC-DC, et le modèle dynamique moyen de régulation de la tension du bus principal VBUS. Ceci nous donne un pas avancé sur la synthèse du contrôle-commande et l'affinement de la stratégie de gestion énergétique.

4.4. Critères de faisabilité

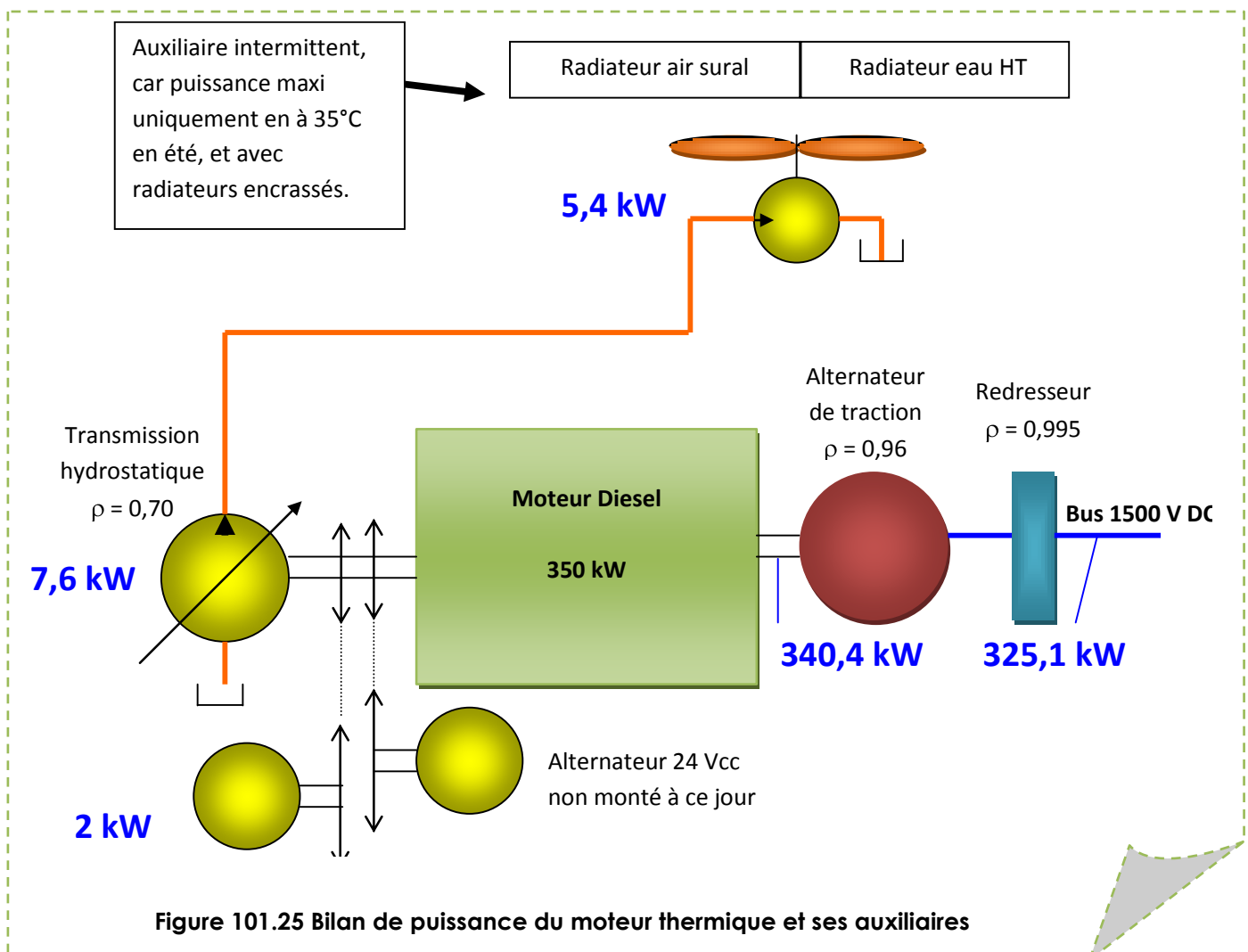
Dans cette section, nous présentons les critères de faisabilité selon lesquels ont été analysées et comparées les différentes configurations issues du dimensionnement énergétique. Il s'agit, notamment, du volume du système et son intégration dans la locomotive, du coût d'investissement, et de la durée de vie des batteries.

4.4.1. Volume du système

L'estimation du volume du système intègre les éléments assemblés, les espaces nécessaires entre éléments pour éviter des surchauffes destructrices, les convertisseurs et les systèmes de refroidissement. Nous distinguons les volumes des sous-systèmes groupe Diesel et du pack de batteries.

✿ Volume du groupe Diesel

Globalement, le volume d'un groupe Diesel (moteur thermique, alternateur et système de refroidissement) dépend de la puissance qu'il peut délivrer. Mais la relation entre le volume et la



puissance nominale du groupe Diesel n'est pas linéaire, car il arrive que le même moteur thermique serve à concevoir des groupes Diesel de puissances électriques nominales différentes.

Comme nous l'avons montré dans le troisième chapitre, nous avons choisi un alternateur/redresseur à pont diode, avec un système de refroidissement à eau comme il correspond le plus à notre longueur limite d'encombrement.

Le moteur diesel doit être dépouillé de tous accessoires, seul le démarreur et l'alternateur 24V sont conservés d'origine, il est alimenté par l'intermédiaire d'une batterie indépendante au plomb. Cette batterie assure également l'alimentation des auxiliaires 24 V du moteur.

Le radiateur de refroidissement de ce moteur est situé dans le compartiment ventilateur de traction du bogie non utilisé pour la traction. La gestion de la ventilation est commandée via le SIE

Les différentes auxiliaires existantes dans le groupe Diesel sont : Auxiliaire refroidissement à eau de l'alternateur + groupe air-air+ tuyaux d'eau BT + Pompe à eau + Filtre à particules + SCR et EGR... Nous pouvons donc écrire :

$$Volume_{GE\ seul} = 0,94\ m^3$$

$$Volume_{\substack{\text{alternateur} \\ \text{redresseur}}} \text{ refroidissement à eau} = 0,3m^3$$

$$Volume_{\text{auxiliaires}} = 0,23\ m^3$$

Soit, un volume total de :

$$Volume_{GE\ complet} = 0,94\ m^3 + 0,53\ m^3 \text{ auxiliaires} = 1,5\ m^3$$

Nous pouvons ainsi exprimer le volume du groupe diesel complet en fonction de sa puissance nominale PGEN :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{\text{groupe diesel}_{complet}} = (PGEN \times 0,0027)_{\text{moteur}} + (PGEN \times 0,0015)_{\text{auxiliaire}} \\ V_{\text{groupe diesel}_{complet}} = 0,0043 \times PGEN \end{array} \right.$$

Le volume s'exprime en m³ et la puissance s'exprime en KW.

Volume du pack des batteries

Le système comprend:

- Les modules de batteries permettant de stocker l'énergie nécessaire et de délivrer le courant et la tension utiles : dans notre cahier des charges on a besoin de 112 modules de 12 Volts, soit 560 cellules en série et deux branches en parallèles, avec une puissance utile de 200 KW électrique, et une capacité de 68 Ah.

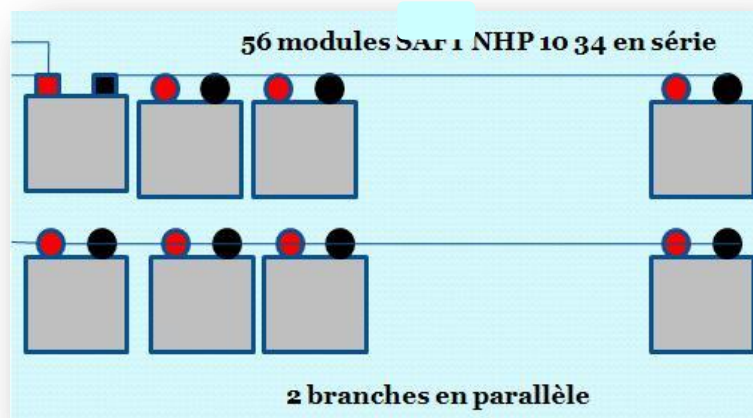


Figure 102.26 Modèle d'assemblage de pack de batteries du kit d'autonomie

- Le système de régulation et de gestion thermique des batteries (BTMS)
- Le système de surveillance et de gestion des batteries (BMC) ainsi que tous les capteurs et équipements connexes
- L'appareillage nécessaire à la sécurité et au fonctionnement du système intégré à la locomotive.
- Les connexions
- Le coffre comprenant l'ensemble du matériel
- Un convertisseur bidirectionnel DC en courant placé entre la sortie du pack et le bus continu 1500 V DC. Grâce à ce convertisseur, le chargement et le déchargement des batteries seront contrôlés en courant.

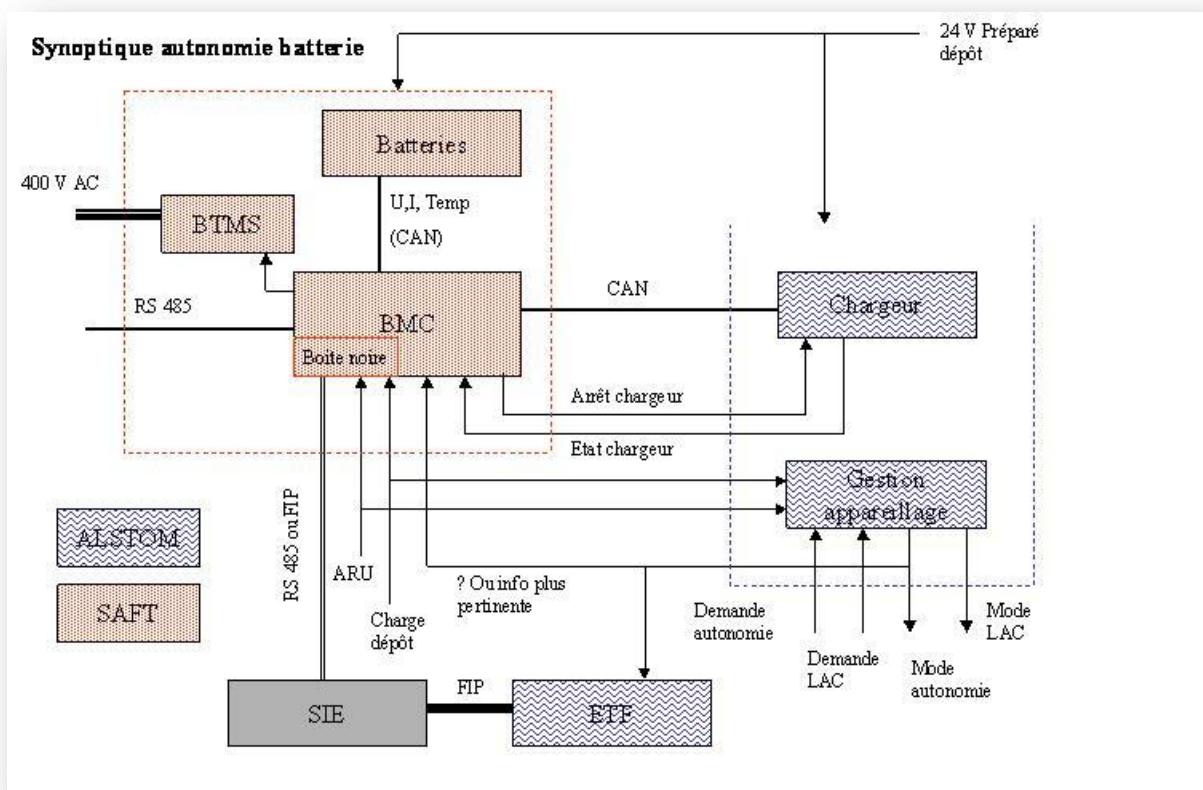


Figure 103.27 Schéma de configuration des batteries NIMH et ses auxiliaires

☞ **Comparaison entre un système refroidissement à eau et à air [43]**

	Refroidissement à air	Refroidissement à eau
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Léger • simple 	<ul style="list-style-type: none"> • Transfert de chaleur plus efficace • La température liquide moyenne plus conformée • Intégré avec le refroidissement de véhicule
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Distribution compliquée d'air dans le paquet. • L'air entrant doit être exempt de saleté et d'eau de la route • La température ambiante variable 	<ul style="list-style-type: none"> • Poids accru • Conception raffinée de module • La température liquide moyenne plus élevée

Le fabricant de batterie de NiMH préfère des caisses en métal si l'air-refroidissement doit être employé pour le refroidissement, et préfère les caisses en plastique de cellules si le refroidissement par l'eau doit être employé. Dans le tramway de Nice, Les batteries sont refroidies par un circuit d'eau glycolée. Ce circuit est lui-même réfrigéré grâce à un groupe de refroidissement actif (BTMS).

Le volume du pack de batteries compte les NBT éléments de batteries, les convertisseurs et filtres associés et le système de refroidissement. De plus, pour assurer une bonne aération, sans risque de surchauffe, il est conseillé de laisser un espace de quelques centimètres entre les éléments. Une étude prospective auprès des spécialistes d'assemblage de batteries nous a permis d'établir une relation linéaire entre le volume du pack et le nombre de batteries.

Le coffre de batteries dépend des plusieurs composants parmi eux : Contacteur, Fusibles, BMC, Platines composants et support, faisceaux électriques, Sectionneur, Ventilateurs et divers. Suite au dimensionnement du 3^{ème} chapitre, nous avons 112 modules des batteries NiMH NHP 340-10, soit un volume de 0.54 m³. Nous estimons le volume du coffre de batteries avec ses différents auxiliaires de 1.5 m³, soit un volume d'auxiliaires de 0.66 m³. Le volume d'un module de batterie est de 0.0048 m³. Nous pouvons donc écrire :

$$Volume_{Pack\ batterie\ complet} = K_{BAT} \times N_{BAT\ total} \times Volume_{module}$$

- K_{BAT} Est le coefficient d'assemblage qui tient compte des espaces entre éléments et le volume de matière supplémentaire apportée par le châssis d'assemblage.
- $N_{BAT\ total}$ Est le nombre total des modules du pack
- $Volume_{module}$ Correspond au volume du module NiMH

$$\text{Soit : } K_{BAT} = \frac{1.5\ m^3}{112 \times 0.0048\ m^3} = 2.79$$

De tout ce qui précède, nous déduisons l'expression du volume du système, pour une configuration (PGEN, NBT), par :

$$\text{Vol}_{\text{système}} = \text{Vol}_{\text{GE}} + \text{Vol}_{\text{BT}} \quad \rightarrow \quad \text{Volume}_{\text{système}} = 0.0043 \times \text{PGEN} + 2.79 \times 0.0048 \times N_{\text{BAT total}}$$

$$\text{Volume}_{\text{système}(m^3)} = 0.0043 \times \text{PGEN} + 0.0134 \times N_{\text{BAT total}}$$

4.4.2. Coût financier du système

Normalement, le coût financier du système intègre le coût initial des éléments, le coût de développement, l'amortissement des éléments et le coût d'exploitation (carburant compris). Mais à ce stade de la conception, il est difficile de prendre en compte tous ces aspects. Il est question uniquement du coût initial des sources et de l'estimation des coûts de mise en œuvre (assemblage et convertisseurs).

Il s'agit de minimiser le critère de coût énergétique suivant, dépendant du dimensionnement (dim), du cycle (cyc), et de la puissance des accessoires (acc) qu'on s'est fixés :

$$J(\text{dim}, \text{acc}, \text{cyc}) = \sum_{i=0}^{n-1} C_{MT_i}(\Omega_{MT_i}, \Gamma_{MT_i})$$

C_{MT_i} représente la quantité de carburant correspondant à l'application sur le moteur thermique, entre les temps $i \cdot T_e$ et $(i+1) \cdot T_e$, du couple Γ_{MT_i} à la vitesse Ω_{MT_i} . Ce critère est un coût intégral au sens. Le problème ne contient pas le coût final. La formulation du problème est pour l'instant incomplète : nous ne savons pas encore par rapport à quelles commandes nous allons minimiser $J(\text{dim}, \text{acc}, \text{cyc})$.

Nous avons fixé l'état de charge de la batterie comme variable d'état. Avec le modèle de la batterie, son expression est la suivante :

$$\text{SOC}_{r_{i+1}} = \begin{cases} \text{SOC}_{r_i} - I_{B_i} & \text{si } I_{B_i} \geq 0 \\ \text{SOC}_{r_i} - I_{B_i} \cdot \nu_B & \text{si } I_{B_i} < 0 \end{cases}$$

✿ Coût financier du groupe Diesel

Globalement, le coût financier d'un groupe Diesel (moteur thermique, alternateur et système de refroidissement) dépend de la puissance qu'il peut délivrer. En plus du coût catalogue, il faut ajouter les frais de mise en œuvre (capotage, filtre à particules, modifications pour intégration sur une locomotive,...). Nous estimons le coût du groupe Diesel à 150 K€. Nous pouvons donc écrire :

$$\text{Coût}_{\text{GE}} = 0.428 \times \text{PGEN}, \text{ sachant que le coût s'exprime en K€}$$

✿ Coût financier du Pack batteries

Le coût d'assemblage compris, d'un pack de 112 modules de batteries NiMH NHP 340-10, est de 200 K€. Nous pouvons donc écrire :

$$\text{Coût}_{\text{pack batterie}} = 1.78 \times N_{\text{BAT total}} \text{ sachant que le coût s'exprime en K€}$$

Le coût global du système (NBT, PGEN) s'écrit donc :

$$Coût_{système} = 0.428 \times PGEN + 1.78 \times N_{BAT\ total}$$

Il faut évidemment considérer ces coûts comme des tendances très approximatives. Le développement des filières industrielles (effet de nombre) notamment autour du véhicule électrique pur ou hybride est susceptible d'engendrer de fortes évolutions.

4.4.3. Durée de vie des batteries

Les batteries sont les éléments les plus fragiles du système d'une part, à cause de leur durée de vie assez limitée et d'autre part, à cause de leur coût élevé. De plus, l'environnement, surtout la température ambiante, a un effet important sur leur durée de vie. Pour ce qui nous concerne, dans cette phase de conception, nous supposons que les batteries sont équipées de système de ventilation qui garantit une bonne température de fonctionnement. Les limitations de courant de charge et de décharge étant respectées, le seul facteur d'influence de la durée de vie des batteries reste la profondeur de décharge et le nombre de cycles.

Dans son article "Optimal battery/ultracapacitor storage combination" paru en janvier 2008, William Henson a établi que, quelle que soit la technologie de batterie, le nombre de cycles disponibles CF ("cycles to failure") pour une profondeur de décharge DoD donnée s'écrit :

$$C_F = a_1 + a_2 \cdot e^{a_3 \cdot DOD}$$

Mais pour des raisons de stratégie commerciale les fabricants refusent de donner les paramètres de ce modèle. La durée de vie des batteries NiMH de notre power pack hybride a été estimée pour une première analyse de 10 ans après avoir simulé le premier besoin « chargement de port » pendant le début et la fin de la mission, à condition de respecter une température de 30°. Il faut bien noter que lors de la phase de décharge le système de refroidissement sera en arrêt, et il ne sera activé que lors de la charge. Le tableau 4.1. Représente les détails de l'étude présentant ainsi la durée de vie des batteries :

	1 ^{er} besoin M1	2 ^{ème} besoin M2	3 ^{ème} besoin M4	4 ^{ème} besoin M5	Total
T° batterie	30	30	30	30	1800 cycles
PDD	52,09%	44,58%	17,31%	17,31%	
Nbre cycles/an	500	500	50	750	
Au prorata	80%	15%	100%	5%	
T° batterie	30	30	30	30	563 cycles
PDD	52,09%	44,58%	17,31%	17,31%	
	0.8 de premier besoin	0.15 du 2 ^{ème} besoin	1 du 3 ^{ème} besoin	0.05 du 4 ^{ème} besoin	
Vie estimée (années)	10	10	10	10	
Nbre cycles totaux	4000	750	500	375	5625

Tableau XVII.1 Estimation de durée de vie du pack de batteries du kit d'autonomie

Le phénomène de cyclage est le résultat de l'altération de la batterie due aux effets d'un vieillissement dans des conditions nominales. Elle prend en compte les phénomènes de détérioration naturels qui sont la détérioration des plaques et séparateur, la déshydratation des éléments. Elle donne une caractéristique montrant l'évolution de la capacité de stockage de l'accumulateur en fonction du nombre et de la profondeur des cycles de charge-décharge. Son évaluation est réalisée en suivant les tests de la norme BS6290.

L'importance du nombre de cycle est d'autant plus importante que leur amplitude est importante. Ce qui a pour effet de nettement diminuer la durée de vie de la batterie lors de son utilisation en décharges profondes. Cette caractéristique est habituellement fournie par les constructeurs sous forme d'un tableau donnant la durée de vie (en cycles) en fonction des profondeurs de décharge.

Le sizing ne prend pas en compte dans un premier temps la répartition des cycles dans une journée. Compte tenu d'un nombre de cycles de 1350 annuels / 300 jours \approx 4.5 cycles / jour, avec un cycle maximum ayant une PDD de 52%, ce qui correspond à 2.4C à recharger par jour, la charge devrait être réalisable sur une journée de 16h. Cela sera à confirmer avec l'analyse plus précise des scénarios

4.4.4. Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté les cinq critères de faisabilité. L'évaluation de plusieurs de ces critères est basée sur des modèles analytiques approximatifs. Mais nous avons montré autant que possible la validité de ces modèles analytiques, avec des données réelles. Ces critères seront utilisés pour l'étude de faisabilité, dans la section suivante, puis dans le chapitre sur l'optimisation

4.5. Conclusions et perspectives

Ce chapitre vient compléter le chapitre 3 consacré à la synthèse du dimensionnement et la modélisation des deux sources d'énergie. Nous avons présenté la méthode de gestion d'énergie adoptée dans notre projet de développement d'un kit autonome hybride propre et durable. Notons que cette gestion se compose de deux modes de fonctionnement, un premier normal contenant la phase de démarrage, la traction et l'Arrêt, et enfin un deuxième dégradé contenant la phase d'interruption et de parking de la locomotive. Ces phases ont été développées sous forme des boîtes noires de gestion d'énergie grâce au développement des algorithmes représentant leurs fonctionnements. Nous avons abordé à la fin la phase d'intégration de la gestion dans l'interface TCMS de la locomotive.

Dans un deuxième temps, nous avons présenté les modèles d'analyse en flux de puissance du groupe Diesel, du pack de batteries et de la stratégie de gestion. En plus de la prise en compte des pertes, déjà intégrée dans les modèles de synthèse étudiés au chapitre 3, ces modèles sont plus complets et plus détaillés. Ils intègrent notamment, le contrôle statique des niveaux de puissance admissible par les packs, le contrôle dynamique des puissances de charge et de décharge en fonction

de l'état de charge des packs, le calcul de la consommation de fuel et des émissions de CO₂, et surtout une version détaillée de la gestion énergétique. Les résultats de simulation montrés en exemple témoignent de la cohérence et de la pertinence de ces modèles. Les résultats de la simulation des configurations issues de la phase de synthèse nous ont amenés à élaborer les critères de faisabilité ayant permis d'analyser et de comparer ces configurations entre elles. La section qui suit présente la mise au point de ces critères de faisabilité.

A la fin de ce chapitre, Nous avons procédé au Pré-dimensionnement électrique hacheur bidirectionnel. Quelques valeurs clés liées au dimensionnement des convertisseurs ont été présentées. Dans un deuxième temps, nous avons identifié le modèle dynamique moyen de la régulation de courant entre le pack de batteries et le hacheur bidirectionnel DC-DC, et le modèle dynamique moyen de régulation de la tension du bus principal VBUS. Ceci nous donne un pas avancé sur la synthèse du contrôle-commande et l'affinement de la stratégie de gestion énergétique.

Conclusion Générale

Les travaux de thèse présentés ici ont pour but l'étude et le développement d'une source d'énergie hybride embarquée à intégrer dans une locomotive électrique multi-tension (Alternative ou continue) à chaîne de traction électrique autonome propre et durable. Nous avons étudié ici l'application dans le domaine ferroviaire comme les locomotives sur des bouts de lignes non-électrifiées auprès des opérateurs ferroviaires. S'il paraît évident, à l'issue de cette étude et de l'état de l'art mené au premier chapitre, que l'idée d'hybridation ferroviaire est tout à fait pertinente, tout du moins pour certains segments de missions spécifiques, il serait difficile et probablement aléatoire, vu la précision de certains de nos indicateurs, de donner des conclusions quantitatives précises.

L'étude s'est démarrée du cahier des charges d'une locomotive électrique multi-tension pouvant tirer jusqu'à 1800 Tonnes, et ayant un volume disponible qui nous permet d'ajouter un kit hybride et la rendre ainsi autonome et interopérable sur des bouts de lignes non-électrifiées. Couplé à l'importance primordiale de la notion de mission, l'existence d'une locomotive électrique à option d'une source d'énergie hybride embarquée impose des contraintes d'encombrement et de masse, comme notre objectif principal dans cette étude est de garder l'architecture technique globale de sa chaîne de traction, et de réduire au minimum les modifications que nous pourrions avoir dans l'engin, pour réduire ainsi le coût de l'application et de la réalisation de l'étude.

L'objectif principal de l'étude était de concevoir le kit hybride autonome à intégrer dans une locomotive électrique, en termes d'architecture, de dimensionnement et de gestion. D'autre part, il s'agissait pour ALSTOM Transport d'acquérir un savoir faire en matière de développement d'une source hybride embarquée à intégrer dans ses locomotives électriques et de les rendre interopérable en Europe en améliorant ainsi ses disponibilités et ses parcours à travers ses différentes missions. D'un autre côté, il s'agissait de rénover ses engins ferroviaires en termes de développement propre et durable respectant l'environnement et réduisant ainsi les émissions polluantes. De plus, il a été nécessaire pour l'entreprise d'acquérir des connaissances plus précises en terme de nouvelles technologies de production et de système de stockage d'énergie (Accumulateurs, supercondensateurs, volant d'inertie).

Les travaux réalisés ont consisté dans un premier temps à définir les différentes missions ferroviaires auprès des opérateurs privés sur des bout de lignes non-électrifiées répondant à notre problématique, et permettant ainsi de réaliser un dimensionnement énergétique du kit hybride autonome, respectant le cahier des charges de l'étude lié essentiellement à l'encombrement

disponible. Ensuite, nous avons identifié les deux sources de tension et de courant de la source d'énergie hybride embarquée après avoir évalué plusieurs technologies potentielles. Nous avons présenté la méthode de dimensionnement énergétique d'une source d'énergie hybride à embarquée dans une locomotive électrique multi-tension. Une étude de marché auprès des exploitants ferroviaires Européens nous a permis d'identifier parmi plusieurs besoins, des missions dominantes qui vont nous servir à identifier les performances du système. A partir des missions choisies, nous avons pu identifier quatre paramètres nécessaires au dimensionnement énergétique du système ($P_{moyenne}$, $E_{mission}$, E_u et P_{max}^{SSE}). Ensuite, nous avons évalué plusieurs différentes solutions envisagées, compatible avec le dimensionnement énergétique effectué.

Dans un deuxième temps, et après avoir défini l'architecture technique de la chaîne de traction de la locomotive électrique multi-tension à option du kit hybride, nous avons présenté la démarche de dimensionnement et de modélisation des ces deux sources d'énergie et de puissance. Cette étude, a mis en évidence dans ce type d'application l'utilisation d'un kit autonome hybride composé de deux sources complémentaires, une première source d'énergie correspondant à un groupe électrogène (Moteur Diesel + Alternateur à Aimant permanent / Redresseur à Diode) d'une puissance électrique utile DC de 325 KW soit 350 KW thermique, et un pack de batteries NiMH comme source secondaire de puissance pour le système de stockage d'énergie, associé à un convertisseur bidirectionnel (56 modules en série/2 branches en parallèle, NiMH NHP 340-10) d'une puissance utile de 200 KW DC et d'une capacité énergétique de 68 Ah. Nous avons effectué une comparaison dimensionnelle entre une batterie NiMH et une batterie Li-ion pour notre source d'énergie embarquée. Nous pouvons ainsi confirmer, suite au bilan comparatif obtenu, que les batteries Li-ion sont très prometteuses pour les futures applications hybrides, surtout pour notre kit hybride.

Nous avons aussi abordé la modélisation du système se basant sur un bilan de puissance complet permet de prendre en compte les pertes du système. Un développement du modèle dynamique moyen équivalent du pack de batteries NiMH a été mise en place suite à des travaux réalisés dans la littérature des accumulateurs NiMH, et le validé dans un premier temps par les résultats du fournisseur, et dans un deuxième temps par les essais expérimentaux à échelle réduite du pack de batteries NiMH, qui nous ont permis de consolider notre choix technique final de système de stockage d'énergie et son dimensionnement. Les essais expérimentaux nous permettent aussi de prendre en compte les paramètres nécessaires à notre développement de gestion d'énergie du système, et qui comprend une tâche primordiale du contrôle de l'état de charge de la batterie.

La structure étant définie, nous avons abordé enfin la dernière phase d'étude qui est le développement du contrôle-commande, et la mise en œuvre de la gestion d'énergie entre les deux sources présentes à bord du véhicule, en tenant compte des limitations énergétiques du système de stockage et du dimensionnement du système. Le but de ces stratégies d'énergie est de maximiser par exemple le rendement global de la chaîne de traction.

Plusieurs perspectives peuvent être évoquées autour de ces travaux de thèse.

Il serait intéressant de poursuivre cette étude avec un modèle de pack de batteries NiMH intégrant les effets d'échelles. De plus pour valider l'évolution des températures dans le circuit de refroidissement du système. De même, de continuer cette validation en échelle unitaire du système complet du kit autonome, y compris son groupe électrogène et son pack de batteries, en prenant en compte les différentes contraintes ferroviaires que nous pouvons se mettre en face lors d'une mission (Vibrations, variation de température, adhérence...)

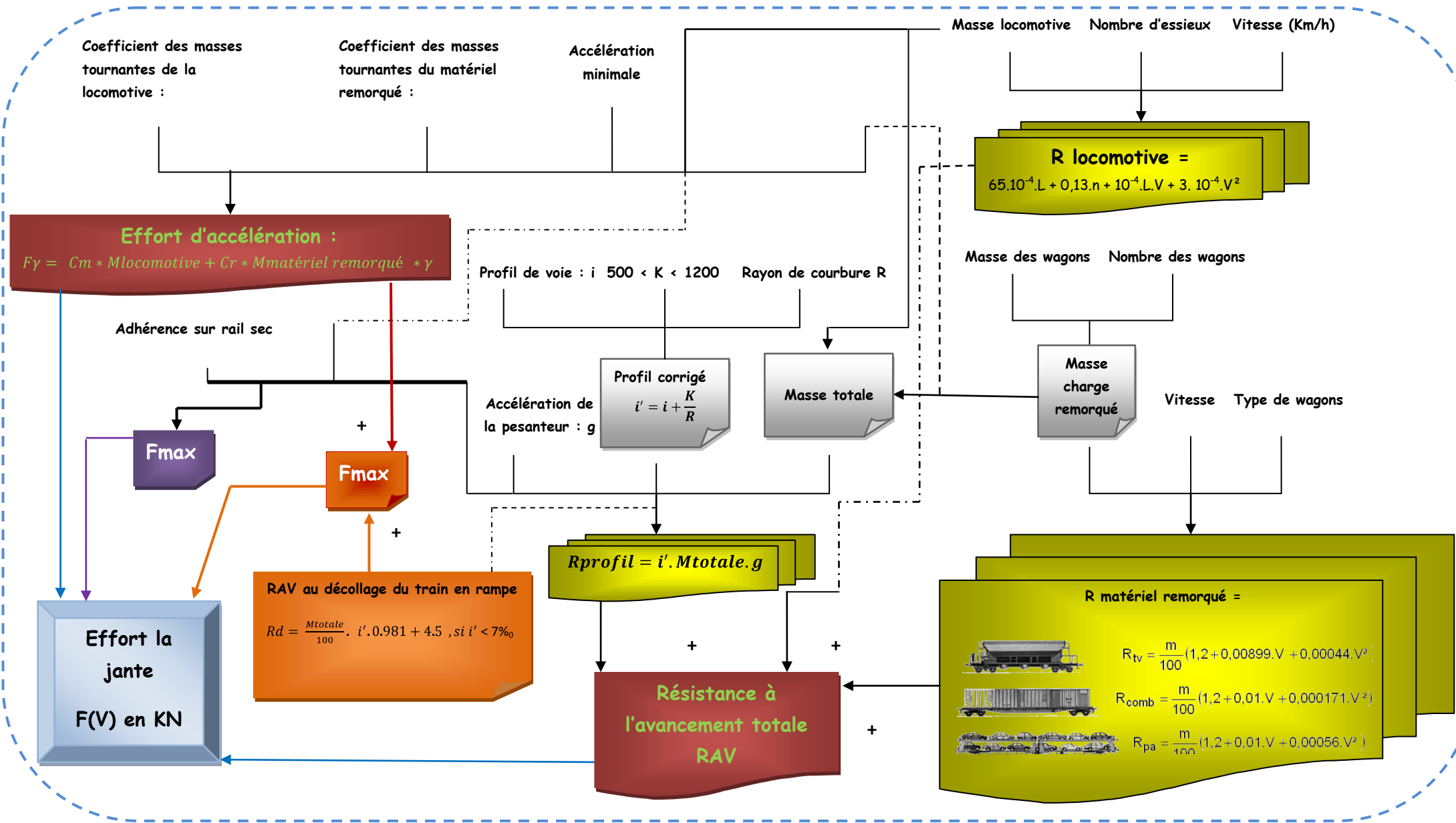
La stratégie d'énergie présentée étant globale à l'ensemble du parcours, il faudrait mettre au point une stratégie d'énergie locale qui permettrait ainsi une mise en œuvre en temps réel sur le véhicule.

Sur le plan général il serait bien sur intéressant, voire indispensable, de pouvoir monter un banc pour tester l'ensemble des algorithmes de commande rapprochés et la stratégie d'énergie du kit hybride complet en temps réel.

Cette étude sur la conception d'un kit hybride autonome fut donc particulièrement riche d'enseignements, tant sur le plan de la démarche systémique que des retombées applicatives : elle permet notamment d'avoir une vision plus claire des choix comparatifs en terme de nouvelles technologies. Actuellement, l'offre technologique s'étend à bien analyser l'encombrement disponible dans la locomotive, surtout en terme de masse disponible à intégrer en respectant les normes de circulation ferroviaires en Europe.

ANNEXE A

Modèle dynamique de la locomotive



→ Démarrage en palier : F_{max} (à Vitesse = 0 Km/h) = Effort d'accélération + RAV totale
→ Démarrage en pleine rampe : F_{max} (à vitesse = 0 Km/h) = Effort d'accélération + RAV au décollage

Annexe B

Phase d'industrialisation des systèmes de stockage

		2006	2007	2008	2009	2010
Lead-Acid	Technology	Technology validated				
	24...110 V batteries	Technology cycle				
	Rescue Batteries for APS	Technology cycle				
Ni-Cd	technology	Technology validated				
	24...110 V batteries	Technology cycle				
	TLS shunting loco	Product cycle				
Ni-MH	technology	Technology cycle				
	Autonomy (Tram Nice)	Product cycle				
	110 V - AGV	Product cycle				
Li-Ion	Li-Co	technology strictly forbidden (except for computer, mobile phone...)				
	Li-FePO4	Technology cycle				
	Li-NiCoAl	Technology cycle				
Supercaps	Steem (RATP)	Technology cycle				
		Product cycle				
Flywheel	FW composite	technology not validated				
	FW metal	Development stopped				

Technology	
	To be addressed
	Up-stream
	Technology cycle
	Technology validated
Products	
	Product cycle
	Demonstrator
Revenue service	
	< 3 years
	> 3 years
	

Annexe C

Méthode de dimensionnement analytique d'un pack de batterie de traction

✿ Détermination du nombre de cellules en série NS_{BAT}

Considérons que la tension du bus principal est fixe, et que notre rapport cyclique $\alpha \in [\alpha_{min}, \alpha_{max}]$. Soit donc :

$$\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max} \Rightarrow$$

$$\alpha_{min} * V_{BUS} \leq \alpha * V_{BUS} \leq \alpha_{max} * V_{BUS} \Rightarrow$$

$$\alpha_{min} * V_{BUS} \leq V_{BAT} + V_L \leq \alpha_{max} * V_{BUS} \Rightarrow$$

V_L représente la tension aux bornes de la bobine qui se trouve en série avec le pack afin de lisser le courant de charge et de recharge.

Comme la somme des deux tensions V_{BAT} et V_L est limitée entre les deux bornes, donc V_{BAT} toute seule sera aussi limitée entre les mêmes bornes ; nous pouvons écrire :

$$\text{D'où : } \begin{cases} NS_{bat_{minimal}} = \alpha_{min} \frac{V_{BUS}}{V_{cellule_{mini}}} \\ NS_{bat_{maximal}} = \alpha_{max} \frac{V_{BUS}}{V_{cellule_{maxi}}} \end{cases}$$

D'où :

$$NS_{bat_{moyen}} \text{ nominale} = \frac{\alpha_{moyenne}}{V_{cellule_{nominale}}} * V_{BUS}$$

✿ Détermination du nombre de branches en parallèle Np_{BAT}

Pour définir le nombre de branches en parallèle, il faut mettre deux nouvelles hypothèses :

- ☞ Calculer la puissance maximale et la puissance minimale sollicitées de la batterie lors du programme de traction
- ☞ Calculer l'énergie maximale et l'énergie minimale sollicitées de la batterie lors du programme de traction

Ces deux hypothèses ont été déjà traitées dans le chapitre 2, comme elles représentent un dimensionnement énergétique de batteries.

Donc pour obtenir la relation qui nous donne le dimensionnement de nombre de branche qu'il faut avoir, nous partons de l'équation suivante :

$$PBAT = VBAT * IBAT \Rightarrow IBAT = \frac{PBAT}{VBAT}, \quad \text{soit aussi} \quad IBAT_{max} = \frac{PBAT_{max}}{VBAT_{max}}$$

De même, notons les équations suivantes :

$$\left. \begin{array}{l} PBAT = NBAT_{totale} * Pcellule_{batt} \\ VBAT = NSBAT * Vcellule_{batt} \\ IBAT = NPBAT * icellule_{batt} \\ NBAT_{totale} = NSBAT + NPBAT \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{NSBAT est le nombre total des cellules en série} \\ \text{NPBAT est le nombre total des branches en parallèle} \end{array}$$

Ensuite, nous exprimons le courant de la batterie IBAT en fonction de la capacité nominale de la batterie, car cette information est donné dans la DATA SHEET d'un fournisseur de batterie ; d'où :

$$CBAT_{nominale} = IBAT * \text{temps de décharge} \Rightarrow IBAT = \frac{CBAT_{nominale}}{\text{temps}_{décharge}}$$

$$\text{or } IBAT = \frac{PBAT}{VBAT} = \frac{NBAT_{totale} * Pcellule_{batt}}{NSBAT * Vcellule_{batt}} = \frac{NPBAT * C_{batt_{cellule}}}{\text{temps}_{décharge}}$$

Grâce à cette identification, nous exprimons le temps de décharge de la batterie en fonctions des paramètres connus, avec :

$$CBAT_{nominale} = (NPBAT * C_{batt_{cellule_nominale}})$$

$$\Leftrightarrow \text{temps}_{décharge} = \frac{NSBAT * NPBAT}{NSBAT + NPBAT * Pcellule_{batt}} * C_{batt_{cellule}} * Vcellule_{batt}$$

Comme nous le remarquons, le temps_{décharge} s'exprime en fonction de NSBAT et NPBAT, sachant que NSBAT a déjà été déterminé. Il reste alors deux inconnues à déterminer. C'est pour cela, la variable temps_{décharge} peut-être obtenue suite au cahier des charges élaborés après avoir déterminé la valeur énergétique minimale et maximale, ainsi que la valeur de la puissance minimale et maximale ; nous pouvons écrire donc :

$$EBAT = PBAT * \text{temps}_{décharge} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} EBAT_{mini} = PBAT_{mini} * \text{temps}_{décharge_{mini}} \\ EBAT_{maxi} = PBAT_{maxi} * \text{temps}_{décharge_{maxi}} \end{array} \right.$$

Avec :

- **EBAT (mini)** : représente la valeur énergétique totale et minimale du cahier de charges élaboré du système de stockage d'énergie.
- **EBAT (maxi)** : représente la valeur énergétique totale et maximale du cahier des charges élaboré du système de stockage d'énergie
- **PBAT (mini)** : représente la valeur absolue d'un pic de puissance minimum présentée dans le cahier des charges
- **PBAT (maxi)** : représente la valeur absolue d'un pic de puissance maximale présentée dans le cahier des charges

$$\text{D'où : } \text{temps}_{\text{décharge}_{\text{mini}}} = \frac{\min \text{ EBAT totale du cahier des charges}}{\min \text{ PBAT totale du cahier des charges}}$$

$$\text{Et } \text{temps}_{\text{décharge}_{\text{maxi}}} = \frac{\max \text{ EBAT totale du cahier des charges}}{\max \text{ PBAT totale du cahier des charges}}$$



$$\text{temps}_{\text{décharge}} = \text{temps}_{\text{décharge}_{\text{moyen}}} = \frac{\text{temps}_{\text{décharge}_{\text{mini}}} + \text{temps}_{\text{décharge}_{\text{maxi}}}}{2}$$

$$\text{Or : } C_{\text{batt}_{\text{cellule}}} = i_{\text{cellule}_{\text{batt}}} * \text{temps}_{\text{décharge}} \implies$$

$$i_{\text{cellule}_{\text{batt}}} = \frac{C_{\text{batt}_{\text{cellule}}}}{\text{temps}_{\text{décharge}}}$$

Avec $IBAT = NPBAT * i_{\text{cellule}_{\text{batt}}}$;

Il s'agit ensuite de déterminer un régime connu dans notre cahier des charges pour pouvoir obtenir le nombre de branche en parallèle ; c'est pour cela nous avons pris en compte le régime le plus sévère qui dimensionne les contraintes maximales de consommation énergétique. D'où le **régime de puissance consommatrice maximale** avec :

$$IBAT_{\text{max}} = \frac{PBAT_{\text{max}}}{VBAT_{\text{max}}} \text{ Et } IBAT = NPBAT * i_{\text{cellule}_{\text{batt}}}$$

Avec $VBAT_{\text{max}} = NSBAT * V_{\text{cellule}_{\text{batt}}_{\text{max}}}$

Ce qui nous donne :

$$IBAT_{\text{max}} = NPBAT * i_{\text{cellule}_{\text{batt}}_{\text{max}}} = NPBAT * \frac{C_{\text{batt}_{\text{cellule}_{\text{max}}}}}{\text{temps}_{\text{décharge}_{\text{moyen}}}}$$



D'où :

$$NPBAT = \frac{IBAT_{max}}{icellule_{batt_{max}}} = \frac{PBAT_{max} * 1000}{VBAT_{max}} * temps_{décharge_{moyen}} * \frac{1}{Cbatt_{cellule_{max}}}$$

✿ Détermination des limites de l'état de charge SOC

Il faut imposer une contrainte de maintien de l'état de charge de la batterie. Il est nécessaire de restreindre l'évolution de l'état de charge relatif SOC de telle manière que l'état de charge absolu SOC reste dans la plage préconisée par le constructeur de la batterie, [SOC_{min}; SOC_{max}]

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$$

L'état de charge de la batterie se limite généralement entre 0% et 100%, mais la profondeur de décharge de la batterie limite son état de décharge minimale, et la fonction de la surcharge de la batterie limite son état de charge maximale. Soit donc :

$$\begin{aligned} \text{Et} \quad & SOC_{min} (\%) = f(\text{profondeur de décharge}) \\ & SOC_{max} (\%) = f(\text{surcharge de la batterie}) \end{aligned}$$

$$\text{Avec} \quad SOC_{\%} t = 100 * \left(1 - \frac{t_{initial} i_{BAT} * dt}{CBAT_{nominale}}\right)$$

Dans notre méthode analytique, nous calculons les deux limites de SOC, en se basant sur les résultats de dimensionnement énergétique du système de stockage d'énergie présentés dans le chapitre 2. Nous retirons de ces résultats, les valeurs de consommation énergétique utile pour le dimensionnement de notre source, spécialement la valeur maximale, soit $Energie_{utile_{maximale}}(KWh)$, et la valeur minimale, soit $Energie_{utile_{minimale}}(KWh)$.

Or:

$$\begin{aligned} Energie_{utile_{maximale}} \text{ KWh} &= P_{maximale_{utile}} \text{ KW} * temps_{décharge_{moyen}} \\ &= NPBAT + NSBAT * P_{cellule_{bat_{maximale}}} * temps_{décharge_{moyen}} \end{aligned}$$



$$\left\{ \begin{aligned} & \mathbf{Energie_{utile_{maximale}} \text{ KWh}} \\ &= NPBAT + NSBAT * V_{cellule_{batt_{max}}} * icellule_{batt_{max}} * 1000 * temps_{décharge_{moyen}} \\ & \mathbf{Energie_{utile_{minimale}} \text{ KWh}} \\ &= NPBAT + NSBAT * V_{cellule_{batt_{minimale}}} * icellule_{batt_{minimale}} * 1000 * temps_{décharge_{moyen}} \end{aligned} \right.$$

Avec $Energie_{totale} BAT \text{ KWh} = \frac{NSBAT * V_{cellule_{batt_{nominal}}} * NPBAT * C_{batt_{cellule_{nominal}}}}{1000}$ qui
représente l'énergie totale nominale des batteries.

Annexe D

Dimensionnement d'un pack de supercondensateur et estimation de sa durée de vie

Exemple de dimensionnement d'un pack de supercondensateur

1. Le besoin est de travailler avec un pack à énergie réduite : on demande 680 Wh (+/-5%) d'énergie max ce qui représente 1/6^{ème} de l'énergie maximale pour réaliser un parcours d'après les simulations système (La donnée de base est le parcours T1 avec une stratégie Boost V1).

$$E_{\max} = 680 \text{ Wh (+/- 5\%)}$$

Le fournisseur (Maxwell) propose un pack SC de **720 Wh** constitué de BCAP0010 décrits au § 3.2:

$$E_{\max \text{ transférée}} = \frac{3}{4} E_{\max} = 540 \text{ Wh}$$

$$N_{\text{elem}} = \frac{540 \times 3600}{2600 \times 2,3^2} \frac{8}{3} = 377$$

Le nombre d'éléments choisi est **384** pour des raisons de mise en modules (384 = 64 x 6).

2. Avec ces 384 éléments, il faut avoir une tension V_{SC} toujours inférieure à la tension bus, le pire cas est en freinage à SOCmax. Pour s'assurer du fonctionnement du hacheur, on fait le calcul avec la tension maximale d'un supercondensateur (2,5 V) :

$$V_{SC_max} = \frac{N_{\text{elem}}}{N_p} (V_{\text{elem}} + R_{\text{elem}} I_{\text{elem_max}}) = \frac{N_{\text{elem}}}{N_p} (2,5 + 0,0005 \times 600) = \frac{N_{\text{elem}}}{N_p} \times 2,8$$

Si $N_p = 1$, $V_{SC} = \frac{384}{1} \times 2,8 = 1075 \text{ V} > V_{bus}$

si $N_p = 2$, $V_{SC} = \frac{384}{2} \times 2,8 = 538 \text{ V} < V_{bus}$

Le choix s'est donc porté sur **2 branches** en parallèle.

On aurait pu choisir plus de 2 branches, mais le hacheur aurait été sollicité plus fortement en courant. Lorsqu'on fait le choix du nombre de branches, il faut s'assurer que les courants vus par le hacheur sont admissibles et qu'ils ne génèrent pas de pertes trop importantes.

Pour cela, il faut calculer les pertes du hacheur sur le point le plus contraignant ou sur parcours et vérifier que les températures IGBT sont correctes.

3. Les SOC min et max se calculent facilement ainsi que les puissances maximales en traction et freinage :

		TRACTION	FREINAGE
SOC min = 0	$V_C = 1,155 \times 192 = 222 \text{ V}$	$P_{SCmax} = 197 \text{ kW}$	$P_{SCmax} = -335 \text{ Kw}$
SOC min = 1	$V_C = 2,31 \times 192 = 444 \text{ V}$	$P_{SCmax} = 463 \text{ kW}$	$P_{SCmax} = -601 \text{ kW}$

Critère de fin de vie

En vieillissant, à force de subir des cyclages, le supercondensateur voit ses valeurs caractéristiques se modifier. En l'occurrence, sa valeur capacitive va diminuer et sa résistance série va augmenter. Néanmoins ce supercondensateur doit être capable de produire des performances identiques avec ses caractéristiques dégradées. C'est pourquoi, dans l'optique de l'utiliser sur un véhicule où il va subir de nombreux cyclages, il faut dimensionner le supercondensateur avec ces valeurs dégradées.

Les valeurs de fin de vie sont définies comme suit :

$$C_{\max_fin \text{ de vie}} = k_C \times C_{\max_nom} \quad \text{avec } 0 < k_C < 1$$

$$R_{\text{élem_fin de vie}} = k_R \times R_{\text{élem_nom}} \quad \text{avec } k_R > 1$$

Plus on tolère de marge entre les valeurs de fin de vie et les valeurs nominales pour allonger la durée de vie, plus on surdimensionne la quantité de supercondensateurs nécessaire à une application.

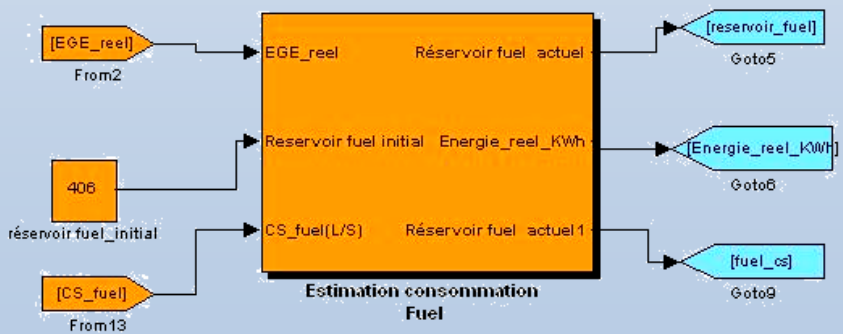
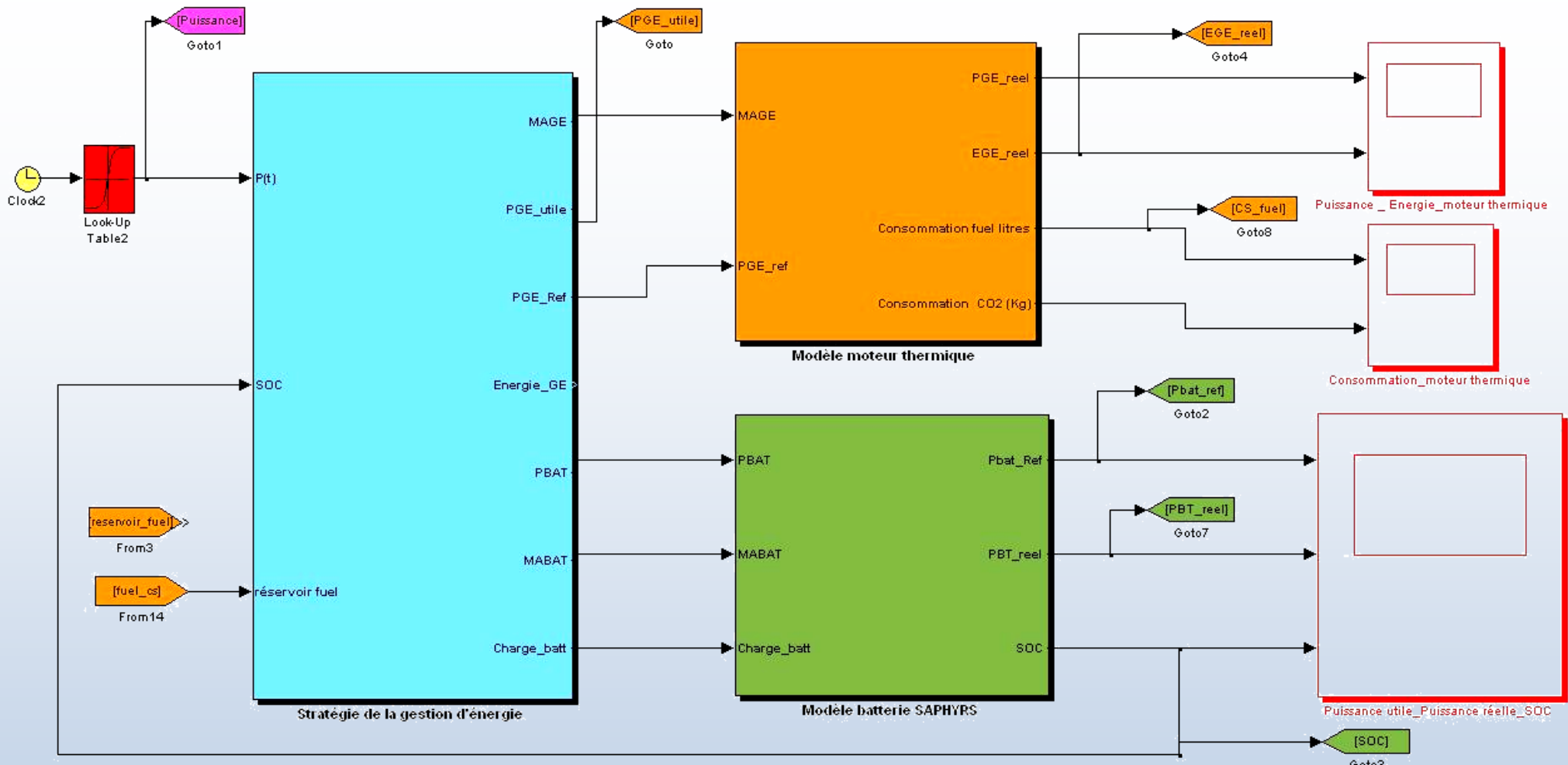
Il est donc essentiel de connaître le gain réel en durée de vie lorsqu'on surdimensionne un pack SC pour une application : c'est un des objectifs des essais planifiés sur le banc Coppace.

Pour répondre à cette question, on peut appliquer un cycle typique sur un pack SC et observer la dégradation de R et C en fonction du nombre de cycles.

les critères de fin de vie choisis par le fournisseur pour son dimensionnement sont, pour le moment, les suivants :

$$C_{\max_fin \text{ de vie}} = 0,8 \times C_{\max_nom}$$

$$R_{\text{élem_fin de vie}} = 2 \times R_{\text{élem_nom}}$$



Annexe E

Modèle d'analyse global du kit d'autonomie hybride

Bibliographie

- [1] Commission des comptes et de l'économie de l'environnement. Mobilité, transport et environnement. Technical report, CCEE, décembre 2006.
- [2] Rafic Younes, "Elaboration d'un modèle de connaissance du moteur diesel avec turbocompresseur à géométrie variable en vue de l'optimisation de ses émissions", Thèse Soutenue le 07 Décembre 1993.
- [3] Julien Scordia, "Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides", Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, 10 Novembre 2004.
- [4] Joseph Beretta, Thierry Alleau, François Badin, Cyriacus Bleijs, Jean Bonal, "le génie électrique automobile, la traction électrique", Lavoisier 2005.
- [5] S. Delprat, T. M. Gerra" J. Rimaux, "Optimal Control of a parallel powertrain: From global optimization to real time control strategy", VTC2002.
- [6] Theo Hofman, Roell van Druten, "Concept Design for Hybrid Vehicle Power Systems", 2005 American Control Conference June 8-10, 2005. Portland, OR, USA.
- [7] Roger Kaller, Jean Marc Allenbach, "Traction électrique", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), ISBN : 2-88074-274-9, Avril 1999.
- [8] A. Kleimaier, D. Schroder, "Optimization Strategy for Design and Control of a Hybrid Vehicle", AMC2000-Nagoya.
- [9] Reza Langari et Jong-Seob Won, "Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle—Part I: System Architecture and Design of the Driving Situation Identification Process", IEEE Transactions On Vehicular Technology, Vol. 54, No. 3, May 2005.
- [10] CEI 349 : « Traction électrique, machines électriques tournantes des véhicules ferroviaires et routiers », 1991 – 11.

- [11] NF EN 1987 : « Véhicule routiers à propulsion électrique en trois parties », Partie 1 : Stockage de l'énergie à bord du véhicule (Décembre 1997).
- [12] Julien Scordia, « Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides », Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, 10 Novembre 2004.
- [13] Aïman NOUH, « Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers », Thèse de doctorat de l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard et de l'Université de Franche-Comté, Belfort, 26 Mars 2008.
- [14] S. Deprat, « Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles », Thèse de doctorat de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, Janvier 2002.
- [15] E. Faggioli, P. Rena, V. Danel, X. Andrieu, R. Mallant et H. Kahlen (1999), "Supercapacitors for the energy management of electric vehicles", *Journal of Power Sources*, volume 84, pp. 261–269, 1999.
- [16] C. E. BARBIER, "Modélisation et simulation du système véhicule électrique pour la conception et le contrôle de sa chaîne de traction", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 22 novembre 1994.
- [17] P. DUPRAZ, "Conception d'une chaîne de traction hybride parallèle thermique et électrique", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1998.
- [18] T. BRENDON, "Modeling and Control of a Series Configured Hybrid Electric Vehicle for Parametric Study", Thesis of Master of Science in Engineering of the University of Texas at Austin, August 1997.
- [19] BRONOEL G. « Les accumulateurs électrochimiques : progrès et tendances Rhone Poulenc », *L'actualité chimique*, N°3, issn 0151-9093, mai 1990.
- [20] HLADIK J. « Accumulateur électriques », Paris, Presse universitaire, collection que sais-je, 1979.
- [21] SUNU W.G., BURROWS B. "Mathematical model for design of battery electrodes II Current Density", *Distribution J. Electrochemical Society* Vol 129, N°4, 1982, p. 688-695.
- [22] Aihua Wang, Yaobin Chen and Rongjun Zhang, "A novel design of energy management system for hybrid electric vehicles using evolutionary computation", In *Electric Vehicle Symposium 18*, 2001.
- [23] E.VAN den Tillaart. MATADOR, "Management tool for the assessment of driveline technologies and research", Chapitre Subtask 2.4: Test Methods. SOC Correction methods for HEVs. TNO Automotive, July 2000.
- [24] Alexandre DUBRAY, "Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant les profils de mission suivis », thèse de Doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 2002.

- [25] Cossi Rockys AKLI, « Conception systémique d'une locomotive hybride autonome, Application à la locomotive hybride de démonstration et d'investigations en énergétique LHyDIE développée par la SNCF », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique Toulouse, 27 Juin 2008.
- [26] ADEME, « Système de dépollution des transports Maritime, ferroviaire et engins de travaux publics », Technical Report, ADEME, 2004.
- [27] R. L. Cousineau. Development of a hybrid switcher locomotive the railpower green goat. Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE, 2006.
- [28] Bernard DUMAS, « Etude ELODIT, comparaison de deux locomotives de forte puissance à traction autonome équipées de groupe de production d'énergie à moteur diesel ou à turbines », ALSTOM Transport, 2004.
- [29] John Herbst, Matthew Caprio, Robert Thelen, "2 MW 130 kWh Flywheel Energy Storage System", The University of Texas at Austin-Center for Electromechanics, Texas USA, April 2003.
- [30] R.F. Thelen, Senior Member, IEEE, J.D. Herbst, M.T. Caprio, "A 2MW Flywheel for Hybrid Locomotive Power", Center for Electromechanics-The University of Texas at Austin, Texas USA, April 2003.
- [31] Pieter VOS and Jolt OOSTRA, "Hybrid locomotive – Technical concept », ALSTOM Transport Stendal, Allemagne, juin 2006.
- [32] Thierry MONTANIER, « FUEL CELL system – FULLTRAM – Spécifications générales du système », ALSTOM Transport, Tarbes, Février 2004.
- [33] Didier GARRET, « Analyse de besoins de services aux opérateurs du Fret Européen », ALSTOM Transport, Belfort, Mars 2006.
- [34] Mr. Philippe BARRADE, Mr. Alfred RUFER, "The use of supercapacitors for energy storage in traction systems", Laboratory of industrial electronics Lausanne Switzerland, 2004.
- [35] Phatiphat THOUNTHONG, "CONCEPTION D'UNE SOURCE HYBRIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPERCONDENSATEURS », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 9 décembre 2005.
- [36] Pierre CHAPPAS, « Cours la traction ferroviaire », Eddition 2001.
- [37] Jérôme LACHAIZE, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction », Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de toulouse, 20 septembre 2004.

- [38] F. Porcher, S. Poignant, « Dimensionnement et choix de pack supercondensateurs », ALSTOM Transport tarbes, 2002.
- [39] Jean-Claude Lassègues, Techniques de l'Ingénieur : Supercondensateurs, 2001 – Ref : D 3 334.
- [40] Thierry MONTANIER, « Spécification technique de batterie d'autonomie du tramway de Nice », ALSTOM Transport, Tarbes, 2004.
- [41] E. KHUN, C. FORGEZ, G. FRIEDRICH, "Electric Equivalent Circuit of a NiMH Cell : Methods and Results", Université de technologie de compiègne, 2003.
- [42] E. KHUN, C. FORGEZ, G. FRIEDRICH, "Modèle de batteries NiMH adaptée au Génie électrique description et validation expérimentale », Université de technologie de compiègne, 2003.
- [43] David Linden, Thomas B. Reddy, "Handbook of Batteries", Third Edition, Part II, 1995
- [44] C.R. Akli, X. Roboam, B. Sareni, and A. Jeunesse, "Energy management and sizing of a hybrid locomotive", 12th European Conference on Power Electronics and Applications, 2007.
- [45] B. Sareni S. A. Randi, S. Astier. Full modelling approach of electric vehicle for design optimisation. 18th International Electric Vehicle Symposium, 2001.
- [46] Nicolas Hulot. Pacte écologique. Technical report, Observatoire de la fondation Nicolas Hulot, 2007.
- [47] M. OSAWA. The ne@train, first hybrid material in the world. Rail international, Avril 2004.
- [48] David Briginshaw. Hybrid traction system benefits environment : Japan's new energy train project uses a hybrid diesel-electric traction system to achieve major reductions in energy consumption, noxious emissions, and noise. International Railway Journal, Decembre 2004.
- [49] M. Steiner, M. Klohr, and S. Pagiela. Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles. Power Electronics and Applications, EPE'07.
- [50] Direction de l'Innovation et de la Recherche. Plate-forme pour trains hybrides economes en energie et respectueux de l'environnement. Technical report, SNCF, 2006.
- [51] C. LAURENCIN, C. RONDEAU, and M. DEBRUYNE. La bb427000 de la sncf : les choix techniques pour la traction et le freinage. Revue Générale des Chemins de Fer, Mars 2002.
- [52] C. COURTOIS, F. LACÔTE, M. PROVOOST, and V. SABATE. Traction électrique ferroviaire. Technique de l'Ingénieur, 1999.
- [53] R. Saisset. Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. PhD thesis, INP Toulouse, 2004.

- [54] Martin W. Carlen Thomas Christen. Theory of ragone plots. *Journal of Power Sources*, 2000.
- [55] Thomas Christen and Christian Ohler. Optimizing energy storage devices using ragone plots. *Journal of Power Sources*, 2002.
- [56] A.Jeunesse and M.Thiounn. A hybrid locomotive for demonstration and investigation on energetics. *WCRR06*, 2006.
- [57] Pu Shi and Yiwen Zhao. Application of unscented kalman filter in the soc estimation of li-ion battery for autonomous mobile robot. *International Conference on Information Acquisition*, 2006.

