



HAL
open science

Contribution aux méthodes de conception et de gestion des systèmes énergétiques multi-sources par optimisation systémique : application aux trains hybrides électrique autonomes

Marie Poline

► To cite this version:

Marie Poline. Contribution aux méthodes de conception et de gestion des systèmes énergétiques multi-sources par optimisation systémique : application aux trains hybrides électrique autonomes. Energie électrique. Université Grenoble Alpes, 2018. Français. NNT : 2018GREAT099 . tel-02124030

HAL Id: tel-02124030

<https://theses.hal.science/tel-02124030>

Submitted on 9 May 2019

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

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Génie électrique**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Marie POLINE

Thèse dirigée par **Laurent GERBAUD, Professeur, G2elab**

préparée au sein du **Laboratoire de Génie Électrique de
Grenoble (G2Elab)**

dans l'**École Doctorale Électronique, Électrotechnique,
Automatique et Traitement du Signal (EEATS)**

Contribution aux méthodes de conception et de gestion des systèmes énergétiques multi-sources par optimisation systémique. Application aux trains hybrides électriques et autonomes

Thèse soutenue publiquement le **28 novembre 2018**,
devant le jury composé de :

Mme Florence OSSART

Professeur des Universités, GEEPS, Gif sur Yvette, Président

M. Bruno SARENI

Professeur, LAPLACE, Toulouse, Rapporteur

Mme Marie-Cécile PERA

Professeur des Universités, FEMTO-ST, Belfort, Rapporteur

M, Laurent GERBAUD

Professeur, Université Grenoble Alpes, Directeur de thèse

M. Julien POUGET

Maître de conférences, Institut Systèmes Industriels, Sion, Examineur

M. Frédéric CHAUVET

Chef de Projet, SNCF Innovation & Recherche, Paris, Examineur

M. Emmanuel VINOT

Chargé de Recherche, IFSTTAR, Bron, Examineur



Table des matières

Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	XIV
Remerciements	XV
Introduction générale	1
Chapitre I : Problématique ferroviaire	4
I.1. Alimentation ferroviaire.....	4
I.1.1. Répartition du trafic ferroviaire en France.....	4
I.1.2. Alimentation électrique.....	5
I.1.3. Alimentation diesel	7
I.2. Types de train.....	7
I.2.1. Types de trains selon le trajet.....	7
I.2.2. Types de train selon l'alimentation	8
I.2.2.1. <i>Train électrique en 1500V DC</i>	8
I.2.2.2. <i>Train diesel-électrique</i>	8
I.2.2.3. <i>Train bimode</i>	9
I.2.2.4. <i>Train bicourant</i>	10
I.3. Problématique et intérêt de l'hybridation ferroviaire.....	10
I.3.1. Hybridation ferroviaire	10
I.3.2. Problématiques électriques et intérêt de l'hybridation électrique	11
I.3.3. Problématiques diesel et intérêt de l'hybridation diesel.....	14
I.3.4. Conclusion	15
I.4. Systèmes de stockage d'énergie.....	16
I.4.1. Classification des systèmes de stockage	16
I.4.2. Systèmes de stockage pour l'embarqué	18

1.4.2.1. Batteries.....	18
1.4.2.2. Supercondensateurs.....	20
I.5. Gestions énergétiques	21
I.5.1. Interaction gestion énergétique – dimensionnement.....	21
I.5.2. Etat de l’art sur les gestions énergétiques	22
1.5.2.1. Gestion à base de règles	22
1.5.2.2. Gestion énergétique optimale	23
1.5.2.3. Conclusion.....	26
I.6. Granulométrie du modèle	26
I.6.1. Définition de la granulométrie	26
I.6.2. Choix du niveau de granulométrie	26
I.7. Conclusion et objectifs.....	27
Chapitre II : Méthode de dimensionnement par optimisation	29
II.1. Introduction	29
II.2. Formulation d’un modèle de dimensionnement et méthodes de résolution	29
II.2.1. Formulation du problème de dimensionnement	29
II.2.2. Problème direct.....	29
II.2.3. Problème inverse	31
II.2.4. Formulation du problème d’optimisation	31
II.2.5. Choix de l’algorithme d’optimisation.....	34
II.2.5.1. Comment choisir l’algorithme d’optimisation ?.....	34
II.2.5.2. Algorithmes déterministes	35
II.2.5.3. Algorithmes stochastiques	35
II.2.5.4. Hybridation des algorithmes	36
II.2.5.5. Bilan sur les algorithmes.....	36
II.2.6. Conclusion.....	37
II.3. Dimensionnement par optimisation sur cycle	38
II.3.1. Mission ferroviaire	38
II.3.2. Taille du modèle de dimensionnement	41
II.4. Dimensionnement par optimisation combinant gestion énergétique et dimensionnement	41
II.5. Conclusion	42

Chapitre III : Dimensionnement par optimisation pour la traction hybride diesel-électrique	43
III.1. Problématique et objectifs	43
III.2. Architecture du train.....	43
III.3. Modélisation des sources d'énergies	44
III.3.1. Modélisation du groupe diesel	44
<i>III.3.1.1. Moteur et groupe de refroidissement</i>	44
<i>III.3.1.2. Consommation de carburant</i>	45
<i>III.3.1.3. Groupe diesel</i>	49
III.3.2. Modélisation des systèmes de stockage	49
III.3.3. Cas particulier des batteries (vieillessement)	51
<i>III.3.3.1. Comptage des cycles</i>	51
<i>III.3.3.2. Modèle de vieillissement pour batteries de type NiMH</i>	54
<i>III.3.3.3. Modèle de vieillissement pour batteries de type Li-Ion</i>	55
III.4. Gestions énergétiques.....	56
III.4.1. Gestion à base de règles	56
III.4.2. Gestion par programmation dynamique	59
<i>III.4.2.1. Principe de la méthode</i>	59
<i>III.4.2.2. Limites de capacité des sources d'énergie</i>	60
<i>III.4.2.3. Choix du maillage</i>	63
<i>III.4.2.4. Fonction coût et algorithme</i>	65
III.4.3. Cas particulier de deux types de stockeurs : gestion fréquentielle	66
III.5. Dimensionnement par optimisation combinant gestion et dimensionnement.....	67
III.5.1. Cas particulier de la programmation dynamique.....	67
III.5.2. Modèle orienté pour l'optimisation	69
<i>III.5.2.1. Mission ferroviaire</i>	69
<i>III.5.2.2. Entrées d'optimisation</i>	70
<i>III.5.2.3. Paramètres</i>	70
<i>III.5.2.4. Sorties contraintes</i>	70
<i>III.5.2.5. Fonction objective</i>	71
III.5.3. Bilan	72
III.6. Conclusion.....	73

Chapitre IV : Dimensionnement par optimisation pour la traction hybride électrique	75
IV.1. Problématique et objectifs.....	75
IV.2. Architecture du système étudié	75
IV.3. Modélisation de la ligne ferroviaire et de la traction électrique hybride	76
IV.3.1. Méthode nodale.....	76
IV.3.2. Méthode nodale avec impédance variable et découpage fixe.....	79
IV.3.2.1. Découpage de la ligne.....	79
IV.3.2.2. Position des nœuds mobiles.....	81
IV.3.2.3. Longueur des lignes et impédances.....	83
IV.3.2.4. Matrice d'admittance – impédance	84
IV.3.2.5. Modélisation des sous-systèmes	84
IV.3.2.6. Puissance du train.....	87
IV.3.2.7. Résolution du système	87
IV.4. Gestion énergétique.....	88
IV.4.1. Introduction.....	88
IV.4.1.1. Norme ferroviaire.....	88
IV.4.1.2. Solutions pour respecter la norme.....	89
IV.4.2. Gestion énergétique selon les seuils de tension.....	90
IV.4.2.1. Principe de la gestion.....	90
IV.4.2.2. Fonctionnement.....	91
IV.4.2.3. Estimation de tension	94
IV.4.2.4. Puissance maximale de la caténaire	97
IV.4.2.5. Puissance de la caténaire et du système de stockage	98
IV.4.2.6. Modes de fonctionnement.....	99
IV.4.2.7. Bilan	102
IV.4.3. Gestion énergétique par algorithme d'optimisation	103
IV.4.4. Cas particulier de deux types de stockeurs.....	104
IV.5. Dimensionnement par optimisation combinant gestion et dimensionnement	104
IV.5.1. Modèle orienté pour l'optimisation.....	104
IV.5.1.1. Mission ferroviaire.....	104
IV.5.1.2. Entrées d'optimisation.....	106
IV.5.1.3. Paramètres	107
IV.5.1.4. Contraintes en sortie	108

IV.5.1.5. <i>Fonction objective</i>	108
IV.5.2. Bilan	108
IV.6. Conclusion	111
Chapitre V : Etude de cas	113
V.1. Introduction	113
V.2. Implantation du modèle	113
V.2.1. Logiciel CADES	113
V.2.2. Dérivation automatique du code	114
V.2.3. Implantation du modèle orienté pour l'optimisation : cas de la traction hybride diesel-électrique	114
V.2.4. Implantation du modèle orienté pour l'optimisation : cas de la traction hybride électrique	115
V.2.5. Cas d'étude	116
V.3. Comparaison de deux gestions	117
V.3.1. Mission ferroviaire	117
V.3.2. Cahier des charges	117
V.3.2.1. <i>Entrées d'optimisation</i>	117
V.3.2.2. <i>Paramètres spécifiques à chaque gestion</i>	118
V.3.2.3. <i>Contraintes et fonction objective</i>	119
V.3.3. Résultats	120
V.3.4. Analyse	123
V.4. Analyse de la gestion par règles intégrée dans un modèle de dimensionnement orienté pour l'optimisation	126
V.4.1. Problématique de la gestion à base de règles dans un modèle de dimensionnement orienté pour l'optimisation	126
V.4.2. Analyse de sensibilité : indice de Sobol	126
V.4.3. Mission ferroviaire	128
V.4.4. Modèle orienté pour l'optimisation	129
V.4.5. Choix des variables d'étude	131
V.4.6. Résultats	131
V.4.7. Analyse	132
V.5. Ouverture : utilisation du stockage stationnaire	133
V.5.1. Stockage stationnaire vs stockage embarqué	133
V.5.2. Cas d'étude de la ligne R et intérêt d'une solution mixte	134
V.5.3. Modélisation du système de stockage stationnaire	135

V.5.4. Gestion énergétique.....	136
V.5.4.1. Zone isolée.....	136
V.5.4.2. Calcul des contributions.....	136
V.5.4.3. Organigramme de la gestion énergétique.....	137
V.5.5. Modèle orienté pour l'optimisation.....	139
V.5.6. Résultats.....	140
V.5.7. Analyse.....	142
V.6. Conclusion.....	143
Conclusion générale.....	144
Bibliographie.....	149
Annexes.....	157
A.1. L'hybridation dans le monde du transport.....	157
A.2. Traction hybride diesel-électrique.....	158
A.2.1. Equations du train hybride diesel-électrique.....	158
A.2.2. Fonction normalisée de la cartographie.....	165
A.2.3. Algorithme rainflow.....	167
A.2.4. Coefficient du modèle de vieillissement des batteries Li-ion.....	171
A.2.5. Gestion à base de règles.....	172
A.2.6. Coût d'exploitation.....	176
A.2.6.1. Coût actualisé de consommation de carburant.....	176
A.2.6.2. Coût actualisé de maintenance.....	177
A.2.6.3. Coût de rachat des batteries.....	178
A.2.7. Cahier des charges complet du cas d'étude.....	178
A.3. Traction hybride électrique.....	180
A.3.1. Equations du train hybride électrique.....	180
A.3.2. Mise en équation de la ligne et résolution.....	183
A.3.2.1. Résolution.....	183
A.3.2.2. Calcul de la matrice jacobienne.....	184
A.3.3. Calcul des résistances du modèle équivalent approché pour l'estimation de tension des nœuds.....	184
A.3.3.1. Méthode générale.....	184

A.3.3.2. <i>Cas particuliers</i>	186
A.3.3.3. <i>Limites du modèle équivalent approché</i>	187
A.3.4. Modes de fonctionnement de la gestion par seuil.....	188
A.3.5. Gestion énergétique selon la norme ferroviaire.....	194
A.3.5.1. <i>Principe de la gestion</i>	194
A.3.5.2. <i>Fonctionnement</i>	196
A.3.5.3. <i>Modes de fonctionnement</i>	196
A.3.6. Mise en application de la gestion par algorithme d'optimisation sur un cas d'étude	202
A.3.6.1. <i>Mission ferroviaire</i>	202
A.3.6.2. <i>Cahier des charges</i>	204
A.3.6.3. <i>Résultats et analyse</i>	205
A.3.7. Modélisation du système de stockage stationnaire	207
A.3.7.1. <i>Modélisation du système de stockage stationnaire</i>	207
A.3.7.2. <i>Calcul des contributions</i>	207
A.3.7.3. <i>Estimation de la tension et choix de l'initialisation</i>	209
A.3.7.4. <i>Gestion énergétique</i>	210
Résumé	216

Liste des figures

Figure 1 : Organisation des chapitres	3
Figure 2 : Bilan des travaux	147
Figure I.1 : Carte du réseau ferroviaire français, tel qu'il se présente en 2017 [3].....	5
Figure I.2 : Alimentation électrique	6
Figure I.3 : Coût d'investissement et d'exploitation	7
Figure I.4 : Architecture d'un train électrique en 1500V DC [7].....	8
Figure I.5 : Architecture d'un train diesel-électrique [7]	9
Figure I.6 : Architecture d'un train bimode [7].....	9
Figure I.7 : Architecture d'un train bicourant [7].....	10
Figure I.8 : Architecture hybride série [12].....	11
Figure I.9 : Solutions possibles pour améliorer le plan de tension et développer le trafic.....	12
Figure I.10 : Structure d'hybridation intégrant un système de stockage.....	15
Figure I.11 : Plan de Ragone [21], [22], [23].....	17
Figure I.12 : Plan de Ragone pour les batteries [26]	19
Figure I.13 : Schéma d'un supercondensateur [32].....	21
Figure I.14 : Approches découplées	22
Figure I.15 : Approche intégrée	22
Figure I.16 : Principe de la gestion à base de règles	23
Figure I.17 : Exemple des « chemins possibles » pour la programmation dynamique.....	25
Figure I.18 : Commande prédictive.....	25
Figure I.19 : Conclusion et objectifs	27
Figure II.1 : Problème direct	30
Figure II.2 : Résolution « à la main ».....	30
Figure II.3 : Problème inverse.....	31
Figure II.4 : Résolution du problème inverse.....	31
Figure II.5 : Modèle orienté pour l'optimisation.....	32
Figure II.6 : Résolution par un algorithme d'optimisation.....	33
Figure II.7 : Problèmes d'optimisation [57]-[63].....	34
Figure II.8 : Performances des algorithmes d'optimisation [57]-[60].....	37
Figure II.9 : Exemple de mission ferroviaire	40
Figure II.10 : Principe de l'optimisation combinée.....	42

Figure III.1 : Architecture du train hybride diesel-électrique	44
Figure III.2 : Fonction normalisée de la cartographie	46
Figure III.3 : Cas d'étude et autonomie.....	48
Figure III.4 : Cycle complet	52
Figure III.5 : Rainflow	53
Figure III.6 : Vie consommée et vie restante	53
Figure III.7 : Gestion par règles en traction	58
Figure III.8 : Gestion par règles en freinage	59
Figure III.9 : Limites de divergence.....	61
Figure III.10 : Limites de convergence	62
Figure III.11 : Limites énergétiques	63
Figure III.12 : Choix du pas du maillage	64
Figure III.13 : Etats possibles pour un pas de maillage 4 fois plus petit.....	64
Figure III.14 : Nombre de points du maillage.....	64
Figure III.15 : Chemins possibles	65
Figure III.16 : Gestion fréquentielle.....	67
Figure III.17 : Principe du modèle avec programmation dynamique.....	69
Figure III.18 : Optimisation combinée de la traction diesel-électrique.....	73
Figure III.19 : Modèle du train hybride diesel-électrique orienté pour l'optimisation	73

Figure IV.1 : Schéma du système.....	76
Figure IV.2 : Eléments apparaissant dans la représentation nodale.....	77
Figure IV.3 : Déplacement du train.....	78
Figure IV.4 : Impact sur la représentation du système pour la version 1.....	78
Figure IV.5 : Version 2 de la modélisation nodale	79
Figure IV.6 : Découpage de la ligne	80
Figure IV.7 : Nœuds fixes et mobiles	80
Figure IV.8 : Exemple de déplacement du train et du nœud associé	81
Figure IV.9 : Train entre un nœud fixe et un nœud mobile	82
Figure IV.10 : Train entre deux nœuds mobiles.....	82
Figure IV.11 : Aucun train	83
Figure IV.12 : Modèle du train.....	84
Figure IV.13 : Fonction du redresseur	86
Figure IV.14 : Modèle complet de la sous-station	87
Figure IV.15 : Gestion énergétique par seuil	90
Figure IV.16a : La tension est en-dessous de <i>seuil</i> ₁	92
Figure IV.17 : La tension est entre les deux seuils.....	92
Figure IV.18 : Oscillations de tension.....	93
Figure IV.19 : Modèle équivalent approché de la ligne	95
Figure IV.20 : Méthode d'estimation de la tension.....	96
Figure IV.21 : Modes de fonctionnement en traction dans le cas de la gestion par seuils.....	101
Figure IV.22 : Modes de fonctionnement en freinage dans le cas de la gestion par seuils....	102
Figure IV.23 : Etapes de la gestion par seuils	103
Figure IV.24 : Gestion dans le cas de deux types de systèmes de stockage	104
Figure IV.25 : Position des trains (cas d'étude Transilien sud de Paris).....	105
Figure IV.26 : Disposition de la ligne ferroviaire (cas d'étude Transilien sud de Paris).....	105
Figure IV.27 : Puissance des trains (cas d'étude Transilien sud de Paris).....	106
Figure IV.28 : Principe de l'optimisation combinée	109
Figure IV.29 : Modèle d'optimisation dans le cas de la gestion par règle	110
Figure IV.30 : Modèle d'optimisation dans le cas de la gestion par algorithme.....	111

Figure V.1 : Environnement CADES	114
Figure V.2 : Implantation du modèle pour le train hybride diesel-électrique	115
Figure V.3 : Implantation du modèle pour le train hybride électrique.....	116
Figure V.4 : Mission ferroviaire du train hybride diesel-électrique.....	117
Figure V.5a : Exemple pour $\Delta E = 4$	119
Figure V.6 : Profils de puissance des sources dans le cas de la gestion par règles	122
Figure V.7 : Profils de puissance des sources dans le cas de la gestion par programmation dynamique	123
Figure V.8 : Position des trains de la mission ferroviaire entre les gares G_1 et G_2	128
Figure V.9 : Puissance des trains de la mission ferroviaire entre les gares G_1 et G_2	129
Figure V.10 : Représentation nodale de la ligne ferroviaire	129
Figure V.11 : Modèle orienté pour l'optimisation dans le cas de la traction hybride électrique	130
Figure V.12 : Puissance des supercondensateurs embarqués dans les trains	134
Figure V.13 : Modélisation du système de stockage stationnaire	135
Figure V.14a : Comportement du système de stockage stationnaire en support.....	136
Figure V.15 : Gestion énergétique de la zone du stationnaire	139
Figure V.16 : Modèle orienté pour l'optimisation dans le cas d'une ligne ferroviaire équipé d'un système de stockage stationnaire	140
Figure V.17 : Puissance des supercondensateurs embarqués dans les trains circulant sur la ligne R sur une ligne avec un système de stockage stationnaire	141
Figure V.18 : Puissance des supercondensateurs du système stockage stationnaire	142

Figure A.1 : Architecture hybride série [12]	157
Figure A.2 : Architecture hybride parallèle [12].....	157
Figure A.3 : Architecture hybride série-parallèle [12].....	158
Figure A.4 : Consommation de carburant selon la puissance	166
Figure A.5 : Interpolation de la cartographie	167
Figure A.6 : Etat de charge de la batterie	168
Figure A.7 : Cycles complet et demi-cycles.....	171
Figure A.8 : Traction combinée	173
Figure A.9 : Traction électrique	173
Figure A.10 : Traction et recharge	174
Figure A.11 : Freinage de forte puissance.....	174
Figure A.12 : Freinage de faible puissance	175
Figure A.13 : Gestion à base de règles.....	176
Figure A.14 : Modèle équivalent approché de la ligne	185
Figure A.15a: Caténaire seule	190
Figure A.16 : Freinage interdit	190
Figure A.17a : Caténaire seule	191
Figure A.18a : Caténaire seule	192
Figure A.19a : Caténaire seule	193
Figure A.20a : Caténaire seule	193
Figure A.21a : Caténaire seule	194
Figure A.22 : Gestion énergétique selon la norme pour la traction	194
Figure A.23 : Gestion énergétique selon la norme pour le freinage	195
Figure A.24a : Caténaire seule	198
Figure A.25a : Caténaire seule	198
Figure A.26 : Freinage interdit	199
Figure A.27a : Caténaire seule	200
Figure A.28 : Freinage sans limite	200
Figure A.29 : Modes de fonctionnement en traction dans le cas de la gestion selon la norme	201
Figure A.30 : Modes de fonctionnement en freinage dans le cas de la gestion selon la norme	202
Figure A.31 : Position des trains (mission inspirée du cas normatif EN50641)	203
Figure A.32 : Puissance des trains (mission inspirée du cas normatif EN50641)	203
Figure A.33 : Représentation nodale de la ligne ferroviaire	204
Figure A.34 : Puissance des systèmes de stockage	206
Figure A.35 : Energie des systèmes de stockage.....	206
Figure A.36 : Représentation nodale du système de stockage stationnaire.....	207
Figure A.37 : Modèle équivalent pour le calcul des contributions	208

Figure A.38 : Algorithme pour déterminer la puissance fournie par le système de stockage embarqué	211
Figure A.39 : Algorithme pour déterminer la puissance fournie par le système de stockage stationnaire	213
Figure A.40 : Algorithme pour déterminer la répartition de puissance entre stationnaire et embarqué	214

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des systèmes de stockage d'énergie	16
Tableau III.1 : Energie et puissance caractéristique par cellule des batteries et supercondensateurs.....	51
Tableau III.2 : Mode de fonctionnement en traction pour la gestion par règles	57
Tableau IV.1 : Modes de fonctionnement de la gestion par seuils	99
Tableau V.1 : Entrées d'optimisation : cas d'étude du train hybride diesel-électrique.....	118
Tableau V.2 : Contraintes : cas d'étude du train hybride diesel-électrique	119
Tableau V.3 : Résultats d'optimisation : cas du train hybride diesel-électrique.....	120
Tableau V.4 : Bilan sur la comparaison entre les deux gestions.....	125
Tableau V.5 : Indices de Sobol de 1 ^{er} ordre	132
Tableau V.6 : Dimensionnement obtenu après optimisation	135
Tableau V.7 : Dimensionnement obtenu	141
Tableau A.1 : Extremums de l'état de charge	167
Tableau A.2 : Extremums de l'état de charge après la 1 ^{ère} étape de l'algorithme.....	169
Tableau A.3 : Résidus après la 1 ^{ère} étape	169
Tableau A.4 : Extremums de l'état de charge après la 2 ^{ème} étape de l'algorithme	169
Tableau A.5 : Résidus après la 2 ^{ème} étape	169
Tableau A.6 : Extremums de l'état de charge après la 3 ^{ème} étape de l'algorithme	170
Tableau A.7 : Cycles	170
Tableau A.8 : Résidus en fin de calcul.....	170
Tableau A.9 : Coefficients du modèle de vieillissement des batteries de type Li-ion [78]....	171
Tableau A.10 : Mode de fonctionnement en traction pour la gestion par règles	172
Tableau A.11 : Paramètres du train hybride diesel-électrique	178
Tableau A.12 : Modes de fonctionnement de la gestion par seuils.....	188
Tableau A.13 : Modes de fonctionnement de la gestion selon la norme	197
Tableau A.14 : Contraintes du cas d'étude de la gestion par algorithme d'optimisation	204
Tableau A.15 : Résultats du dimensionnement du cas d'étude de la gestion par algorithme d'optimisation.....	205

Remerciements

Au tout début, la thèse ce n'est qu'une seule vaste et belle idée. Puis au fil des rencontres et des échanges qui ont lieu tout au long de la thèse, pleins de nouvelles idées apparaissent. Je voudrais remercier toutes les personnes qui ont permis la naissance de ces idées !

Je remercie tout particulièrement Laurent Gerbaud, mon directeur de thèse, pour sa grande disponibilité et pour toute l'aide qu'il m'a apportée. Merci de prendre toujours le temps de répondre à mes questions. Nos rapides discussions du matin m'ont permis d'avancer à grand pas !

Merci aussi à Julien Pouget pour ses conseils judicieux et son aide pour trouver un juste équilibre entre recherche et application industrielle. Et surtout merci de m'avoir proposé cette thèse. Cela a été une superbe expérience !

Un grand merci à Frédéric Chauvet pour son aide sur la traction diesel. J'ai beaucoup appris sur le ferroviaire, ce fut très enrichissant.

Merci aussi à toute l'équipe de la SNCF ! J'ai passé de très bons moments même si je n'étais de passage que pour de très courts instants. Je remercie tout particulièrement Jean-François Tremong pour sa disponibilité et son aide pour naviguer entre les différents services SNCF. Grâce à toi, j'ai toujours pu trouver la réponse à mes questions ! Merci aussi à Ali Castaing pour avoir pris en cours de route l'encadrement scientifique de la thèse. Tes conseils sur la rédaction m'ont bien aidé. Un grand merci à Matthieu Renault pour avoir pris le temps d'échanger autour de la traction diesel et à Etienne Sourdille sur la traction électrique.

Je voudrais aussi remercier tout particulièrement Petre Enciu qui a été d'une grande aide autour de CADES et pour avoir intégré dans le logiciel des spécificités qui m'ont beaucoup apportée.

Un grand merci aux amis et collègues du G2elab ! J'ai adoré travailler avec vous et profiter de la vie grenobloise (surtout le ski) ! Merci tout particulièrement à Camille, Sacha et Lou pour avoir pris le temps de répondre à chacun de mes « et vous avez un synonyme pour ... ? ». Merci aussi à Lucas pour ses « pensées positives » sans lesquelles je suis sûre que je n'aurais pas pu finir dans les temps !

Un immense merci à mes amis et à ma famille pour m’avoir soutenue durant ces trois ans et pour m’avoir gentiment écoutée raconter mes « problèmes de code » alors que vous n’en compreniez pas un mot ! Merci tout particulièrement à Maman pour avoir patiemment relu ces quelques 200 pages afin de traquer chaque faute d’orthographe ! S’il en reste, je suis bien désolée. Merci infiniment à Papa, Bastien et Jordie pour avoir pris le temps de relire, commenter et corriger cette thèse. Vic et Thib, n’hésitez pas à m’envoyer vos retours !



Pleins de nouvelles idées !

Introduction générale

La première ligne ferroviaire française pour le transport des voyageurs est créée en 1830 et ce sont des locomotives à vapeur qui assurent la traction. Puis le réseau ferroviaire s'électrifie, tout d'abord, en 1500V DC (1922) puis en 25kV AC (1955) [1]. Selon les régions et les villes, des choix différents s'effectuent : les lignes à grande vitesse et à fort trafic s'équipent ou se rénovent avec une ligne aérienne de contact (caténaire) en 25kV AC, tandis que les lignes de faible trafic restent non électrifiées et sont équipées de trains diesel-électriques. Aujourd'hui, 50% des lignes ferroviaires sont électrifiées, mais elles rassemblent 85% du trafic voyageurs et marchandises. Le reste du trafic (15%) est assuré par des trains diesel-électrique qui font face à plusieurs challenges. En effet, le changement des lois sur l'environnement de la France et de l'Union Européenne impose de faire évoluer ce mode de transport afin de réduire ses émissions de gaz à effet de serre.

De plus, la traction électrique fait elle aussi face à certaines difficultés. Ainsi, la consommation d'énergie pour alimenter le moteur de traction des trains entraîne une chute de tension. Lorsque celle-ci est trop importante, les sécurités se mettent en place et réduisent la quantité d'énergie que le train peut soutirer à la caténaire. Il devient alors nécessaire de renforcer la ligne sous peine de ralentir le trafic.

Pour répondre à ces différentes problématiques, la SNCF (Société Nationale des Chemins de fer Français) a choisi de regarder comment hybrider les trains par ajout de systèmes de stockage embarqué. Afin de pouvoir développer ce type de train, la compagnie doit répondre aux problématiques suivantes :

- comment dimensionner les systèmes de stockage embarqués dans le train ?
- quelle est la gestion d'énergie à leur appliquer ?

Notre objectif est de répondre à ces deux questions. Pour cela, nous allons construire une méthode permettant de faire le pré-dimensionnement d'un système multi-sources. Elle sera mise en application sur deux types de trains : le train hybride diesel-électrique et le train hybride électrique.

Dans le premier chapitre, nous cherchons à identifier les caractéristiques de chaque type de traction. La question soulevée est : quelles sont les spécificités de chaque famille de train et comment l'ajout de système de stockage embarqué permet de répondre aux problématiques ?

Par exemple, dans le cas du train diesel-électrique, la problématique vient du rendement du groupe diesel qui va influencer sur la consommation de carburant et donc sur l'émission de gaz à effet de serre. Pour la traction électrique, ce sont les chutes de tension le long de la caténaire qui sont contraignantes. Les questions qui se posent ensuite sont : quel est le système de stockage en embarqué le plus adapté à la traction ferroviaire ? Quelle est la gestion énergétique à appliquer au système multi-source ? Un bref état de l'art sur ces deux sujets nous a permis d'y répondre.

Le type de système de stockage et de gestion énergétique ayant été choisi, la question suivante est : quelle est la méthode la plus adaptée pour effectuer le pré-dimensionnement des sources d'énergie ? En effet, le dimensionnement et la gestion d'énergie ont une forte influence l'un sur l'autre. Nous voulons prendre en compte cette interaction en couplant les deux au sein d'un même modèle. Le chapitre II présente donc cette méthode. De plus, nous faisons le choix de résoudre le problème à l'aide d'un algorithme d'optimisation. Il nous faut donc choisir celui qui est le plus adapté à notre modèle. Un état de l'art des différentes familles d'algorithmes est présenté dans ce chapitre afin de justifier le choix que nous avons fait.

La méthode mise en place est générique et s'adapte à tout type de trains. Cependant, chaque mode de traction ayant ses propres problématiques (rendement pour le train diesel et chute de tension pour le train électrique), l'étude a été séparée selon les deux modes de traction.

Le chapitre III concerne alors la traction hybride diesel-électrique. Il répond aux questions suivantes :

- quel est le modèle des sources d'énergie du train ?
- quelle est la gestion d'énergie de ce système ?
- comment est mis en place le modèle orienté pour l'optimisation ?

De plus, la problématique de ce type de train est la consommation de carburant qui est une source de pollution de l'air. Ce chapitre propose donc une méthode permettant de faire le calcul de la consommation au cours du processus de dimensionnement.

Le chapitre IV est consacré à la modélisation du train hybride électrique. De même que pour la traction diesel, il répond aux questions portant sur la modélisation des sources d'énergie, sur la gestion énergétique à leur appliquer et sur la mise en place du modèle orienté pour l'optimisation. Cependant, à la différence du train hybride diesel-électrique, ce train ne peut être étudié de manière isolé. En effet, chaque train présent sur la ligne va influencer les autres. Il nous faut donc aussi modéliser la ligne électrique ferroviaire.

Le dernier chapitre permet de valider la méthode sur deux cas d'étude concrets. Le premier concerne le trajet d'un unique train hybride diesel-électrique et le second un ensemble de trains hybrides électriques.

Enfin, une conclusion résume les travaux effectués et présente des perspectives de développement. La Figure 1 résume schématiquement les différentes questions soulevées ainsi que les chapitres qui y répondent.

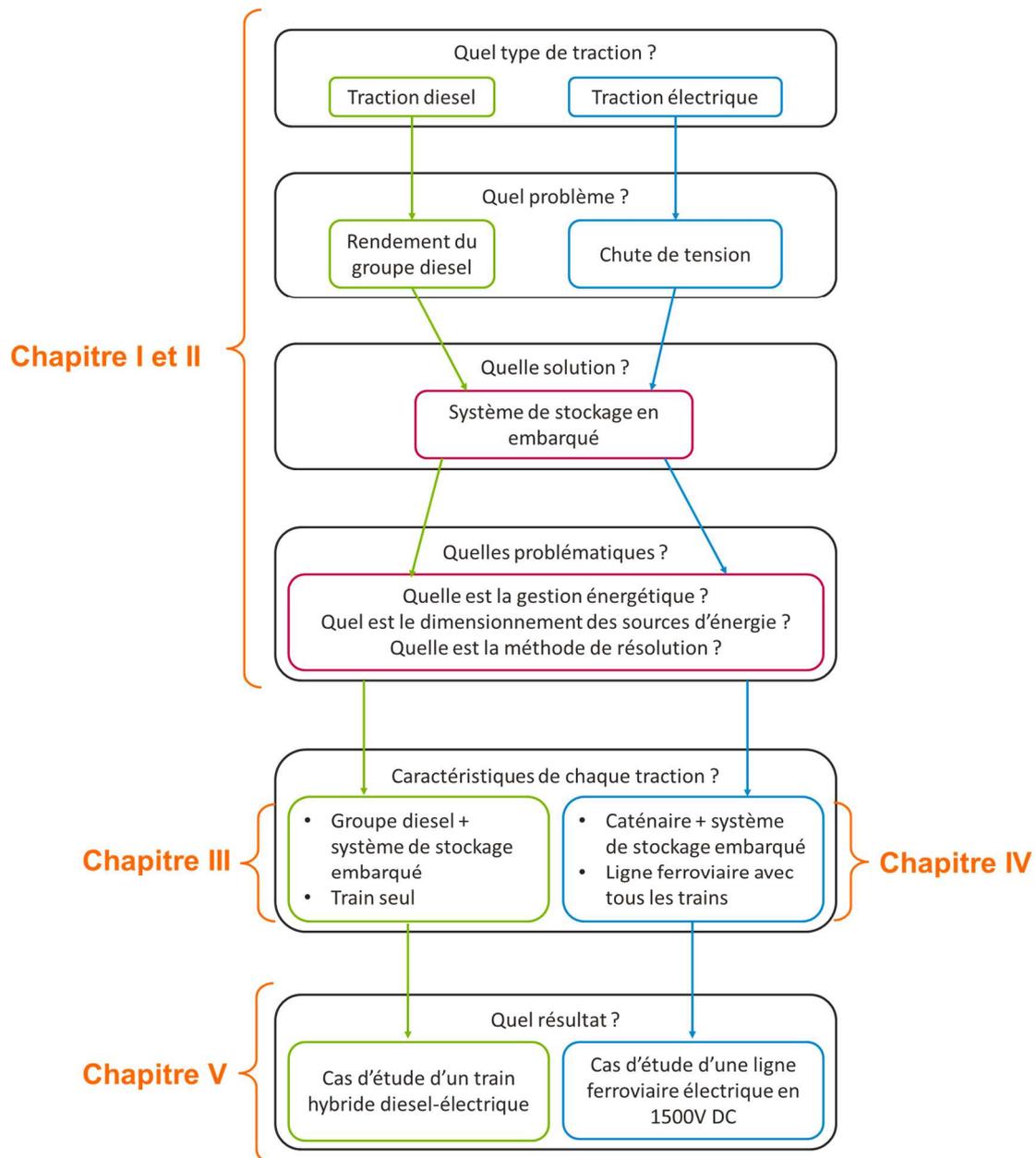


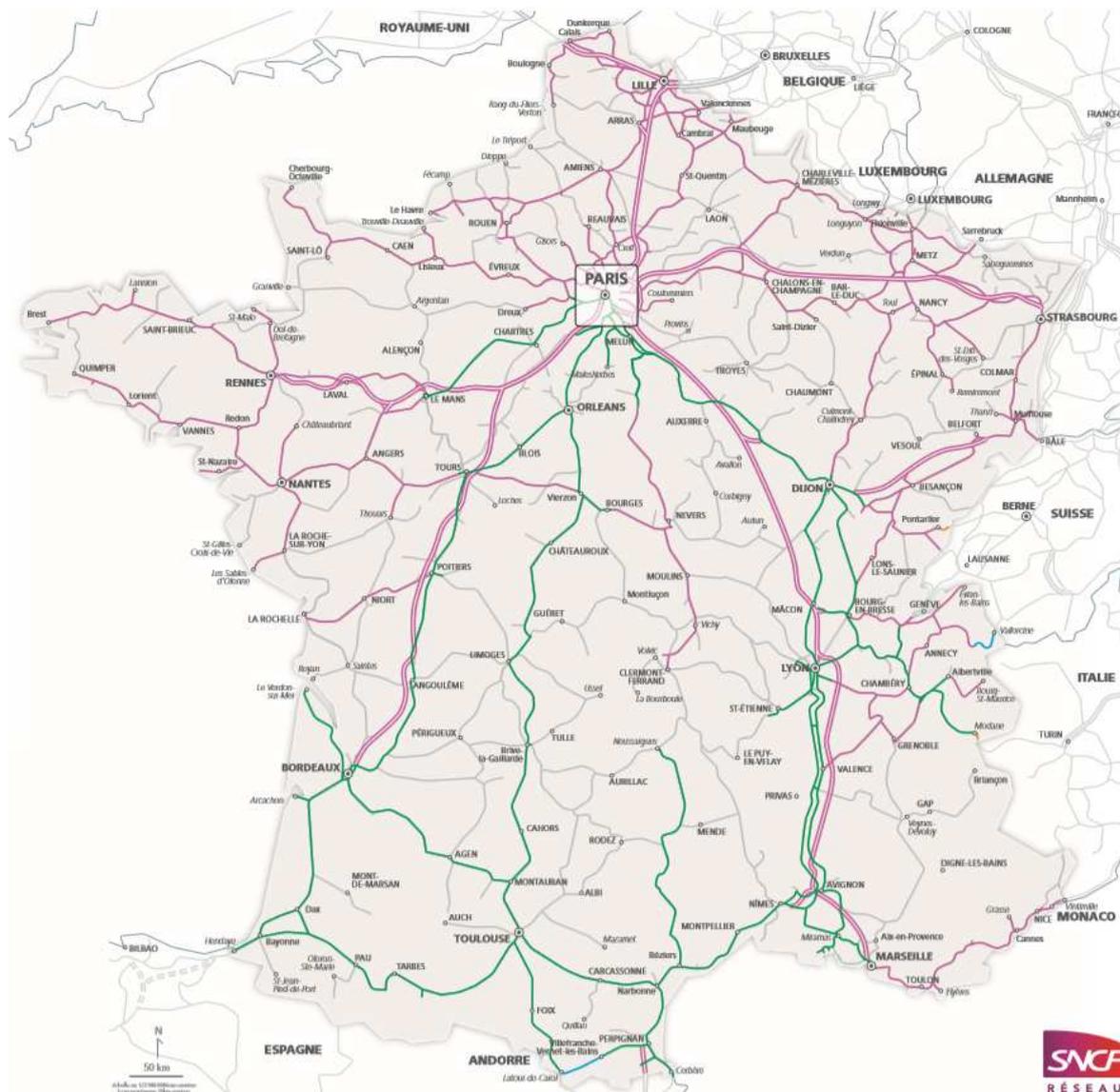
Figure 1 : Organisation des chapitres

Chapitre I : Problématique ferroviaire

I.1. ALIMENTATION FERROVIAIRE

I.1.1. Répartition du trafic ferroviaire en France

Le système ferroviaire français se compose de 30 000 km de lignes dont seules 50% sont électrifiées [2]. Cependant, la majorité du trafic (85% du trafic voyageur et 85% du trafic fret) est faite en traction électrique. Ces trains sont alimentés par le biais d'une caténaire reliée à des sous-stations placées régulièrement en bordure de voie. Deux types d'alimentation sont utilisés : 25kV AC ou 1,5kV DC (cf. Figure I.1). Le reste du trafic est assuré par des trains thermiques alimentés par un ou plusieurs moteurs diesels.



- ▬▬▬ Ligne Grande Vitesse, 25kV AC
- ▬▬▬ 25kV AC
- ▬▬▬ 1500V DC
- ▬▬▬ 800-850V DC par 3^{ème} rail
- ▬▬▬ Non électrifié

Figure I.1 : Carte du réseau ferroviaire français, tel qu'il se présente en 2017 [3]

I.1.2. Alimentation électrique

L'électrification du réseau ferroviaire français commence en 1900. Des postes d'alimentation du réseau ferroviaire (sous-stations) sont installés de manière régulière le long des voies. Ces postes s'alimentent eux-mêmes sur le réseau français de transport d'électricité (RTE) ou sur le réseau de distribution. Les sous-stations sont reliées entre elles par une ligne aérienne de contact (caténaire) sur laquelle les trains se connectent au moyen d'un pantographe

(cf. Figure I.2). Deux types principaux d'alimentation existent en France : 1500V DC et 25kVAC.

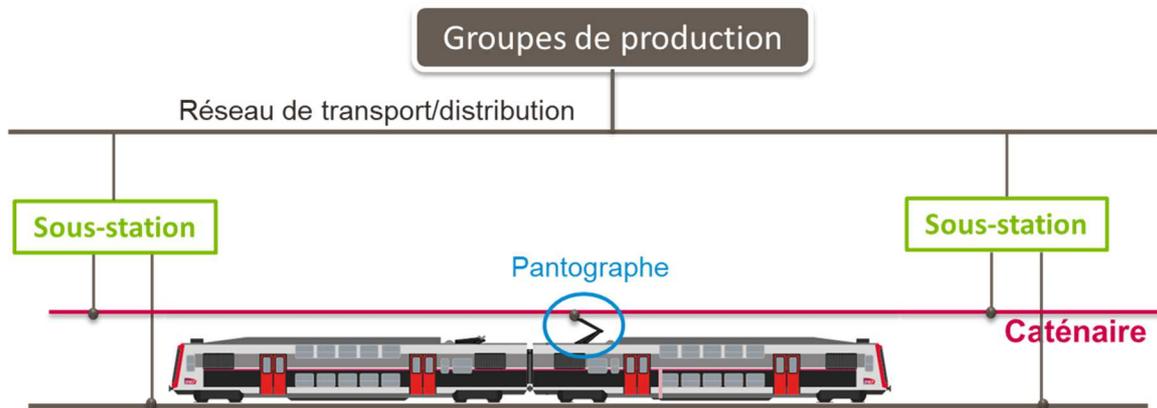


Figure I.2 : Alimentation électrique

✓ 1500V DC

Ce type d'alimentation est un choix historique puisqu'à l'origine les trains électriques étaient équipés de machines à courant continu. L'utilisation de ce type de tension permettait de régler leur vitesse directement sans étage de conversion électronique. Les sous-stations sont réparties tous les 8-15km et sont non réversibles [4]. Elles sont équipées d'un transformateur associé à un redresseur à diode [5]. Le principal avantage de ce type d'alimentation est sa faible distance d'isolation (utile pour les tunnels). Cependant, la puissance délivrée est plus faible, ce qui impose de placer des sous-stations plus régulièrement en bordure de voie.

✓ 25kV AC

L'alimentation en alternatif a été introduite dans les années 1950. La tension étant plus élevée, le courant est plus faible, ce qui réduit les pertes en ligne. Cela permet alors d'espacer les sous-stations (40-100km) et de réduire la section de la caténaire [4]-[5]. A l'inverse du cas 1500V DC, les sous-stations sont réversibles (possibilité de renvoyer l'énergie de freinage sur le réseau). L'alimentation des trains se fait toujours par une caténaire monophasée. Afin de réduire les possibles déséquilibres sur le réseau électrique français, les sous-stations sont alimentées par des phases différentes, ce qui impose d'avoir des zones neutres (section de séparation) sur lesquelles le train ne peut soutirer de la puissance et doit avancer sur son erre [5].

I.1.3. Alimentation diesel

Une partie du trafic est toujours assurée par des trains alimentés par un ou plusieurs moteurs diesels (15% du trafic voyageur, [2]). Ces trains de type TER (Transport Express Régional) ou fret circulent dans des zones qui n'ont pas été électrifiées en raison de leur faible trafic. En effet, le coût d'investissement pour l'électrification d'une ligne est très important et se justifie s'il y a un trafic suffisant pour assurer la rentabilité économique de la ligne (cf. Figure I.3). Ces trains représentent le deuxième poste de consommation d'énergie de la SNCF.

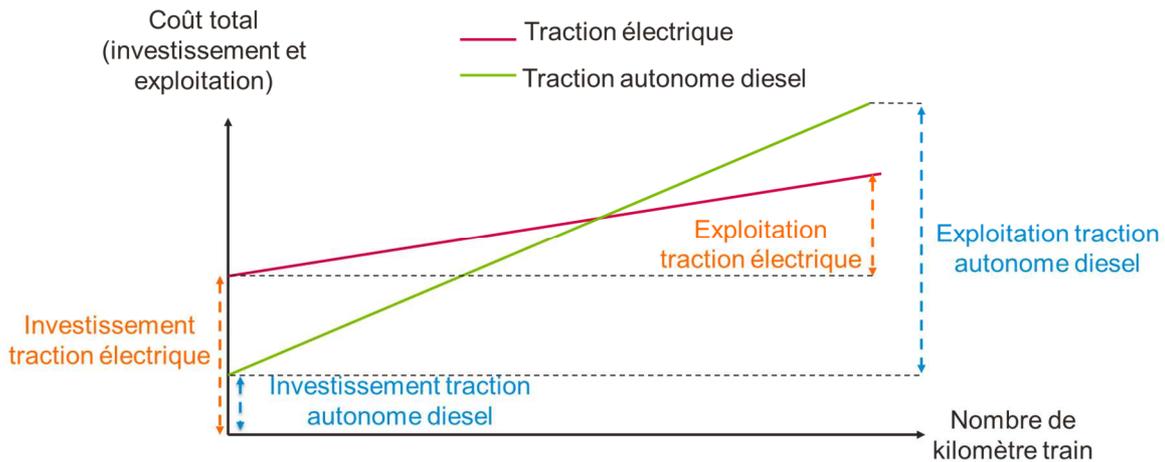


Figure I.3 : Coût d'investissement et d'exploitation

Il est possible de classer les trains en fonction du type d'alimentation. Les différents trains sont présentés dans la partie suivante.

I.2. TYPES DE TRAIN

I.2.1. Types de trains selon le trajet

Selon le trajet effectué, nous pouvons distinguer plusieurs types de trains [6] :

- Les trains pour la grande vitesse : TGV (Train Grande Vitesse)
- Les trains pour le transport régional : TER (Transport Express Régional), RER (Réseau Express Régional) et Transilien
- Les trains pour le transport de marchandise : fret

Dans le cas du TGV, la seule alimentation possible est celle du 25kV AC. Pour les TER ou le fret, plusieurs alimentations sont possibles (1500VDC, 25kV AC, diesel) et certains trains peuvent exploiter plusieurs d'entre elles (train bicourant ou train bimode, cf. I.2.2.3). Pour la

suite de notre étude, nous travaillerons sur des trains de type TER pouvant circuler sur du 1500V DC ou avec un moteur diesel.

I.2.2. Types de train selon l'alimentation

I.2.2.1. Train électrique en 1500V DC

Dans le cas d'un train électrique en 1500V DC, le moteur est alimenté par un réseau électrique. Il est connecté à ce réseau au moyen d'un pantographe. L'énergie ponctionnée passe ensuite par une chaîne de conversion composée d'un hacheur rhéostatique et d'un onduleur (cf. Figure I.4). Le moteur électrique récupère la puissance en sortie de cette chaîne de conversion et la transmet aux roues par un réducteur.

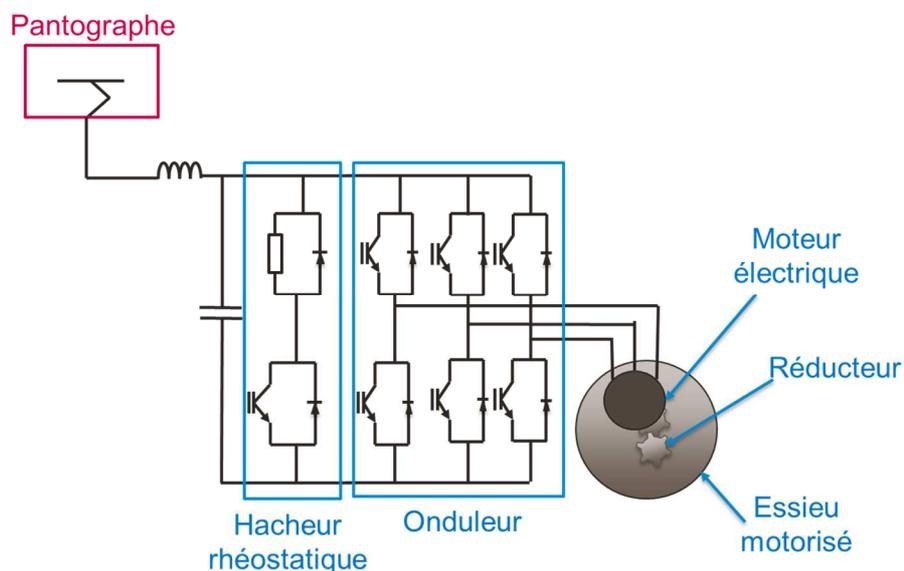


Figure I.4 : Architecture d'un train électrique en 1500V DC [7]

Le train est souvent équipé de plusieurs moteurs électriques : soit un par essieu motorisé, soit un moteur pour deux essieux motorisés [8].

I.2.2.2. Train diesel-électrique

Dans le cas d'un train diesel-électrique, la chaîne de traction reste proche de celle d'un train électrique. Cependant, pour ce type de train, ce n'est pas un réseau électrique qui apporte la puissance nécessaire mais un moteur diesel (cf. Figure I.5). Il fournit la puissance à un alternateur qui la transmet à un bus continu par le biais d'un redresseur [9]. Le reste de la chaîne de traction (hacheur, onduleur, moteur électrique, réducteur) est identique à celui que l'on trouve dans un train de type électrique.

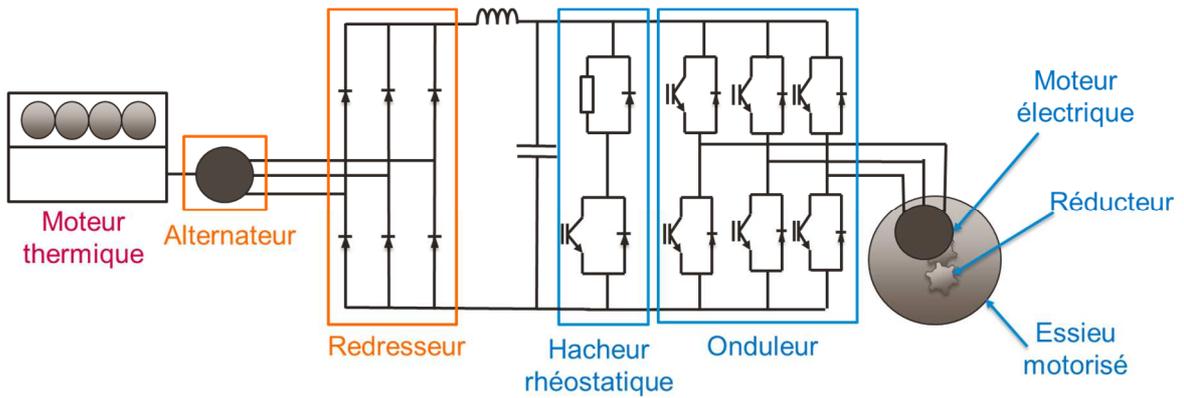


Figure I.5 : Architecture d'un train diesel-électrique [7]

Le train est équipé de plusieurs chaînes de traction de ce type (2, 4 ou 6) et plusieurs essieux sont motorisés [10].

I.2.2.3. Train bimode

Les trains dits « bimodes » sont capables de circuler sur des lignes électrifiées comme sur des lignes non électrifiées. Pour cela, ils sont équipés d'une chaîne de traction mixte rassemblant les composants d'une chaîne de traction électrique et ceux d'une chaîne de traction diesel-électrique. Dans le cas d'un bimode pouvant circuler sur du 1500V DC, le pantographe est connecté au bus continu de la chaîne de traction diesel [10]. Celui-ci transmet alors la puissance au moteur électrique par le biais d'une chaîne de conversion (cf. Figure I.6).

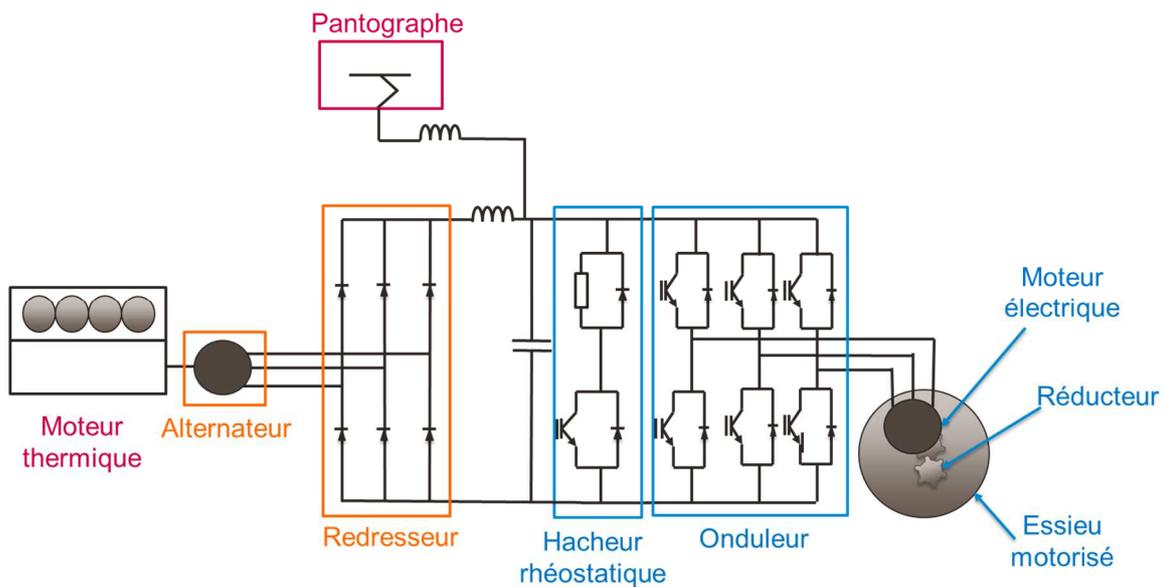


Figure I.6 : Architecture d'un train bimode [7]

De même, le train est équipé de plusieurs chaînes de traction de ce type (4 ou 6).

I.2.2.4. Train bicourant

Les trains bicourants sont des trains électriques pouvant circuler à la fois sur du 1500V DC et sur du 25kV AC. Pour cela, ils disposent de deux pantographes chacun pouvant se connecter à un type d'alimentation. L'architecture de conversion est plus complexe dans le cas du pantographe AC puisqu'il y a un transformateur monophasé et un pont mixte à commutation forcée (cf. Figure I.7). Le reste de l'architecture reste semblable à celle d'un train électrique circulant sur du 1500V DC.

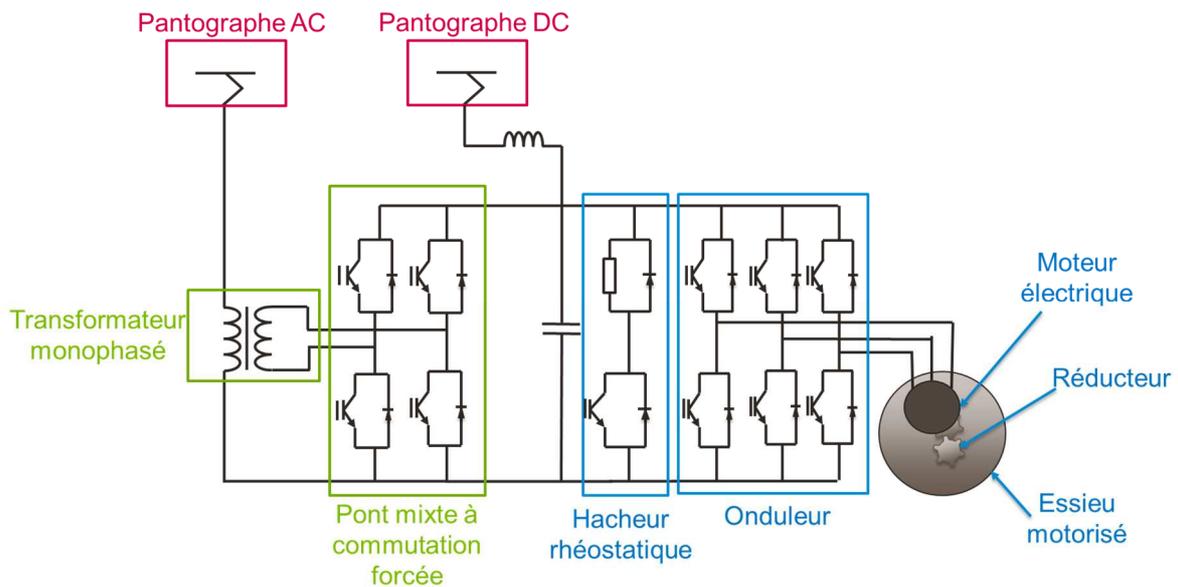


Figure I.7 : Architecture d'un train bicourant [7]

De même que pour le train électrique, ce type de train est équipé de plusieurs moteurs électriques.

I.3. PROBLEMATIQUE ET INTERET DE L'HYBRIDATION FERROVIAIRE

I.3.1. Hybridation ferroviaire

L'hybridation dans le domaine du transport peut se décomposer en plusieurs architectures [11] (cf. annexes A.1). Dans le cas du ferroviaire, nous parlerons d'hybridation lorsque le train est équipé à bord d'un système de stockage d'énergie. Les chaînes de traction que nous avons étudiées sont de type hybride série (chaîne de traction actuelle des trains, cf. Figure I.8). Dans la partie suivante, nous verrons l'intérêt d'équiper les trains électriques ou diesel d'un système de stockage.

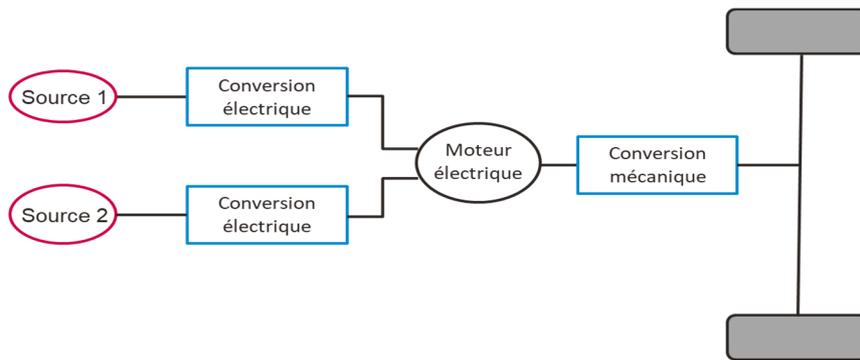


Figure I.8 : Architecture hybride série [12]

I.3.2. Problématiques électriques et intérêt de l'hybridation électrique

En France, la majorité du trafic est assuré par des trains électriques [2]. Lorsqu'un train électrique circule, il soutire du courant à la caténaire par le biais du pantographe. Cela entraîne une chute de tension au point de consommation d'énergie (qui augmente avec la distance du train aux sous-stations).

Cependant, si la chute de tension est trop importante, il est nécessaire de ralentir les trains afin d'éviter l'activation des protections électriques et d'avoir de pertes en ligne trop importantes. Cela peut entraîner des retards et limite la capacité de la ligne (seul un nombre limité de trains peuvent circuler).

Plusieurs solutions existent afin de rehausser le plan de tension du réseau électrique ou pour tenir ce plan de tension face à une montée en charge de la ligne (augmentation de trafic) :

- 1) augmenter la tension à vide des sous-stations d'alimentation électrique (SST)
- 2) ajouter des postes de mise en parallèle (PMP)
- 3) augmenter la section de caténaire
- 4) ajouter des sous-stations d'alimentation électrique (SST) en bordure de voie
- 5) ajouter des systèmes de stockage stationnaire en bordure de voie (STA)

Pour illustrer ceci, considérons la situation de la Figure I.9.

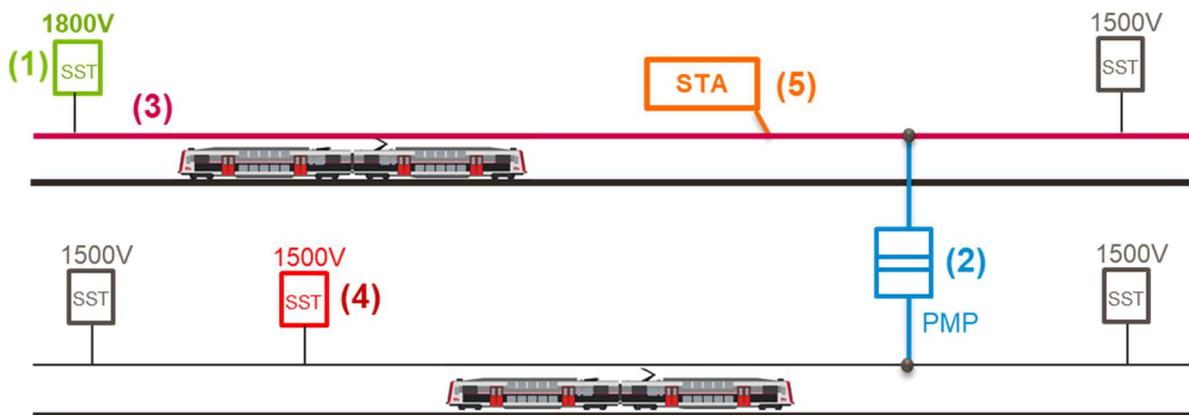


Figure I.9 : Solutions possibles pour améliorer le plan de tension et développer le trafic

La première solution est la plus rapide à mettre en place et reste peu coûteuse car tous les systèmes électriques sont déjà en position (cf. (1) sur Figure I.9). Cependant, elle présente des limites : il n'est pas possible d'augmenter cette tension infiniment (au maximum à 1800V DC).

La seconde solution consiste à mettre en place des disjoncteurs ou interrupteurs afin de connecter en parallèle les caténaires de différentes voies (cf. (2) sur Figure I.9). Cela revient à augmenter artificiellement la section de caténaire permettant ainsi de faire transiter plus de courant. Le coût de cette solution est plus élevé que celui de la solution précédente mais reste assez faible. Elle est donc souvent mise en place.

Il est aussi possible de remplacer la caténaire par une autre ayant un diamètre plus important (cf. (3) sur Figure I.9). La résistance de la ligne diminue alors permettant de faire transiter plus de puissance. Cependant, le coût du câble est élevé. Par conséquent, cette solution est utilisée si un fort renforcement est nécessaire.

Enfin, la dernière solution usuelle est d'ajouter des sous-stations en bordure de voie afin de fournir aux trains un autre point d'alimentation (cf. (4) sur Figure I.9). Mais, cette solution demande un très fort investissement.

Une autre solution, actuellement en cours d'étude à la SNCF, consiste à ajouter du stockage stationnaire en bordure de voie (cf. (5) sur Figure I.9). Ce système de stockage serait en mesure de fournir une partie de la puissance demandée par les trains [4]-[5]. Les sous-

stations fourniraient alors moins de courant aux trains, ce qui limiterait les chutes de tension et permettrait un développement du trafic [5]. De plus, le système de stockage pourrait rendre d'autres services tels que le lissage des pics de puissance, la compensation de l'énergie réactive (alimentation AC) ou la récupération de l'énergie de freinage [13]. En effet, actuellement, les sous-stations en 1500V DC ne sont pas réversibles. La majorité du freinage est donc dissipée dans des rhéostats. Le système de stockage permettrait de capter cette énergie perdue afin de la réutiliser ensuite. Cependant, cette solution n'apporte une correction que dans une zone géographique ciblée. A partir d'une certaine distance, les pertes en lignes sont trop importantes pour que le système de stockage stationnaire ait un impact.

La solution que nous proposons dans nos travaux est inspirée de cette dernière proposition : le système de stockage ne serait plus au sol mais embarqué dans le train. Notre objectif est d'utiliser ce système de stockage pour fournir une partie de la puissance demandée par les trains afin de réduire la sollicitation des sous-stations. Cela permet de diminuer la puissance qui transite par la caténaire et donc de réduire les chutes de tension. De plus, l'énergie de freinage peut être récupérée en totalité ou en partie par le stockeur. Le principal avantage de cette solution est qu'elle n'est pas limitée à une zone spécifique : si une ligne ferroviaire présente plusieurs limites de capacité mais dans des zones géographiques éloignées les unes des autres, l'usage du système de stockage embarqué permet de résoudre les problèmes en tout point de la ligne avec le moins de pertes en ligne possible. Cependant, le coût d'investissement est très élevé, plus que dans le cas du stationnaire, car chaque train doit être équipé d'un système de stockage.

Il existe plusieurs exemples de systèmes ferroviaires ayant un système de stockage à bord. Celui-ci est essentiellement utilisé pour fournir l'énergie dans les zones n'ayant pas de caténaire. Nous retiendrons par exemple, le tramway de Nice qui fonctionne depuis 2007 avec des batteries de type NiMH (13kWh) ou encore celui de Rotterdam qui utilise un volant d'inertie (4kWh) testé de 2006 à 2008 [10]. Un autre exemple est celui développé depuis 2011 par la East Japan Railway Company [14]. Il s'agit d'un train de type TER (puissance maximale de 350kW) avec des batteries Li-ion (72kWh) qui fournissent la puissance dans les zones sans caténaire.

I.3.3. Problématiques diesel et intérêt de l'hybridation diesel

Certaines lignes ferroviaires ne sont pas électrifiées en raison de leur faible trafic (50% des lignes ferroviaires). Les trains qui y circulent fonctionnent avec un ou plusieurs moteurs thermiques (train diesel-électrique). Cependant, ce type d'alimentation a de forts impacts négatifs tels que l'émission de gaz à effet de serre nocifs pour l'environnement et pour la santé. La France s'est engagée à réduire les émissions de CO₂ (facteur 3x20 [15]) tout comme la SNCF qui a pour objectif, pour la transition énergétique, de remplacer son parc de locomotives diesels par un parc hybride puis électrique d'ici 2050 [16]. De plus, 60% du temps, ces moteurs diesels fonctionnent soit à faible charge (pour alimenter les auxiliaires), soit dans une plage de fonctionnement ayant un mauvais rendement [17]. Il y a donc une consommation élevée de carburant pour une faible puissance fournie. De surcroît, ce type de train diesel-électrique demande une maintenance plus régulière que celle d'un train électrique (revue générale tous les 7 ans contre 15 ans pour un train électrique).

Pour limiter ces impacts négatifs, nous proposons d'hybrider les trains en ajoutant des systèmes de stockage d'énergie en embarqué. Ils permettraient d'améliorer l'efficacité énergétique de la chaîne de traction. En effet, les systèmes de stockage pourraient servir d'appoint afin de lisser les pics de puissance ou encore pour alimenter les auxiliaires (notamment lors des arrêts : fonction « start – and – stop »). Le moteur diesel pourrait alors fonctionner proche de son point de meilleur rendement [10]. De plus, il serait alors possible de récupérer une partie de l'énergie de freinage (issue des freins électriques) qui est actuellement dissipée dans des rhéostats. Cette énergie serait réutilisable par la suite, ce qui réduirait l'utilisation du moteur diesel et permettrait éventuellement de diminuer sa taille.

Il existe de nombreux exemples de trains diesel-électrique hybrides [10], [18], dont :

- la locomotive hybride de Toshiba HD 300-901 utilisée pour le fret à Tokyo depuis 2012 (puissance diesel de 205kW et batteries Li-ion avec une puissance de 40kW),
- le train GG20B Green Goat de Canadian Railpower Technologies Corp avec des batteries au plomb, produite en 2004 (puissance totale de 1490kW),
- la locomotive BR203 de ALSTOM (2006) avec des batteries Nickel-Cadium (puissance diesel de 200kW et batteries de 350kW),
- la locomotive H3 de ALSTOM (2013) avec des batteries Nickel-Cadium (puissance diesel de 350kW et batteries de 350kW),
- le train HB E2010 de type TER qui circule depuis 2015 au Japon. Il est équipé d'un moteur diesel de 331kW et de deux packs de batteries de 15,2kWh.

I.3.4. Conclusion

L'hybridation ferroviaire (ajout de système de stockage en embarqué) est une solution possible pour faire face aux différentes problématiques de la traction électrique ou diesel. Dans le cas de la traction électrique, le système de stockage peut aider au soutien de tension et dans le cas de la traction diesel, il permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre. De plus, dans les deux cas, le système de stockage peut récupérer l'énergie de freinage actuellement dissipée dans les rhéostats.

Les deux types de traction ont une architecture très proche avec un bus continu connecté à un moteur électrique par le biais de convertisseurs. Quel que soit le type de traction, les systèmes de stockage embarqués seront donc connectés à ce bus continu par le biais d'un convertisseur DC/DC (cf. Figure I.10).

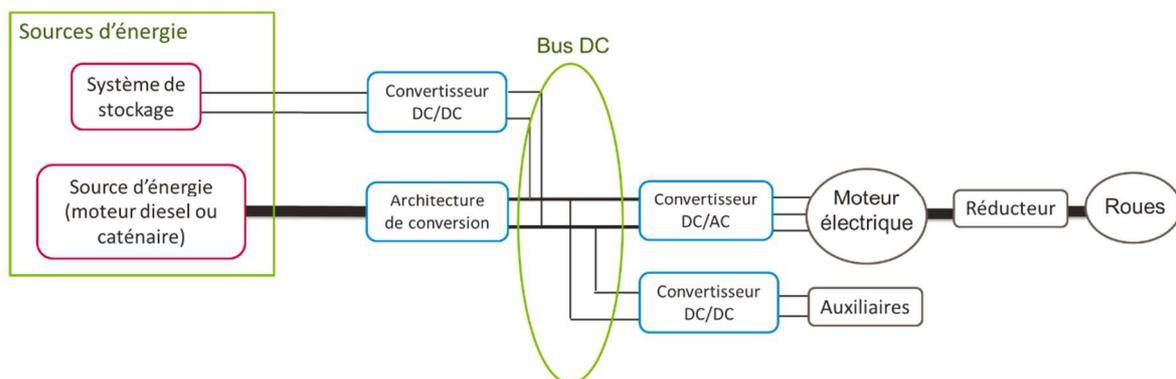


Figure I.10 : Structure d'hybridation intégrant un système de stockage

I.4. SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIE

I.4.1. Classification des systèmes de stockage

Les systèmes de stockage d'énergie se définissent au moyen de deux caractéristiques principales que sont la quantité d'énergie que l'on peut stocker et la quantité d'énergie que l'on peut transférer. Suivant l'application recherchée (stockage longue durée, lissage de pics de puissance, découplage de la production et de la demande, ...) certains systèmes de stockage sont plus adaptés que d'autres.

Ils existent quatre grandes catégories de systèmes de stockage liées à la forme sous laquelle l'énergie est stockée : électrochimique, électrique, mécanique et thermique (non présentée ici) comme le détaille le Tableau I.1 [19].

Tableau I.1 : Classification des systèmes de stockage d'énergie

Stockage électrochimique	Stockage électrique (électromagnétique et électrostatique)	Stockage mécanique
<ul style="list-style-type: none">- Batteries (Plomb, NiMH, Li-ion, ...)- Batteries redox- Système hydrogène (pile à combustible avec électrolyseur)	<ul style="list-style-type: none">- Condensateurs- Supercondensateurs- Bobines magnétiques supraconductrices	<ul style="list-style-type: none">- Système de stockage par pompage- Volant d'inertie- Air comprimé

Chacun de ces systèmes de stockages possède des caractéristiques différentes avec des avantages et des inconvénients qui lui sont propres. Un moyen rapide d'identifier le système le mieux adapté pour une application donnée, est d'utiliser le plan de Ragone [20] (cf. Figure I.11). Il permet de classer les technologies de stockage en fonction de leur densité massique d'énergie (quantité d'énergie massique que l'on peut stocker) et de leur densité massique de puissance (quantité d'énergie massique que l'on peut transférer en unité de temps). Cela permet de donner un aperçu de la dynamique du système. D'après ce plan, plus un système de stockage aura une densité massique d'énergie élevée, plus il sera apte à stocker une importante quantité d'énergie. De même, si un système a une densité massique de puissance élevée, sa dynamique sera plus rapide (capacité à fournir des puissances élevées).

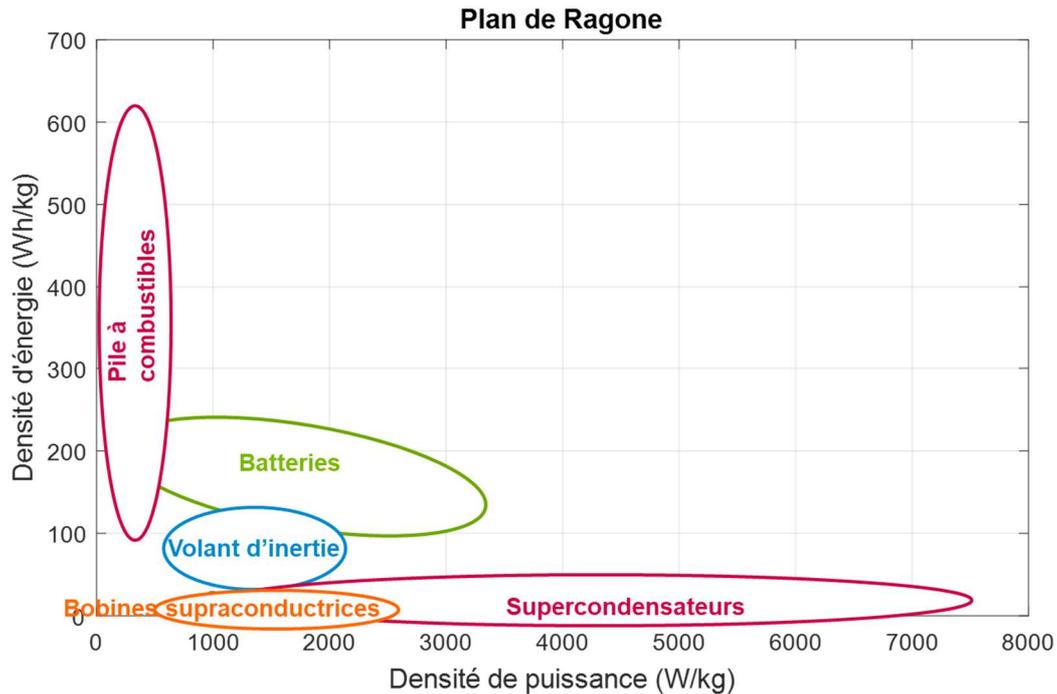


Figure I.11 : Plan de Ragone [21], [22], [23]

Dans le cadre de notre application, il est nécessaire que les systèmes de stockage aient une masse et un volume raisonnables afin de pouvoir les embarquer à bord du train. Les systèmes du type : pompage, air comprimé, bobine supraconductrice et batterie redox ne sont donc pas adaptés à nos besoins. Ils sont réservés à des applications stationnaires.

Les autres systèmes de stockage présentent des caractéristiques intéressantes pour notre étude du train hybride :

- Les piles à combustibles sont une source d'énergie réversible (pouvant se charger et se décharger au cours de la mission) à condition d'avoir un électrolyseur à bord. L'ajout de cet élément rend le système beaucoup plus encombrant. De plus, il est nécessaire d'avoir des réservoirs pouvant contenir l'hydrogène et l'oxygène. Ce système n'est donc pas le plus adapté à l'hybridation des trains. Cependant, l'hydrogène peut être utilisé en remplacement des moteurs diesels.
- Le stockage d'énergie au moyen d'un volant d'inertie présente des performances très intéressantes car ils sont capables d'effectuer un grand nombre de cycles sans perdre de leur capacité. Son intérêt a déjà été démontré dans le cas d'une application ferroviaire (cf. I.3.2 et [24]). Cette technologie posait des questions de sécurité en cas d'accident (accident de train) mais les dernières avancées permettent de faire des volants d'inertie

qui se désagrègent en cas d'impact. Ce système de stockage est cependant peu répandu dans le domaine du transport. Il demande une vitesse minimale pour fonctionner (ce qui empêche de stocker sur le long terme) et a de nombreux auxiliaires, ce qui accroît sa consommation d'énergie. Il ne fait donc pas partie des choix technologiques que nous avons retenus.

- Les batteries et les supercondensateurs ont une masse et un volume acceptables pour une application en embarqué. De plus, leur usage assez répandu en fait des technologies matures. Cependant, même si elles ont déjà été utilisées pour des applications ferroviaires [18], le retour d'expérience sur cette technologie dans le domaine du ferroviaire reste faible. Néanmoins, nous avons choisi d'utiliser ces deux technologies de stockage qui semblent les plus adaptées.

Dans la partie suivante nous présentons plus en détail les deux systèmes de stockage retenus.

I.4.2. Systèmes de stockage pour l'embarqué

I.4.2.1. Batteries

Les batteries sont les systèmes de stockages les plus utilisées pour des applications à usage quotidien mais aussi pour de plus grandes applications industrielles comme les véhicules électriques ou hybrides. L'énergie est stockée sous forme électrochimique. Le principal avantage de cette technologie est sa densité d'énergie élevée qui permet de stocker une quantité importante d'énergie. Il existe principalement 4 grandes familles de batteries qui se distinguent par les matériaux utilisés : lithium, nickel, plomb et sodium [25]. Elles ont des performances différentes (cf. Figure I.12).

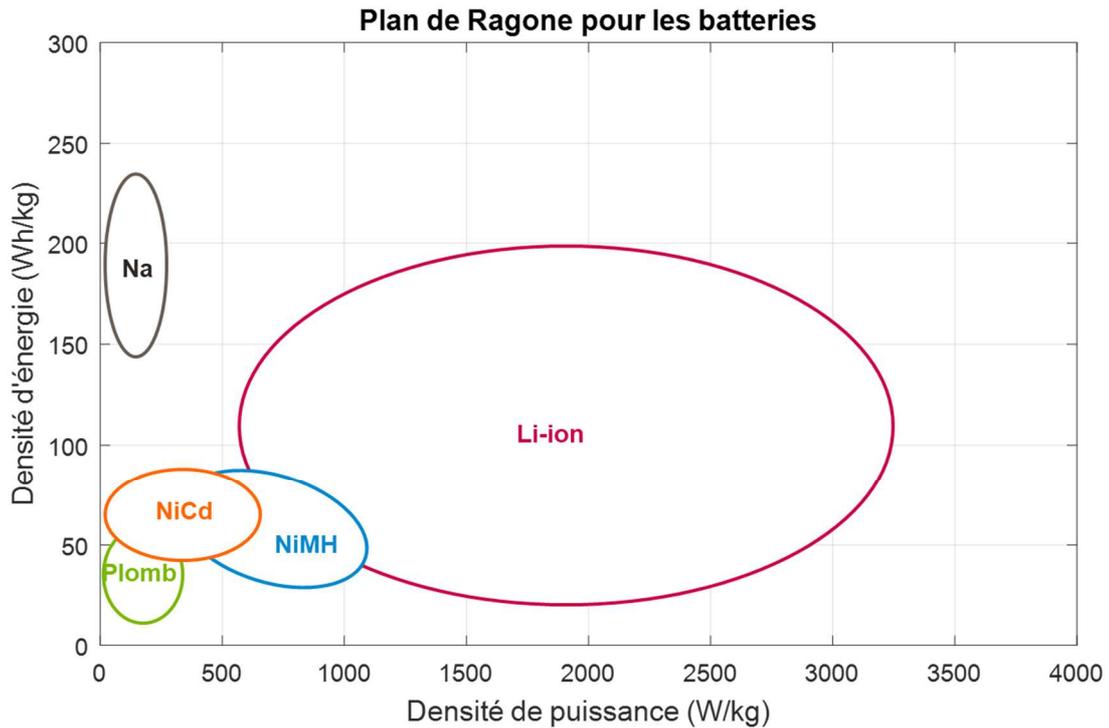


Figure I.12 : Plan de Ragone pour les batteries [26]

Les batteries au plomb sont les plus anciennes et par conséquent les plus matures, mais leurs performances sont plus faibles que celles des autres batteries [27].

Les batteries au sodium sont très spécifiques : elles fonctionnent à haute température et donc nécessitent des systèmes auxiliaires conséquents. Elles sont utilisées uniquement dans les milieux industriels [27].

Les batteries au nickel concernent plutôt le domaine industriel et sont utilisées en raison de leur densité de puissance élevée ainsi que de leur bonne résistance à une surcharge ou aux chocs. Elles fonctionnent sur une large plage de températures [28].

Enfin, les batteries au lithium ont la plus haute densité d'énergie et sont très largement répandues tant dans des applications quotidiennes (vie courante) que dans des applications industrielles [27]. Il est possible de les classer en 3 grandes familles [21] :

- les lithium-métal où l'électrode est composée de lithium métallique,
- les lithium-ions (les plus répandues) où le lithium reste à l'état ionique (à l'aide d'un matériau d'insertion),
- les lithium-polymères qui ont un électrolyte gélifié.

Il existe une grande variété de batteries Lithium-ion adaptées à différentes applications pouvant aller d'une forte densité d'énergie à une forte densité de puissance [26].

Le principal inconvénient de cette technologie est sa sensibilité aux cycles effectués : selon la profondeur de décharge, la batterie aura la capacité d'effectuer plus ou moins de cycles [17]. L'usage que l'on fait de la batterie va donc conditionner son coût d'exploitation : si les cycles sont d'une grande profondeur de décharge (80%), il sera nécessaire de changer la batterie plus régulièrement que pour des cycles de plus faible profondeur de décharge (moins de 50%).

Les batteries de type NiMH ont déjà été utilisées pour des applications ferroviaires. Nous étudierons donc une hybridation avec des batteries de type NiMH. Cependant, en raison du fort développement actuel des batteries de type lithium-ion et de leurs performances, nous avons aussi sélectionné cette technologie pour notre étude.

1.4.2.2. Supercondensateurs

Les supercondensateurs se composent de deux électrodes plongées dans un électrolyte et séparées par une membrane poreuse (cf. Figure I.13). En fonction de la charge ou de la décharge, les électrons se déplacent mais sans qu'il y ait un transfert de charge, contrairement aux batteries. Ce système possède une bonne densité de puissance ce qui lui permet de répondre aux brusques appels de puissance (en raison de sa faible résistance interne) [29]. De plus, par leur composition, les supercondensateurs peuvent effectuer des millions de cycles sans perdre de leurs performances [29]. Leur densité d'énergie est cependant faible comparée aux batteries. Plusieurs applications sont possibles pour ce dispositif, notamment dans le transport pour la récupération de l'énergie de freinage [30]-[31]. Il existe trois catégories de supercondensateurs [30] :

- double couches qui sont les plus répandus,
- faradiques, moins répandus, qui ont un fonctionnement proche de celui d'une batterie,
- hybrides (technologie récente) qui sont une associations des deux technologies précédentes.

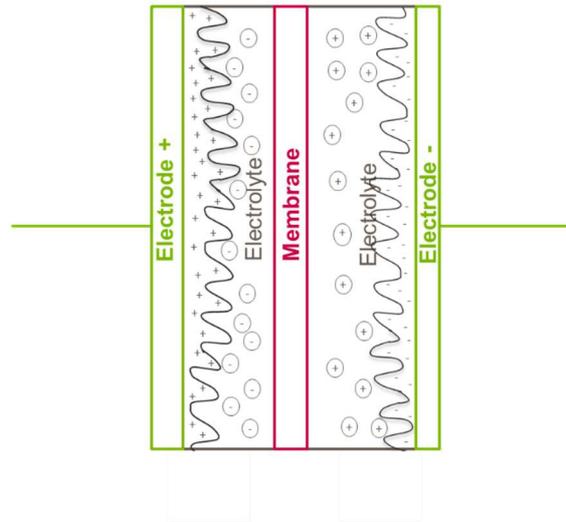


Figure I.13 : Schéma d'un supercondensateur [32]

I.5. GESTIONS ENERGETIQUES

I.5.1. Interaction gestion énergétique – dimensionnement

Nous avons choisi d'hybrider le train diesel afin de réduire sa consommation de carburant et le train électrique pour aider au soutien de tension. L'objectif de nos travaux est de dimensionner les systèmes de stockage embarqués.

Le train est un système multi-sources. Afin de le dimensionner au mieux, il est nécessaire d'estimer quel est le rôle de chacune des sources d'énergies. La gestion énergétique est donc un facteur clé pour évaluer ce dimensionnement, puisqu'elle définit les demandes en puissance et en énergie de chacune des sources.

Une méthode usuelle pour les dimensionner consiste à fixer une gestion énergétique (cf. Figure I.14) puis à en déduire la taille des sources. A l'inverse, pour déterminer la gestion, il est nécessaire de choisir le dimensionnement des sources (cf. Figure I.14). Ces deux approches découplent donc la gestion énergétique et le dimensionnement.

Or, la gestion énergétique va fortement influencer la taille du système de stockage et réciproquement, le dimensionnement va conditionner la gestion. Nous voulons donc prendre en compte cette influence mutuelle. Pour cela, nous proposons d'intégrer la gestion des sources dans le modèle de dimensionnement : approche intégrée (cf. Figure I.15).

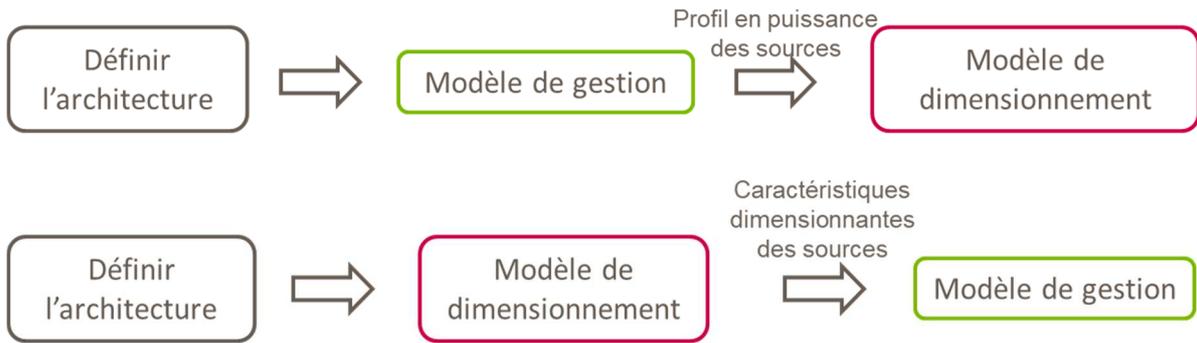


Figure I.14 : Approches découplées



Figure I.15 : Approche intégrée

Il existe plusieurs méthodes possibles de gestion d'énergie d'un système multi-sources. La partie suivante présente les principales (cf. I.5.2).

I.5.2. Etat de l'art sur les gestions énergétiques

I.5.2.1. Gestion à base de règles

Il existe plusieurs familles de gestions énergétiques optimales : la commande LQ, la programmation dynamique ou encore la commande prédictive, ... En raison de la nécessité d'avoir une connaissance a priori du cycle temporel, la plupart de ces méthodes ne peuvent s'appliquer en temps réel contrairement à la gestion à base de règles. Cette dernière consiste à déterminer le comportement de chacune des sources d'énergie en fonction de critères. Ainsi, une variable de décision est soumise à des tests, si le test est validé alors la source d'énergie adoptera un comportement prédéterminé, dans le cas contraire, elle fera une autre action (cf. Figure I.16). Déterminer les tests à faire ainsi que les comportements qui en découlent demande une forte expertise du système. De plus, ce sont des décisions souvent prises pour un pas de temps fixe indépendamment du reste du cycle temporel effectué par le train. Par conséquent, cette gestion n'est pas optimale sur le cycle, puisqu'elle ne tient pas compte de l'ensemble du trajet. Cependant, une bonne connaissance du système peut mener à de très bons résultats avec cette méthode. De plus, il est possible d'intégrer à la gestion un comportement précis répondant

à des critères industriels. Finalement, ce type de gestion est applicable aisément en temps réel, puisqu'il n'y a pas de nécessité de connaissance *a priori* du comportement du train. Ce contrôle a déjà été utilisé dans le cas de véhicule hybride ou électrique [33], [34].

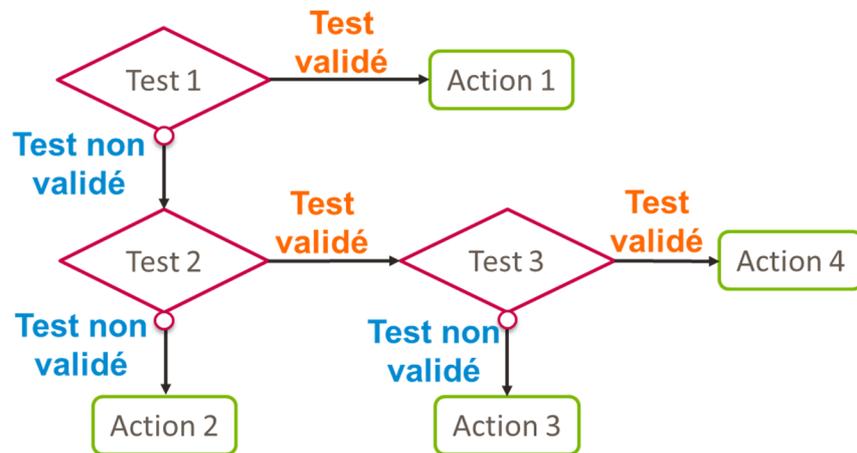


Figure I.16 : Principe de la gestion à base de règles

I.5.2.2. Gestion énergétique optimale

I.5.2.2.1. Introduction

Les méthodes de gestion d'énergie optimale sont basées sur des conditions mathématiques à respecter. Cela consiste à minimiser ou maximiser un (ou plusieurs) critère(s) tout en respectant certaines contraintes fixées au préalable.

Cela nécessite de définir un modèle du système pouvant s'exprimer sous forme de système d'état ou à l'aide d'autres formulations mathématiques (lagrangien, hamiltonien) [35] qui vont aider à sa résolution (comme la méthode du minimum de Pontryagin qui utilise l'hamiltonien [36]). Les parties suivantes présentent quelques gestions énergétiques optimales.

I.5.2.2.2. Commande Linéaire Quadratique (LQ)

La commande linéaire quadratique (LQ) est une méthode qui repose sur une formulation matricielle du problème. Le système à résoudre devient alors l'équation algébrique de Riccati [37]. Le principal avantage de cette gestion est d'être très robuste et de s'appliquer à plusieurs types de problèmes :

- discrets ou continus,
- sur un horizon fini ou infini.

Il existe deux grandes familles de commande LQ :

- la commande linéaire quadratique,
- la commande linéaire quadratique gaussienne.

La seconde prend en compte des incertitudes du modèle [38] et fait souvent appel au filtre de Kalman pour sa résolution. Elle est principalement utilisée pour le contrôle d'un élément en particulier plutôt que pour gérer un système multi-sources (par exemple : [39], [40] et [41]).

1.5.2.2.3. Programmation dynamique

La programmation dynamique est une méthode souvent utilisée pour déterminer la gestion optimale de systèmes hybrides dans le monde du transport [42], [43], [44] mais aussi dans le cas d'autres systèmes utilisant plusieurs sources (réseau : [45]-[46], bâtiment : [47]). Elle détermine le profil énergétique des sources, qui minimise un critère choisi (par exemple : la consommation de carburant). Cette méthode repose sur le principe d'optimalité de Bellman qui explique que si un chemin est optimal sur un petit intervalle alors c'est un morceau du chemin optimal sur l'ensemble du parcours [48]. Elle est souvent employée dans un cas déterministe (la demande est supposée connue et ne varie pas : [43]-[44], [46]-[47]), mais il est possible de l'utiliser afin d'obtenir des lois de commande dans le cas stochastique : [42]-[45].

Pour utiliser cette méthode, il faut choisir une grandeur d'état dont on cherchera le profil énergétique. L'espace de cette variable d'état (par exemple, l'état de charge du système de stockage) est discrétisé (découpé en une série d'états possibles, cf. Figure I.17). Le temps est lui aussi discrétisé. Ensuite, nous fixons un état initial et un état final. Il est alors possible de tracer dans le maillage ainsi obtenu (en respectant ces nœuds), les chemins reliant l'état initial à l'état final et de choisir celui qui minimise le plus le critère choisi (cf. Figure I.17). Pour cela, l'algorithme remonte par récursivité de l'état final à l'état initial en ajoutant au coût de départ les coûts de transition. Ainsi, une fois arrivé à l'état initial, chaque chemin tracé a un coût qui lui est propre (cf. Figure I.17). Le chemin optimal est donc celui avec le coût minimal [48], [49].

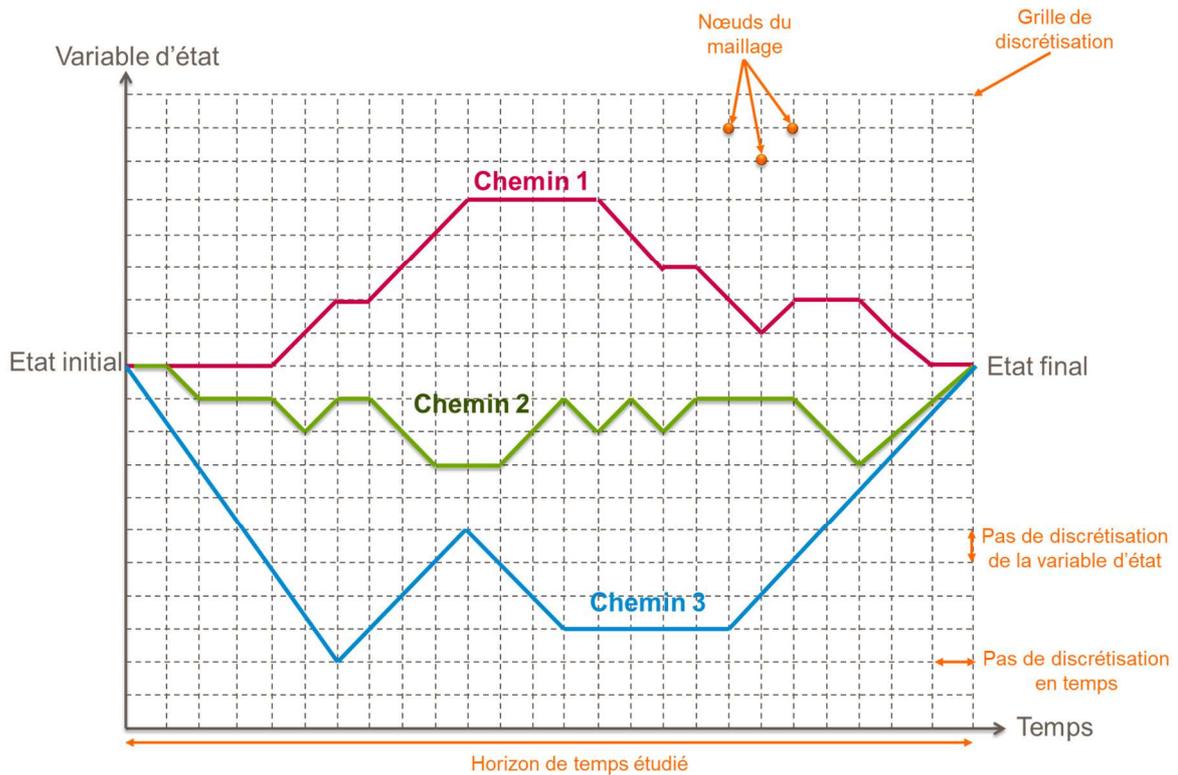


Figure I.17 : Exemple des « chemins possibles » pour la programmation dynamique

I.5.2.2.4. Commande prédictive

La commande prédictive utilise un modèle de prédiction simplifié du modèle complet pour prédire, sur un horizon fini, le comportement du système [50]. A chaque pas de temps, à l'aide du modèle de prédiction, la commande est déterminée sur un horizon de temps donné (pour N pas de temps, N étant inférieure à la durée de l'étude) mais seule la première valeur de la séquence ainsi déterminée est conservée (cf. Figure I.18). L'action est réitérée pour le point suivant à déterminer, et ce jusqu'à la fin du parcours. Le modèle n'a donc pas besoin d'être reformulé mais il est nécessaire d'en avoir une bonne connaissance afin de construire le modèle de prédiction. Ce contrôle est utilisé pour des applications variées telles que la gestion du trafic [51], la gestion d'un micro réseau [52] ou encore pour les véhicules électriques [53].

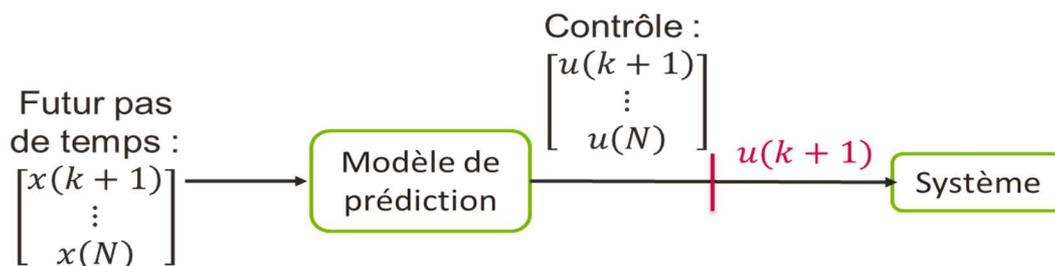


Figure I.18 : Commande prédictive

où :

$x(k + 1)$	-	Variable d'état au pas de temps d'indice $(k + 1)$
N	-	Horizon de temps pour estimer la commande
$u(k + 1)$	-	Variable de contrôle au pas de temps d'indice $(k + 1)$
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

1.5.2.3. Conclusion

Pour notre étude, nous utiliserons principalement des gestions à base de règles en raison de leur facilité d'implantation sur des cas industriels. Nous étudierons aussi une commande par programmation dynamique qui est très utilisée pour la gestion de systèmes multi-sources en particulier dans le domaine des véhicules hybrides ou électriques [54], [55], [56]. Elle permet de donner une très bonne référence mais ne peut être utilisée en temps réel car elle repose sur une connaissance *a priori* du cycle que le train effectue.

I.6. GRANULOMETRIE DU MODELE

I.6.1. Définition de la granulométrie

La granulométrie du modèle définit la taille de son plus petit élément. Autrement dit, elle détermine le degré de décomposition du système complet en sous-systèmes [43]. En effet, un modèle peut prendre en compte différents phénomènes physiques (puissance, tension, température, ...) qui demandent une modélisation plus ou moins fine. Plus un modèle est fin, plus il est en mesure de fournir des informations détaillées sur la physique du système. Cependant, un modèle trop fin peut conduire à des calculs qui demandent trop de temps pour qu'il soit utilisable, notamment en industrie [57].

I.6.2. Choix du niveau de granulométrie

Notre objectif est de déterminer le pré-dimensionnement des sources embarquées dans le train. Nous avons fait le choix d'intégrer la gestion énergétique dans le modèle de dimensionnement pour tenir compte de son influence. Le modèle global est donc complexe (systèmes multi-sources avec gestion). Nous faisons alors le choix d'une modélisation en « flux d'énergie ». Les variables du modèle sont l'énergie et la puissance de chacune des sources. Suite à différentes études [58], ce degré de précision est estimé suffisant pour faire du pré-dimensionnement. En effet, nous nous situons en phase d'esquisse (première étape de projet) et notre objectif est de mieux cerner la zone d'étude qui présente un intérêt. Une représentation macroscopique est donc suffisante.

I.7. CONCLUSION ET OBJECTIFS

La majorité du trafic ferroviaire en France est assuré par des trains électriques. Cependant, une partie du réseau ferroviaire n'est pas électrifiée en raison du faible trafic. Des trains diesels ou bimodes sont donc utilisés sur ces lignes. Pour faire face aux problématiques diesels ou électriques (cf. I.3), nous avons choisi d'hybrider le train en ajoutant des systèmes de stockage d'énergie embarqués (batteries ou supercondensateurs). Notre objectif industriel est de déterminer le pré-dimensionnement des sources d'énergie en tenant compte de la gestion énergétique à appliquer à ce système multi-sources (cf. Figure I.19).

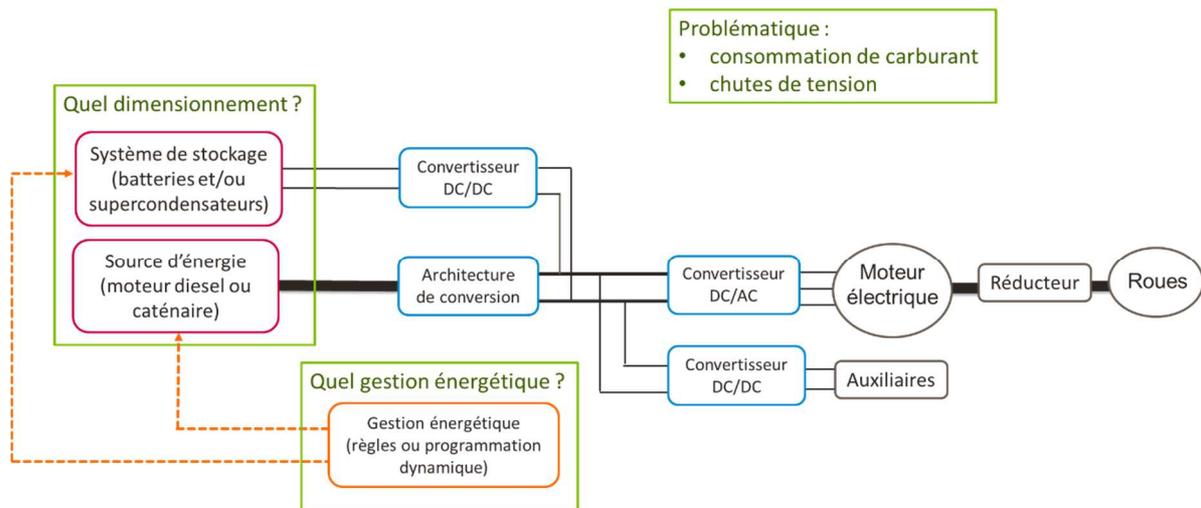


Figure I.19 : Conclusion et objectifs

Chaque type de traction (électrique ou diesel) rencontre des problématiques différentes : pour la traction diesel, c'est la consommation de carburant qui a pour conséquence un coût d'exploitation élevé et des émissions de gaz à effet de serre. Dans le cas de la traction électrique, la problématique à laquelle nous nous intéressons est la chute de tension de la caténaire qui empêche le développement du trafic. De plus, pour cette seconde application, les autres trains présents sur la ligne influencent le plan de tension. Il n'est donc pas possible de les écarter de l'étude, alors que pour la traction diesel, il est possible d'étudier chaque train de manière isolée. Nous avons donc des modélisations et des objectifs différents selon que le train est diesel ou électrique.

Cependant, la même méthode d'optimisation est employée. Celle-ci est détaillée dans le Chapitre II qui commence par introduire la notion de problèmes directs et inverses. Ce chapitre présente ensuite les spécificités des modèles orientés pour l'optimisation qui ont été développés dans ces travaux (optimisation sur cycle, optimisation combinant gestion et dimensionnement).

Afin de tenir compte des particularités de chaque mode de traction, nous avons séparé les cas d'application. Le Chapitre III présente la modélisation pour un train hybride diesel-électrique. Il détaille la représentation des sources d'énergies du train (groupe diesel et système de stockage) ainsi que les gestions énergétiques étudiées pour ce type de traction (gestion à base de règle et programmation dynamique). Finalement, ce chapitre présente le modèle de dimensionnement orienté pour l'optimisation d'un train hybride diesel-électrique.

Le Chapitre IV est consacré au train hybride électrique. Il introduit la méthode utilisée pour représenter la ligne électrique et les trains qui y circulent. Ce chapitre détaille aussi les gestions d'énergie qui s'appliquent à un train hybride électrique (gestion par règles sur les tensions de la ligne et gestion par algorithme d'optimisation). Il conclut ensuite sur le modèle de dimensionnement orienté pour l'optimisation pour ce type de train.

Finalement, quelques résultats sont présentés dans le Chapitre V. Nous avons choisi de faire dans ce chapitre une première analyse comparant deux gestions d'énergie dans le cas d'un train hybride diesel-électrique. Puis, une seconde partie présente une analyse critique de l'usage d'une gestion à base de règles dans un modèle de dimensionnement orienté pour l'optimisation. Enfin, une ouverture est faite sur une solution mixte associant stockage stationnaire et embarqué pour le soutien de tension d'une ligne électrique ferroviaire.

Chapitre II : Méthode de dimensionnement par optimisation

II.1. INTRODUCTION

Notre objectif est de déterminer le pré-dimensionnement des sources d'énergie embarquées. Pour cela, nous faisons le choix d'utiliser des méthodes d'optimisation qui ont l'avantage d'avoir un large champ d'exploration. Cela implique d'avoir une formulation spécifique du modèle, qui est détaillée à la partie suivante. Nous présentons ensuite les spécificités de notre problème d'optimisation qui utilise un cycle temporel (cf. II.3) et intègre la gestion énergétique multi-sources (cf. II.4).

II.2. FORMULATION D'UN MODELE DE DIMENSIONNEMENT ET METHODES DE RESOLUTION

II.2.1. Formulation du problème de dimensionnement

Un modèle de dimensionnement peut être formulé de différentes façons. La méthode généralement employée en industrie consiste à représenter un système à partir de ses équations fonctionnelles et d'en déduire de manière immédiate ses performances. Ce modèle est dit direct (cf. II.2.2).

Cependant, cette méthode présente des limites (cf. II.2.2). Il existe alors une autre formulation possible où ce sont les performances qui vont déterminer les variables de dimensionnement. Ce type de formulation est dite inverse (cf. II.2.3). La résolution peut alors se faire au moyen d'un algorithme d'optimisation (cf. II.2.5).

II.2.2. Problème direct

Un modèle est dit direct lorsqu'il fournit les performances du système étudié à partir de ses caractéristiques dimensionnantes [59], [60]. Ce modèle a pour but de calculer le comportement du système et pour cela, il peut utiliser des outils de simulation [60]. Plusieurs méthodes sont possibles :

- simulation dynamique

- calculs par éléments finis
- calculs analytiques

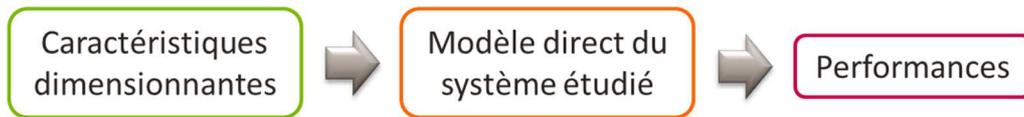


Figure II.1 : Problème direct

La construction de ce type de modèle se fait en plusieurs étapes :

- une première phase de détermination de la structure du système (cahier des charges)
- une phase de modélisation du système
- une phase de simulation (résolution des équations)

Pour améliorer les performances obtenues en sortie du modèle, il peut être nécessaire de modifier le cahier des charges « à la main » : l'expert travaille par tâtonnement afin d'identifier la valeur des variables dimensionnantes qui permettront d'améliorer les résultats de la simulation (cf. Figure II.2). Cette tâche peut demander beaucoup de temps et devient plus difficile à effectuer lorsque le modèle se complexifie (système multi-physique). De plus, pour être efficace, elle demande une forte expertise, ce qui la rend moins adaptée à l'étude de nouveaux systèmes.

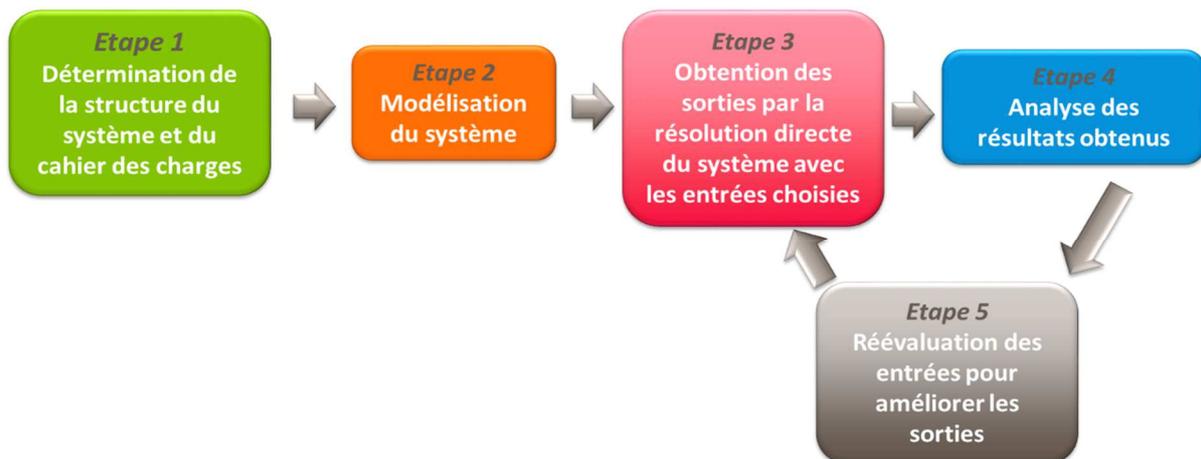


Figure II.2 : Résolution « à la main »

II.2.3. Problème inverse

Le modèle inverse retourne la causalité naturelle [43] : il s'agit de déterminer les caractéristiques du système qui correspondent aux performances souhaitées [59], [60]. Pour cela, il est nécessaire de fixer le cahier des charges des performances puis de remonter aux caractéristiques du système qui permettent de le respecter (cf. Figure II.3) [59].

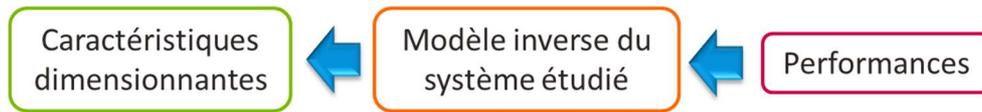


Figure II.3 : Problème inverse

Il peut être difficile de renverser les équations physiques du modèle afin de remonter aux caractéristiques dimensionnantes à partir des performances. Dans ce cas, une méthode de résolution possible est l'utilisation d'un algorithme d'optimisation. Les équations conservent le sens d'un modèle direct. Les performances désirées sont fixées par le cahier des charges. L'algorithme d'optimisation va alors itérer sur les valeurs des caractéristiques dimensionnantes afin de respecter les critères choisis (cf. Figure II.4) [60].

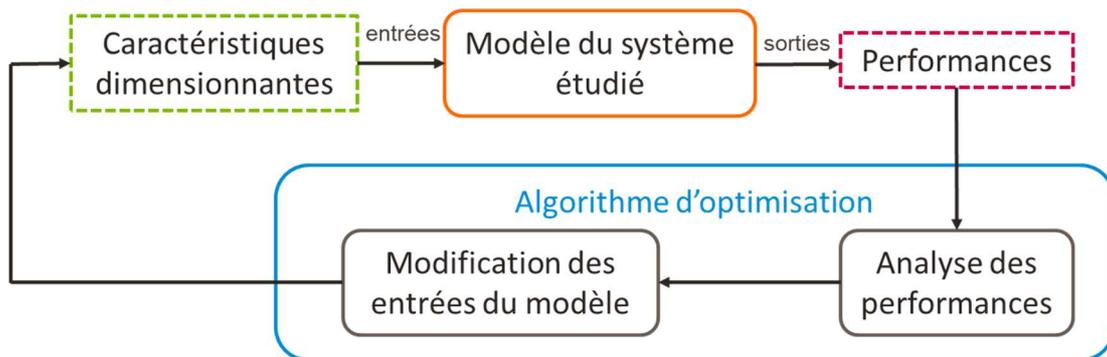


Figure II.4 : Résolution du problème inverse

II.2.4. Formulation du problème d'optimisation

Un problème d'optimisation est un problème inverse qui, de manière générale, se formule de la façon suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_x (f_{obj}(x, p)) \\ g(x, p) \leq 0 \\ h(x, p) = 0 \\ x_i \in [x_i^{min}; x_i^{max}] \forall i \in [1; N] \end{array} \right. \quad (II.1)$$

où :

f_{obj}	-	Fonction objective : elle représente le critère que l'on souhaite minimiser ou maximiser
g	-	Fonction traduisant les contraintes d'inégalité (par exemple une contrainte de limite maximale sur le volume embarqué)
h	-	Fonction traduisant les contraintes d'égalité (par exemple, de conserver le même état de charge au début et à la fin du trajet)
$x = [x_1, \dots, x_N]$	-	Entrées d'optimisation
$[x_i^{min}; x_i^{max}]$	-	Espace des valeurs possibles pour l'entrée d'optimisation x_i
N	-	Nombre d'entrées d'optimisation
p	-	Paramètres du modèle

Un problème d'optimisation est donc composé de plusieurs types de variables (cf. Figure II.5) :

- les variables d'optimisation sont les entrées du modèle de dimensionnement qui sont libres d'être modifiées par l'algorithme d'optimisation afin d'obtenir les sorties désirées. Ces entrées sont contraintes dans un intervalle (variable « x »).
- les variables fixes (paramètres : « p ») sont les entrées qui ne peuvent être changées au cours de l'optimisation (physique du système).
- les contraintes sont les sorties du modèle qui sont soumises à des critères de performances (limitations physiques à respecter). Elles se formulent sous forme de contraintes d'égalité ou d'inégalité (fonctions « g » et « h »).
- les variables intermédiaires sont les sorties libres d'évoluer (pas de contraintes spécifiques à respecter). Elles sont utilisées pour l'analyse des résultats.
- la fonction objective est le critère principal que l'on cherche à minimiser ou à maximiser (fonction « f_{obj} »).

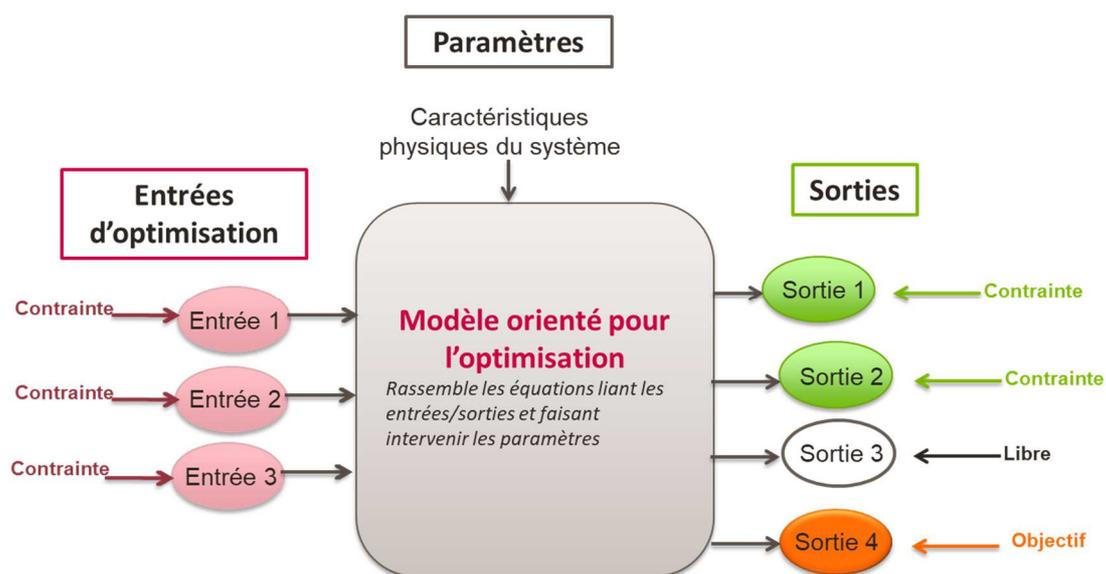


Figure II.5 : Modèle orienté pour l'optimisation

Pour construire le problème d'optimisation, il est nécessaire de fixer le cahier des charges. Ce choix n'est pas anodin puisqu'il va conditionner le type de chacune des variables (entrées d'optimisation ou paramètres, sorties libres ou contraintes) [61]. Il s'agit d'identifier quelles sont les variables qui vont avoir un impact sur les performances et de choisir quels sont les sorties soumises à des critères. La formulation du problème suit donc les étapes suivantes (cf. Figure II.6) :

- 1) une phase de modélisation du système à dimensionner qui consiste à déterminer les équations traduisant la physique de ce système
- 2) une phase de définition du cahier des charges qui détermine le type de chaque variable du système et les performances souhaitées
- 3) une phase de résolution au moyen d'un algorithme d'optimisation
- 4) une phase d'expertise pour l'analyse des résultats et le réajustement du cahier des charges

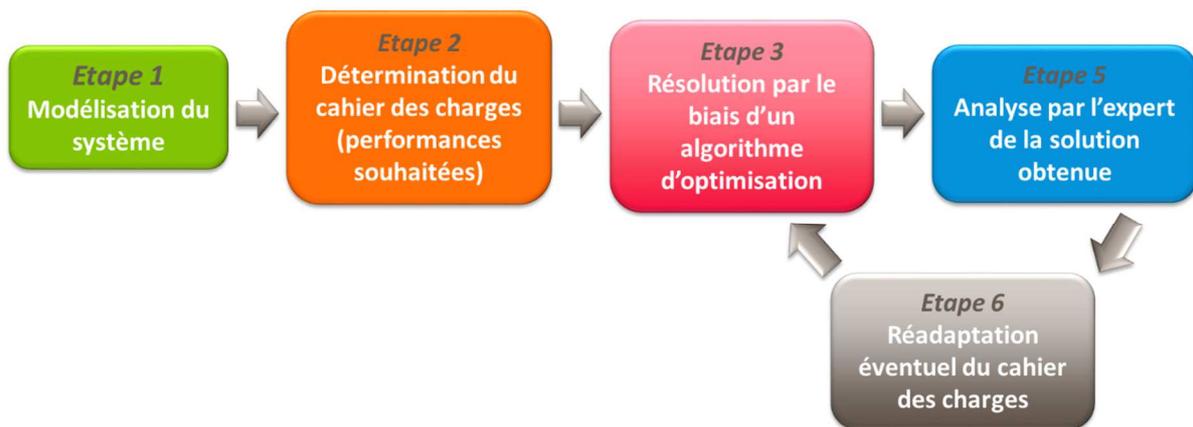


Figure II.6 : Résolution par un algorithme d'optimisation

Ce type de problème demande un temps de développement plus long puisque le modèle suit un formalisme précis. Il arrive souvent au cours de la phase de modélisation de devoir revoir le cahier des charges car la solution trouvée par l'algorithme est non réalisable ou parce qu'il n'y a pas eu de convergence de l'algorithme. Dans ce cas, il peut être nécessaire de redéfinir l'objectif ou d'ajouter des contraintes.

Cependant, l'avantage de la formulation avec un problème inverse est que l'utilisation d'un algorithme d'optimisation permet de parcourir un champ d'exploration plus large, garantissant une meilleure solution en des délais beaucoup plus courts.

II.2.5. Choix de l'algorithme d'optimisation

II.2.5.1. Comment choisir l'algorithme d'optimisation ?

Le choix de l'algorithme d'optimisation est conditionné par la nature du modèle et du cahier des charges. Celui-ci est caractérisé par [57], [62], [63] :

- son nombre de variables qui peut orienter vers des méthodes de recherche locale (au voisinage d'un point initial) ou globale (exploration du domaine avant convergence) pour des raisons de temps de calculs ou de capacité mémoire (au-delà de 50 variables, nous pouvons considérer que le problème est complexe),
- la nature de ses variables (continue ou discrète),
- le type de ses fonctions (linéaire ou non-linéaire, dérivable ou non-dérivable),
- la présence, la nature et le nombre de ses contraintes,
- son nombre d'objectifs.

En se basant sur ces caractéristiques, il est possible de classer les problèmes d'optimisation afin d'identifier l'algorithme le plus adapté (cf. Figure II.7) [57], [63].

De plus, selon le système étudié, une méthode méta-heuristique avec une recherche distribuée (selon des lois stochastiques) ou de voisinage (modification élémentaire de la variable) peut être plus ou moins adaptée.

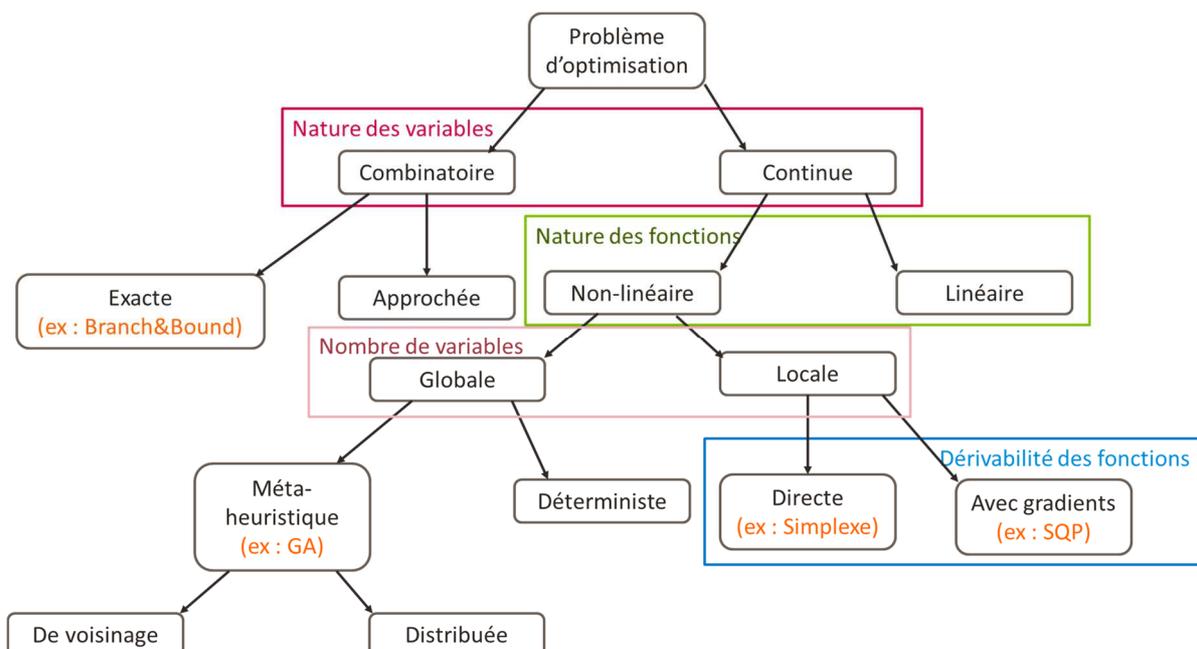


Figure II.7 : Problèmes d'optimisation [57]-[63]

Nous pouvons distinguer deux grandes familles d'algorithmes : déterministe (cf. II.2.5.2) et stochastique (cf. II.2.5.3).

II.2.5.2. Algorithmes déterministes

Un algorithme est dit déterministe lorsque pour les mêmes conditions initiales, il trouve toujours le même optimum [60]. Il existe deux sortes d'algorithmes déterministes : les algorithmes dit « locaux » qui sont bien adaptés aux problèmes convexes et les algorithmes dit « globaux » qui travaillent en divisant l'espace de recherche [60]. Pour une recherche locale, lorsque la fonction objective est dérivable et continue, il est intéressant d'utiliser des algorithmes quasi-Newton tel que SQP (Sequential Quadratic Programming) [64], IP (Interior Point) ou des algorithmes du type gradients conjugués. Si la fonction n'est pas dérivable, les méthodes de directions conjugués ou simplexe donnent de bons résultats [65]. Dans le cas global, des algorithmes possibles sont EGO (Efficient Global Optimization) [66] ou DIRECT (Dividing Rectangles) [67].

Ces algorithmes demandent à ce que la fonction soit continue et souvent dérivable. L'utilisation du Jacobien permet une convergence plus rapide [62]. Cependant, lorsque le système est complexe, le calcul de la matrice des dérivées n'est pas anodin. Plusieurs méthodes d'approximation sont possibles (tel que les différences finies) mais un calcul exact donnera de meilleurs résultats [68] et aidera généralement la convergence de l'algorithme.

Le principal inconvénient des algorithmes déterministes est qu'ils sont fortement dépendants du point initial. L'utilisation des gradients les rend susceptibles de s'arrêter sur un optimum proche du point initial alors que celui-ci est peut-être un optimum local. Cependant, ils ont de bonnes performances lorsqu'il s'agit de traiter les problèmes ayant un grand nombre de contraintes [62].

II.2.5.3. Algorithmes stochastiques

Les algorithmes stochastiques utilisent une part d'aléatoire pour rechercher l'optimum. Ils sont donc susceptibles d'avoir des résultats différents pour un même point initial [60]. Une des grandes familles parmi ces algorithmes sont les algorithmes génétiques. Ils reposent sur des lois de sélection naturelle pour choisir le meilleur résultat. Contrairement aux algorithmes déterministes qui cherchent dans une seule direction au moyen des gradients, ces algorithmes vont travailler au moyen d'une « population ». Plusieurs jeux de valeurs des entrées du modèle sont définis au début de la recherche, ils forment les « parents ». Selon les résultats, ces

« parents » vont donner naissance à des « enfants » par croisement ou par mutation partielle. Il s'agit ensuite de sélectionner les enfants présentant les meilleures performances (en termes de respect des contraintes et d'optimalité de(s) l'objectif(s)) [61]. Ainsi, au fil des générations, la population va converger vers l'optimum.

Il existe plusieurs types d'algorithmes stochastiques selon s'ils sont mono ou multi-objectifs. Dans le cas multi-objectifs, nous avons par exemple l'algorithme :

- VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm) [69],
- MOGA (Multiple Objective Genetic Algorithm) [70],
- NSGA-II (Non-dominating Sorting Genetic Algorithm) [71].

Ces algorithmes ont l'avantage théorique de ne pas s'arrêter sur des optimums locaux (s'ils sont bien paramétrés) et donc de permettre de trouver l'optimum global. De plus, ils sont capables de traiter des problèmes avec des variables discrètes et sont assez robustes [57]. Cependant, ils font de nombreux appels au modèle de dimensionnement, ce qui est coûteux en mémoire et temps de calcul et ils ne sont pas aptes à traiter des problèmes ayant des contraintes serrées.

II.2.5.4. Hybridation des algorithmes

Les algorithmes déterministes sont efficaces pour respecter un grand nombre de contraintes mais ils peuvent s'arrêter sur un optimum local. A l'inverse, les algorithmes stochastiques sont aptes à trouver l'optimum global mais les nombreux appels au modèle les rendent moins adaptés à un problème avec un grand nombre de contraintes.

Pour compenser les inconvénients de chacun des algorithmes, il est possible d'utiliser un chaînage : un algorithme de type stochastique commence par cerner la zone où se trouve l'optimum global. Un algorithme déterministe intervient ensuite pour trouver avec une meilleure précision l'optimum. Pour hybrider, il faut s'assurer que les deux algorithmes utilisés sont bien adaptés au problème d'optimisation (cf. II.2.5.1).

II.2.5.5. Bilan sur les algorithmes

Selon le type de modèle, un algorithme d'optimisation est plus ou moins adéquat. Il n'existe pas d'algorithme qui ait de bonnes performances sur tous types de problèmes [72]. Les

algorithmes déterministes ont une bonne précision et sont aptes à respecter un grand nombre de contraintes mais ils sont plus adaptés à une recherche locale avec le risque de s'arrêter sur un optimum local. Tandis que, les algorithmes stochastiques ont un champ d'exploration plus large assurant une meilleure chance de trouver l'optimum global. Cependant, les nombreux appels à la fonction empêchent leur utilisation sur un modèle complexe. La Figure II.8 présente les avantages et inconvénients de quelques algorithmes selon plusieurs indicateurs [60], [57]:

- précision de la solution trouvée,
- rapidité de convergence,
- nombre de contraintes,
- sensibilité au bruit numérique,
- recherche globale ou locale,
- nombre d'objectifs.

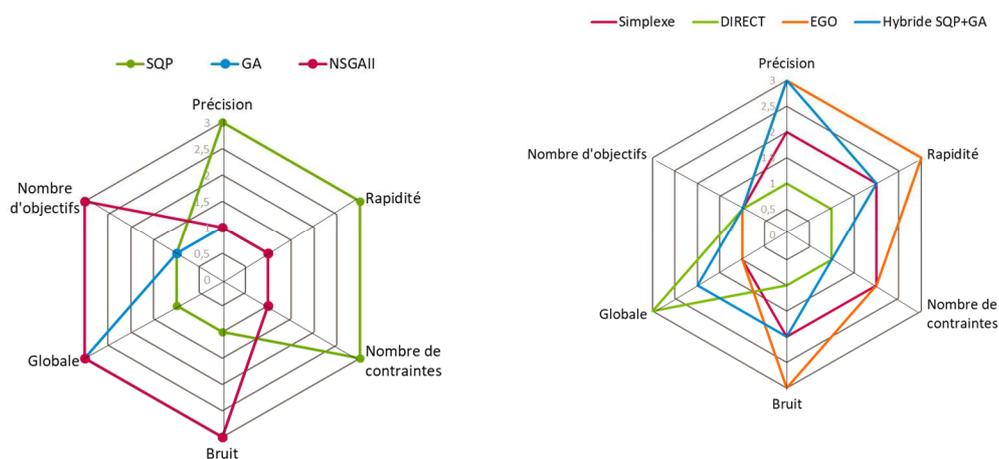


Figure II.8 : Performances des algorithmes d'optimisation [57]-[60]

II.2.6. Conclusion

Pour notre application, le modèle a les caractéristiques suivantes :

- non-linéaire,
- variables continues,
- fonction dérivable,
- grand nombre de contraintes,
- grand nombre de variables.

Nous avons donc fait le choix d'utiliser l'algorithme SQP [64]. Cet algorithme déterministe a l'avantage d'avoir une convergence rapide tout en respectant les contraintes. Cependant, il utilise les gradients. Il est donc nécessaire de calculer le Jacobien du modèle et idéalement, de manière exacte. Différentes méthodes sont possibles pour faire cette dérivation comme nous le verrons au Chapitre V (cf. V.2.2).

II.3. DIMENSIONNEMENT PAR OPTIMISATION SUR CYCLE

II.3.1. Mission ferroviaire

Pour dimensionner les sources d'énergies du train (système de stockage, groupe diesel), nous utilisons un cycle temporel. Celui-ci a une forte influence sur la taille des sources. Il est possible de quantifier cette influence au moyen de deux indicateurs [17] :

- le potentiel d'hybridation en puissance
- le potentiel d'hybridation en énergie.

✓ *Le potentiel d'hybridation en puissance (PHP)*

Cet indicateur caractérise la réduction de la source primaire au profit du système de stockage. Dans notre cas, la source primaire est le moteur diesel pour la traction thermique et la caténaire pour la traction électrique. Le potentiel d'hybridation en puissance permet donc de déterminer dans quelle mesure cette source d'énergie primaire est moins sollicitée. Le système de stockage doit alors faire la compensation. Cet indicateur se calcule de la manière suivante :

$$PHP = \begin{cases} 1 - \frac{P_{moy}}{P_{max}} & \text{si } P_{moy} \geq 0 \text{ et } P_{max} \geq 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (II.2)$$

où :

P_{moy}	(en W)	Puissance moyenne du cycle temporel
P_{max}	(en W)	Puissance maximale du cycle temporel
PHP	-	Potentiel d'hybridation en puissance

Si le PHP est proche de 0 alors cela signifie que le cycle n'est pas favorable à l'ajout de systèmes de stockage. Si le PHP est proche de 1, cela signifie qu'une hybridation est possible avec une forte réduction de la source d'énergie primaire.

✓ **Le potentiel d'hybridation en énergie (PHE)**

Cet indicateur est analogue au PHP mais repose sur une analyse énergétique. En effet, deux cycles temporels peuvent avoir le même PHP car ils ont la même puissance maximale et la même puissance moyenne. Cependant, l'énergie consommée au cours de chacun des cycles peut être différente. Elle dépend de la fréquence et de la régularité des cycles de charge/décharge. Le potentiel d'hybridation en énergie permet de tenir compte de cette différence. Il se calcule de la manière suivante :

$$PHE = \begin{cases} \frac{P_{max}}{E_u} & \text{si } E_u \neq 0 \text{ et } P_{max} \geq 0 \\ +\infty & \text{sinon} \end{cases} \quad (II.3)$$

où :

E_u	(en J)	Energie utile du cycle temporel
P_{max}	(en W)	Puissance maximale du cycle temporel
PHE	-	Potentiel d'hybridation en énergie

Pour calculer l'énergie utile, nous faisons l'hypothèse que la source primaire fonctionne à la puissance moyenne du cycle temporel. La puissance que doit délivrer le système de stockage est donc la différence entre la puissance du cycle et sa puissance moyenne. L'énergie utile représente l'énergie maximale demandée au système de stockage :

$$P_{ESS}(k) = P_{cycle}(k) - P_{moy} \quad (II.4)$$

$$E_{ESS}(k+1) = -dt * P_{ESS}(k) + E_{ESS}(k) \quad (II.5)$$

$$E_u = \max_k(E_{ESS}(k)) - \min_k(E_{ESS}(k)) \quad (II.6)$$

où :

$P_{cycle}(k)$	(en W)	Puissance du cycle temporel au pas de temps d'indice k
P_{moy}	(en W)	Puissance moyenne du cycle temporel
$P_{ESS}(k)$	(en W)	Puissance du système de stockage au pas de temps d'indice k
$E_{ESS}(k)$	(en J)	Energie du système de stockage au pas de temps d'indice k
dt	(en s)	Pas de temps
E_u	(en J)	Energie utile du système de stockage
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

Lorsque PHE tend vers l'infini, cela signifie que le potentiel d'hybridation est élevé. Autrement dit, la fréquence et la régularité des cycles de charge/décharge rendent intéressant l'utilisation d'un système de stockage. A l'inverse, un PHE faible signifie que l'énergie utile est élevée ce qui rend une hybridation plus complexe (besoin d'un système de stockage de grande taille alors que la masse et le volume sont limités).

✓ **Conclusion**

Les caractéristiques du cycle tempore (puissance maximale, puissance moyenne et énergie utile) vont donc influencer la taille des sources d'énergie. Dans le cas d'un potentiel d'hybridation faible (en puissance ou en énergie), c'est la source primaire (groupe diesel ou caténaire) qui sera privilégiée. Dans le cas contraire, c'est le système de stockage qui sera favorisé. Pour notre application, le cycle tempore (appelé mission ferroviaire) se présente sous la forme d'une demande en puissance (traction ou freinage) sur une durée d'étude donnée (cf. Figure II.9).

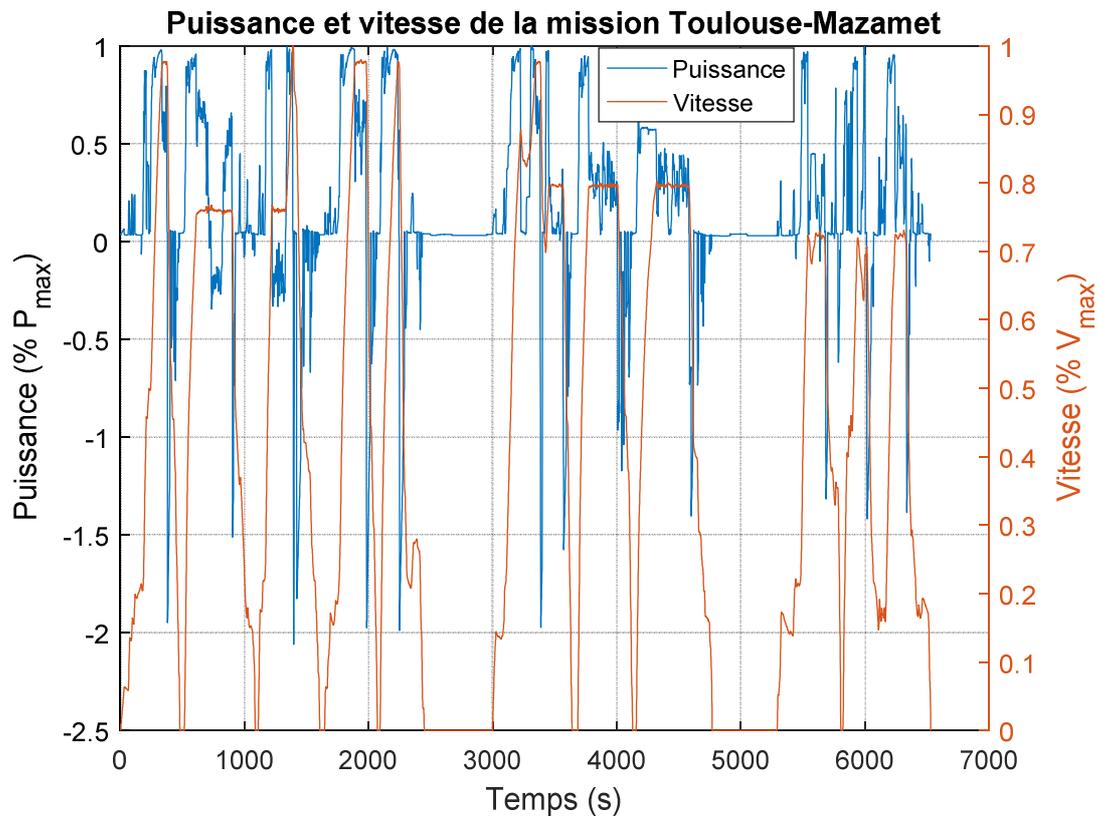


Figure II.9 : Exemple de mission ferroviaire

Pour chaque pas de discrétisation temporelle, il est nécessaire de s'assurer que la puissance de la mission ferroviaire est fournie. Nous avons donc :

$$\forall k, P_{mission}(k) = P_{Sources}(k) \quad (II.7)$$

où :

$P_{mission}(k)$	(en W)	Puissance de la mission ferroviaire (moteur de traction et auxiliaires) au pas de temps d'indice k
$P_{Sources}(k)$	(en W)	Puissance des sources d'énergie (systèmes de stockage, groupe diesel ou caténaire, rhéostat) au pas de temps d'indice k
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

II.3.2. Taille du modèle de dimensionnement

✓ *Choix du pas de discrétisation temporelle*

Notre objectif est d'utiliser les systèmes de stockage embarqués pour fournir une partie de la puissance demandée par les trains afin d'améliorer le rendement (train diesel) ou de réduire les chutes de tension (train électrique). Ainsi, si le système de stockage vient en support, il fournit une puissance pendant une durée dt correspondant au pas de discrétisation temporelle. Par exemple, si ce pas est de 5min, alors la même puissance est fournie pendant 5min. En conséquence, une importante quantité d'énergie est nécessaire, ce qui peut mener à un surdimensionnement du système de stockage. Ainsi, il est nécessaire que la mission ferroviaire ait un pas de discrétisation temporelle de l'ordre de la seconde ou de la dizaine de secondes.

✓ *Impact sur la mémoire et le temps de calcul*

L'optimisation se fait sur la mission ferroviaire complète, les variables du modèle sont donc des variables temporelles échantillonnées dans le temps avec un pas dt . Chaque source d'énergie est caractérisée par un couple {puissance ; énergie} et ce couple doit être déterminé à chaque instant. La taille du modèle dépend donc de la durée du cas d'étude. Plus la mission ferroviaire a un grand nombre de pas de temps, plus la taille des vecteurs est grande. La mémoire morte occupée ainsi que le temps de calcul vont donc être fortement influencés par la taille du cycle temporel.

II.4. DIMENSIONNEMENT PAR OPTIMISATION COMBINANT GESTION ENERGETIQUE ET DIMENSIONNEMENT

Les valeurs des variables de dimensionnement ont une influence sur la gestion énergétique. Par exemple, le nombre de cellules du système de stockage conditionne sa puissance de charge ou de décharge. La gestion énergétique doit respecter ces restrictions lorsqu'elle détermine les profils {puissance ; énergie} de chaque source.

A l'inverse, la gestion énergétique permet de choisir le dimensionnement des sources. En effet, à partir du profil de puissance, il est possible de déduire les caractéristiques propres à un cycle temporel (puissance maximale, puissance moyenne, énergie utile) qui sont déterminantes pour connaître la taille d'une source d'énergie.

Ainsi, pour tenir compte de cette influence mutuelle, nous avons choisi d'intégrer cette gestion dans le modèle de dimensionnement. Celle-ci doit respecter l'équation (II.7). De plus, elle doit satisfaire un critère bien choisi qui dépend du cas d'application (thermique ou

électrique). Pour fonctionner, elle a besoin de connaître les capacités de chacune des sources d'énergie. Ainsi, les variables de dimensionnement des sources sont une entrée du modèle. La gestion énergétique utilise ces données ainsi que celles de la mission ferroviaire pour déterminer le profil {puissance ; énergie} de chaque source. Il est alors possible d'en déduire l'exploitation du train (énergie consommée, coût d'exploitation, etc). De cette manière, le calcul de la fonction objective tient compte des coûts d'investissement mais aussi des coûts d'exploitation (cf. Figure II.10).

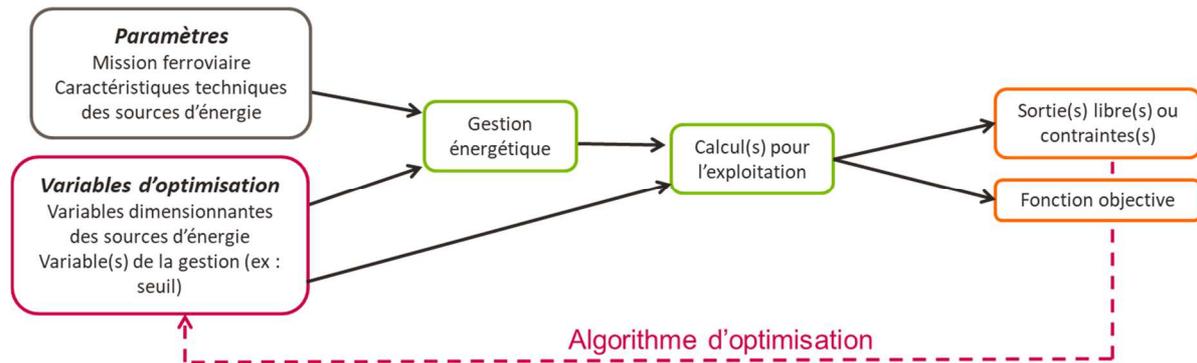


Figure II.10 : Principe de l'optimisation combinée

II.5. CONCLUSION

Notre objectif est de déterminer le pré-dimensionnement des systèmes de stockage embarqués à bord d'un train hybride diesel ou électrique. Nous avons choisi de résoudre le problème à l'aide d'une méthode d'optimisation. D'autre part, le trajet effectué par le train (mission ferroviaire) est pris en compte, ce qui impacte fortement la taille du problème d'optimisation. Ainsi, nous avons choisi de résoudre le problème avec l'algorithme SQP en raison de sa robustesse et de sa capacité à gérer un grand nombre de variables et de contraintes.

De plus, la gestion énergétique est intégrée à ce modèle. Cela permet, pour chaque itération de l'algorithme et donc pour chaque dimensionnement, d'avoir la gestion énergétique adaptée à ce dimensionnement. Les conséquences de l'exploitation du train peuvent alors être intégrées à la fonction objective plutôt que d'être déterminées a posteriori par une gestion qui fera au mieux pour le dimensionnement donné.

Chaque mode d'alimentation (diesel ou électrique) est à l'origine de problématiques différentes (cf. le paragraphe I.3) qui impacte la formulation du problème et sa modélisation. Pour la suite, le Chapitre III présente la modélisation dans le cas de la traction diesel et le Chapitre IV dans le cas de la traction électrique.

Chapitre III : Dimensionnement par optimisation pour la traction hybride diesel-électrique

III.1. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS

Ce chapitre présente le modèle d'un train hybride diesel-électrique. L'hybridation de ce type de train a pour objectif de réduire la sollicitation du groupe diesel permettant ainsi de réduire la consommation de carburant et de diminuer les émissions de CO₂, le bruit et les coûts de maintenance.

Le train est étudié de manière isolée (nous ne prenons pas en compte les autres trains qui circulent sur la ligne car ils n'impactent pas les transferts d'énergie du train). La partie III.3 présente la modélisation des sources d'énergies (groupe diesel et système de stockage) et la partie III.4 introduit les deux gestions étudiées pour cet applicatif (gestion à base de règles et programmation dynamique). Finalement, la dernière partie (III.5) présente le modèle orienté pour l'optimisation.

L'ensemble des équations modélisant le train hybride diesel-électrique sont rassemblées dans l'annexe A.2.1, seules les principales équations sont présentées dans le chapitre.

III.2. ARCHITECTURE DU TRAIN

Pour hybrider le train, nous ajoutons à la chaîne de traction d'un train diesel-électrique conventionnel (cf. Figure I.5), des systèmes de stockage connectés au bus continu par le biais d'un convertisseur statique (cf. Figure III.1). Nous avons fait le choix d'une modélisation en flux d'énergie (cf. I.6.2). En conséquence, les sources sont caractérisées par leur puissance et énergie, et la gestion énergétique se fera sur les échanges de puissances au niveau du bus continu.

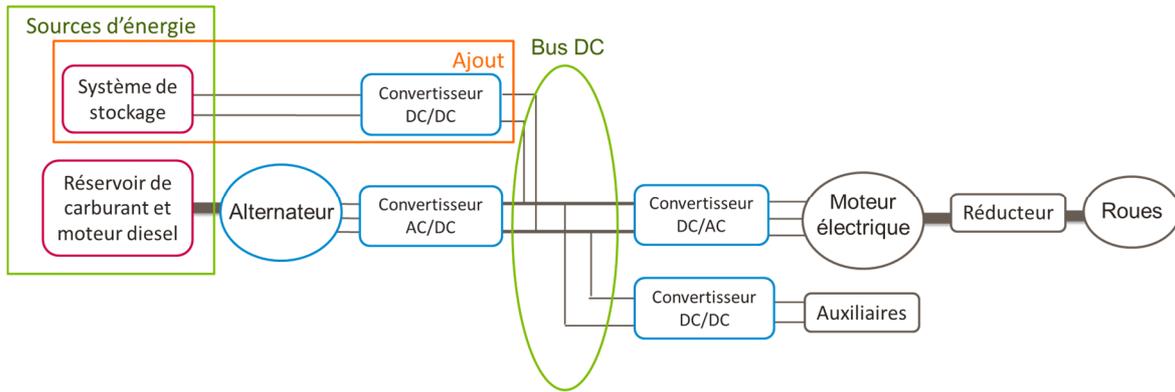


Figure III.1 : Architecture du train hybride diesel-électrique

Pour effectuer le dimensionnement de ce système, il faut modéliser :

- le système de stockage,
- le groupe diesel.

Les différents convertisseurs statiques seront représentés par des rendements.

III.3. MODELISATION DES SOURCES D'ENERGIES

III.3.1. Modélisation du groupe diesel

III.3.1.1. Moteur et groupe de refroidissement

Le moteur et le groupe de refroidissement d'un groupe diesel sont caractérisés par la puissance nominale du moteur diesel. En effet, il est possible de calculer, à l'aide de fonctions d'extrapolations, la masse, le volume et le coût d'un groupe diesel en fonction de sa puissance nominale [17]. Cette donnée est donc la variable dimensionnante de la source d'énergie. Nous reprenons les formules développées par [17] pour le calcul de la masse, du volume et du coût. Les équations concernant le groupe de refroidissement sont données dans l'annexe A.2.1 (cf. les équations (A.2) et (A.4)).

✓ *Volume du moteur*

$$Vol_{mot} = 0.03 * \frac{P_{genom}}{1000} + 0.09 \quad (III.1)$$

où :

P_{genom}	(en W)	Puissance nominale du groupe diesel
Vol_{mot}	(en m ³)	Volume du moteur diesel

✓ **Masse du moteur**

$$M_{moteur} = 0.0037 * P_{genom} + 238.66 \quad (III.2)$$

où :

M_{moteur}	(en kg)	Masse du moteur diesel
--------------	---------	------------------------

✓ **Coût d'investissement du moteur**

$$Cout_{inv,ge} = 0.28 * P_{genom} + 4.5 \quad (III.3)$$

$Cout_{inv,ge}$ (k€) est le coût d'investissement du groupe diesel

III.3.1.2. Consommation de carburant

✓ **Consommation de carburant sur une mission**

Les caractéristiques du carburant (coût, masse et volume) dépendent de la quantité embarquée. Celle-ci est déterminée à partir du carburant consommé au cours de la mission ferroviaire mais aussi en fonction de l'autonomie demandée au train. La consommation sur la mission peut être calculée au moyen d'une cartographie liant la consommation à la puissance du train. En effet, selon la puissance demandée, le rendement du moteur diesel varie : plus la puissance fournie est proche de la puissance nominale du moteur, meilleur est le rendement. Cependant, chaque groupe diesel a une cartographie qui lui est propre en fonction de sa puissance nominale. Or, l'objectif est de dimensionner cette source d'énergie, autrement dit de déterminer la valeur de la puissance nominale. En conséquence, nous ne connaissons pas à l'avance quelle sera la taille du groupe diesel et donc quelle est la cartographie à utiliser.

Ainsi, nous utilisons une fonction normalisée permettant de calculer, pour tout train diesel-électrique, la consommation de carburant selon la puissance demandée par le train et selon sa puissance nominale (cf. Figure III.2 et l'équation (III.5)). La méthode permettant de trouver cette fonction normalisée est présentée à l'annexe A.2.1.

Pour notre application, nous avons utilisé la fonction suivante :

$$\begin{aligned} f_{co}(P_{genom}, P_{ge}(k), C_{sn}) \\ = C_{sn} \\ * \left[-5.58 * \left(\frac{P_{ge}(k)}{P_{ge,nom}} \right)^5 + 19.7 * \left(\frac{P_{ge}(k)}{P_{ge,nom}} \right)^4 - 27.22 * \left(\frac{P_{ge}(k)}{P_{ge,nom}} \right)^3 \right. \\ \left. + 18.57 * \left(\frac{P_{ge}(k)}{P_{ge,nom}} \right)^2 - 6.44 * \left(\frac{P_{ge}(k)}{P_{ge,nom}} \right) + 1.94 \right] * \frac{P_{ge}(k)}{1000 * 3600} \end{aligned} \quad (III.4)$$

où :

C_{sn}	(en g/kWh)	Consommation nominale
$P_{ge}(k)$	(en W)	Puissance fournie par le groupe diesel au pas de temps d'indice k
$P_{ge,nom}$	(en W)	Puissance nominale du groupe diesel
$f_{co}(P_{genom}, P_{ge}(k), C_{sn})$	(en g)	Consommation du groupe diesel au pas de temps d'indice k
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

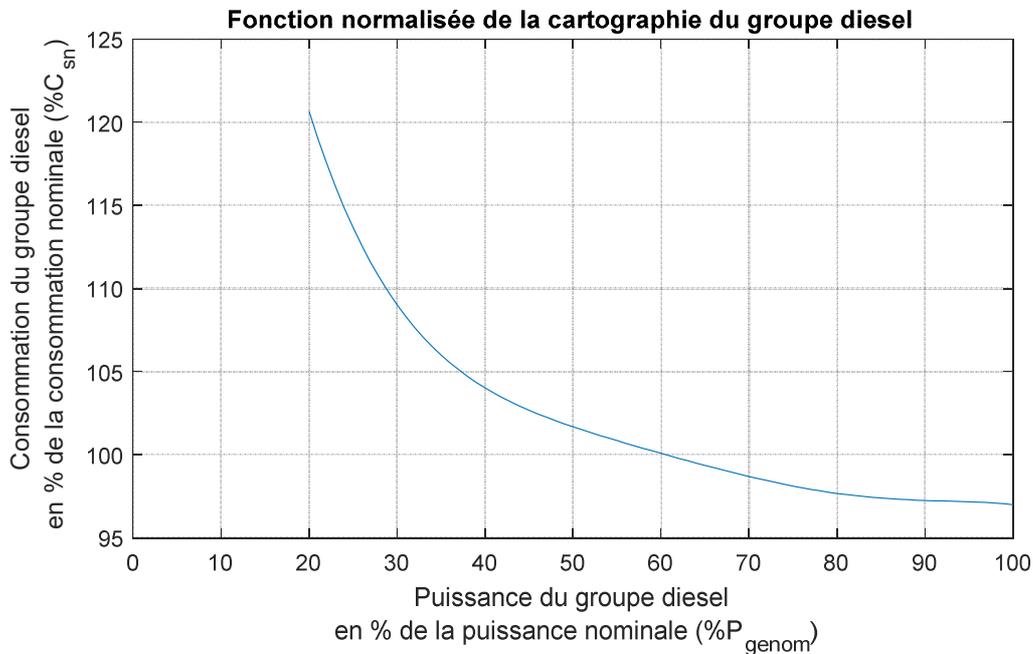


Figure III.2 : Fonction normalisée de la cartographie

Cette fonction n'est valable que lorsque la puissance est entre 20% et 100% de la puissance nominale du groupe diesel. En-dessous de 20%, on considère que la consommation est fixée à sa valeur maximale. Lorsque le groupe diesel tourne à vide (la puissance fournie correspond à celle des pertes), la consommation est minimale (1g/s). En conclusion, la consommation suit la loi suivante :

$$Conso_{ge}(k) = \begin{cases} f_{co}(P_{genom}, P_{ge}(k), C_{sn}) & \text{si } 20\%P_{genom} \leq P_{ge}(k) \leq 100\%P_{genom} \\ C_{smax} & \text{si } 0 < P_{ge}(k) < 20\%P_{genom} \\ C_{smin} * dt & \text{si } P_{ge}(k) = 0 \end{cases} \quad (III.5)$$

où :

C_{smax}	(en g)	Consommation maximale
C_{smin}	(en g/s)	Consommation à vide
dt	(en s)	Pas de temps

La consommation totale sur toute la mission est alors :

$$Conso_{mission} = \sum_{k=1}^N Conso_{ge}(k) \quad (III.6)$$

où :

$Conso_{ge}(k)$	(en g)	Consommation du groupe diesel au pas de temps d'indice k
$Conso_{mission}$	(en g)	Consommation totale sur la mission ferroviaire choisie
N	-	Nombre de pas de temps de la mission ferroviaire

Afin de réduire la consommation, nous avons introduit une fonction de « stop – and –start ». Lorsque le groupe diesel tourne à vide pendant un temps jugé suffisamment long (valeur choisie), nous considérons qu'il est possible de couper cette source d'énergie. La consommation de carburant est donc nulle lorsque le groupe diesel est à l'arrêt.

✓ Carburant embarqué

Grâce à ce qui précède, nous sommes en mesure de connaître la consommation de carburant de la mission ferroviaire. Cependant, la durée de l'étude ne correspond pas nécessairement à l'autonomie du train. En effet, le cas d'étude peut concerner le trajet entre une gare A et une gare B mais en pratique le train peut continuer son trajet jusqu'à une gare C sans remplir son réservoir. Il nous faut donc embarquer le carburant nécessaire pour assurer l'autonomie requise. Cette autonomie est donnée en nombre de kilomètres à parcourir. Nous faisons l'hypothèse que la même mission est répétée autant de fois que nécessaire afin que le train accomplisse le même nombre de kilomètres que ceux demandés par l'autonomie (cf. Figure III.3). La vitesse étant connue, la distance parcourue au cours de la mission est de :

$$Distance = \sum_{k=1}^N \frac{v(k) * dt}{3600} \quad (III.7)$$

où :

$v(k)$	(en km/h)	Vitesse de la mission au pas de temps d'indice k
dt	(en s)	Pas de temps de la mission
N	-	Nombre de pas de temps de la mission ferroviaire
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle
$Distance$	(en km)	Distance totale parcourue au cours de la mission

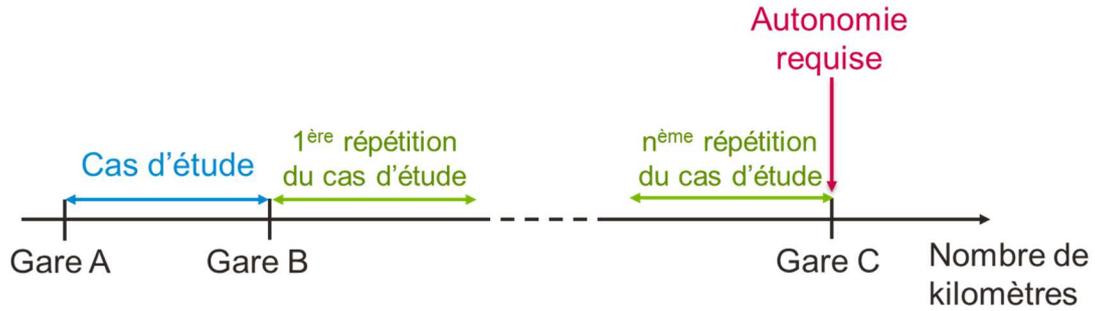


Figure III.3 : Cas d'étude et autonomie

Le nombre de mission correspondant à l'autonomie désirée est alors :

$$nb_{mission} = \frac{Autonomie_{KM}}{Distance} \quad (III.8)$$

où :

$Autonomie_{KM}$	(en km)	Autonomie demandée
$nb_{mission}$	-	Nombre de fois qu'il faut répéter la mission pour parcourir le nombre de kilomètres demandés par l'autonomie

Par conséquent, la quantité totale de carburant embarqué est de :

$$Carburant_{emb} = Conso_{mission} * nb_{mission} \quad (III.9)$$

où :

$Carburant_{emb}$	(en g)	Quantité totale de carburant embarqué pour avoir l'autonomie demandée
$Conso_{mission}$	(en g)	Consommation de carburant au cours de la mission
$nb_{mission}$	-	Nombre de fois qu'il faut répéter la mission pour parcourir le nombre de kilomètres demandés par l'autonomie

✓ *Volume, masse et coût du carburant*

Une fois que la quantité de carburant à embarquer est connue, il est possible d'en déduire son volume et sa masse :

$$Vol_{fuel} = \frac{Carburant_{emb}}{\rho_{diesel} * 1000} \quad (III.10)$$

$$M_{fuel} = \frac{Carburant_{emb}}{1000} + M_{contvide} * \frac{Carburant_{emb}}{\rho_{diesel}} \quad (III.11)$$

où :

$Carburant_{emb}$	(en g)	Quantité totale de carburant embarqué
ρ_{diesel}	(en kg/m ³)	Masse volumique du diesel
$M_{contvide}$	(en kg/L)	Masse à vide du réservoir par litre de carburant embarqué

Vol_{fuel}	(en m ³)	Volume du carburant
M_{fuel}	(en kg)	Masse du carburant embarqué

Pour le calcul du coût, seul le coût d'exploitation de la mission nous intéresse. Celui-ci est défini par :

$$Cout_{conso}^{mission} = \frac{Conso_{mission}}{\rho_{diesel}} * Prix_{carburant} \quad (III.12)$$

où :

$Cout_{conso}^{mission}$	(en k€)	Coût de consommation de carburant pour la mission ferroviaire choisie
$Prix_{carburant}$	(en k€/L)	Prix d'achat du carburant
$Conso_{mission}$	(en g)	Consommation totale de carburant sur la mission

III.3.1.3. Groupe diesel

Le groupe diesel regroupe le moteur diesel, le groupe de refroidissement et le carburant avec son réservoir. Sa variable de dimensionnement est sa puissance nominale. Sa masse et son volume sont la somme des masses et volumes des sous-systèmes qui le composent.

Comme vu précédemment, son coût d'investissement est celui du moteur et du groupe de refroidissement (cf. équation (III.3)), tandis que son coût d'exploitation correspond au coût de consommation du carburant (cf. équation (III.12)).

$$Vol_{ge} = Vol_{mot} + Vol_{refroidisseur} + Vol_{fuel} \quad (III.13)$$

$$M_{ge} = M_{moteur} + M_{fuel} + M_{refroidisseur} \quad (III.14)$$

où :

Vol_{mot}	(en m ³)	Volume du moteur diesel
$Vol_{refroidisseur}$	(en m ³)	Volume du groupe de refroidissement
Vol_{fuel}	(en m ³)	Volume du carburant embarqué
Vol_{ge}	(en m ³)	Volume global du groupe diesel
M_{fuel}	(en kg)	Masse du carburant embarqué
M_{moteur}	(en kg)	Masse du moteur à vide
$M_{refroidisseur}$	(en kg)	Masse du groupe de refroidissement
M_{ge}	(en kg)	Masse globale du groupe diesel

III.3.2. Modélisation des systèmes de stockage

Les systèmes de stockage sont modélisés au moyen de leur énergie et puissance. La puissance du système de stockage est déterminée par la gestion pour chaque pas de temps (cf. III.4). L'énergie du système est alors déduite selon l'équation :

$$E_{ESS}(k+1) = -dt * \frac{P_{ESS}(k)}{3600} + E_{ESS}(k) \quad (III.15)$$

où :

$P_{ESS}(k)$	(en W)	Puissance du système de stockage au pas de temps d'indice k (convention générateur : la puissance est positive en décharge, négative en charge)
$E_{ESS}(k)$	(en Wh)	Energie du système de stockage au pas de temps d'indice k
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle
dt	(en s)	Pas de temps de la mission

Afin de déterminer le profil de puissance du système de stockage, la gestion a besoin de connaître ses capacités énergétiques ainsi que ses capacités en puissance de charge et de décharge. Ces grandeurs sont calculées à l'aide du nombre de cellules et des caractéristiques du système de stockage :

$$P_{ESS,max}^{dch} = nb_{ESS} * P_{ESS,cell}^{dch} \quad (III.16)$$

$$P_{ESS,max}^{ch} = nb_{ESS} * P_{ESS,cell}^{ch} \quad (III.17)$$

$$E_{ESS,min} = (1 - DoD) * nb_{ESS} * E_{ESS}^{cell} \quad (III.18)$$

$$E_{ESS,max} = nb_{ESS} * E_{ESS}^{cell} \quad (III.19)$$

où :

nb_{ESS}	-	Nombre de cellules du système de stockage
$P_{ESS,cell}^{dch}$	(en W/cellule)	Puissance en décharge d'une cellule du système de stockage
$P_{ESS,max}^{dch}$	(en W)	Puissance en décharge du système de stockage
$P_{ESS,cell}^{ch}$	(en W/cellule)	Puissance en charge d'une cellule du système de stockage
$P_{ESS,max}^{ch}$	(en W)	Puissance en charge du système de stockage
E_{ESS}^{cell}	(en Wh/cellule)	Energie d'une cellule du système de stockage
DoD	-	Profondeur de décharge maximale autorisée
$E_{ESS,min}$	(en Wh)	Energie minimale autorisée du système de stockage
$E_{ESS,max}$	(en Wh)	Energie maximale du système de stockage

Le nombre de cellules permet aussi de déterminer le volume, la masse et le coût d'investissement de ce système. Ces équations sont détaillées à l'annexe A.2.1 (cf. les équations (A.22) à (A.24)).

Nous avons vu au Chapitre I que pour notre application, nous utiliserons comme système de stockage soit des batteries, soit des supercondensateurs, soit une association des deux. Le Tableau III.1 rassemble les formules permettant de calculer la puissance et l'énergie caractéristique par cellule pour chacun de ces systèmes [17].

Tableau III.1 : Energie et puissance caractéristique par cellule des batteries et supercondensateurs

Système de stockage	Energie caractéristique par cellule (Wh)	Puissance caractéristique par cellule (W)
Batteries	$E_{BT}^{cell} = C_0 * V_0$	$P_{BT,cell}^{dch} = I_{dcho} * V_0$ et $P_{BT,cell}^{ch} = I_{cho} * V_0$
Supercondensateurs	$E_{SC}^{cell} = \frac{C * V_r^2}{2 * 3600}$	$P_{SC}^{cell} = \frac{0.12 * V_r^2}{ESR_{dc}}$

où :

C_0	(en Ah/ cellule)	Capacité nominale d'une cellule de batterie
V_0	(en V/cellule)	Tension nominale d'une cellule de batterie
I_{dcho}	(en A/cellule)	Courant de décharge nominale d'une cellule de batterie
I_{cho}	(en A/cellule)	Courant de charge nominale d'une cellule de batterie
V_r	(en V/cellule)	Tension nominale d'une cellule de supercondensateur
ESR_{dc}	(en Ω /cellule)	Résistance interne d'une cellule de supercondensateur
C	(en F/cellule)	Capacité d'une cellule de supercondensateur

III.3.3. Cas particulier des batteries (vieillessement)

III.3.3.1. Comptage des cycles

Contrairement aux supercondensateurs qui sont capables d'effectuer des millions de cycles sans perdre de leurs performances, les batteries voient leurs performances diminuer au bout d'un certain nombre d'années (vieillessement calendaire) et suite à un grand nombre de cycles de grande profondeur de décharge (vieillessement cyclique). La modélisation prend en compte ce vieillessement pour le calcul du coût global. En effet, les batteries en fin de vie doivent être remplacées, ce qui génère un coût de rachat et un coût de recyclage.

Afin de déterminer le vieillessement cyclique, il est nécessaire d'identifier les cycles effectués par les batteries. Il faut alors distinguer les microcycles d'un cycle complet car une série de microcycles peut cacher un cycle de grande profondeur de décharge qui sera plus dommageable. Le recensement des cycles s'effectue sur le profil de l'état de charge de la batterie :

$$SoC_{BT}(k) = \frac{E_{BT}(k)}{\max_k(E_{BT}(k))} \quad (III.20)$$

où :

$SoC_{BT}(k)$	-	Etat de charge du module de batteries au pas de temps d'indice k
$E_{BT}(k)$	(en Wh)	Energie stockée dans les batteries au pas de temps d'indice k
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

Une fois l'état de charge connu, les cycles ainsi que leur profondeur de décharge sont comptés à l'aide d'un algorithme de type « rainflow » [73] (celui qui est implémenté dans le modèle est inspiré de [74]). L'algorithme rainflow commence par compter les cycles complets, puis, les extrema de l'état de charge qui ne font pas partie d'un cycle complet sont reliés entre eux pour former des demi-cycles.

Un cycle est dit « complet » lorsque sa pente est moins abrupte que la pente qui le précède et que la pente qui le suit (cf. Figure III.4). L'annexe A.2.3 détaille les calculs effectués par l'algorithme rainflow.

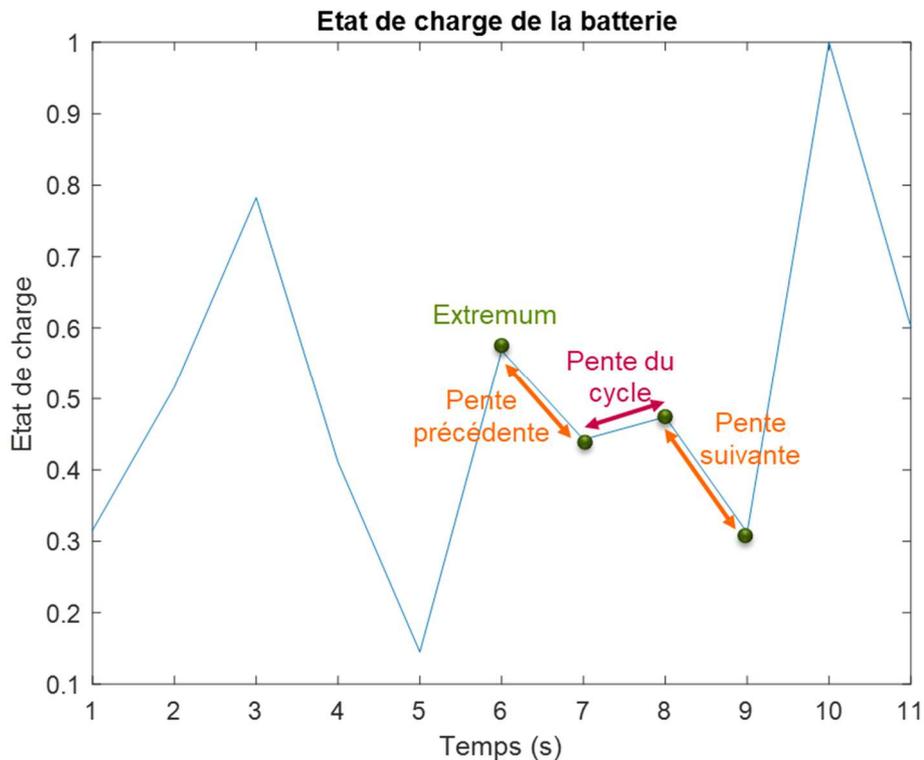


Figure III.4 : Cycle complet

Dans cet exemple, nous obtenons alors les cycles suivants :

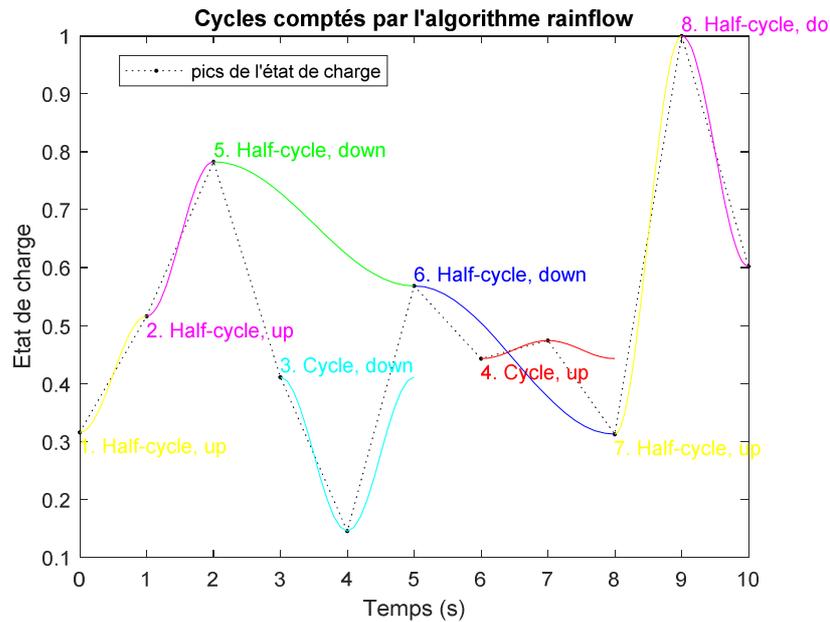


Figure III.5 : Rainflow

Il existe de nombreuses études pour prendre en compte le vieillissement des batteries telles que [75], [76]. Pour notre application, nous avons fait le choix d'implanter deux modèles de vieillissement pour différentes technologies de batteries :

- le premier modèle présenté par [77] s'applique aux batteries de types NiMH
- le second modèle présenté par [78] concerne les batteries de type Li-ion.

Pour la suite, nous définissons la vie des batteries comme étant une variable comprise entre 0 et 1 (1 étant une vie « complète » : les batteries sont neuves, et 0 lorsque les batteries ne sont plus utilisables). Nous définissons aussi L_{conso} comme étant la quantité de vie « consommée » par l'usage. La vie restante des batteries est alors :

$$L_{rest} = 1 - L_{conso} \quad (III.21)$$

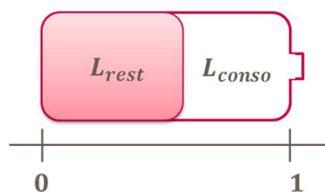


Figure III.6 : Vie consommée et vie restante

III.3.3.2. Modèle de vieillissement pour batteries de type NiMH

Lorsque les batteries effectuent un cycle d'une profondeur de décharge DoD , la vie de la batteries est en partie réduite :

$$L_{conso}(DoD) = DoD * C_0 \quad (III.22)$$

où :

$L_{conso}(DoD)$	Ah	Quantité de vie « consommée » par la profondeur de décharge DoD
C_0	(en Ah)	Capacité nominale initiale de la batterie

Une étude précédente [17] a montré que le nombre maximum de cycles que pouvait réaliser une batterie NiMH au cours de sa durée de vie dépendait de la profondeur de décharge du cycle (nous considérons que la température est fixe à 25°C et que la batterie effectue toujours le même cycle de profondeur DoD). Les deux variables sont liées par la relation :

$$nb_{cycle}(DoD) = 965.73 * DoD^{-2.3748} \quad (III.23)$$

Où nb_{cycle} est le nombre maximal de cycles que peut réaliser la batterie au cours de sa vie pour la profondeur de décharge DoD .

Par conséquent, pour une profondeur de décharge donnée, la vie « possible » d'une batterie est déterminée par l'équation (III.24).

$$L_{cycle}(DoD) = nb_{cycle}(DoD) * DoD * C_0 \quad (III.24)$$

où :

nb_{cycle}	-	Nombre maximal de cycles que peut réaliser la batterie au cours de sa vie pour la profondeur de décharge DoD
C_0	(en Ah)	Capacité nominale initiale de la batterie
L_{cycle}	Ah	Quantité de vie totale d'une batterie pour la profondeur de décharge DoD .

En conclusion, en fin de mission, il est possible d'évaluer la vie restante du module de batteries par :

$$L_{res} = L_{start} - \sum_{i=0}^M \frac{L_{conso}(DoD(i))}{L_{cycle}(DoD(i))} \quad (III.25)$$

où :

L_{res}	-	Indicateur de vie résiduelle du module de batterie en fin de mission ($\in [0 ; 1]$)
L_{start}	-	Indicateur de vie du module de batteries en début de mission (est égale à 1 lorsque les batteries sont neuves)

$L_{cycle}(DoD(i))$	Ah	Quantité de vie totale d'une batterie pour la profondeur de décharge $DoD(i)$.
$L_{conso}(DoD(i))$	Ah	Quantité de vie « consommée » par la profondeur de décharge $DoD(i)$
M	-	Nombre de cycles

En appliquant (III.25) et connaissant le nombre de missions effectuées chaque année, il est possible de connaître la vie résiduelle des batteries en fin d'année. Ainsi, l'année au cours de laquelle les batteries sont en fin de vie ($L_{res} = 0$) est l'année où il est nécessaire de réinvestir dans un nouveau pack.

III.3.3.3. Modèle de vieillissement pour batteries de type Li-Ion

Le modèle présenté précédemment s'applique pour des batteries de types NiMH. Cependant, bien que ces batteries aient déjà été utilisées en ferroviaire, les batteries de type Li-Ion sont de plus en plus employées. Ainsi, le modèle développé par [79]-[80] et mis en forme par [78] concernant les batteries Li-ion est aussi implanté.

Ce modèle est construit afin de prendre en compte la formation de l'interface électrode/électrolyte (couche de passivation) et l'effet de la perte de lithium sur la dégradation. La fonction traduisant ce phénomène est :

$$L_{rest} = 1 - (p_{SEI}e^{-r_{SEI}f_d} + (1 - p_{SEI})e^{-f_d}) \quad (III.26)$$

où :

L_{rest}	-	Quantité de vie restante dans les batteries après une mission
p_{SEI}	-	Portion de lithium consommée dans la formation de l'interface d'électrolyte solide
r_{SEI}	-	Ratio constant de de dégradation
f_d	-	Fonction linéarisée de dégradation (cyclique et calendaire)

Les valeurs des coefficients sont rassemblées dans l'annexe A.2.4.

La fonction de dégradation est la somme de la fonction de dégradation cyclique et de la fonction de dégradation calendaire :

$$f_{cycle} = \sum_i^M f_{DOD}(DOD(i)) * f_{SoC}(SoC(i)) * f_c(C(i)) * n(i) \quad (III.27)$$

$$f_{cal} = K_t * dt * f_{SoC}(SoC_{avg}) \quad (III.28)$$

où :

f_{cycle}	-	Fonction de dégradation par cycle (quantité de « vie » perdue en raison des cycles effectués)
-------------	---	---

f_{DOD}	-	Fonction de dégradation due à la profondeur de décharge
f_{SOC}	-	Fonction de dégradation liée à l'état de charge
f_C	-	Fonction de dégradation liée à la capacité
n	-	Cycle complet (égal à 1) ou demi-cycle (égal à 0.5) défini par l'algorithme de rainflow
f_{cal}	-	Fonction de vieillissement calendaire
K_t	(en s^{-1})	coefficient de vieillissement calendaire
dt	(en s)	Pas de temps de la mission
SoC_{avg}	-	Etat de charge moyen au cours de la mission
M	-	Nombre de cycles

Les différentes fonctions de dégradation liées à la profondeur de décharge, à l'état de charge et à la capacité sont détaillées à l'annexe A.2.1 (cf. les équations (A.34) à (A.37)).

Ce modèle permet de déterminer quel est l'état du module de batteries en fin de mission. De même que pour le modèle de vieillissement précédent, en connaissant le nombre de missions effectuées chaque année, il est possible de déterminer l'état des batteries en fin d'année. Lorsque les batteries sont entièrement utilisées ($L_{res} = 0$) alors il est nécessaire de les changer.

III.4. GESTIONS ENERGETIQUES

III.4.1. Gestion à base de règles

La gestion à base de règles (rule-based management) est beaucoup utilisée en industrie. Elle demande d'avoir une bonne connaissance du système ainsi que des forces et faiblesses de chacune des sources d'énergie. Cela permet de construire un raisonnement « intelligent » de gestion (smart-algorithm) pour guider le fonctionnement des sources. Dans le cas étudié, il s'agit de minimiser la consommation du carburant au cours de la mission. Or, cette consommation est réduite lorsque le groupe diesel fonctionne autour de son point de puissance nominale (point de meilleur rendement, pour des puissances entre 60% et 100% de la puissance nominale comme nous l'avons vu au paragraphe III.3.1.2 notamment sur la Figure III.2) et est minimale lorsque le groupe diesel est à l'arrêt. Par conséquent, l'objectif de cette gestion sera d'utiliser au maximum le groupe diesel à sa puissance nominale ou à le stopper. Les systèmes de stockages seront alors utilisés pour servir d'ajustement de puissance (en charge ou décharge).

✓ *Traction*

En traction, nous distinguons trois cas selon le niveau de puissance demandée par le train :

Tableau III.2 : Mode de fonctionnement en traction pour la gestion par règles

Mode	Puissance (W)	Source(s) sollicitée(s)
Traction combinée	$P_{train} > P_{genom}$	Groupe diesel et système de stockage (en décharge)
Traction électrique	$P_{train} < 60\%P_{genom}$	Système de stockage si possible sinon groupe diesel avec charge éventuelle du système de stockage
Traction et recharge	$P_{train} \in [60\% ; 100\%]P_{genom}$	

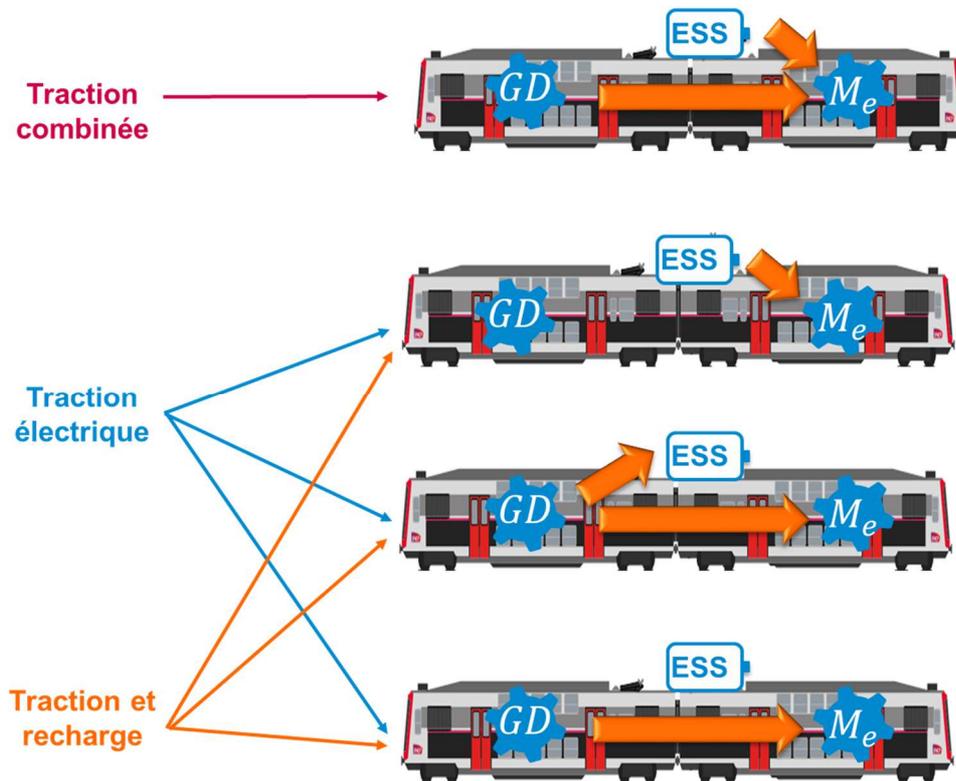
P_{genom} (W) est la puissance nominale du groupe diesel et P_{train} (W) la puissance du train.

Dans le cas d'une demande en puissance très importante ($P_{train} > P_{genom}$), les sources répondent toutes à la demande ($P_{ESS} + P_{ge}$). Pour des puissances plus faibles ($P_{train} < P_{genom}$), le système de stockage est incité en premier à répondre à la demande afin de pouvoir stopper le groupe diesel.

- 1) S'il n'en n'a pas les capacités en **puissance** alors le groupe diesel prend le relais. Pour maximiser le rendement, il est incité tout d'abord à fonctionner à sa puissance nominale et le système de stockage stocke le surplus d'énergie générée. Si ce surplus ne peut être stocké alors le groupe diesel fournit uniquement la puissance demandée par le train (P_{train}) et donc n'est pas à son meilleur rendement.
- 2) Dans le cas où le système de stockage n'a pas la capacité de répondre à la demande pour des raisons **énergétiques** (niveau d'énergie trop bas), alors le groupe diesel va prendre le relais de la même manière, et nous imposons une phase de recharge du système de stockage. Pour les prochains pas de temps, le groupe diesel est incité à fonctionner le plus souvent possible à sa puissance nominale afin de répondre à la demande et de recharger le système de stockage. Cette phase de recharge dure tant que le stockeur n'est pas rechargé et tant que nous sommes en traction avec $P_{train} < P_{genom}$.

De plus, lorsque le train est à l'arrêt (en gare), nous imposons (pour des raisons de bruits et de qualité de l'air) que le groupe diesel soit coupé. Le système de stockage doit alors fournir seul la puissance demandée (qui est celle des auxiliaires).

Les différents modes de la gestion sont présentés sur la Figure III.7.



GD = groupe diesel
 ESS = système de stockage embarqué
 M_e = moteur électrique

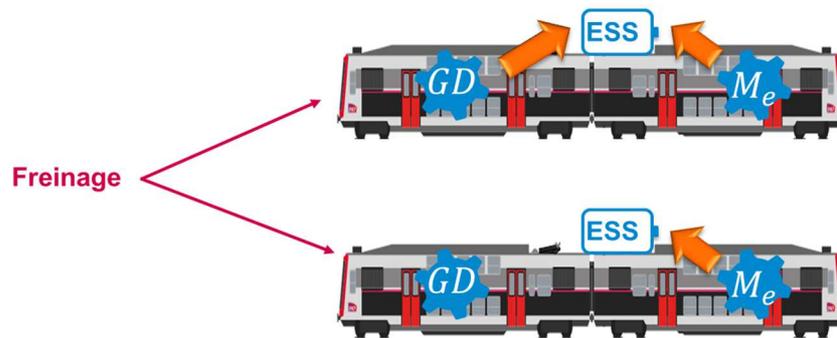
Figure III.7 : Gestion par règles en traction

Cependant, il est important de prendre en compte le fait que la charge et la décharge du système de stockage engendrent des pertes et que c'est le groupe diesel qui charge le stockeur. Ainsi il faut trouver le bon compromis entre : la puissance nominale du groupe diesel, le rendement charge/décharge du système de stockage et les coûts engendrés (investissement et exploitation des sources d'énergie).

✓ Freinage

Dans le cas du freinage, il est possible de stocker cette énergie dans le système de stockage sous condition que la puissance de freinage reste inférieure à la puissance de charge du stockeur. De plus, nous imposons de terminer avec le même état de charge au début et en fin de mission. En conséquence, lors de freinage de très faible puissance, le groupe diesel peut être appelé à fonctionner à sa puissance nominale afin de recharger le système de stockage si son niveau d'énergie est bas. Pour des puissances de freinage supérieures à la puissance de charge du

stockeur, le surplus est dissipé dans un rhéostat. Les différents modes de la gestion sont présentés sur la Figure III.8.



GD = groupe diesel
 ESS = système de stockage embarqué
 M_e = moteur électrique

Figure III.8 : Gestion par règles en freinage

Cette gestion a été développée par Charley LANNELUC durant son stage de fin d'étude d'école d'ingénieur. Elle est détaillée en annexe A.2.5.

III.4.2. Gestion par programmation dynamique

III.4.2.1. Principe de la méthode

La programmation dynamique utilise une variable d'état et cherche à établir son profil. Dans notre cas, nous avons sélectionné comme grandeur d'état : l'énergie du système de stockage (E_{ESS}). Il s'agit alors de déterminer l'évolution de cette énergie au cours de la mission ferroviaire. Pour choisir le chemin effectué par cette variable, la programmation dynamique utilise un critère qu'elle cherche à minimiser. Pour notre application, ce critère est la consommation de carburant que nous voulons réduire.

Cependant, la construction de ce profil doit tenir compte de la mission ferroviaire mais aussi des capacités en puissance (cf. III.4.2.2.1) et en énergie (cf. III.4.2.2.2) de chacune des sources (groupe diesel et système de stockage). De plus, la variable d'état est discrétisée dans l'espace et le niveau de discrétisation doit être choisi avec soin (cf. III.4.2.3). Notre objectif est donc de trouver le chemin optimal qui respecte les capacités des sources tout en ayant une consommation de carburant minimale. Pour cela, l'algorithme part d'un état final fixé et remonte par récursivité à l'état initial choisi en accumulant la consommation de carburant de chaque pas de temps. Le chemin optimal est celui qui a la consommation la plus faible (cf. III.4.2.4).

III.4.2.2. Limites de capacité des sources d'énergie

III.4.2.2.1. Bornes en puissance

Nous devons à tout instant fournir la puissance demandée par le train (cf. l'équation (II.7)). Cependant, chaque source est limitée par sa capacité. Dans le cas du groupe diesel, celui-ci ne peut fournir plus que sa puissance nominale et a toujours une puissance positive. Ainsi, pour chaque pas de temps de la mission ferroviaire, la puissance que fournit le groupe diesel est comprise entre les bornes décrites aux équations (III.29) et (III.30). La programmation dynamique doit tenir compte de ces limites dans sa recherche du chemin optimal. La grandeur d'état étant l'énergie du système de stockage, nous prenons en compte les rendements de cette source dans le calcul des limites imposées par le groupe diesel.

$$P_{ge,lim}^{max}(k) = \left\{ \begin{array}{ll} (P_{train}(k) - P_{ge,min}) * \eta_{ESS} & \text{si } P_{train}(k) \leq P_{ge,min} \\ \frac{P_{train}(k) - P_{ge,min}}{\eta_{ESS}} & \text{sinon} \end{array} \right\} \quad (III.29)$$

$$P_{ge,lim}^{min}(k) = \left\{ \begin{array}{ll} (P_{train}(k) - P_{ge,nom}) * \eta_{ESS} & \text{si } P_{train}(k) \leq P_{ge,nom} \\ \frac{P_{train}(k) - P_{ge,nom}}{\eta_{ESS}} & \text{sinon} \end{array} \right\} \quad (III.30)$$

où :

$P_{ge,lim}^{max}(k)$	(en W)	Borne maximale imposée par le groupe diesel au système de stockage au pas de temps d'indice k
$P_{train}(k)$	(en W)	Puissance demandée ou fournie par le train au pas de temps d'indice k
$P_{ge,min}$	(en W)	Puissance minimale du groupe diesel (égale à 0)
η_{ESS}	-	Rendement du système de stockage
$P_{ge,nom}$	(en W)	Puissance maximale du groupe diesel (sa puissance nominale)
$P_{ge,lim}^{min}(k)$	(en W)	Borne minimale imposée par le groupe diesel au système de stockage au pas de temps d'indice k
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

Dans le cas du système de stockage, la puissance qu'il fournit ou reçoit ne peut dépasser sa puissance maximale de décharge ou sa puissance maximale de charge. Nous pouvons alors déterminer la limite en puissance que doit respecter la programmation dynamique :

$$P_{ESS,lim}^{dch}(k) = \min(P_{ESS,max}^{dch}, P_{ge,lim}^{max}(k)) \quad (III.31)$$

$$P_{ESS,lim}^{ch}(k) = \max(P_{ESS,max}^{ch}, P_{ge,lim}^{min}(k)) \quad (III.32)$$

où :

$P_{ge,lim}^{max}(k)$	(en W)	Borne maximale imposée par le groupe diesel au système de stockage au pas de temps d'indice k
$P_{ESS,max}^{dch}$	(en W)	Puissance maximale de décharge du système de stockage
$P_{ESS,lim}^{dch}(k)$	(en W)	Borne maximale en puissance de décharge au pas de temps d'indice k pour la programmation dynamique
$P_{ESS,max}^{ch}$	(en W)	Puissance maximale de charge du système de stockage

$P_{ESS,lim}^{ch}(k)$	(en W)	Borne maximale en puissance de charge au pas de temps d'indice k pour la programmation dynamique
$P_{ge,lim}^{min}(k)$	(en W)	Borne maximale imposée par le groupe diesel au système de stockage au pas de temps d'indice k

III.4.2.2.2. Bornes en énergie

Le système de stockage est limité par une capacité énergétique maximale ($E_{ESS,max}$) et une énergie minimale ($E_{ESS,min}$) fixées selon une profondeur de décharge choisie. Cependant, l'état initial et l'état final étant fixés, il n'est pas possible de diverger « trop vite » de l'état initial, ni de converger « trop lentement » vers l'état final (limite de puissance de charge/décharge). Il y a donc une limite de divergence et de convergence en plus d'une limite d'énergie maximale et minimale.

La limite de divergence de l'état initial est définie par (cf. Figure III.9) :

$$E_{div}^{dch}(k) = E_{div}^{dch}(k-1) - dt * \frac{P_{ESS,lim}^{dch}(k-1)}{3600} \quad (III.33)$$

$$E_{div}^{ch}(k) = E_{div}^{ch}(k-1) - dt * \frac{P_{ESS,lim}^{ch}(k-1)}{3600} \quad (III.34)$$

où :

$E_{div}^{dch}(k)$	(en Wh)	Energie maximale de divergence du point initial en décharge du système de stockage au pas de temps d'indice k
$P_{ESS,max}^{dch}(k)$	(en W)	Borne maximale en puissance de décharge au pas de temps d'indice k pour la programmation dynamique
$E_{div}^{ch}(k)$	(en Wh)	Energie maximale de divergence du point initial en charge du système de stockage au pas de temps d'indice k
$P_{ESS,lim}^{ch}(k)$	(en W)	Borne maximale en puissance de charge au pas de temps d'indice k pour la programmation dynamique
dt	(en s)	Pas de temps de la mission

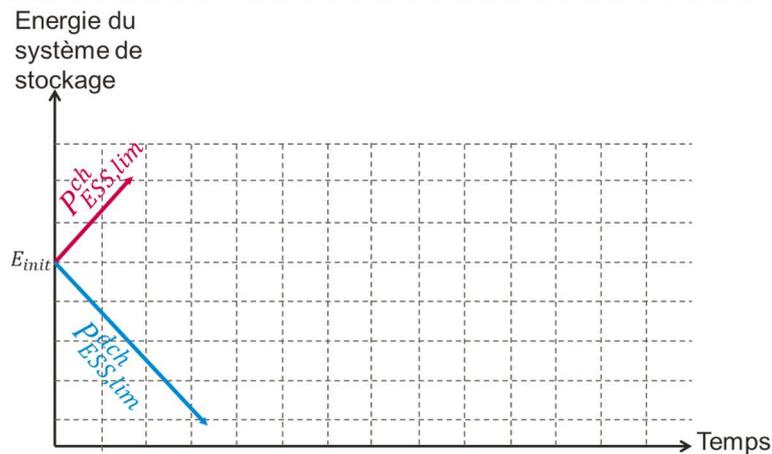


Figure III.9 : Limites de divergence

La limite de convergence vers l'état final est définie par (cf. Figure III.10) :

$$E_{conv}^{ch}(k) = E_{conv}^{ch}(k+1) + dt * \frac{P_{ESS,lim}^{ch}(k+1)}{3600} \quad (III.35)$$

$$E_{conv}^{dch}(k) = E_{conv}^{dch}(k+1) + dt * \frac{P_{ESS,lim}^{dch}(k+1)}{3600} \quad (III.36)$$

où :

$E_{conv}^{ch}(k)$	(en Wh)	Energie maximale de convergence vers le point final en charge du système de stockage au pas de temps d'indice k
$E_{conv}^{dch}(k)$	(en Wh)	Energie maximale de convergence vers le point final en décharge du système de stockage au pas de temps d'indice k

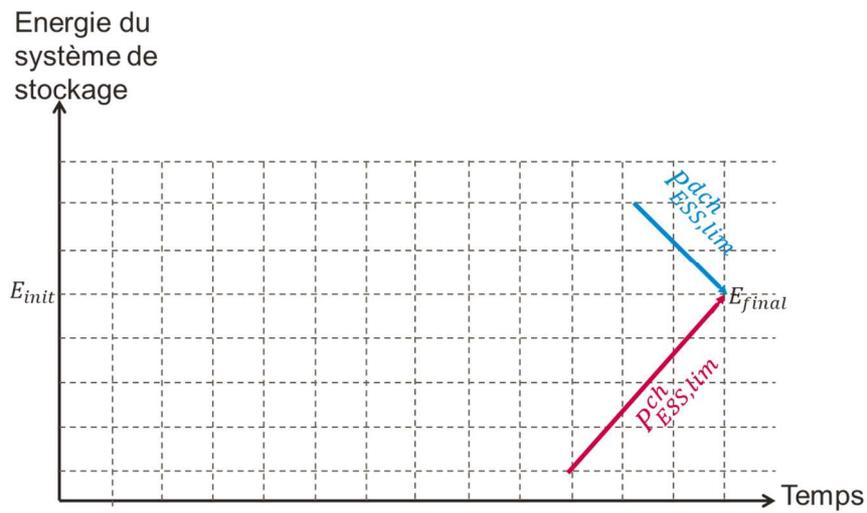


Figure III.10 : Limites de convergence

Finalement, les limites maximales et minimales sur l'énergie du système de stockage sont déterminées par (cf. Figure III.11) :

$$E_{min}(k) = \max(E_{div}^{dch}(k), E_{conv}^{ch}(k), E_{ESS,min}) \quad (III.37)$$

$$E_{max}(k) = \min(E_{div}^{ch}(k), E_{conv}^{dch}(k), E_{ESS,max}) \quad (III.38)$$

où :

$E_{min}(k)$	(en Wh)	Borne minimale de l'énergie au pas de temps d'indice k pour le maillage de la programmation dynamique
$E_{div}^{dch}(k)$	(en Wh)	Energie maximale de divergence du point initial en décharge du système de stockage au pas de temps d'indice k
$E_{ESS,min}$	(en Wh)	Capacité énergétique minimale du système de stockage
$E_{max}(k)$	(en Wh)	Borne maximale de l'énergie au pas de temps d'indice k pour le maillage de la programmation dynamique
$E_{div}^{ch}(k)$	(en Wh)	Energie maximale de divergence du point initial en charge du système de stockage au pas de temps d'indice k
$E_{ESS,max}$	(en Wh)	Capacité énergétique maximale du système de stockage

$E_{conv}^{ch}(k)$	(en Wh)	Energie maximale de convergence vers le point final en charge du système de stockage au pas de temps d'indice k
$E_{conv}^{dch}(k)$	(en Wh)	Energie maximale de convergence vers le point final en décharge du système de stockage au pas de temps d'indice k
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

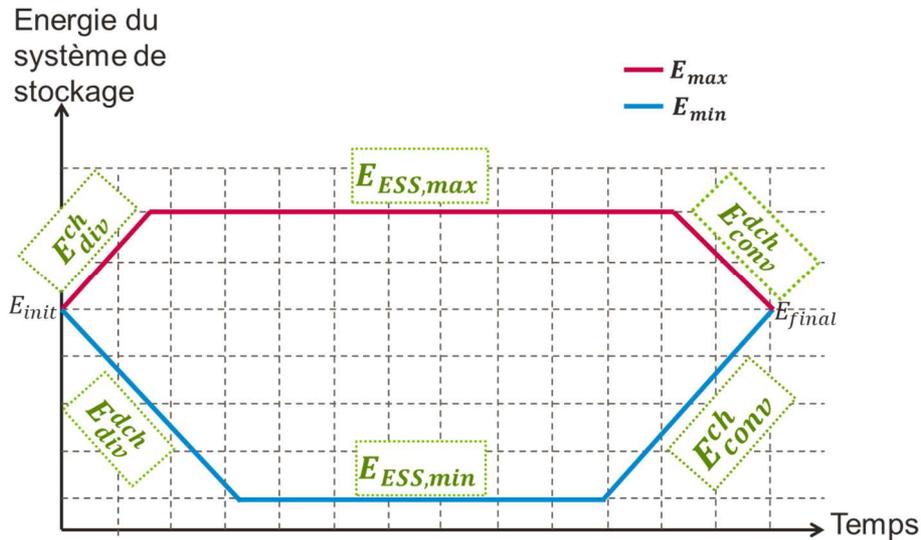


Figure III.11 : Limites énergétiques

III.4.2.3. Choix du maillage

La programmation dynamique cherche le profil de la grandeur d'état qui a la consommation de carburant la plus faible. Pour cela, la variable d'état (énergie du système de stockage) est discrétisée (maillée) entre sa borne maximale et sa borne minimale. Le choix du maillage est un point très délicat de la programmation dynamique. En effet, un maillage trop large ne laisse pas beaucoup de choix d'évolution à l'algorithme mais un maillage trop fin peut poser des problèmes en termes de résolution, de temps de calcul et de mémoire. Pour choisir la finesse du maillage, il faut respecter certaines contraintes :

- 1) le maillage doit être suffisamment fin pour permettre de passer d'un état à l'autre
- 2) le maillage doit avoir suffisamment de points pour couvrir tout l'espace de solutions

✓ Taille d'une maille

Pour passer d'un état d'énergie à l'autre, il est nécessaire que l'écart soit inférieur à la puissance maximale du système de stockage (cf. Figure III.12). Cependant, il est plus intéressant si le pas du maillage est 2, 3, ou 4 fois plus petit que cette puissance. En effet, par exemple, si le pas du maillage est 4 fois plus petit, alors il existe 5 états possibles pour passer à

l'état suivant : charge à pleine puissance, charge à 50% de la puissance maximale, décharge à pleine puissance, décharge à 50% de la puissance maximale ou ne rien faire (cf. Figure III.13).

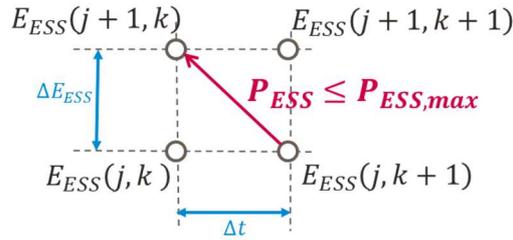
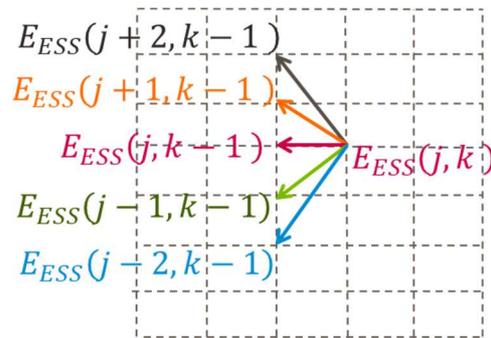


Figure III.12 : Choix du pas du maillage



E_{ESS} (Wh) est l'énergie stockée dans le système de stockage à un état donné j et pour le pas de temps d'indice k .

Figure III.13 : Etats possibles pour un pas de maillage 4 fois plus petit

✓ Nombre de points

Le second point délicat concernant le maillage est son nombre total de points. En effet, il est nécessaire de parcourir tout l'espace de la variable d'état (énergie du système de stockage). Il faut donc qu'il y ait suffisamment de points pour que, connaissant la taille d'une maille, les extremums d'énergie (énergie maximale, énergie minimale) puissent être atteints (cf. Figure III.14).

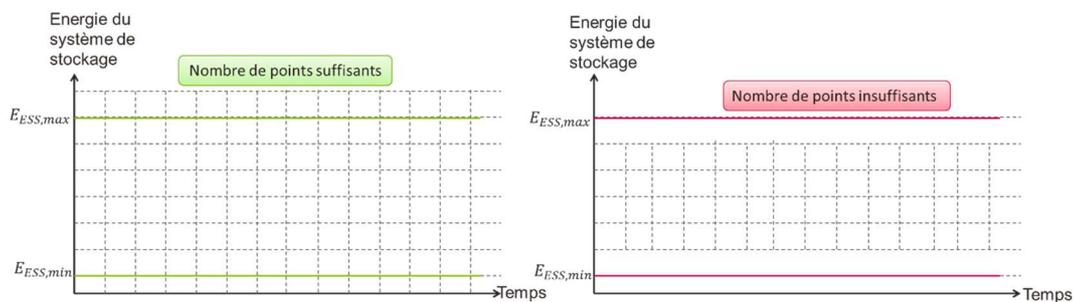


Figure III.14 : Nombre de points du maillage

où :

$E_{ESS,min}$	(en Wh)	Capacité énergétique minimale du système de stockage
$E_{ESS,max}$	(en Wh)	Capacité énergétique maximale du système de stockage

III.4.2.4. Fonction coût et algorithme

La programmation dynamique cherche le chemin suivi par la grandeur d'état qui permet de minimiser un critère donné. Pour cela, l'algorithme commence à l'état final (fixé) et remonte par récursivité à l'état initial. Pour chaque changement d'état, il est possible de calculer un coût de transition. Dans notre cas, le coût de transition est la consommation de carburant nécessaire pour passer d'un état à un autre. Ce coût de transition s'ajoute au coût de l'état précédent. Ainsi, à l'instant initial, la consommation de carburant de la mission est connue pour chacun de chemins possibles (cf. Figure III.15). Le chemin optimal est celui qui a la plus faible consommation.

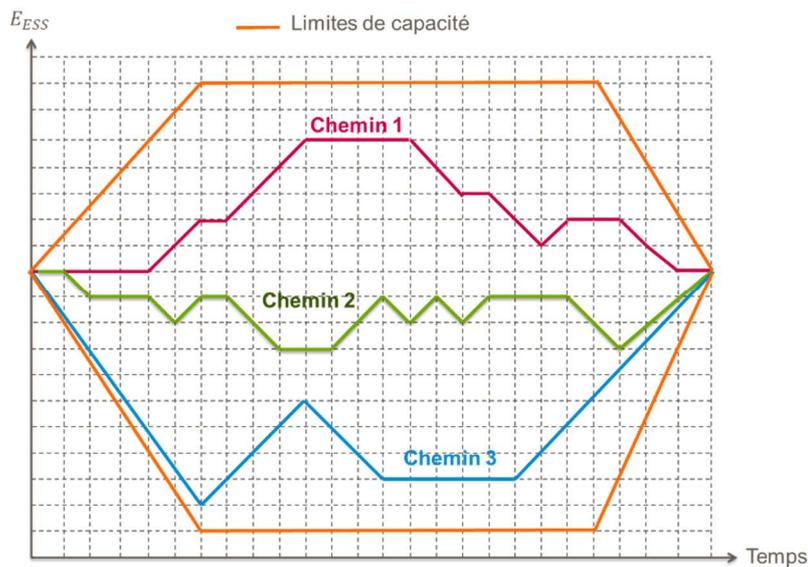


Figure III.15 : Chemins possibles

La fonction coût, pour un instant donné et un état donné, se calcule de la façon suivante :

$$R(j, k) = \min_{j'} \left(R(j', k + 1) + \text{Conso}_{ge}(j, j', k) \right) \quad (\text{III.39})$$

où :

$R(j', k + 1)$	(en g)	« Coût » (soit la consommation) pour l'état j' de l'énergie du système de stockage au pas de temps d'indice $k+1$ (il regroupe le coût de tous les instants précédents)
$\text{Conso}_{ge}(j, j', k)$	(en g)	Consommation du groupe diesel pour passer du pas de temps d'indice $k+1$ au pas de temps d'indice k en partant de l'état d'énergie j' pour aller vers l'état d'énergie j
$R(j, k)$	(en g)	« Coût » pour l'état j du système de stockage au pas de temps d'indice k

A l'instant initial, le chemin ayant le coût le plus faible est choisi. Il donne le profil énergétique du système de stockage. Sa puissance est ensuite calculée selon l'équation (III.40) et la puissance du groupe diesel est déduite par différence (cf. équation (III.41)).

$$P_{ESS}(k) = -3600 * \left(\frac{E_{ESS}(k + 1) - E_{ESS}(k)}{dt} \right) \quad (\text{III.40})$$

$$P_{ge}(k) = P_{train}(k) - P_{ESS}(k) \quad (\text{III.41})$$

où :

$P_{ESS}(k)$	(en W)	Puissance du système de stockage au pas de temps d'indice k (convention générateur : la puissance est positive en décharge, négative en charge)
$E_{ESS}(k)$	(en Wh)	Energie du système de stockage au pas de temps d'indice k
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle
dt	(en s)	Pas de temps de la mission
$P_{ge}(k)$	(en W)	Puissance du groupe diesel au pas de temps d'indice k
$P_{train}(k)$	(en W)	Puissance du train au pas de temps d'indice k

III.4.3. Cas particulier de deux types de stockeurs : gestion fréquentielle

Il peut être intéressant d'utiliser non pas un seul type de système de stockage mais une association de stockeurs différents. En effet, nous avons vu à la partie I.4.1 qu'il était possible de classer les systèmes de stockage selon leur densité d'énergie et leur densité de puissance. Par exemple, les supercondensateurs ont une haute densité de puissance mais une faible densité d'énergie, alors que l'inverse se vérifie pour les batteries. Utiliser une association de ces deux systèmes de stockage permettrait de compenser les inconvénients de chacune des technologies. Il est alors nécessaire d'ajouter une gestion supplémentaire. Nous avons fait le choix d'utiliser une gestion fréquentielle qui va séparer la puissance de la mission ferroviaire en deux selon sa dynamique :

- les supercondensateurs ont la capacité de fournir des puissances élevées, ils vont donc répondre à la demande haute-fréquence (P_{HF}),
- les batteries et le groupe diesel ont des densités d'énergie élevées, ils fourniront donc la puissance dite basse-fréquence (P_{BF}), (cf. Figure III.16).

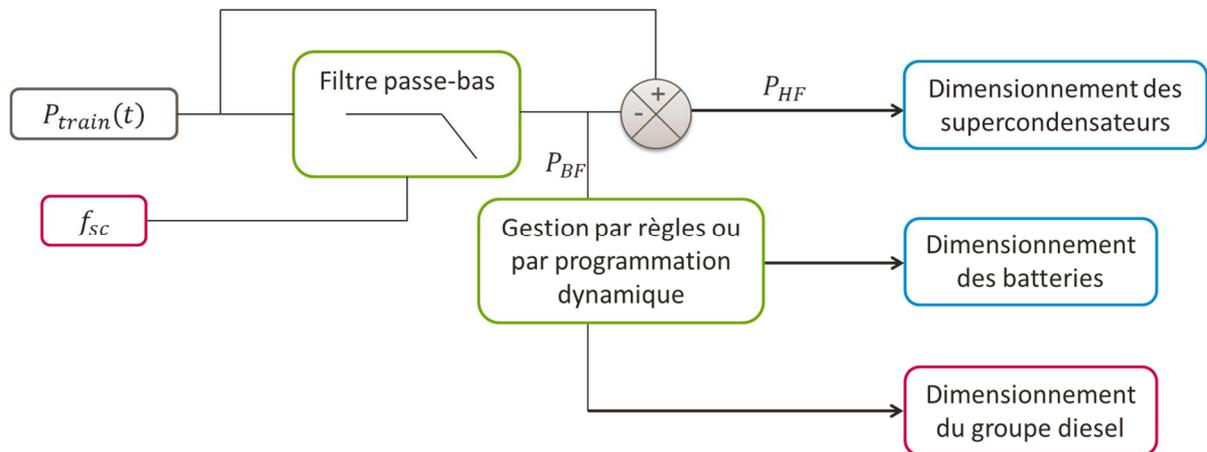


Figure III.16 : Gestion fréquentielle

Le filtre passe-bas du 1^{er} ordre est modélisé de la façon suivante :

$$P_{BF}(k + 1) = dt * 2\pi * f_{sc} * (P_{train}(k) - P_{BF}(k)) + P_{BF}(k) \quad (III.42)$$

où :

$P_{BF}(k)$	(en W)	Puissance basse-fréquence au pas de temps d'indice k
f_{sc}	(en Hz)	Fréquence de coupure du filtre passe-bas
$P_{train}(k)$	(en W)	Puissance de la mission ferroviaire au pas de temps d'indice k
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle
dt	(en s)	Pas de temps de la mission

Nous pouvons alors en déduire la puissance haute-fréquence :

$$P_{HF}(k) = P_{train}(k) - P_{BF}(k) \quad (III.43)$$

P_{HF} (W) est la puissance haute fréquence de la mission.

III.5. DIMENSIONNEMENT PAR OPTIMISATION COMBINANT GESTION ET DIMENSIONNEMENT

III.5.1. Cas particulier de la programmation dynamique

Nous avons fait le choix d'intégrer la gestion énergétique dans le modèle de dimensionnement pour prendre en compte son influence (cf. le paragraphe I.5.1). Cela signifie que la formulation de la gestion peut ajouter des contraintes supplémentaires au problème d'optimisation.

Pour résoudre le problème d'optimisation, nous avons choisi l'algorithme déterministe SQP en raison de ses bonnes performances face à un modèle ayant un grand nombre de variables (cf. le paragraphe II.2.6). Celui-ci utilise le Jacobien pour évoluer entre deux itérations. Cependant, la programmation dynamique n'est pas un algorithme dérivable. Afin de pouvoir l'utiliser dans notre modèle, nous avons fait le lien entre les parties du modèle dérivables et celles non dérivables à l'aide d'un paramètre évolutif.

Pour cela, nous calculons la capacité en puissance et en énergie ainsi que l'énergie initiale du système de stockage à l'aide du nombre de cellules qui est une entrée du modèle d'optimisation (cf. les équations (III.16) à (III.19)).

Nous appliquons alors la méthode de programmation dynamique pour déterminer :

- les limites en énergie et en puissance du système de stockage (cf. III.4.2.2),
- le maillage de l'énergie stockée dans le système de stockage (cf. III.4.2.3).

Toutes ces données sont des variables dérivables. Dans le cas des limites, la dérivation est directe. Dans le cas du maillage, celui-ci est calculé par incrémentation (positive et négative) de l'énergie initiale, ce qui garantit la dérivabilité par rapport au nombre de cellules du système de stockage (pour l'optimisation, nous choisissons de faire du nombre de cellules du système de stockage une variable réelle et continue).

Ces informations sont ensuite transmises à l'algorithme de programmation dynamique qui va donner les indices du maillage correspondant au chemin optimal (celui avec la consommation de carburant la plus faible). Ces indices permettent de sélectionner dans le maillage, les états d'énergie du chemin optimal. Or, chacun de ces états est dérivable par rapport à l'entrée d'optimisation (nombre de cellules du système de stockage). La chaîne de dérivation est donc maintenue au niveau global au moyen de ce paramètre évolutif (indices des états correspondant au meilleur parcours). La Figure III.17 présente les échanges d'informations entre les différentes parties du modèle.

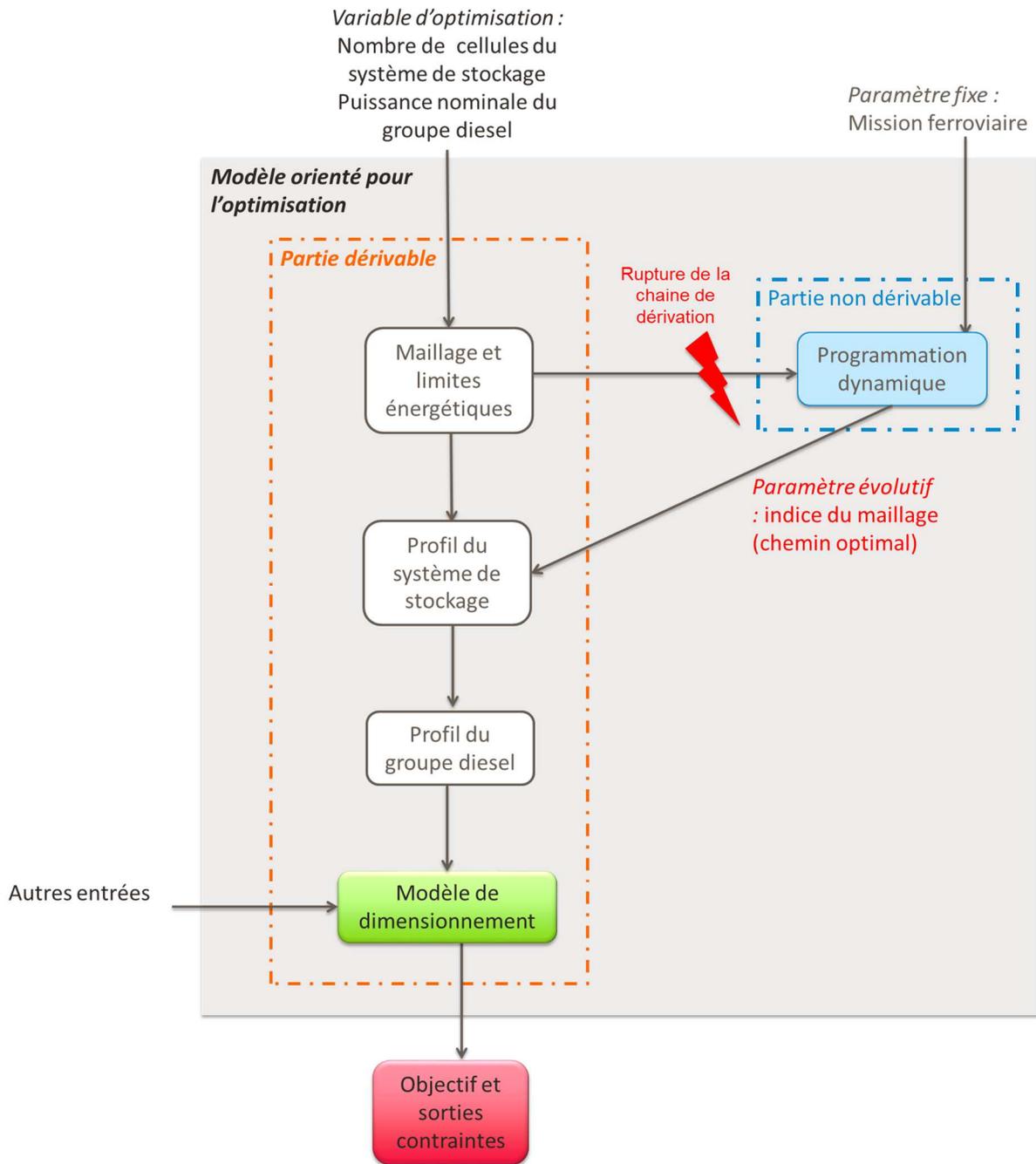


Figure III.17 : Principe du modèle avec programmation dynamique

III.5.2. Modèle orienté pour l'optimisation

III.5.2.1. Mission ferroviaire

Dans le cas de la traction hybride diesel-électrique, nous ne prenons pas en compte l'environnement extérieur (les autres trains). La mission ferroviaire se compose alors de la puissance du train étudié pour chaque pas de temps et de sa vitesse (cf. Figure II.9).

III.5.2.2. Entrées d'optimisation

Notre objectif est de déterminer le dimensionnement des sources d'énergie. Les entrées d'optimisation sont donc la variable dimensionnante de chaque source :

- nombre de cellules du système de stockage
- puissance nominale du groupe diesel

De plus, dans le cas où deux systèmes de stockage différents sont utilisés (par exemple batteries et supercondensateurs), nous utilisons un filtrage fréquentiel sur la mission pour répartir les puissances entre les sources (en fonction de leur dynamique). La fréquence de coupure du filtre passe-bas est alors elle aussi une entrée d'optimisation.

III.5.2.3. Paramètres

Le modèle comporte un certain nombre de paramètres qui sont des entrées fixes non modifiables par l'algorithme d'optimisation. Nous avons :

- la mission ferroviaire qui est transmise sous forme d'un fichier de données,
- les caractéristiques techniques de chaque source d'énergie (tension nominale, courant nominal, prix du carburant ...),
- les données de paramétrage de la gestion énergétique (par exemple la taille du maillage pour la programmation dynamique).

III.5.2.4. Sorties contraintes

Nous ajoutons aussi au modèle des critères industriels à respecter :

- chaque système de stockage doit finir la mission avec le même état de charge qu'au début
- les sources d'énergies sont embarquées dans le train. En conséquence, leur volume et leur masse globaux sont soumis à une limite maximale

Ce volume et cette masse se calculent de la manière suivante :

$$Vol_{sources} = Vol_{ge} + \sum_{i=1}^{nb_{type,stock}} Vol_{ESS,i} \quad (III.44)$$

$$M_{sources} = M_{ge} + \sum_{i=1}^{nb_{type,ESS}} M_{ESS,i} \quad (III.45)$$

où :

$Vol_{sources}$	(en m ³)	Volume total des sources d'énergies du train diesel-électrique hybride
Vol_{ge}	(en m ³)	Volume du groupe diesel
$Vol_{ESS,i}$	(en m ³)	Volume du système de stockage i
$M_{sources}$	(en kg)	Masse total des sources d'énergie du train diesel-électrique hybride
M_{ge}	(en kg)	Masse du groupe diesel
$M_{ESS,i}$	(en kg)	Masse du système de stockage i
$nb_{type,stock}$	-	Nombre de stockeurs différents

Remarque : un train trop léger risque de glisser. Afin de ne pas perdre l'adhérence, il est nécessaire de s'assurer que la masse obtenue n'est pas trop faible.

Finalement, dans le cas d'une gestion à base de règles, il faut vérifier que les sollicitations du système de stockage respectent ses caractéristiques techniques en termes de puissance de charge/décharge et de capacité énergétique. Nous ajoutons donc les contraintes suivantes :

$$\max_k (P_{ESS}(k)) - P_{ESS,max}^{dch} \leq 0 \quad (III.46)$$

$$\left| \min_k (P_{ESS}(k)) \right| - P_{ESS,max}^{ch} \leq 0 \quad (III.47)$$

$$\max_k (E_{ESS}(k)) - E_{ESS,max} \leq 0 \quad (III.48)$$

$$\min_k (E_{ESS}(k)) - E_{ESS,min} \leq 0 \quad (III.49)$$

où :

$P_{ESS}(k)$	(en W)	Puissance du système de stockage au pas de temps d'indice k
$P_{ESS,max}^{dch}$	(en W)	Puissance maximale du système de stockage en décharge
$P_{ESS,max}^{ch}$	(en W)	Puissance maximale du système de stockage en charge
$E_{ESS}(k)$	(en Wh)	Energie du système de stockage au pas de temps d'indice k
$E_{ESS,max}$	(en Wh)	Energie maximale du système de stockage
$E_{ESS,min}$	(en Wh)	Energie minimale du système de stockage

III.5.2.5. Fonction objective

La fonction objective choisie est le coût global actualisé sur 30 ans. Il se compose de deux parties :

- le coût d'investissement (achat des différentes sources : groupe diesel et système(s) de stockage),
- le coût d'exploitation qui rassemble les coûts de consommation de carburant mais aussi les coûts de maintenance des sources d'énergie et le coût de rachat éventuel des batteries lorsqu'elles sont en fin de vie.

Ces coûts sont actualisés pour tenir compte l'évolution de la valeur de l'argent dans le futur.

$$Cout_{inv} = Cout_{ge} + \sum_{i=1}^{nb_{type,ESS}} Cout_{ESS,i} \quad (III.50)$$

$$Cout_{exploitation} = Cout_{BT}^{act} + Cout_{conso}^{act} + Cout_{maintenance}^{act} \quad (III.51)$$

où :

$Cout_{inv}$	(en k€)	Coût d'investissement pour acheter les sources d'énergie composant le train diesel-électrique
$Cout_{ge}$	(en k€)	Coût d'achat du groupe diesel
$Cout_{ESS,i}$	(en k€)	Coût d'achat du système de stockage i
$Cout_{exploitation}$	(en k€)	Coût d'exploitation du train sur toute sa durée de vie
$Cout_{BT}^{act}$	(en k€)	Coût actualisé de rachat des batteries en fin de vie
$Cout_{conso}^{act}$	(en k€)	Coût de consommation de carburant actualisé pour la durée de vie du train
$Cout_{maintenance}^{act}$	(en k€)	Coût actualisé de maintenance pour la durée de vie du train

Le calcul de ces différents coûts est détaillé dans l'annexe A.2.6.

Le coût total du train diesel-électrique est donc la somme de ces deux coûts :

$$Cout_{train}^{act} = Cout_{inv} + Cout_{exploitation} \quad (III.52)$$

$Cout_{train}^{act}$ (k€) est le coût total actualisé du train diesel-électrique.

III.5.3. Bilan

Pour conclure, le modèle orienté pour l'optimisation s'articule de la façon suivante : les variables de dimensionnement et les paramètres sont transmis à la gestion énergétique. Les profils de puissance et d'énergie obtenus en sortie de cette gestion permettent de calculer le coût d'exploitation tandis que les variables d'entrées permettent de calculer le coût d'investissement. L'algorithme a alors pour objectif de minimiser la somme de ces deux coûts (cf. Figure III.18).

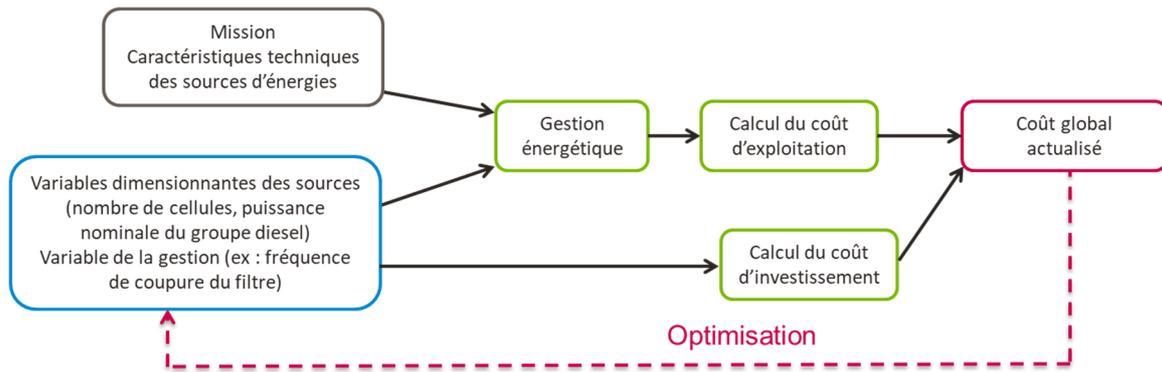


Figure III.18 : Optimisation combinée de la traction diesel-électrique

Le modèle orienté pour l'optimisation a donc la forme suivante :

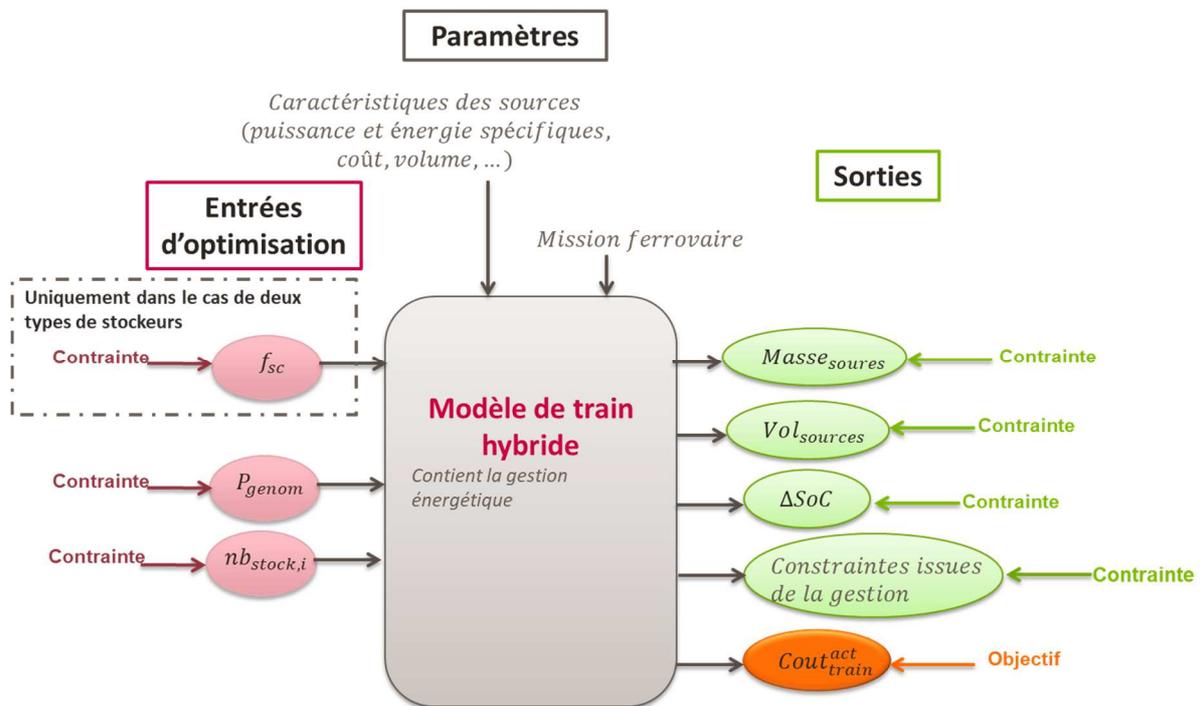


Figure III.19 : Modèle du train hybride diesel-électrique orienté pour l'optimisation

Ce modèle a entre 2 et 4 entrées d'optimisation, environ 40 paramètres et entre 7 et 12 sorties contraintes (cela dépend du nombre de systèmes de stockage différents).

III.6. CONCLUSION

Une partie du trafic est encore actuellement effectué par des trains diesel-électrique. Le principal inconvénient de ce type de train est la consommation de carburant (conséquence environnementale et coût d'exploitation élevé). Afin de réduire cette consommation, nous proposons d'hybrider les trains en ajoutant des systèmes de stockage en embarqué. Pour

déterminer la taille des sources d'énergie, nous avons mis en place un modèle de dimensionnement pour l'optimisation intégrant la gestion énergétique. Plusieurs gestions ont été étudiées : une gestion à base de règles adaptée à une industrialisation et une gestion par programmation dynamique donnant une référence idéale que l'on souhaiterait atteindre. La résolution du système se fait par le biais d'un algorithme d'optimisation. Nous présentons des résultats dans le Chapitre V (cf. le paragraphe V.3).

Chapitre IV : Dimensionnement par optimisation pour la traction hybride électrique

IV.1. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS

La majorité de la traction ferroviaire se fait au moyen de trains électriques dont certains sont alimentés par une caténaire à 1500V continu. Le passage d'un train occasionne une chute de tension qui, si elle devient trop importante, impose un ralentissement du trafic. Plusieurs solutions sont possibles pour maintenir la tension dans une plage acceptable (cf. le paragraphe I.3.2). Nous avons fait le choix d'utiliser des systèmes de stockage embarqué car cette solution a une très bonne efficacité énergétique : usage à proximité immédiate du problème donc sans pertes en ligne. Cependant, le coût d'investissement et de maintenance de cette solution est très élevé.

Nous allons dans un premier temps introduire la modélisation de la ligne et des différents sous-systèmes qui la composent (cf. IV.3). Puis, nous présenterons les gestions énergétiques utilisées dans le cas de la traction hybride électrique (cf. IV.4) ainsi que le modèle orienté pour l'optimisation (cf. IV.5).

L'ensemble des équations du train hybride électrique est rassemblé dans l'annexe A.3.1.

IV.2. ARCHITECTURE DU SYSTEME ETUDIE

Pour notre étude, nous travaillerons sur le réseau 1500V DC. Les groupes de production nationaux fournissent la puissance au réseau français de transport (RTE) ou de distribution. Les sous-stations récupèrent cette énergie et la transmettent à la caténaire. Les trains qui circulent sur la ligne viennent alors ponctionner sur celle-ci la puissance dont ils ont besoin. Le système étudié se compose donc de plusieurs éléments (cf. Figure IV.1) :

- les sous-stations de la voie (SST),
- la caténaire alimentant les trains,
- les trains et leur système de stockage embarqué,
- les postes de mise en parallèle (PMP).

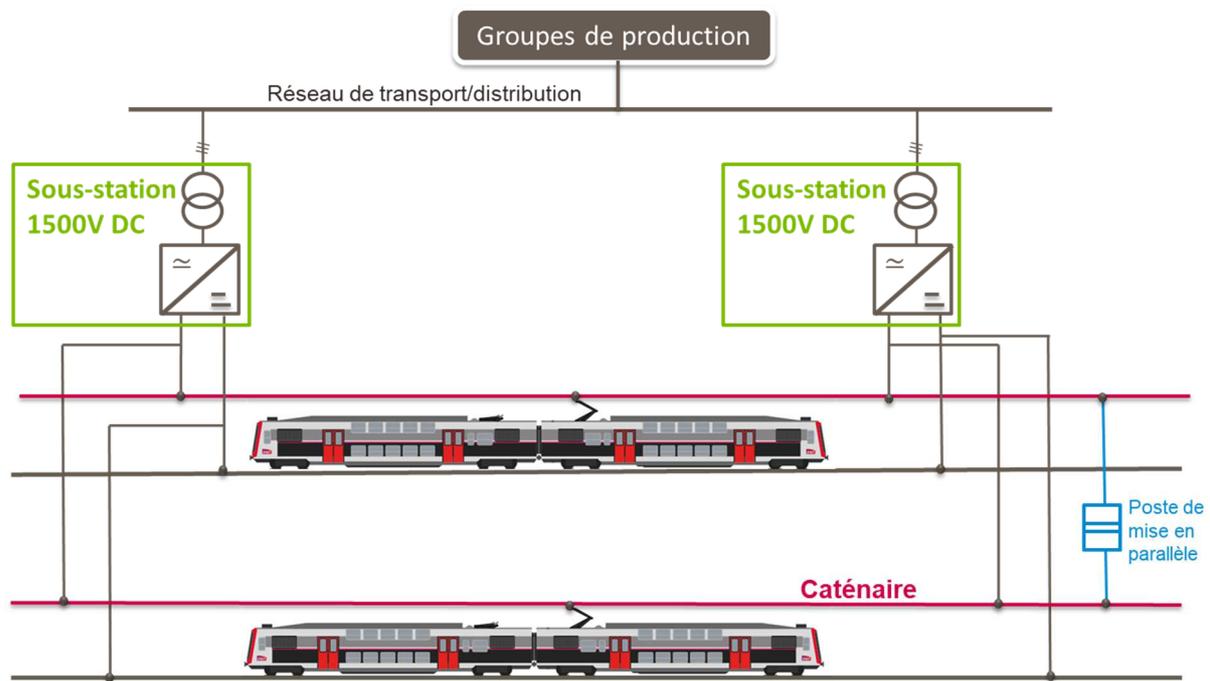


Figure IV.1 : Schéma du système

Chaque train qui circule, est équipé d'un système de stockage embarqué qui a pour objectif d'aider au maintien de tension de la ligne électrique. Pour prendre en compte l'influence d'un train sur un autre, il est nécessaire de tenir compte de l'environnement global. En conséquence, il est nécessaire de faire la modélisation :

- de la ligne électrique composée de sous-stations et postes de mise en parallèle,
- des trains avec chacun leur système de stockage et leur profil de mission.

IV.3. MODELISATION DE LA LIGNE FERROVIAIRE ET DE LA TRACTION ELECTRIQUE HYBRIDE

IV.3.1. Méthode nodale

La méthode la plus utilisée pour représenter une ligne ferroviaire est la méthode nodale ([5], [81], [82] et [83]). Elle consiste à représenter les postes fixes (sous-stations et postes de mises en parallèle) et les trains par des nœuds. Les nœuds des sous-stations fournissent la puissance à la ligne électrique (sources) et les nœuds des trains sont les points de consommation (charges). La caténaire qui fait le lien entre sources et charges est représentée par une série de résistances pour chaque tronçon de ligne (portion située entre deux nœuds, cf. Figure IV.2).

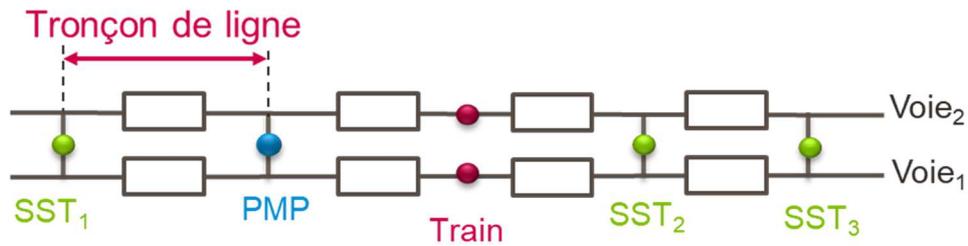


Figure IV.2 : Eléments apparaissant dans la représentation nodale

Une fois le découpage de la ligne mis en place, il est possible de construire la matrice des admittances et des impédances de la ligne. Cela donne la mise en équation suivante :

$$AX = S \quad (IV.1)$$

où :

A	-	Matrice d'admittance – impédance globale
X	-	Vecteur des inconnus du système
S	-	Second membre

Pour notre application, nous avons :

$$X = \begin{pmatrix} V \\ I_{SST} \end{pmatrix} \quad (IV.2)$$

$$S = \begin{pmatrix} J \\ E_{SST} \end{pmatrix} \quad (IV.3)$$

où :

V	(en V)	Vecteur des tensions au niveau des nœuds
I_{SST}	(en A)	Vecteur des courants issus des sous-stations
J	(en A)	Vecteur des courants soutirés par les trains
E_{SST}	(en V)	Vecteur des tensions à vide des sous-stations

Il existe plusieurs versions de cette méthode :

- 1) la méthode nodale avec un découpage de la ligne évolutif et des nœuds mobiles
- 2) la méthode nodale avec un découpage de la ligne fixe et des nœuds fixes
- 3) la méthode nodale avec un découpage de la ligne fixe et des nœuds mobiles.

✓ **Méthode nodale avec un découpage de la ligne évolutif**

La première méthode est la plus utilisée ([82], [83], [84] et [85]). Lorsqu'un train est présent sur la ligne, la résistance du tronçon de ligne est séparée de part et d'autre du train (cf. Figure IV.3). Chaque fois que le train change de position, le nœud qui le symbolise se déplace

changeant la valeur des résistances qui l'entourent (cf. Figure IV.3). Cette méthode permet de prendre en compte précisément la position du train et donc de connaître avec exactitude la chute de tension locale. Le principal inconvénient de cette version de la méthode nodale est que la disposition des différents nœuds varie : le découpage et le nombre de nœud ne restent pas fixe ce qui nécessite de reconstruire pour chaque pas de temps le système à résoudre (cf. équation (IV.1) et Figure IV.4).

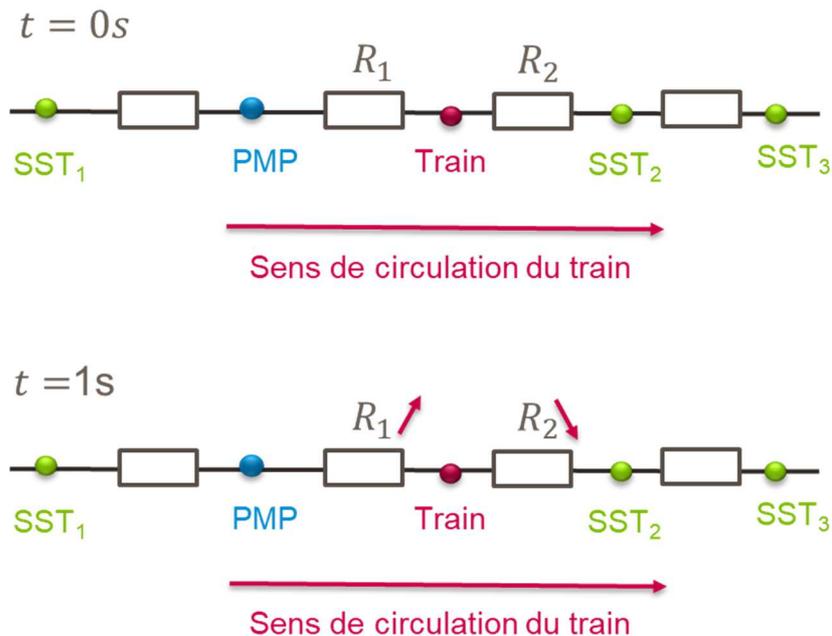


Figure IV.3 : Déplacement du train

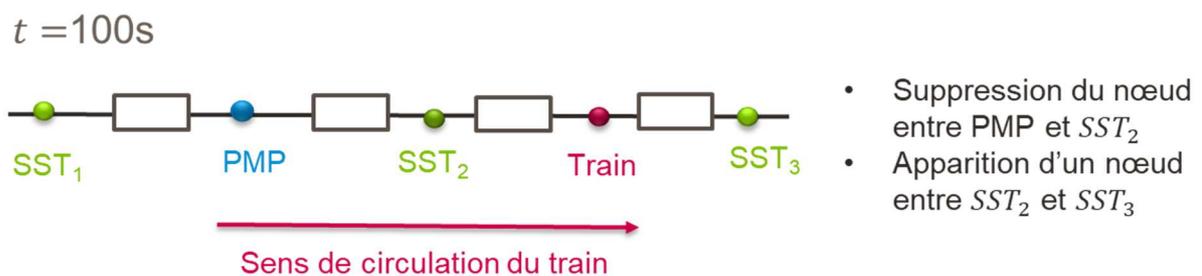


Figure IV.4 : Impact sur la représentation du système pour la version 1

✓ Méthode nodale avec un découpage de la ligne fixe et des nœuds fixes

La seconde méthode utilise un découpage fixe de la ligne ce qui permet de conserver la forme de la matrice d'admittance au cours du temps (seul le courant soutiré par les trains varie) [86]. La résolution est donc plus aisée car une fois la modélisation mise en place, le système se construit une seule fois et peut être utilisé pour chaque pas de temps. Pour cela, chaque portion

de ligne est découpée en morceaux de petites tailles (cf. Figure IV.5). Lorsqu'un train circule, il envoie une demande de puissance aux nœuds qui lui sont les plus proches (avec une répartition de la demande proportionnelle à sa distance à chaque nœud, cf. Figure IV.5). Cependant, avec cette méthode, la chute de tension au point local n'est pas connue avec précision. Pour la connaître de manière exacte, il est nécessaire de faire du post-processing par une méthode d'extrapolation. Cette méthode ne rend donc pas de manière exacte le plan de tension. Elle requiert aussi une discrétisation plus fine que les deux autres méthodes.

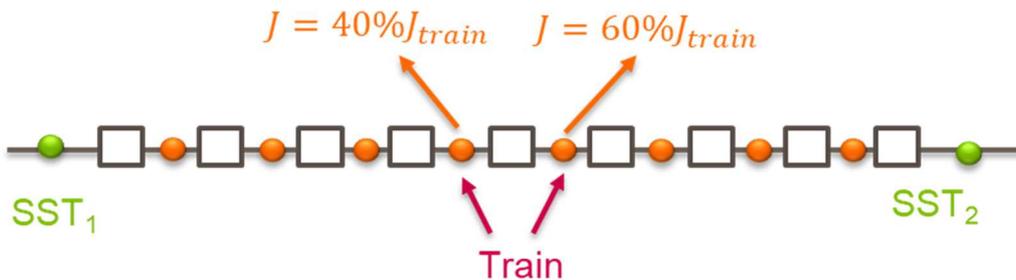


Figure IV.5 : Version 2 de la modélisation nodale

✓ *Méthode nodale avec un découpage de la ligne fixe et des nœuds mobiles*

La dernière méthode proposée [5] permet de tenir compte des avantages de chacune des deux méthodes précédentes : elle utilise un découpage fixe de la ligne afin d'avoir toujours le même système à résoudre mais utilise des nœuds mobiles afin de tenir compte avec précision de la position du train pour mieux évaluer la chute de tension locale. C'est cette méthode que nous avons choisie. Elle est présentée en détail dans le paragraphe IV.3.2.

IV.3.2. Méthode nodale avec impédance variable et découpage fixe

IV.3.2.1. Découpage de la ligne

Avant de commencer l'étude du plan de tension, il est nécessaire de construire le modèle de la ligne. Il s'agit de déterminer les nœuds dont nous avons besoin pour calculer les tensions.

Les nœuds sont associés :

- aux postes fixes (sous-stations et postes de mise en parallèle)
- aux trains

Pour connaître le nombre de nœuds des trains, il faut compter combien de trains au maximum se trouvent sur chaque tronçon de ligne (c'est-à-dire entre deux sous-stations ou entre

une sous-station et un poste de mise en parallèle). Pour cela, nous repérons la position des trains et nous comptons combien de train sont présents sur une portion de ligne. Le nombre maximum donne le nombre de nœuds présents sur la ligne (cf. Figure IV.6).

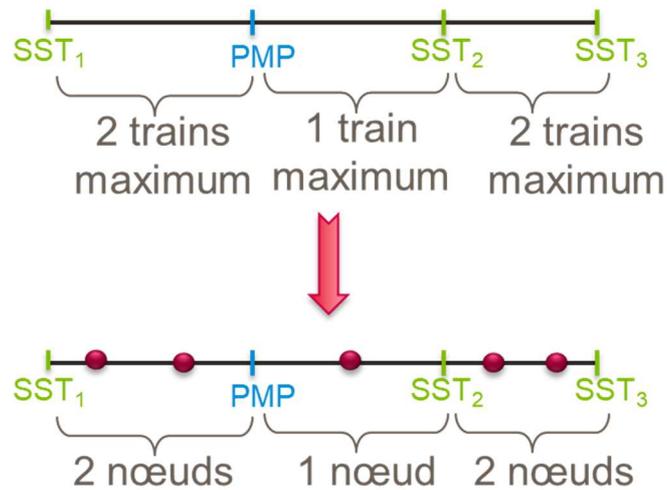


Figure IV.6 : Découpage de la ligne

Chaque train est donc symbolisé par un nœud. Ces nœuds sont *mobiles* : leur position évolue en même temps que le train se déplace sur la ligne (cf. Figure IV.8). Les postes fixes (sous-stations et postes de mises en parallèle) sont symbolisés par des nœuds *fixes* (cf. Figure IV.7).

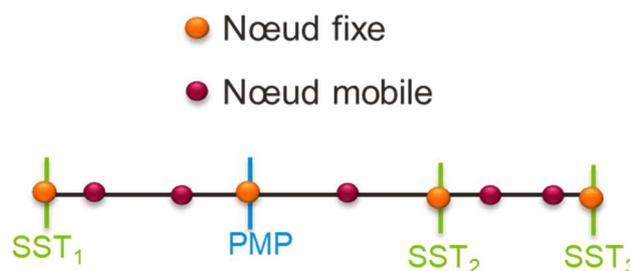
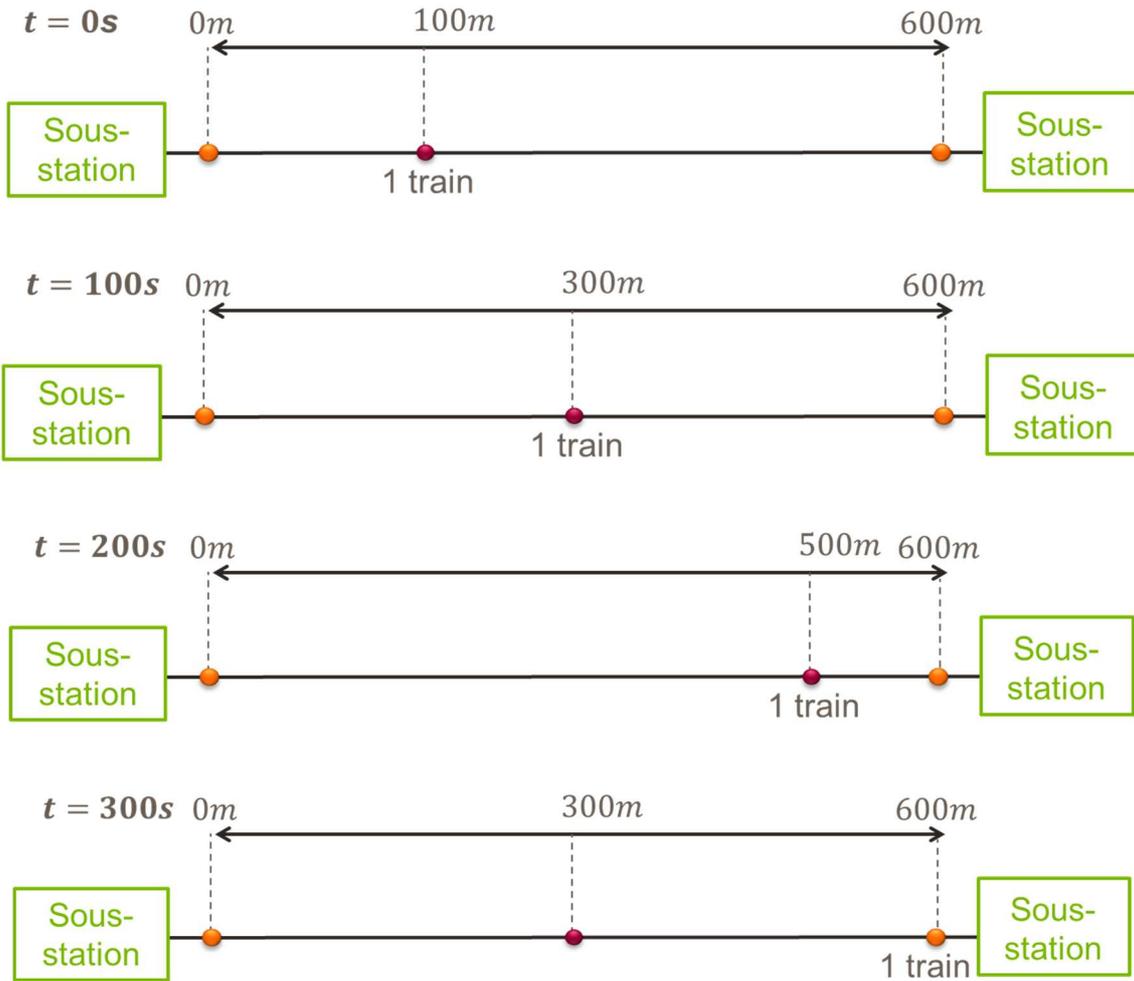


Figure IV.7 : Nœuds fixes et mobiles

Lorsqu'un train pénètre sur la ligne, le nœud mobile le plus proche lui est rattaché. Tant que le train n'est pas suffisamment proche d'un autre nœud (fixe ou mobile) alors c'est le même nœud qui lui reste attaché et qui se déplace en même temps que lui (cf. Figure IV.8). Lorsqu'un train est très proche d'un nœud fixe, il se rattache exceptionnellement à ce nœud jusqu'à s'en être écarté suffisamment (d'au moins 10m). Cela permet d'éviter d'avoir une impédance infiniment petite et donc de créer de grandes variations de tension (cf. Figure IV.8).



$$590m \leq \text{position réelle du train} \leq 610m$$

Figure IV.8 : Exemple de déplacement du train et du nœud associé

IV.3.2.2. Position des nœuds mobiles

Comme nous avons choisi d'utiliser une méthode avec des nœuds mobiles, cela signifie que la position de ces nœuds évolue entre chaque pas de temps (contrairement aux nœuds des sous-stations et postes de mise en parallèle qui restent fixes). Il est donc nécessaire de déterminer la position de ces nœuds mobiles.

Plusieurs règles régissent la position des nœuds mobiles :

- 1) Lorsqu'un train est entre un nœud mobile et un nœud fixe, le nœud mobile se rattache au train à condition que la distance du train au nœud fixe soit supérieure à une valeur limite fournie en entrée du modèle (le choix qui a été fait ici est de mettre une distance

minimale de 10m). Si la distance est inférieure alors on considère que le train est « immobile » au nœud fixe jusqu'à ce qu'il ait dépassé cette limite (cf. Figure IV.9).

2) Lorsqu'un train est entre deux nœuds mobiles : c'est le nœud mobile le plus proche qui se rattache au train (cf. Figure IV.10).

3) Si aucun train n'est présent alors les nœuds sont placés à égale distance les uns des autres (cf. Figure IV.11).

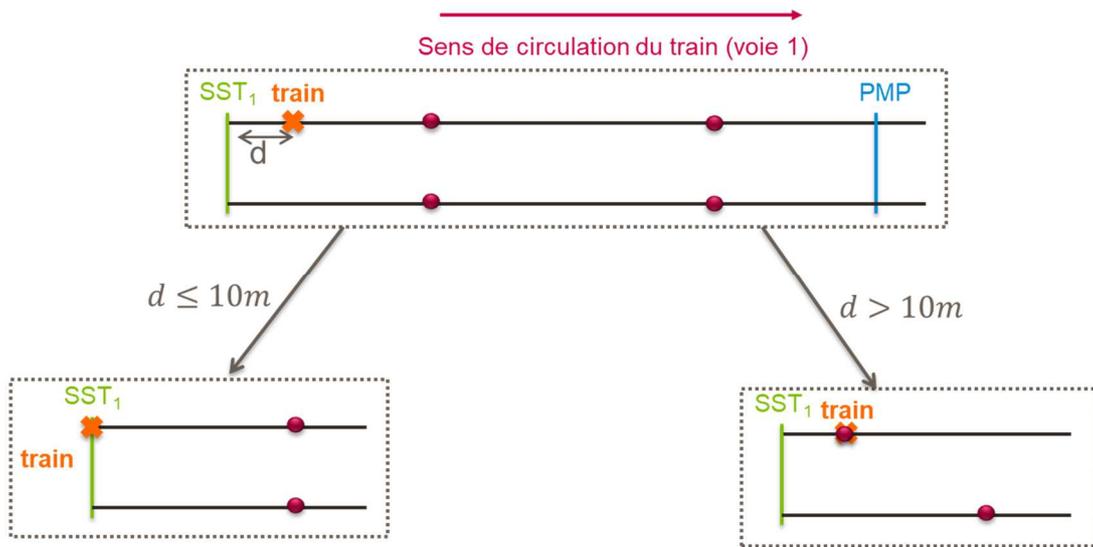


Figure IV.9 : Train entre un nœud fixe et un nœud mobile

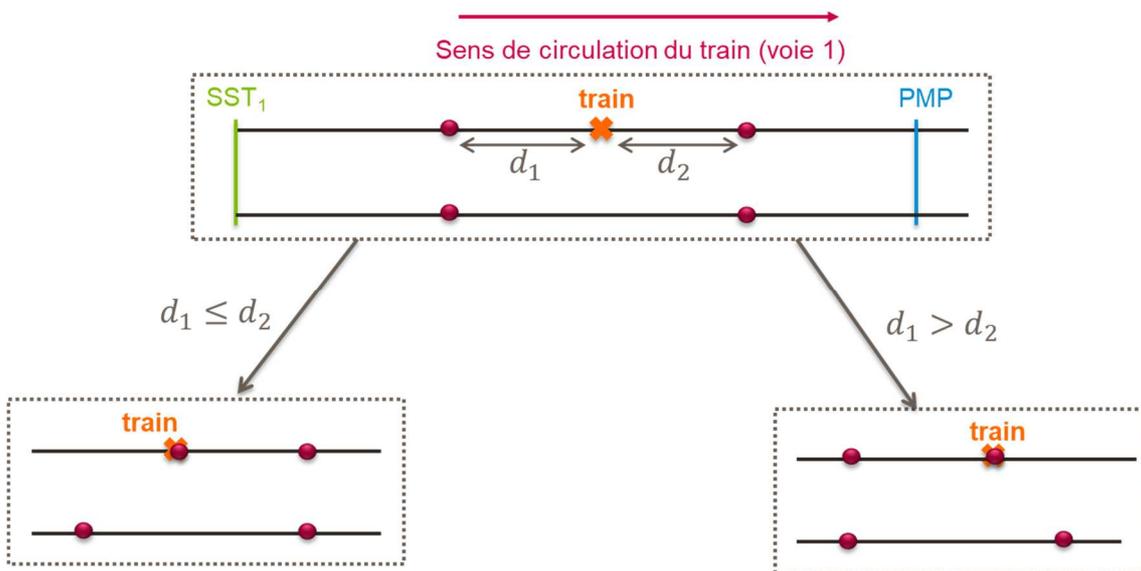
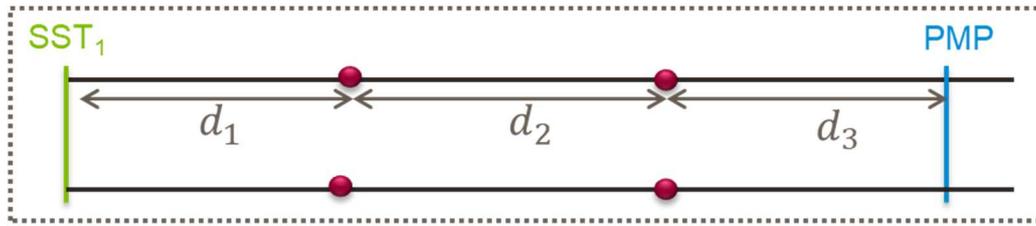


Figure IV.10 : Train entre deux nœuds mobiles



$$d_1 = d_2 = d_3$$

Figure IV.11 : Aucun train

IV.3.2.3. Longueur des lignes et impédances

Une fois la position des nœuds connue, il est possible de calculer la longueur des tronçons de lignes et d'en déduire leur impédance à partir de l'impédance linéique de la ligne.

L'impédance linéique est la somme de l'impédance linéique de la caténaire et de l'impédance linéique des rails. De même que [5], nous faisons l'hypothèse que la caténaire est essentiellement constituée de cuivre et les rails de fer. Nous avons donc :

$$R_{lin}^{cat} = \frac{\rho_{Cu}}{S_{cat}} \quad (IV.4)$$

$$R_{lin}^{rail} = \frac{\rho_{Fe}}{S_{rail}} \quad (IV.5)$$

où :

R_{lin}^{cat}	(en Ω/m)	Résistance linéique de la caténaire
ρ_{Cu}	(en Ω/m^3)	Résistivité du cuivre
S_{cat}	(en m^2)	Section de la caténaire
ρ_{Fe}	(en Ω/m^3)	Résistivité du fer
S_{rail}	(en m^2)	Section de rail
R_{lin}^{rail}	(en Ω/m)	Résistance linéique du rail

L'impédance linéique totale (R_{lin}^{tot} en Ω/m) est alors :

$$R_{lin}^{tot} = R_{lin}^{cat} + \frac{1}{2} R_{lin}^{rail} \quad (IV.6)$$

L'impédance d'une portion de ligne se calcule de la manière suivante :

$$Z_{ligne} = L_{ligne} * R_{lin}^{tot} \quad (IV.7)$$

où :

Z_{ligne}	(en Ω)	Impédance du tronçon de ligne
-------------	----------------	-------------------------------

L_{ligne}	(en m)	Longueur du tronçon de ligne
R_{lin}^{tot}	(en Ω/m)	Impédance linéique totale

IV.3.2.4. Matrice d'admittance – impédance

La matrice d'admittance – impédance rassemble les différentes admittances des tronçons de ligne ainsi que les impédances des sous-stations (cf. équation (IV.8)).

$$A = \begin{pmatrix} Y_{ligne} & -I \\ I & Z_{SST} \end{pmatrix} \quad (IV.8)$$

où :

Y_{ligne}	(en Ω^{-1})	Matrice contenant l'admittance de chaque tronçon de ligne (morceau entre deux nœuds qu'ils soient fixes ou mobiles)
I	-	Matrice d'incidence (vaut 1 lorsque le nœud est un nœud symbolisant une sous-station, 0 sinon)
Z_{SST}	(en Ω)	Matrice contenant l'impédance des sous-stations
A	-	Matrice d'admittance – impédance globale

IV.3.2.5. Modélisation des sous-systèmes

La modélisation des sous-systèmes de la ligne ferroviaire demande de représenter :

- 1) les trains,
- 2) les systèmes de stockage embarqués dans les trains,
- 3) les postes de mises en parallèle,
- 4) les sous-stations.

✓ *Les trains*

Les trains sont modélisés par des sources de **courant** (cf. Figure IV.12) qui soutirent à la caténaire de quoi alimenter le moteur de traction et/ou les auxiliaires.

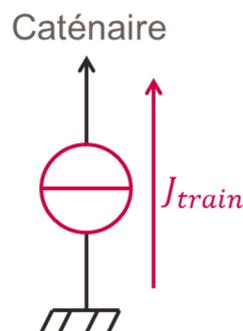


Figure IV.12 : Modèle du train

✓ *Les systèmes de stockage embarqués*

Les systèmes de stockage sont embarqués dans le train. Par conséquent, ils n'apparaissent pas directement dans la représentation nodale mais sont couplés avec la représentation du train. Ils sont modélisés au moyen de leur énergie et puissance (modèle en flux d'énergie) de la même manière que celle présentée au paragraphe III.3.2.

✓ *Les postes de mises en parallèle*

Les postes de mises en parallèles sont modélisés par des sources de *courant* qui restent **fixes** (cf. Figure IV.7). Lorsqu'un train se trouve au niveau d'un poste de mise en parallèle, il soutire la puissance dont il a besoin à la caténaire à partir de ce nœud de courant.

✓ *Les sous-stations*

Les sous-stations sont représentées par des sources de *tension* parfaites en série avec une résistance et associées à un redresseur à diodes (cf. Figure IV.14). Le redresseur présente une discontinuité (dû à son changement de l'état passant à l'état bloqué). Afin de rendre le modèle continu, la même méthode que celle développée par [5] a été utilisée (cf. Figure IV.13). Le redresseur est donc représenté par la fonction suivante :

$$I_{SST} = \frac{1}{Z_{SST}} * \frac{1}{\pi} * (E_{SST} - V) * \arctan \left[(E_{SST} - V) * C_{Diode} + \frac{1}{2}\pi + \frac{\pi}{C_{Diode}} \right] \quad (IV.9)$$

où :

I_{SST}	(en A)	Courant en sortie de la sous-station
E_{SST}	(en V)	Tension à vide de la sous-station
Z_{SST}	(en Ω)	Matrice contenant l'impédance des sous-stations
V	(en V)	Tension en sortie de la sous-station
C_{Diode}	-	Coefficient de lissage pour assurer la continuité (le choix de la valeur a été déterminé par [5])

Ce modèle a été choisi car une discontinuité franche d'un état de conduction à un autre induit des perturbations fortes de l'algorithme d'optimisation.

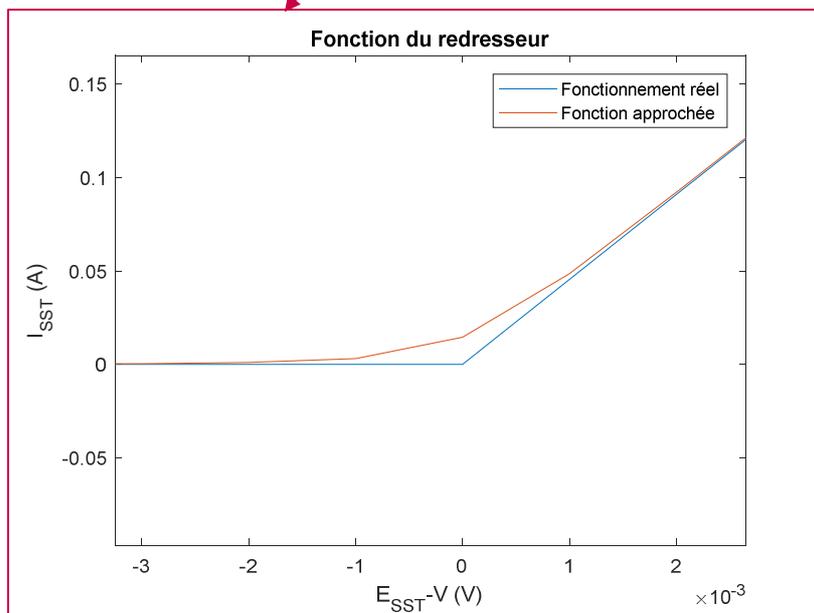
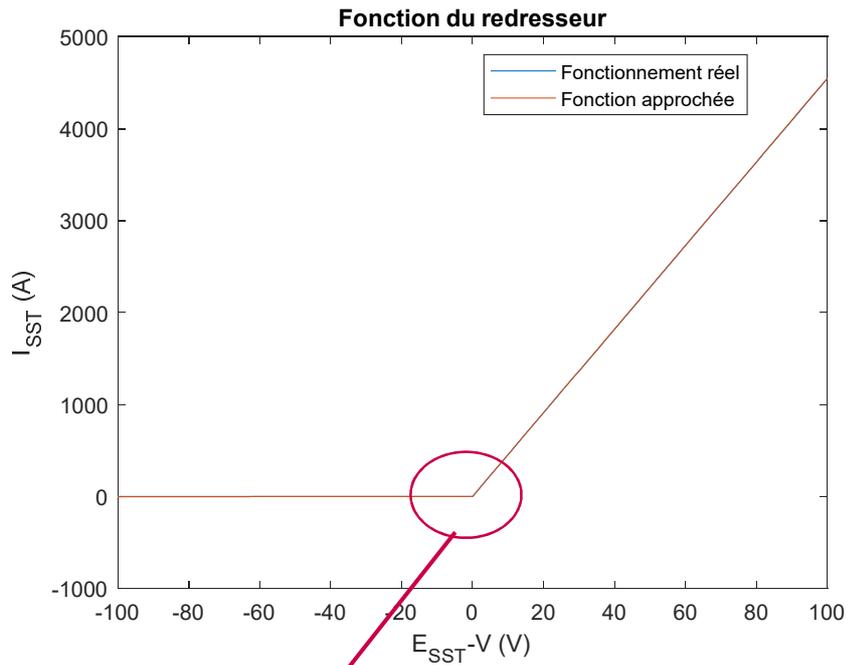


Figure IV.13 : Fonction du redresseur

Finalement, le train pouvant s'attacher à une sous-station (lorsque sa distance à la sous-station est très petite), un nœud de courant est ajouté en sortie du redresseur (cf. Figure IV.14).

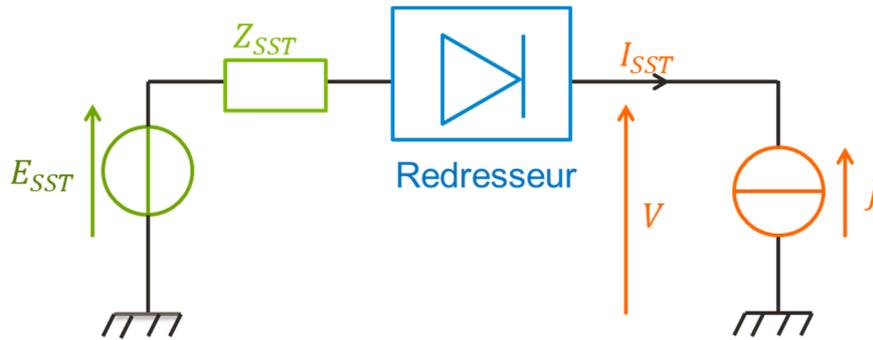


Figure IV.14 : Modèle complet de la sous-station

IV.3.2.6. Puissance du train

Pour toute mission ferroviaire, les données fournies par la SNCF donnent la puissance de chaque train pour la durée de l'étude. Or, au cours de la simulation, les trains se déplacent de nœud en nœud. Il est donc nécessaire d'allouer la puissance du train au bon nœud. Ainsi, lorsqu'un nœud est rattaché à un train, il reçoit intégralement la demande en puissance du train. Si un nœud n'est pas rattaché à un train alors sa puissance est nulle.

Cependant, au passage d'un train, la tension de la ligne chute. Dans le cas d'une tension trop basse, il peut être nécessaire de ralentir les trains ce que nous souhaitons éviter. En conséquence, une gestion basée sur la tension mesurée à la caténaire va déterminer quelle sera la puissance effectivement demandée au nœud (autrement dit à la caténaire) et quelle sera la puissance que devra fournir le système de stockage en complément. Ainsi, au nœud, la demande de puissance est soit l'intégralité de la puissance demandée par le train, soit une valeur moindre (les stockeurs fournissant le complément).

IV.3.2.7. Résolution du système

La représentation nodale donne le système d'équations (IV.1) à résoudre pour chaque pas de temps. Cependant, J (courant absorbé ou renvoyé par les trains) est une inconnue. En effet, nous n'avons accès qu'à la puissance consommée (ou produite dans le cas du freinage) des trains. Or :

$$P_{train} = V_{train} * J_{train} \quad (IV.10)$$

où :

P_{train}	(en W)	Puissance demandée ou fournie par le train
V_{train}	(en V)	Tension du train mesurée au niveau du pantographe
J_{train}	(en A)	Courant absorbé ou renvoyé par le train

Le système présenté en (IV.1) devient alors :

$$A \begin{pmatrix} V \\ I_{SST} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P \\ \bar{V} \\ E_{SST} \end{pmatrix} \quad (IV.11)$$

où :

P	(en W)	Vecteur des puissances consommées ou fournies par les trains au niveau des nœuds de courant. Lorsque le nœud de courant n'est pas rattaché au train, alors cette puissance est nulle (cf. IV.3.2.6).
V	(en V)	Vecteur des tensions au niveau des nœuds
I_{SST}	(en A)	Vecteur des courants issus des sous-stations
E_{SST}	(en V)	Vecteur des tensions à vide des sous-stations
A	-	Matrice d'admittance – impédance globale

Il faut donc résoudre ce système non-linéaire. Pour cela, nous utilisons une méthode de Newton-Raphson implicite appliquée à la fonction :

$$F(X) = A \begin{pmatrix} V \\ I_{SST} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} P \\ \bar{V} \\ E_{SST} \end{pmatrix} \quad (IV.12)$$

La résolution implicite est détaillée en annexe A.3.2.

Pour déterminer la puissance demandée par les trains, nous avons mis en place des gestions à base de règles ou par algorithme d'optimisation qui sont détaillées dans la partie qui suit.

IV.4. GESTION ENERGETIQUE

IV.4.1. Introduction

IV.4.1.1. Norme ferroviaire

L'objectif de notre étude est de s'assurer que la tension de la caténaire reste dans une plage de tension acceptable afin d'éviter un éventuel ralentissement des trains ou encore afin de pouvoir augmenter le trafic. La norme EN50641 donne les critères à respecter pour avoir un plan de tension acceptable :

- la tension minimale mesurée au niveau du pantographe doit être supérieure à 1000V
- la tension moyenne utile mesurée au niveau du pantographe doit être supérieure à 1350V
- la tension maximale mesurée au niveau du pantographe doit être inférieure à 1950V

La tension minimale est calculée de la manière suivante :

$$U_{min} = \min_k(V_{train}(k)) \quad (IV.13)$$

où :

$V_{train}(k)$	(en V)	Tension du train mesurée au niveau du pantographe au pas de temps d'indice k
U_{min}	(en V)	Tension minimale mesurée au niveau du pantographe
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

La tension moyenne utile est définie (selon la norme EN50641) comme étant la moyenne des tensions du train (mesurée au niveau du pantographe) lorsque le train est en traction.

$$U_{moy}^{utile} = \frac{1}{N_{tract}} \sum_{P_{train}(k) > 0} V_{train}(k) \quad (IV.14)$$

où :

$V_{train}(k)$	(en V)	Tension du train mesurée au niveau du pantographe au pas de temps d'indice k
U_{moy}^{utile}	(en V)	Tension moyenne utile mesurée au niveau du pantographe
N_{tract}	-	Nombre de pas de temps durant lesquels le train est en traction
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle
$P_{train}(k)$	(en W)	Puissance du train (une puissance positive signifie que le train est en traction) au pas de temps d'indice k

La tension maximale est calculée de la manière suivante :

$$U_{max} = \max_k(V_{train}(k)) \quad (IV.15)$$

où :

$V_{train}(k)$	(en V)	Tension du train mesurée au niveau du pantographe au pas de temps d'indice k
U_{max}	(en V)	Tension maximale mesurée au niveau du pantographe

IV.4.1.2. Solutions pour respecter la norme

Une solution possible pour respecter les critères précédents est de réduire la sollicitation de la ligne : le train soutire moins de courant ce qui réduit la chute de tension. Afin de conserver la même puissance fournie au moteur de traction (et donc la même vitesse du train), le système de stockage embarqué fournit le complément. La gestion énergétique doit donc déterminer la part allouée au système de stockage permettant de maintenir le plan de tension dans une plage qui respecte les critères. Nous avons étudié plusieurs gestions :

- une gestion par règles selon les seuils de tension (cf. IV.4.2),

- une gestion par règles selon la norme ferroviaire (présentée à l'annexe A.3.5),
- une gestion par l'algorithme d'optimisation (cf. IV.4.3), qui est idéale mais ne s'applique pas en temps réel. Elle permet juste de fournir une référence.

De plus, il est possible d'équiper les trains avec deux systèmes de stockage ayant des performances complémentaires (haute densité de puissance comme des supercondensateurs et haute densité d'énergie comme des batteries). Pour répartir la puissance entre les deux systèmes, nous utilisons une gestion fréquentielle comme dans le cas de la traction diesel-électrique hybride (cf. le paragraphe III.4.3).

IV.4.2. Gestion énergétique selon les seuils de tension

IV.4.2.1. Principe de la gestion

L'objectif de notre étude est de s'assurer que la tension de la caténaire reste dans une plage de tension acceptable selon les critères de la norme EN50641. Pour cela, nous avons mis en place une gestion qui répartit la puissance entre les sources selon deux seuils de tension (cf. Figure IV.15).

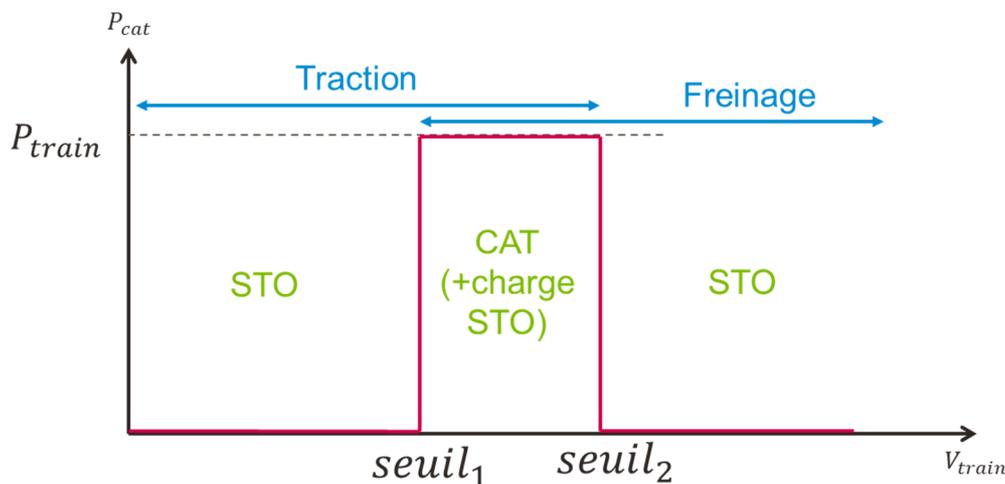


Figure IV.15 : Gestion énergétique par seuil

$seuil_1$ (V) est le seuil minimal de tension à partir duquel le stockeur vient en support pour la traction, $seuil_2$ (V) le seuil maximal de tension à partir duquel le stockeur vient en support pour le freinage, P_{train} (W) la puissance du train à fournir au nœud auquel il est rattaché, P_{cat} (W)

la puissance demandée à la caténaire et V_{train} (V) la tension du train mesurée au niveau du pantographe.

La gestion par seuils fonctionne de la manière suivante :

- Si $V_{train} < seuil_1$ ou $V_{train} > seuil_2$, alors c'est le stockeur qui doit fournir ou recevoir (freinage) la puissance du train
- Si $V_{train} \in [seuil_1 ; seuil_2]$, c'est la caténaire qui est en charge de répondre à la demande en puissance. Il est aussi possible de recharger les systèmes de stockage embarqué afin d'avoir le même état de charge au début et en fin de mission.

IV.4.2.2. Fonctionnement

La gestion énergétique pour chaque train se fait en fonction de sa tension au niveau de son point de rattachement sur la caténaire. La première étape de la gestion consiste alors à estimer quelle serait cette tension au nœud pour le pas de temps considéré et pour chaque train de la mission (cf. IV.4.2.3).

La gestion est faite selon deux seuils introduits précédemment (cf. Figure IV.15). Ainsi, suivant si l'on se trouve à droite ou à gauche du seuil, le comportement du stockeur est très différent :

- Si $U < seuil_1$, le stockeur prend tout en charge et fournit la puissance de traction que demande le train (cf. Figure IV.16a),
- Si $U > seuil_2$, le stockeur récupère l'intégralité de la puissance de freinage du train (cf. Figure IV.16b),
- Si $U \in [seuil_1 ; seuil_2]$, la caténaire répond seule à la demande (cf. Figure IV.17).

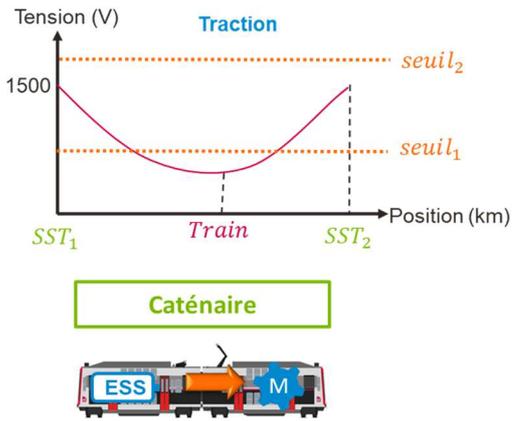


Figure IV.16a : La tension est en-dessous de $seuil_1$

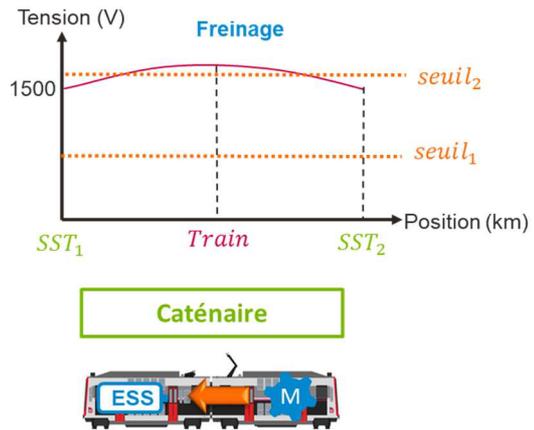


Figure IV.16b : La tension est au-dessus de $seuil_2$

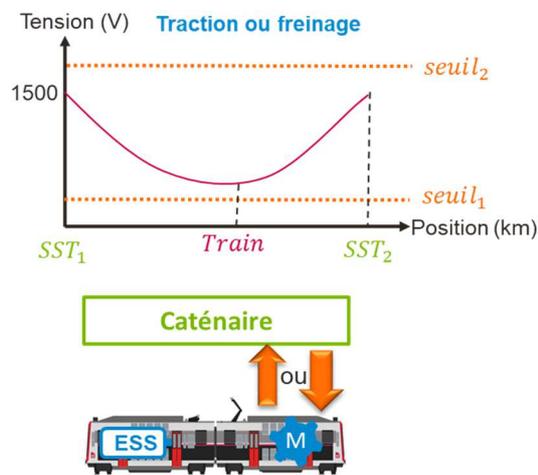


Figure IV.17 : La tension est entre les deux seuils

Sur chaque pas de temps, les sources (caténaire et système de stockage) fonctionnent donc selon un mode du « tout ou rien ». Ce mode de fonctionnement crée de fortes oscillations de tension. La Figure IV.18 montre un exemple où la tension oscille entre la tension à vide des sous-stations (dans ce cas, fixée à 1800V) et une tension proche de 1200V. En effet, lorsque la tension franchit la limite inférieure ($seuil_1$), la gestion cesse de solliciter la caténaire. C'est donc le système de stockage qui fournit toute la demande de traction. Puisque la caténaire n'est pas du tout sollicitée, sa tension remonte au niveau de la tension à vide des sous-stations. Au pas de temps suivant, puisque la tension est correcte, la caténaire est de nouveau utilisée (et seulement elle) pour répondre à la demande. La tension chute alors car elle fournit seule la puissance demandée. Elle franchit donc à nouveau le seuil inférieur de la gestion et le cycle recommence.

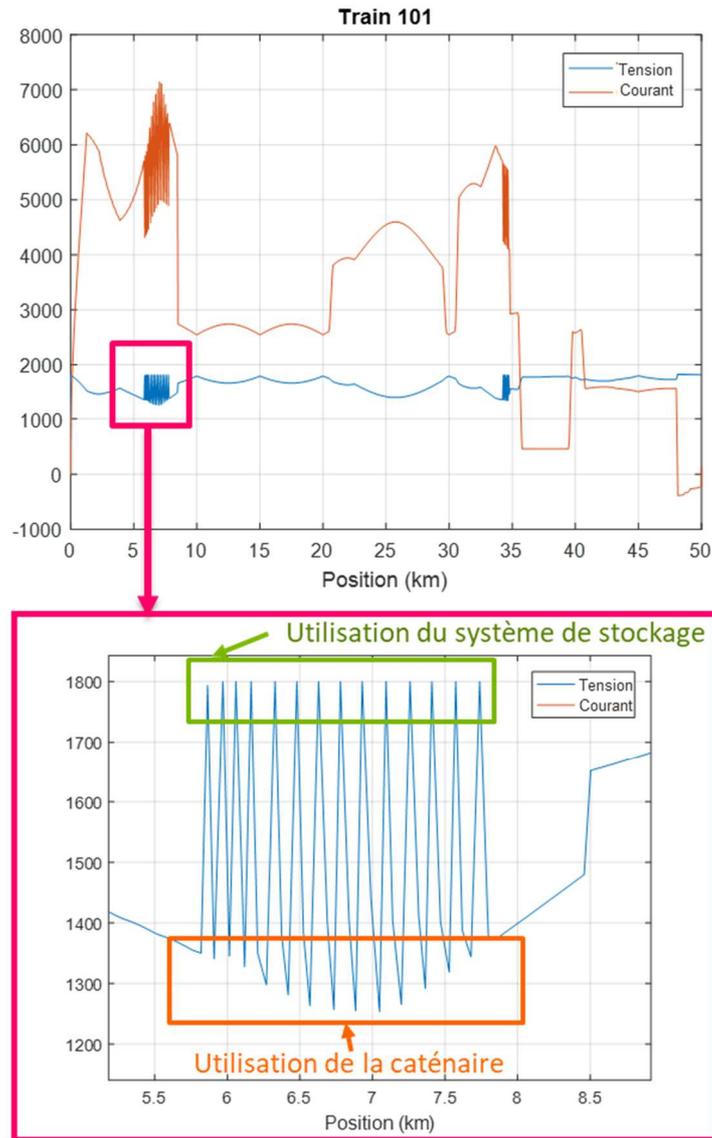


Figure IV.18 : Oscillations de tension

C'est donc un comportement haché que nous souhaitons éviter. En conséquence, nous avons fait le choix d'utiliser au maximum la caténaire. Ainsi, lorsque la tension du train franchit un des seuils, la caténaire participe aussi pour répondre à la demande mais dans une moindre mesure : elle ne fournit que la part de puissance qui fait que la tension mesurée au niveau du pantographe reste supérieure au seuil. Le système de stockage fait alors le complément. Il est possible que la caténaire ne puisse rien fournir selon le niveau de tension ; dans ce cas, seul le système de stockage est utilisé. Nous avons donc un fonctionnement où les sources se partagent la puissance et non plus un fonctionnement où une source est en charge de toute la demande alors que l'autre n'est pas sollicitée. Cela évite les oscillations de tension. Cependant, pour faire

cela, il faut estimer, selon la tension, quelle est la puissance maximale que peut fournir la caténaire (cf. IV.4.2.4).

IV.4.2.3. Estimation de tension

Afin de déterminer la répartition de la demande entre caténaire et système de stockage, il est nécessaire d'estimer la tension du train au pas de temps considéré. Nous ne connaissons pas encore la puissance que fournit la caténaire, il est donc impossible de résoudre le système (IV.11). Notre objectif est donc d'obtenir une estimation locale de la tension (au niveau du train) sans faire de résolution globale (envisageable uniquement en simulation mais pas pour une application réelle).

Pour cela, deux méthodes sont utilisées :

- l'une exploitant la dérivée temporelle de la tension du train (mesurée au niveau du pantographe),
- l'autre exploitant un modèle équivalent approché de la ligne.

✓ *Dérivée temporelle de la tension*

L'usage de la dérivée de la tension du train n'est possible que si nous avons suffisamment d'informations. Dans notre cas, nous avons choisis d'utiliser une différence finie. Cependant, nous ne pouvons calculer cette dérivée à un moment d'indice $(k - 1)$ que si la caténaire a été sollicitée au pas de temps précédent.

$$derive = \frac{V(k - 1) - V(k - 2)}{dt} \quad (IV.16)$$

où :

<i>derive</i>	(en V/s)	Dérivée temporelle
$V(k - 1)$	(en V)	Tension au nœud au pas de temps d'indice $(k - 1)$
$V(k - 2)$	(en V)	Tension au nœud au pas de temps d'indice $(k - 2)$
<i>dt</i>	(en s)	Pas de temps de la simulation
<i>k</i>	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

Nous avons alors :

$$V_{estimée}(k) = V(k - 1) + derive \cdot dt \quad (IV.17)$$

où :

<i>derive</i>	(en V/s)	Dérivée temporelle
$V(k - 1)$	(en V)	Tension au nœud au pas de temps d'indice k-1
$V_{estimée}(k)$	(en V)	Tension estimée au nœud au pas de temps d'indice k

dt	(en s)	Pas de temps de la simulation
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

Cette tension nous permet alors de prendre une décision sur la gestion de puissance pour le pas de temps d'indice k .

✓ *Modèle équivalent approché de la ligne*

Lorsqu'au pas de temps précédent, seul le système de stockage a été sollicité, il est impossible d'avoir une connaissance de la tension (celle-ci étant celle des sous-stations). Il faut donc alors faire appel à un modèle équivalent approché de la ligne (cf. Figure IV.19).

En effet, dans le système complet réel, nous n'avons accès qu'aux informations du train. A partir de celles-ci, nous proposons donc d'extrapoler une information plus globale via un modèle équivalent approché. Pour construire celui-ci, nous ne prenons en compte que les deux sous-stations entourant le train de part et d'autre (les autres sous-stations et les postes de mise en parallèle sont négligés). Le train étudié est considéré comme étant seul sur la ligne entre ces deux sous-stations (les autres trains qui se trouvent entre les mêmes postes fixes sont négligés).

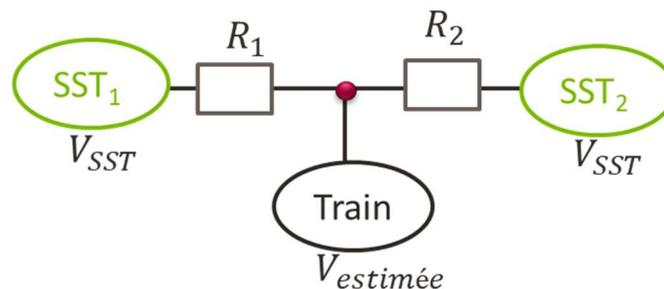


Figure IV.19 : Modèle équivalent approché de la ligne

Nous devons alors résoudre l'équation suivante :

$$(R_1 + R_2)V_{estimée}^2 - V_{SST}(R_1 + R_2)V_{estimée} + P_{node}R_1R_2 = 0 \quad (IV.18)$$

où :

R_1	(en Ω)	Résistance du tronçon de ligne à gauche du train
R_2	(en Ω)	Résistance du tronçon de ligne à droite du train
$V_{estimée}$	(en V)	Tension estimée au nœud de courant auquel le train est attaché
V_{SST}	(en V)	Tension à vide de la sous-station
P_{node}	(en W)	Puissance demandée par le train au nœud auquel il est rattaché

La résolution de l'équation (IV.18) permet de connaître la tension estimée pour le pas de temps considéré. Le calcul des résistances R_1 et R_2 est détaillé dans l'annexe A.3.3.

✓ **Correction de l'écart**

Cette estimation peut présenter des écarts par rapport à la résolution du système global de la ligne ferroviaire (cf. IV.3.2.7). Afin de compenser les écarts entre estimation et résolution du modèle complet, nous multiplions la tension estimée par l'écart obtenu au pas de temps précédent (méthode de space-mapping [87], [88]).

$$V_{estimée}(k) = V_{estimée}(k) * \left(1 + \frac{V(k-1) - V_{estimée}(k-1)}{V(k-1)} \right) \quad (IV.19)$$

où :

$V(k-1)$	(en V)	Tension au nœud pour le pas de temps d'indice $(k-1)$ calculée par la résolution du modèle complet de la ligne ferroviaire
$V_{estimée}(k)$	(en V)	Tension estimée au nœud pour le pas de temps d'indice k
$V_{estimée}(k-1)$	(en V)	Tension estimée au nœud pour le pas de temps d'indice $(k-1)$
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

Le facteur correctif varie d'un pas de temps à l'autre mais aussi selon les cas d'étude. Pour nos cas d'applications, nous avons relevé un écart correctif en moyenne de 0.08% et avec un écart type de 5%.

✓ **Bilan**

Les étapes permettant d'estimer la tension sont résumées sur la Figure IV.20.

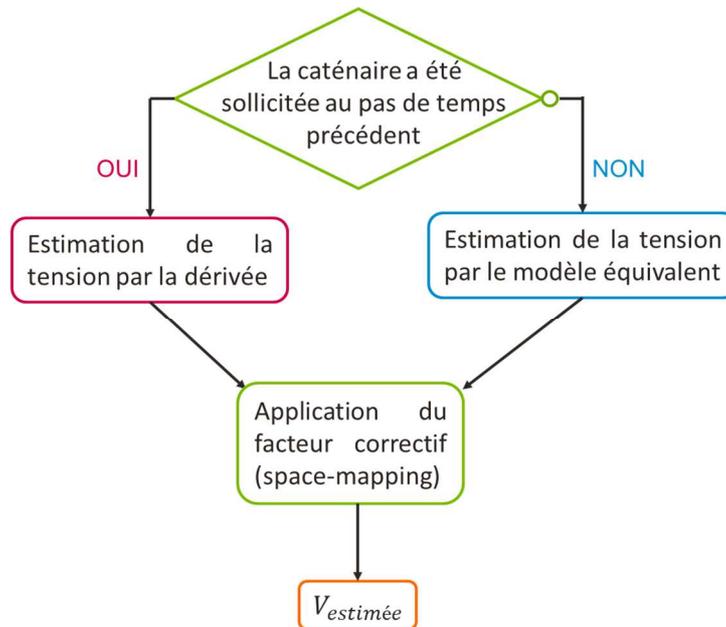


Figure IV.20 : Méthode d'estimation de la tension

Une fois la tension estimée, il faut déterminer quelle est la puissance maximale que peut fournir (ou recevoir en freinage) la caténaire. Le choix de cette puissance doit garantir que la tension reste dans les critères imposés (cf. IV.4.2.1).

IV.4.2.4. Puissance maximale de la caténaire

Pour évaluer la puissance maximale que peut fournir ou recevoir la caténaire, nous utilisons le modèle équivalent (cf. Figure IV.19). Selon ce modèle, nous avons :

$$P_{cat}^{max} = \frac{V_{ref}(R_1 + R_2)V_{limit} - (R_1 + R_2)V_{limit}^2}{R_1R_2} \quad (IV.20)$$

où :

R_1	(en Ω)	Résistance du tronçon de ligne à gauche du train
R_2	(en Ω)	Résistance du tronçon de ligne à droite du train
V_{limit}	(en V)	Tension limite imposée
V_{ref}	(en V)	Tension de référence choisie
P_{cat}^{max}	(en W)	Puissance maximale que peut fournir (ou recevoir) la caténaire au nœud

Le choix de la tension V_{limit} dépend du mode (cf. IV.4.2.6) dans lequel nous nous trouvons. En effet, selon si nous sommes dans un cas de traction ou de freinage, selon si nous nous situons dans l'intervalle des seuils de tension de la gestion ou en dehors, la tension limite est choisie différemment. Il existe trois cas possibles :

- $V_{traction}$ (V) est la tension minimale que l'on impose lorsque le train est en mode traction. Elle peut être fixée au seuil minimum imposée par la norme (1000V) plus une sécurité (par exemple : $1000 + \epsilon V$). Elle doit être supérieure ou égale au seuil minimum de la gestion ($seuil_1$).
- $V_{freinage}$ (V) est la tension maximale que l'on impose lorsque le train est en mode freinage. Elle doit être inférieure à la tension à vide des sous-stations et peut être choisie égale ou légèrement inférieure au seuil maximal de la gestion ($seuil_2$).
- V_{rch} (V) est la tension minimale que l'on impose lorsqu'une recharge du stockeur est effectuée. Elle doit être supérieure ou égale à la tension limite choisie en traction ($V_{traction}$).

De même, la tension V_{ref} est différente selon si l'on est en traction ou en freinage :

- dans le cas de la traction, la référence choisie est la tension à vide des sous-stations (V_{SST})
- dans le cas du freinage, la référence choisie est la tension maximale permanente (U_{max1})

IV.4.2.5. Puissance de la caténaire et du système de stockage

Une fois que la puissance maximale de la caténaire est déterminée, nous pouvons comparer la puissance demandée par le train à cette limite. Si la puissance du train est inférieure à la limite, alors la caténaire répond seule à la demande (traction ou freinage), sinon elle ne fournit/reçoit que P_{cat}^{max} , le système de stockage faisant le complément.

$$P_{cat}(k) = \begin{cases} P_{node}(k) & \text{si } P_{node}(k) < P_{cat}^{max} \\ P_{cat}^{max} & \text{sinon} \end{cases} \quad (IV.21)$$

où :

$P_{cat}(k)$	(en W)	Puissance fournie/reçue par la caténaire au pas de temps d'indice k
$P_{node}(k)$	(en W)	Puissance demandée/renvoyée par le train au nœud auquel il est attaché au pas de temps d'indice k
P_{cat}^{max}	(en W)	Puissance maximale que peut fournir (ou recevoir) la caténaire au nœud

Pour modéliser les pertes dans la chaîne énergétique du système de stockage, nous avons pris un rendement global. La puissance du système de stockage se calcule de la manière suivante :

$$P_{ESS}(k) = \begin{cases} \frac{P_{node}(k) - P_{cat}(k)}{\eta_{ESS}} & \text{pour la décharge} \\ (P_{node}(k) - P_{cat}(k)) * \eta_{ESS} & \text{pour la charge} \end{cases} \quad (IV.22)$$

où :

$P_{cat}(k)$	(en W)	Puissance fournie/reçue par la caténaire au pas de temps d'indice k
$P_{node}(k)$	(en Ω)	Puissance demandée/renvoyée par le train au nœud auquel il est attaché au pas de temps d'indice k
η_{ESS}	-	Rendement du système de stockage
$P_{ESS}(k)$	(en W)	Puissance fournie/reçue par le système de stockage au pas de temps d'indice k
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

Cependant, dans le cas d'une charge du stockeur ou en freinage, il faut s'assurer que la puissance de charge n'est pas supérieure à la puissance maximale de charge du stockeur ou que l'énergie reçue ne dépasse pas sa capacité maximale. Si l'une de ces conditions n'est pas

remplie, alors la puissance est limitée selon la condition la plus contraignante. Dans le cas du freinage, il faut alors dissiper le surplus dans un rhéostat.

Notre objectif est de répondre à toute demande en traction. Le système de stockage doit donc impérativement avoir les capacités suffisantes pour répondre à toute puissance de décharge demandée pendant la mission.

Rappelons que la gestion est faite selon deux seuils. De plus, le train est soit en traction, soit en freinage. Il existe donc plusieurs modes possibles qui sont détaillés dans la partie suivante.

IV.4.2.6. Modes de fonctionnement

Afin d'éviter des oscillations de tension (comme présenté précédemment, cf. le paragraphe IV.4.2.2), nous avons fait le choix de maximiser l'usage de la caténaire. Elle est donc sollicitée le plus souvent possible même si selon le niveau de tension, elle ne fournira qu'une partie de la puissance demandée. Selon si l'on est en traction ou en freinage et selon la valeur de la tension estimée, 6 modes apparaissent (cf. le Tableau IV.1).

Tableau IV.1 : Modes de fonctionnement de la gestion par seuils

Mode	Tension (V)	Puissance (W)	V_{limit} (V)
Traction limitée	$V_{estimée}(k) < seuil_1$	$P_{node}(k) > 0$	$V_{traction}$
Freinage interdit	$V_{estimée}(k) < seuil_1$	$P_{node}(k) < 0$	-
Traction sans limite et recharge	$V_{estimée}(k) > seuil_2$	$P_{node}(k) > 0$	$V_{traction}$ et V_{rch}
Freinage limité	$V_{estimée}(k) > seuil_2$	$P_{node}(k) < 0$	$V_{freinage}$
Traction limitée et recharge	$V_{estimée}(k) \in [seuil_1; seuil_2]$	$P_{node}(k) > 0$	$V_{traction}$ et V_{rch}
Freinage sans limite	$V_{estimée}(k) \in [seuil_1; seuil_2]$	$P_{node}(k) < 0$	$V_{freinage}$

où :

$V_{estimée}(k)$	(en V)	Tension estimée au nœud pour le pas de temps d'indice k
$P_{node}(k)$	(en Ω)	Puissance demandée/renvoyée par le train au nœud auquel il est attaché au pas de temps d'indice k

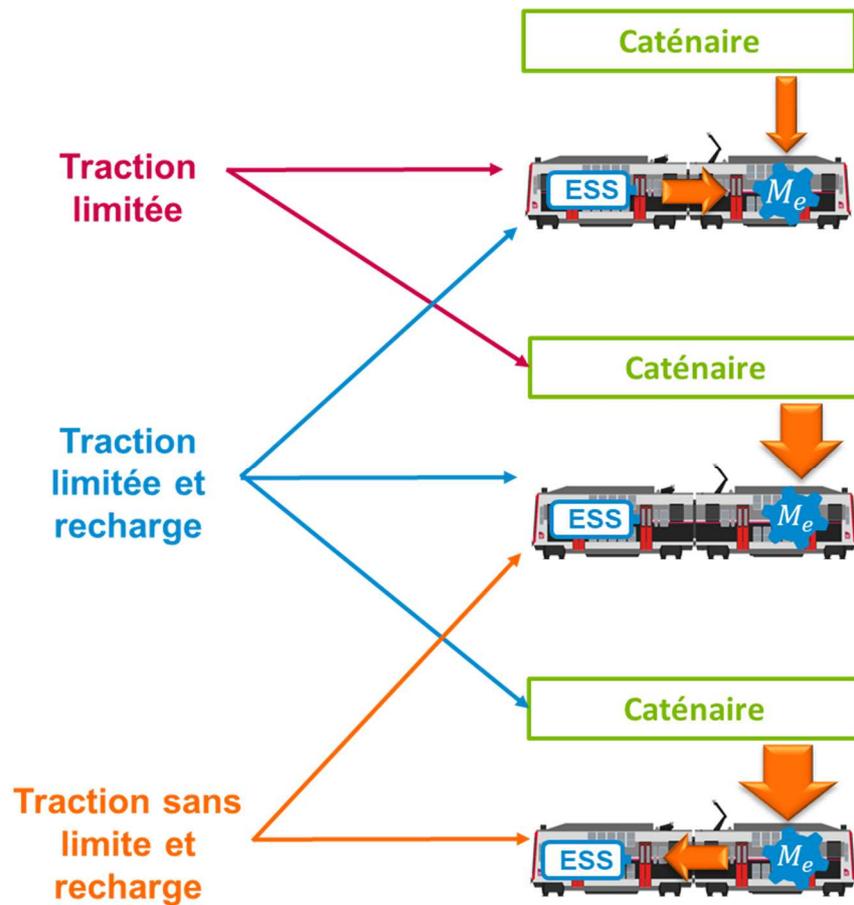
$seuil_1$	(en V)	Seuil de tension minimale à partir duquel le stockeur vient en support pour la traction
$seuil_2$	(en V)	Seuil de tension maximale à partir duquel le stockeur vient en support pour le freinage
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle
V_{limit}	(en V)	Tension limite pour le calcul de la puissance maximale de la caténaire (cf. IV.4.2.4).

✓ **Traction**

Selon que la puissance demandée par le train est inférieure ou supérieure à la puissance maximale de la caténaire, le système de stockage sera ou non sollicité (cf. IV.4.2.5). Nous pouvons alors distinguer en traction 3 comportements possibles :

- la caténaire répond seule à la demande,
- la caténaire et le système de stockage répondent tous les deux à la demande,
- la caténaire répond à la demande et recharge le système de stockage.

Pour ce dernier cas, la puissance maximale de la caténaire est réévaluée une seconde fois avec la limite V_{rch} . Une distinction a été faite entre la limite en puissance pour répondre à une demande de traction et celle pour recharger le système de stockage. En effet, avoir deux limites différentes permet d'éviter que la tension minimale du train soit atteinte lors d'une recharge du stockeur. Les modes de fonctionnement en traction peuvent donc adopter les comportements suivants (ces modes sont détaillés dans l'annexe A.3.4) :



ESS = système de stockage embarqué

M_e = moteur électrique

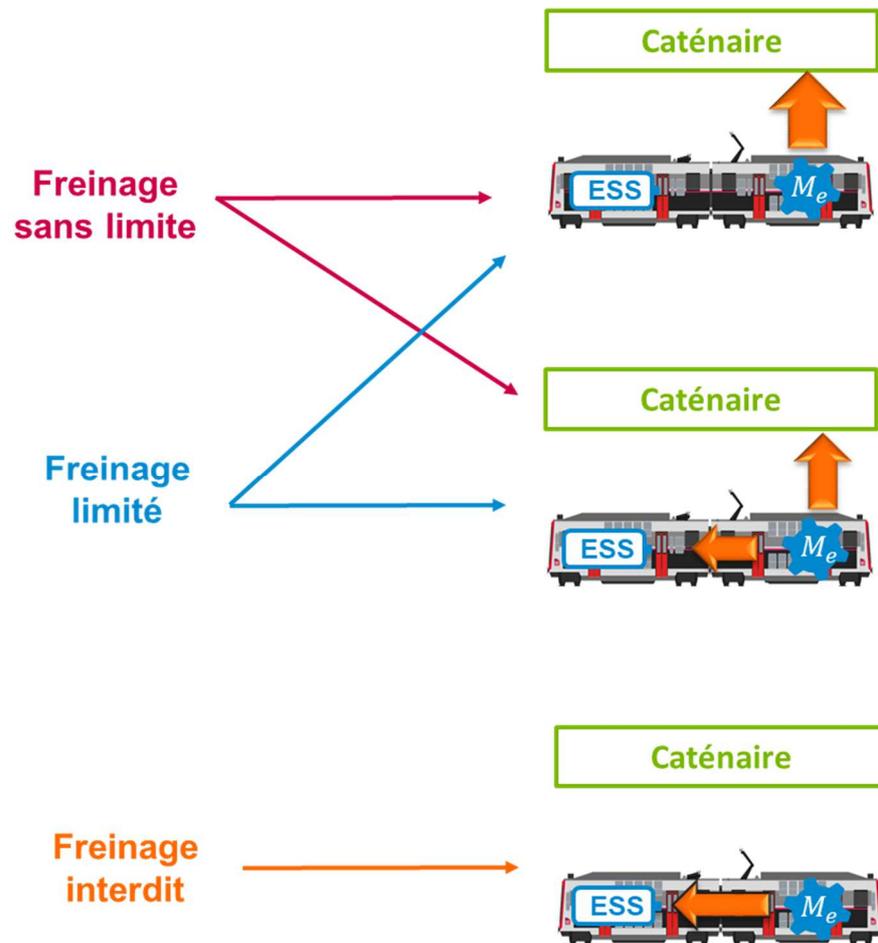
Figure IV.21 : Modes de fonctionnement en traction dans le cas de la gestion par seuils

✓ *Freinage*

Selon si la puissance renvoyée par le train est inférieure ou supérieure à la puissance maximale de la caténaire, le système de stockage sera ou non utilisé pour récupérer l'énergie de freinage (cf. IV.4.2.5). Nous pouvons alors distinguer en freinage 3 comportements possibles :

- la caténaire reçoit seule la puissance de freinage,
- la caténaire et le système de stockage reçoivent chacun une part de la puissance de freinage,
- le système de stockage est seul à recevoir la puissance de freinage.

Les modes de fonctionnement en freinage peuvent donc adopter les comportements suivants (ces modes sont détaillés dans l'annexe A.3.4) :



ESS = système de stockage embarqué

M_e = moteur électrique

Figure IV.22 : Modes de fonctionnement en freinage dans le cas de la gestion par seuils

IV.4.2.7. Bilan

La gestion par seuils se fait en plusieurs étapes. Il faut tout d'abord estimer la tension au niveau du train. Pour cela, deux méthodes sont possibles (par la dérivée ou par le modèle équivalent approché présenté précédemment) selon que la caténaire a été sollicitée ou non au pas de temps précédent (cf. IV.4.2.3). Une fois la tension estimée, il faut déterminer la puissance maximale que peut fournir la caténaire (cf. IV.4.2.4) à l'aide d'une limite en tension bien choisie qui dépend du mode de fonctionnement (cf. IV.4.2.6). Nous pouvons alors déterminer la répartition de puissance entre la caténaire et le système de stockage (cf. IV.4.2.5). Les différentes étapes de la gestion sont résumées sur la Figure IV.23.

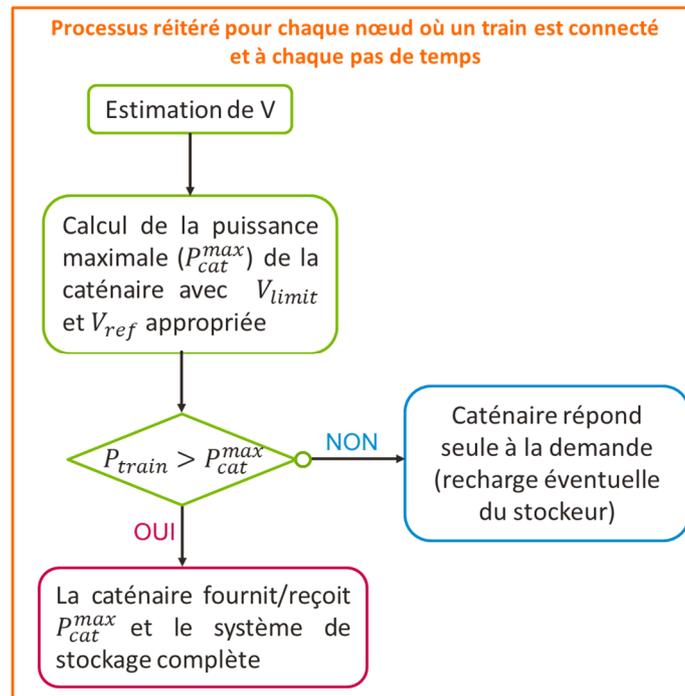


Figure IV.23 : Etapes de la gestion par seuils

IV.4.3. Gestion énergétique par algorithme d'optimisation

La dernière gestion que nous avons étudiée a été faite par le biais d'un algorithme d'optimisation. Dans ce cas, aucune loi de gestion n'est implantée, c'est un algorithme d'optimisation qui vient pour chaque pas de temps décider pour chacun des stockeurs embarqués quelle va être leur puissance. La puissance soutirée à la caténaire est alors déduite de la puissance des stockeurs. Pour chaque pas de temps, nous respectons donc, pour tous les transferts de puissances, l'égalité suivante :

$$P_{train}(k) = P_{cat}(k) + P_{ESS}(k) + P_{rheostat}(k) \quad (IV.23)$$

où :

$P_{train}(k)$	(en W)	Puissance du train (traction ou freinage) pour le pas de temps d'indice k
$P_{cat}(k)$	(en W)	Puissance que fournit ou reçoit la caténaire pour le pas de temps d'indice k
$P_{ESS}(k)$	(en W)	Puissance du système de stockage (charge ou décharge) embarqué dans le train pour le pas de temps d'indice k
$P_{rheostat}(k)$	(en W)	Puissance dissipée dans le rhéostat du train pour le pas de temps d'indice k
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

Un exemple d'application de cette gestion est donné en annexe A.3.6.

IV.4.4. Cas particulier de deux types de stockeurs

Dans le cas où deux types de systèmes de stockage sont embarqués dans le train (par exemple batteries et supercondensateurs), il est nécessaire d'ajouter une gestion supplémentaire pour déterminer la puissance allouée à chacun des systèmes de stockage. Dans ce cas, nous appliquons la même gestion que celle présentée au Chapitre III : une gestion fréquentielle (cf. le paragraphe III.4.3).

Tout d'abord, la gestion à base de règles (selon des seuils ou selon la norme) s'applique afin de déterminer la puissance allouée aux systèmes de stockage. Ensuite, cette puissance est filtrée au moyen d'un filtre passe-bas du 1^{er} ordre pour séparer la demande selon sa dynamique (cf. Figure IV.24).

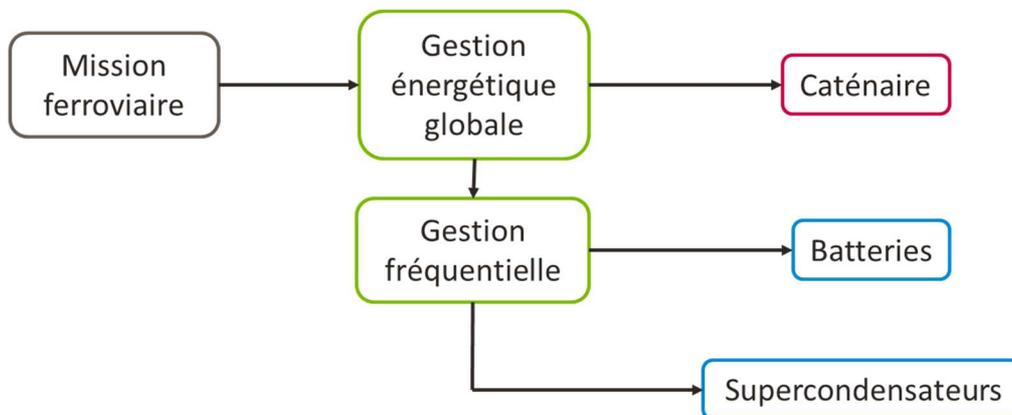


Figure IV.24 : Gestion dans le cas de deux types de systèmes de stockage

IV.5. DIMENSIONNEMENT PAR OPTIMISATION COMBINANT GESTION ET DIMENSIONNEMENT

IV.5.1. Modèle orienté pour l'optimisation

IV.5.1.1. Mission ferroviaire

Le dimensionnement par optimisation s'effectue sur une mission ferroviaire (cf. le paragraphe II.3). Dans le cas de la traction hybride électrique, nous avons besoin des informations suivantes pour chaque pas de temps :

- la position de chacun des trains circulant sur la portion de ligne étudiée (par exemple, cf. Figure IV.25, les trains circulent de la gare G_1 vers la gare G_2 et inversement),
- leur puissance (cf. Figure IV.27).

Ces cycles temporels sont transmis au modèle de dimensionnement sous forme de paramètres (figés pour le dimensionnement). La Figure IV.26 montre la disposition des éléments fixes (sous-stations et postes de mise en parallèle) sur cette ligne ferroviaire.

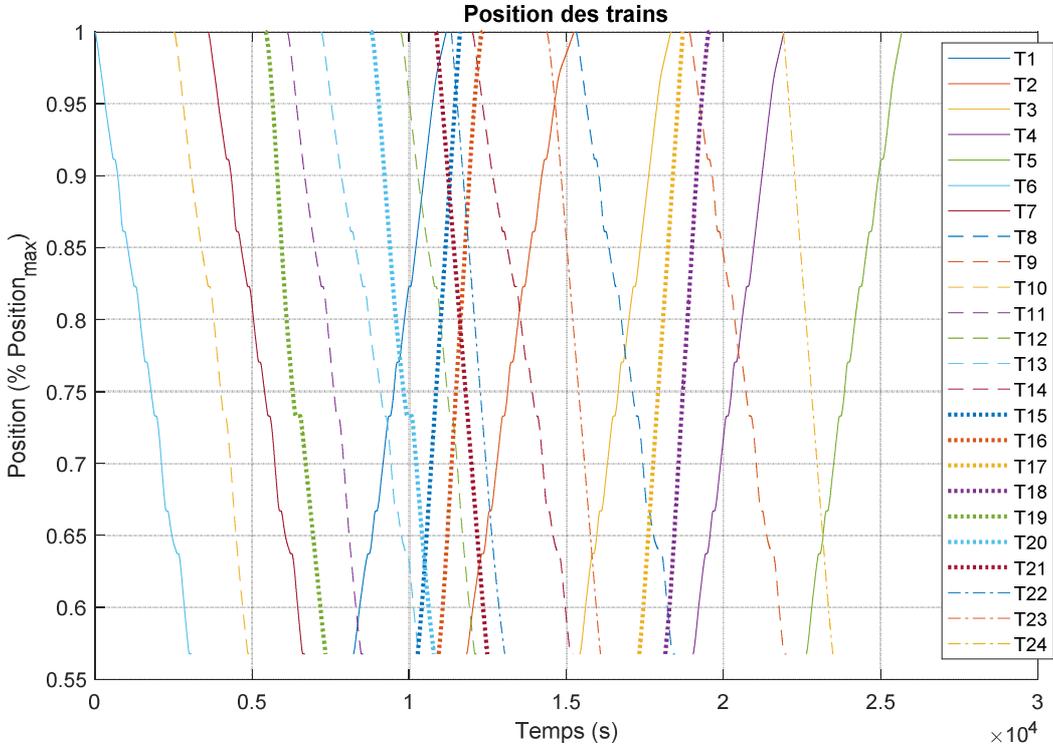
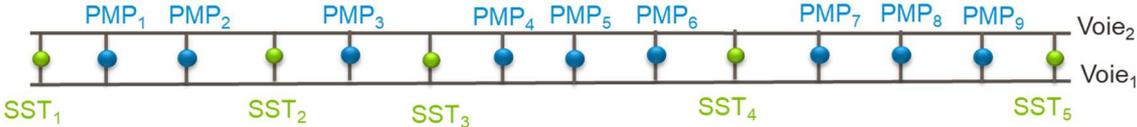


Figure IV.25 : Position des trains (cas d'étude Transilien sud de Paris)



SST_i = sous-station i (i = 1..6)
 PMP_i = poste de mise en parallèle i (i = 1..9)

Figure IV.26 : Disposition de la ligne ferroviaire (cas d'étude Transilien sud de Paris)

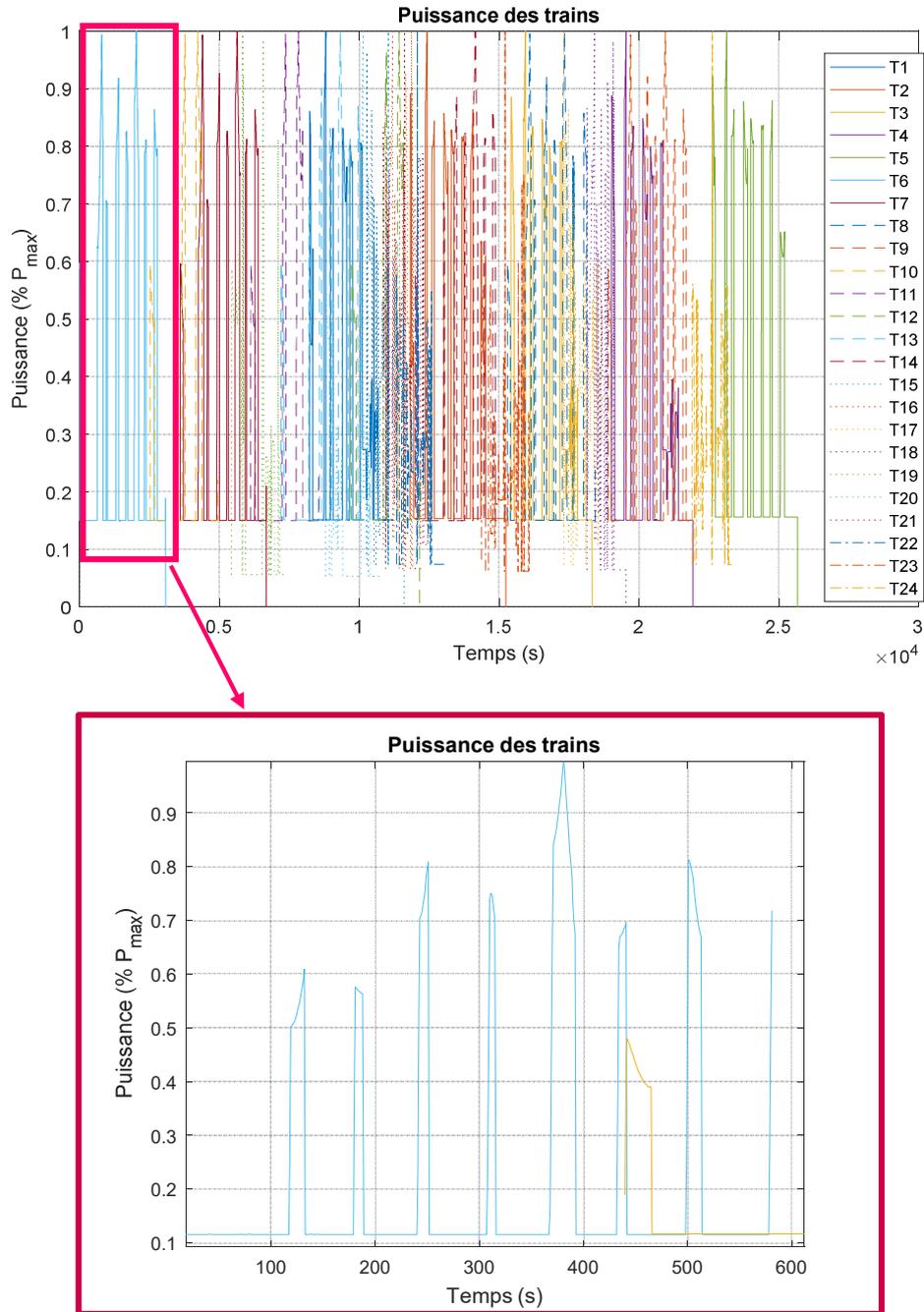


Figure IV.27 : Puissance des trains (cas d'étude Transilien sud de Paris)

IV.5.1.2. Entrées d'optimisation

De même que pour la traction hybride diesel-électrique, nous cherchons à déterminer le nombre de cellules du système de stockage embarqué à bord du train. Cependant, dans le cas de la traction hybride électrique, ce n'est pas un seul train qui est étudié mais un ensemble de trains (cf. Figure IV.25 et Figure IV.27). Or, certains trains sont de même type et d'autres sont réutilisés à un autre moment de la journée pour effectuer un autre trajet. Il faut donc que ces

trains demeurent polyvalents. En conséquence, les entrées d'optimisation sont le nombre de cellules pour chaque *type* de trains (cf. Figure IV.29) et c'est le train le plus dimensionnant qui déterminera la taille du système de stockage, pour tous les autres trains de même type.

De plus, la gestion énergétique est intégrée dans le modèle. Afin de trouver la gestion par règles la plus adaptée au cas d'étude et au dimensionnement des systèmes de stockage, les seuils de tension de la gestion sont eux aussi des entrées d'optimisation.

Si le train est équipé de deux systèmes de stockage différents (batteries et supercondensateurs), alors la fréquence de coupure du filtre passe-bas de la gestion fréquentielle est une entrée d'optimisation. Afin de tenir compte des différents types de train, il y a une fréquence de coupure par type de train.

Dans le cas d'une gestion par algorithme d'optimisation, les entrées d'optimisation sont les puissances à chaque pas de temps de chaque système de stockage (un système de stockage par train, cf. Figure IV.30). Il est alors nécessaire de faire un post-processing pour déterminer le trajet qui aura été le plus dimensionnant pour chaque type de train.

IV.5.1.3. Paramètres

Nous avons choisi de modéliser la ligne par une méthode nodale avec un découpage fixe (cf. IV.3.2). Pour déterminer le découpage de la ligne (nombre de nœuds pour chaque tronçon de ligne) et la position de chaque nœud au cours du temps, nous avons mis en place un modèle générique. Il détermine, quel que soit le cas d'étude, le nombre nécessaire de nœuds, leur position et la puissance requise à chacun d'eux pour toute la durée de la mission, et il transmet ces informations au modèle de dimensionnement sous forme de paramètres vectoriels. De même, la mission ferroviaire (position des trains et leur puissance au cours du temps) est elle aussi un paramètre vectoriel.

Tout comme pour la traction hybride diesel-électrique, les caractéristiques physiques des sources d'énergies (tension nominale, courant nominal, ...) ainsi que les paramètres de la gestion (comme le courant maximal pour la gestion issue de la norme) sont des paramètres fixes pendant tout le processus d'optimisation.

IV.5.1.4. Contraintes en sortie

L'hybridation des trains électriques a pour objectif de participer au soutien de tension. La tension mesurée au niveau du pantographe est donc contrainte selon les prescriptions de la norme EN50641 (cf. le paragraphe IV.4.1.1).

De plus, nous imposons que chaque système de stockage termine la mission avec le même état de charge qu'à son début. Il y a donc pour chaque système embarqué, une contrainte sur l'écart entre état de charge initial (en début de mission) et état de charge final (en fin de mission).

De même que pour la traction hybride diesel-électrique, des contraintes sur les puissances de charge/décharge et sur l'énergie utilisée sont ajoutées au modèle afin de s'assurer que les capacités des sources d'énergie sont respectées. De plus, nous utilisons des systèmes de stockage en embarqué, la masse et le volume de chacun des systèmes de stockage sont alors contraints par une valeur maximale.

IV.5.1.5. Fonction objective

Dans le cas de la traction électrique hybride, nous cherchons à minimiser l'énergie consommée au niveau des sous-stations :

$$E_{conso} = \sum_{i=1}^{nb_{SST}} \sum_{k=1}^N I_{SST,i}(k) * E_{SST,i} * dt \quad (IV.24)$$

où :

$I_{SST,i}(k)$	(en A)	Courant consommé à la sous-station i pour le pas de temps d'indice k
$E_{SST,i}$	(en V)	Tension à vide de la sous-station i
N	-	Nombre de pas de temps de la mission
nb_{SST}	-	Nombre de sous-stations de la ligne
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle
E_{conso}	(en J)	Energie consommée au niveau des sous-stations
dt	(en s)	Pas de temps

IV.5.2. Bilan

Au final, le modèle de dimensionnement s'articule de la façon suivante : les variables dimensionnantes (nombre de cellules des systèmes de stockage pour chaque type de trains, seuils de la gestion) sont transmises à la gestion qui va être bornée par ces variables (puissance et énergie maximale du système de stockage). La gestion va alors déterminer la puissance fournie par la caténaire selon les seuils de tensions. Cette puissance est ensuite transmise au

système à résoudre (cf. IV.3.2.7) qui détermine les courants et tensions en chaque nœud de la ligne. Il est alors possible de calculer l'énergie consommée au niveau des sous-stations. L'algorithme va chercher à minimiser cette quantité en travaillant sur les entrées d'optimisation. Ce modèle est présenté sur la Figure IV.28.

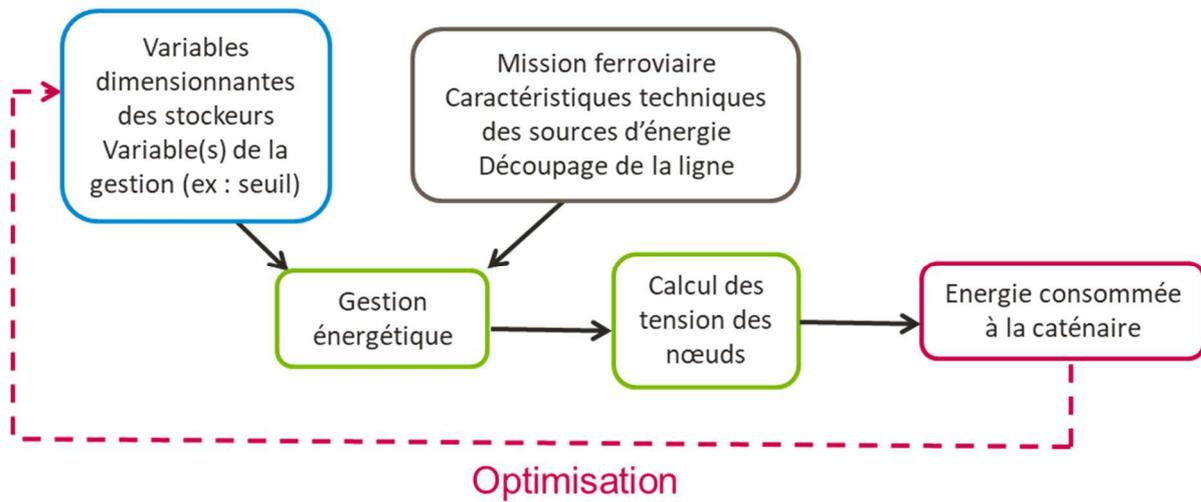


Figure IV.28 : Principe de l'optimisation combinée

Dans le cas d'une gestion par règles, le modèle orienté pour l'optimisation prend la forme présentée sur la Figure IV.29.

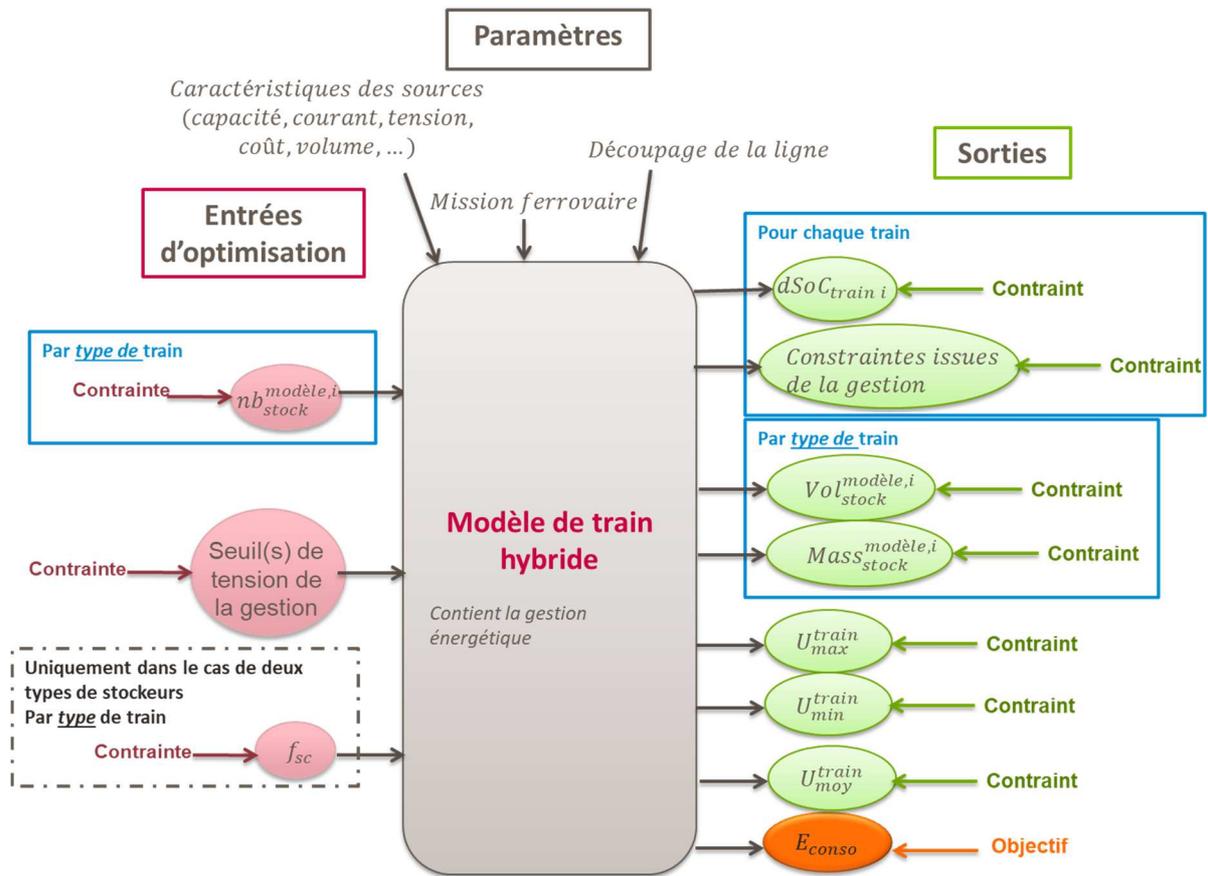


Figure IV.29 : Modèle d'optimisation dans le cas de la gestion par règle

Dans le cas d'une gestion par algorithme, le modèle orienté pour l'optimisation prend la forme présentée sur la Figure IV.30.

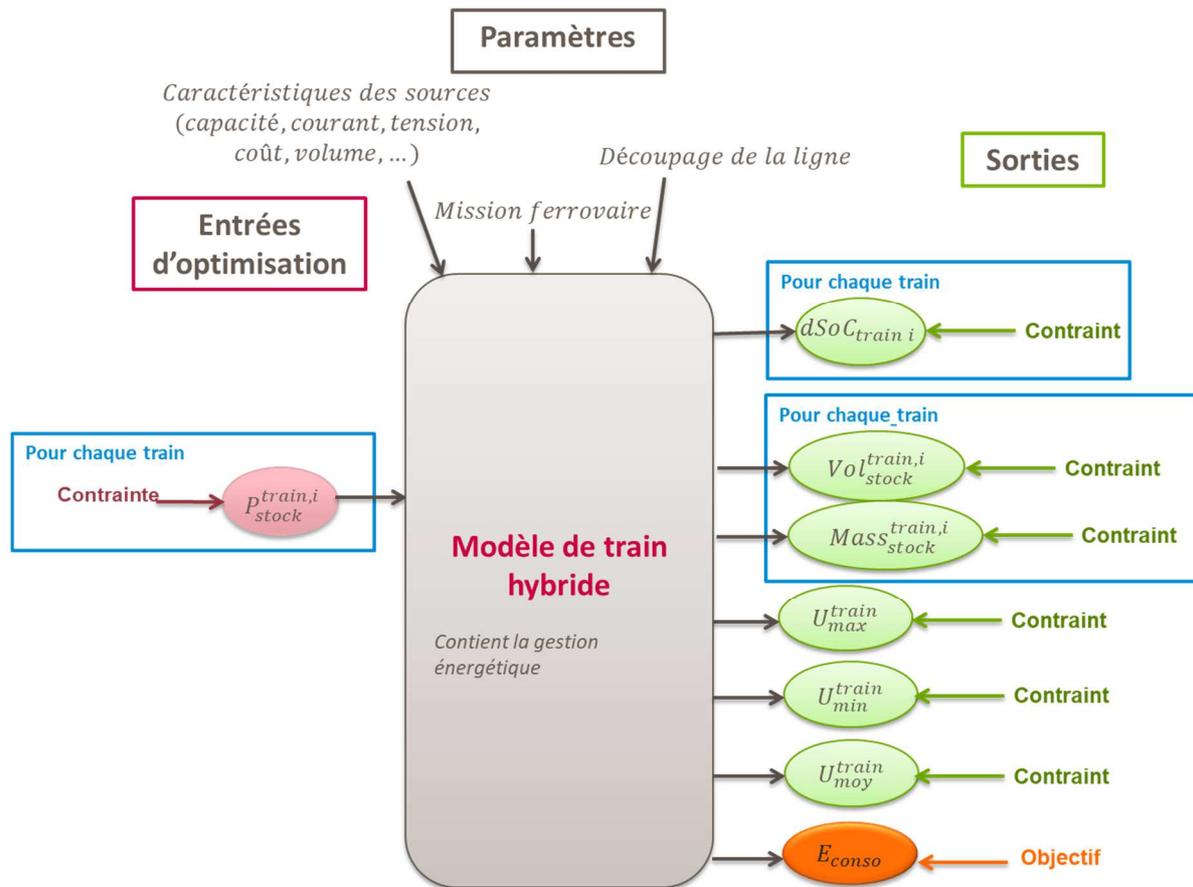


Figure IV.30 : Modèle d'optimisation dans le cas de la gestion par algorithme

La différence essentielle entre ces deux modèles concerne le nombre de variables d'optimisation. Dans le premier cas, les variables d'optimisation sont de l'ordre de la dizaine (seuils de la gestion et nombre de cellules par modèles de trains). Dans le second cas, les entrées d'optimisations sont vectorielles. La taille du modèle dépend donc fortement de la taille de la mission ferrovaire (nombre de trains et nombre de pas de temps de la mission). Ce modèle est donc difficilement utilisable pour des missions ayant un grand nombre de trains ou ayant une durée d'étude importante car alors le modèle demande une grande capacité de mémoire informatique, à la fois en mémoire vive mais aussi en mémoire morte pour le calcul de la matrice jacobienne (cf. V.2.2).

IV.6. CONCLUSION

Au passage d'un train électrique, la tension de la caténaire diminue. Une tension trop basse implique un ralentissement des trains. Afin de corriger ce problème, nous avons étudié la solution du stockage en embarqué dans le train. Cette seconde source d'énergie permet de soutenir la tension de la caténaire en fournissant une partie de la puissance demandée par le

train. Elle permet aussi de récupérer une partie l'énergie de freinage qui serait sinon dissipée dans un rhéostat. Pour modéliser notre système, nous avons choisi de représenter la ligne par le biais de nœuds de courant (représentation nodale) avec des impédances variables (les nœuds se déplacent sur la ligne). De plus, nous avons intégré la gestion énergétique au sein du modèle de dimensionnement afin de prendre en compte son influence. Plusieurs gestions ont été étudiées : à base de règles ou au moyen d'un algorithme d'optimisation. Le modèle obtenu est utilisé pour faire du dimensionnement par optimisation et un cas d'étude est présenté au paragraphe V.4.

Chapitre V : Etude de cas

V.1. INTRODUCTION

Nous avons présenté aux Chapitres III et IV les modèles orientés pour l'optimisation dans le cas des tractions hybrides diesel-électrique et hybrides électriques. Ces modèles sont génériques (par exemple, pour la traction électrique, le découpage de la ligne avec les nœuds se génère de manière automatique). Ils s'appliquent donc à n'importe quel cas d'étude ferroviaire. Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord l'implantation des différents modèles dans l'environnement CADES (cf. V.2). Ensuite, nous avons fait le choix d'étudier deux aspects particuliers de la méthode employée. La première étude porte sur la comparaison du dimensionnement obtenu dans le cas de deux gestions (cf. V.3). La seconde étude (cf. V.4) est une analyse de sensibilité dans le cas d'une gestion à base de règles incluse dans un modèle orienté pour l'optimisation. Nous proposons ensuite une ouverture sur une ligne électrique ayant un stockage stationnaire en bordure de voie et des trains hybrides (cf. V.5).

V.2. IMPLANTATION DU MODELE

V.2.1. Logiciel CADES

Pour implanter nos modèles orientés pour l'optimisation, nous avons choisi d'utiliser l'environnement CADES [89]. Cette suite logicielle permet de représenter les équations dans différents langages : C++, Java, Python ou sml (langage déclaratif d'équations propre à CADES). Les équations sont décrites au format du langage choisi. A partir de ce fichier, CADES va générer un composant logiciel appelé MUSE (cf. Figure V.1). Ce composant logiciel se présente sous la forme d'une boîte noire avec des entrées et des sorties. Il est alors possible de l'utiliser pour effectuer différentes opérations :

- un calcul simple (outil « compute »),
- une analyse de sensibilité (outil « Analyse sensitivity »),
- une optimisation (outil « optimizer »).

Il est aussi possible de coupler des modèles écrits dans des formalismes ou langages différents.



Figure V.1 : Environnement CADES

V.2.2. Dérivation automatique du code

Nous avons fait le choix de cet environnement car CADES utilise ADOL-C [90]-[91] pour faire la dérivation automatique de code [92]-[93]. Cela permet d’avoir la dérivée exacte du modèle et donc d’assurer une meilleure convergence de l’algorithme d’optimisation (cf. le paragraphe II.2.5.2). La version de SQP implantée dans CADES est VF13 (d’HSL) [94].

La dérivation automatique du code que nous utilisons demande beaucoup de mémoire morte. En effet, à la première exécution du code, elle construit dynamiquement un arbre de dérivation pour chacune des possibilités de calcul du code (une branche est créée pour chaque test). Dans le cas d’un processus itératif (comme le Newton-Raphson), l’arbre est construit pour chacune des itérations de l’algorithme. Si ces itérations sont nombreuses, la taille de l’arbre de dérivation augmente très rapidement. Par exemple, prenons le cas d’étude suivant : 2 trains électriques qui circulent pendant une durée de 320s (pas de temps de 1s). Si l’algorithme de Newton Raphson est dérivé par la dérivation automatique, la taille de l’arbre de dérivation est d’environ 620Mo. En revanche, si cet algorithme est extrait (nous imposons alors le calcul du Jacobien à l’aide du théorème des fonctions implicites), la taille de l’arbre de dérivation est de 9Mo. Nous avons donc une réduction d’environ 98%.

V.2.3. Implantation du modèle orienté pour l’optimisation : cas de la traction hybride diesel-électrique

Nous avons choisi de découper notre modèle orienté pour l’optimisation en plusieurs parties (cf. Figure V.2) :

- les équations des sources d’énergie (cf. les équations (III.3) à (III.7) et (III.19) à (III.23) sont décrites dans le langage sml (équations écrites sans ordonnancement de calcul),
- la gestion énergétique ainsi que le calcul des contraintes et de la fonction objective sont décrits dans le langage C++ (langage procédural séquentiel orienté).

Les équations des sources permettent d’obtenir les puissances et énergies caractéristiques qui sont nécessaires à la gestion énergétique. Le modèle des sources d’énergie permet aussi de calculer sa masse, son volume et son coût d’investissement. Le fichier de la gestion d’énergie permet d’obtenir les profils en puissance et en énergie de chacune des sources sur toute la durée de la mission ferroviaire. Il permet aussi de déterminer les contraintes, le coût d’exploitation et la fonction objective. Ces différentes variables sont rassemblées dans un fichier sml qui représente le train complet (cf. Figure V.2).

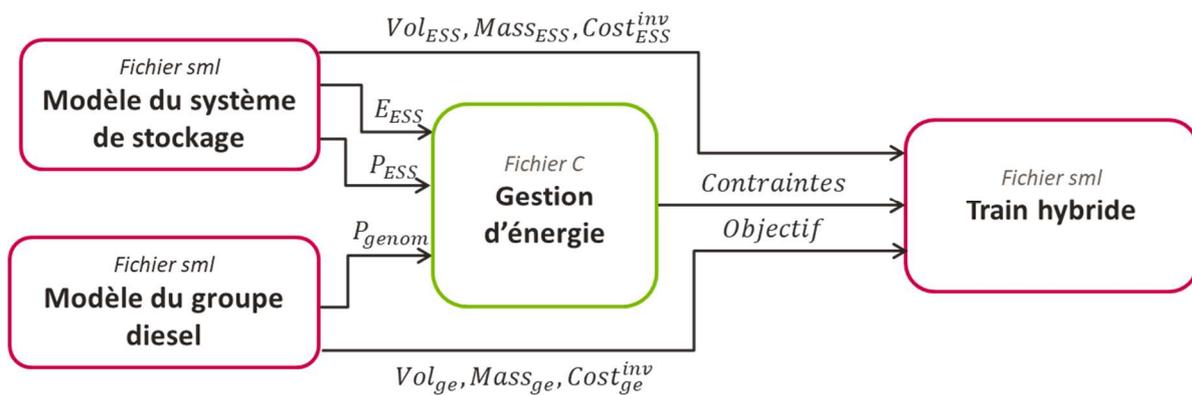


Figure V.2 : Implantation du modèle pour le train hybride diesel-électrique

V.2.4. Implantation du modèle orienté pour l'optimisation : cas de la traction hybride électrique

Dans le cas de la traction hybride électrique, le découpage est sensiblement le même que celui de la traction hybride diesel-électrique (cf. Figure V.3) :

- les équations des sources d’énergie sont décrites dans le langage sml
- la gestion énergétique, les contraintes et la fonction objective sont en C++

Cependant, afin de réduire la taille de l’arbre de dérivation produit par la dérivation du code (cf. V.2.2), nous avons fait le choix d’extraire l’algorithme de Newton-Raphson du code C++ pour le mettre en java. La matrice jacobienne de la résolution est calculée à l’aide du théorème des fonctions implicites (cf. A.3.2.2).

Finalement, le modèle orienté pour l’optimisation s’articule de la manière suivante : les équations des sources permettent le calcul des puissances et énergies caractéristiques nécessaires à la gestion d’énergie. Celle-ci fait appel pour chaque pas de temps au modèle java contenant la méthode de résolution du modèle complet de la ligne ferroviaire. Une fois les

calculs effectués pour tous les pas de temps de la mission, les contraintes et la fonction objective sont calculées (cf. Figure V.3).

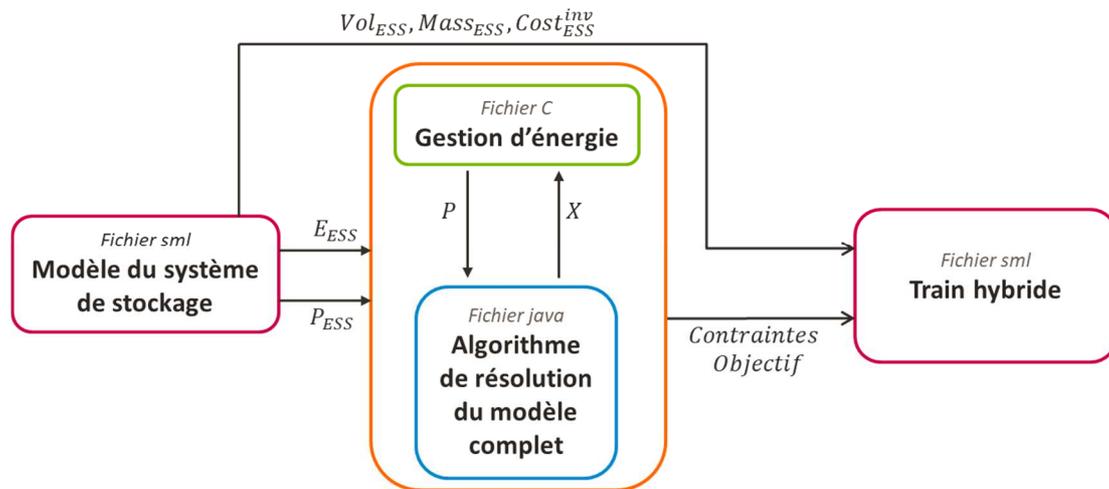


Figure V.3 : Implantation du modèle pour le train hybride électrique

V.2.5. Cas d'étude

Selon le mode de traction, les cas d'études diffèrent. En effet, dans le cas de la traction hybride diesel-électrique, le train est étudié de manière isolée. Nous ne tenons pas compte de son environnement et plus particulièrement des autres trains qui circulent sur la même ligne car ils n'ont pas d'influence sur le comportement énergétique du train. En revanche, dans le cas de la traction hybride électrique, il est impossible de ne pas considérer les autres trains qui circulent en même temps en raison de l'effet de foisonnement. En effet, la consommation énergétique de chaque train va influencer sur la tension de la ligne, impactant ainsi les autres trains. Ainsi, le cas d'étude du train hybride diesel-électrique concerne le trajet d'un unique train, tandis que celui du train hybride électrique prend en compte un ensemble de trains (ici 25 trains).

Notre objectif est de mettre en place une méthode permettant de déterminer le dimensionnement du train hybride. De plus, afin de tenir compte de l'influence de la gestion, celle-ci est intégrée au modèle de dimensionnement. Ainsi, nous souhaitons comparer le dimensionnement obtenu dans le cas de deux gestions différentes. Nous avons choisi le train hybride diesel-électrique pour effectuer cette étude présentée dans la partie suivante. Les deux gestions d'énergie qui sont comparées sont la gestion à base de règles et la programmation dynamique.

La gestion à base de règles prend une décision à chaque pas de temps sans avoir une vue globale de la mission ferroviaire. Elle ne peut donc pas prévoir les pics de puissances de la

mission ferroviaire. En conséquence, le dimensionnement peut être imposé par ces pics et il n'y a alors qu'une seule solution possible. Nous voulons donc nous assurer que les variables de dimensionnement ont une influence sur les sorties du modèle. Pour cela, nous avons utilisé les indices de Sobol pour faire une analyse de sensibilité. Le cas d'étude considéré concerne un ensemble de trains hybrides électriques.

Finalement, nous proposons une ouverture sur une ligne ferroviaire équipée d'un système de stockage stationnaire. Les trains qui circulent sur cette ligne sont aussi des trains hybrides.

V.3. COMPARAISON DE DEUX GESTIONS

V.3.1. Mission ferroviaire

Dans le cas de la traction hybride diesel-électrique, le train est étudié de manière isolé. La mission ferroviaire se présente alors sous la forme de la puissance et de la vitesse du train pour chaque pas de temps (cf. Figure V.4).

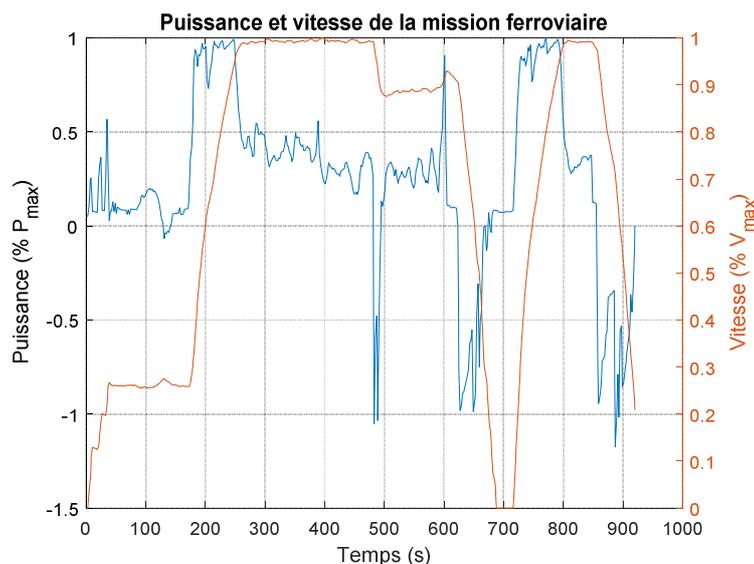


Figure V.4 : Mission ferroviaire du train hybride diesel-électrique

V.3.2. Cahier des charges

V.3.2.1. Entrées d'optimisation

Nous avons fait le choix d'étudier un train hybride ayant deux types de systèmes de stockage : des batteries Lithium-ion et des supercondensateurs. Le modèle orienté pour l'optimisation a été présenté au Chapitre III. Les entrées d'optimisation sont rassemblées dans le Tableau V.1.

Tableau V.1 : Entrées d'optimisation : cas d'étude du train hybride diesel-électrique

Variable	Descriptif	Unité	Valeur minimale	Valeur maximale
nb_{BT}	Nombre de cellules des batteries	-	2000	6000
f_{sc}	Fréquence de coupure du filtre passe-bas	Hz	0	2
P_{genom}	Puissance nominale du groupe diesel	kW	400	1200

V.3.2.2. Paramètres spécifiques à chaque gestion

Le modèle orienté pour l'optimisation fait appel à de nombreux paramètres (tels que les spécifications des systèmes de stockage). Les paramètres communs aux deux modèles sont présentés dans l'annexe A.2.7.

Cependant, chaque gestion a des paramètres qui lui sont propres. Dans le cas de la gestion à base de règles, il existe 4 paramètres qui lui sont spécifiques :

- *seuilRecharge*. Ce paramètre indique le niveau de l'état de charge à partir duquel il est nécessaire de recharger les batteries. En effet, une des contraintes est de terminer la mission avec le même état de charge qu'à son début. Afin d'éviter une brusque recharge uniquement en fin de mission, nous avons introduit ce paramètre pour inciter la gestion à se mettre en mode « recharge » (sous réserve que les conditions de puissance soient favorables). Il est fixé pour ce cas d'étude à 40% de profondeur de décharge.
- $I_{crête}$. C'est le courant crête des batteries. Pour éviter un surdimensionnement, nous avons introduit la possibilité de fonctionner au courant crête lors des pics de forte puissance (en traction ou en freinage).
- $T_{crête,max}$. C'est la durée maximale d'utilisation du courant crête. En effet, il n'est pas possible de solliciter les batteries à leur courant crête au-delà d'une certaine durée (fournie par le constructeur, ici 30s).
- $T_{lim,reuse_Icrête}$. C'est la durée au bout de laquelle il est de nouveau possible d'utiliser la puissance crête. L'utilisation du courant crête entraîne un échauffement des batteries. Il est alors nécessaire d'attendre un certain temps pour que les batteries refroidissent avant de pouvoir de nouveau les solliciter à leur puissance crête (choisie pour ce cas d'étude à 60s).

Dans le cas de la gestion par programmation dynamique, les paramètres spécifiques concernent surtout le paramétrage de l'algorithme de gestion :

- ΔE indique la taille d'une maille (cf. Figure V.5a) ; il permet de déterminer combien d'états sont atteignables entre deux pas de temps (choisie ici à 6),
- *maillage* indique le nombre de points du maillage (la grille globale de tous les états possibles, cf. Figure V.5b, fixé pour ce cas à 500 points).

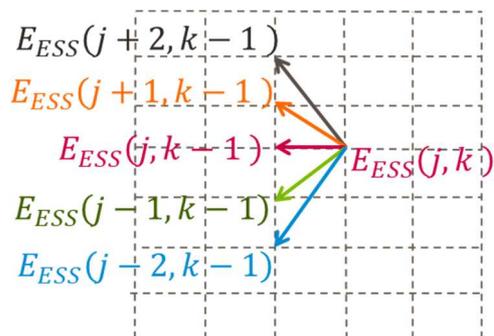


Figure V.5a : Exemple pour $\Delta E = 4$



Figure V.5b : Exemple pour *maillage* = 9

V.3.2.3. Contraintes et fonction objective

Les contraintes du modèle portent sur la masse, le volume des sources mais aussi sur l'état de charge des systèmes de stockage. De plus, dans le cas de la gestion à base de règles, il faut s'assurer que la puissance sollicitée ne dépasse pas les capacités du système de stockage. Ces contraintes sont rassemblées dans le Tableau V.2.

Tableau V.2 : Contraintes : cas d'étude du train hybride diesel-électrique

Variable	Descriptif	Unité	Valeur minimale	Valeur maximale
$Vol_{sources}$	Volume total des sources embarquées	m ³	0	52
$Masse_{sources}$	Masse totale des sources embarquées	kg	0	23400
ΔSoC_{BT}	Ecart entre état de charge initial et final des batteries	Wh	-100	100
ΔSoC_{SC}	Ecart entre état de charge initial et final des supercondensateurs	Wh	-10	10

$C_{P_{dch}}$	Contrainte sur la puissance de décharge des batteries (cf. l'équation (III.46))	W	-10^6	0.01
$C_{P_{ch}}$	Contrainte sur la puissance de charge des batteries (cf. l'équation (III.47))	W	-10^6	0.01
$C_{E_{max}}$	Contrainte sur l'énergie maximale des batteries (cf. l'équation (III.48))	Wh	-10^6	0.01
$C_{E_{min}}$	Contrainte sur l'énergie minimale des batteries (cf. l'équation (III.49))	Wh	-10^6	0.01

La fonction objective que l'on souhaite minimiser est le coût global actualisé qui rassemble coût d'investissement et le coût actualisé d'exploitation (cf. l'équation (III.51)).

V.3.3. Résultats

Dans le cas de la gestion à base de règles, l'optimisation dure 36s et fait 76 itérations, tandis que dans le cas de la programmation dynamique, l'optimisation dure 1h6min et fait 4 itérations sur un ordinateur avec un processeur Intel® Core™ i5-6600 CPU@ 3.3GHz, avec 8Go de RAM et un système d'exploitation en 64bits.

Les résultats de l'optimisation sont rassemblés dans le Tableau V.3. La Figure V.6 et la Figure V.7 présentent les profils de puissance obtenus dans le cas de la gestion par règles et de la programmation dynamique respectivement.

Tableau V.3 : Résultats d'optimisation : cas du train hybride diesel-électrique

<i>Entrées d'optimisation</i>					
Variable	Descriptif	Unité	Train non hybride	Gestion par règles	Programmation dynamique
nb_{BT}	Nombre de cellules des batteries	-	-	5502 (253kWh et 1MW)	450 (21kWh et 88kW)
f_{sc}	Fréquence de coupure du filtre passe-bas	Hz	-	0.35	0.001

P_{genom}	Puissance nominale du groupe diesel	kW	1 514	537	734
-------------	-------------------------------------	----	-------	-----	-----

<i>Contraintes</i>					
Variable	Descriptif	Unité	Train non hybride	Gestion par règles	Programmation dynamique
$Vol_{sources}$	Volume total des sources embarquées	m ³	52	23.8	43
$Masse_{sources}$	Masse totale des sources embarquées	T	23	10.7	13
ΔSoC_{BT}	Ecart entre état de charge initial et final des batteries	Wh	-	22.7 (0.008%)	0
ΔSoC_{SC}	Ecart entre état de charge initial et final des supercondensateurs	Wh	-	-7 (-1.8%)	-2*10 ⁻⁴
$C_{P_{dch}}$	Contrainte sur la puissance de décharge des batteries (cf. l'équation (III.46))	kW	-	-470	-
$C_{P_{ch}}$	Contrainte sur la puissance de charge des batteries (cf. l'équation (III.47))	kW	-	-180	-
$C_{E_{max}}$	Contrainte sur l'énergie maximale des batteries (cf. l'équation (III.48))	kWh	-	-39	-
$C_{E_{min}}$	Contrainte sur l'énergie minimale des batteries (cf. l'équation (III.49))	kWh	-	-33	-

<i>Objectif (et autres sorties)</i>					
Variable	Descriptif	Unité	Train non hybride	Gestion par règles	Programmation dynamique
nb_{SC}	Nombre de cellules de supercondensateurs	-	-	489 (2kWh et 1MW)	7250 (31kWh et 15.5MW)
$Cout_{train}^{act}$	Coût actualisé total du train	k€	4028	3820	2760
$Cout_{inv}$	Coût d'investissement du train	k€	428	1580	1420

$Cost_{exploitation}$	Coût actualisé d'exploitation du train (sur 30 ans)	k€	3600	2240	1340
$Conso_{mission}$	Consommation de carburant pour une mission	L	33	26	24

La répartition de puissance entre les sources est présentée sur la Figure V.6 et la Figure V.7.

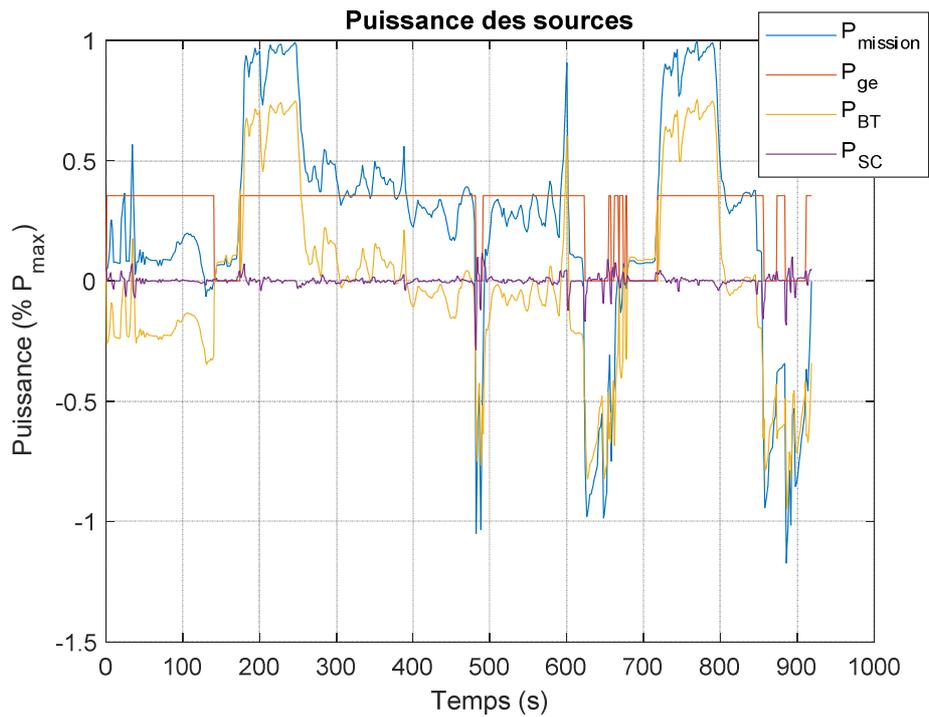


Figure V.6 : Profils de puissance des sources dans le cas de la gestion par règles

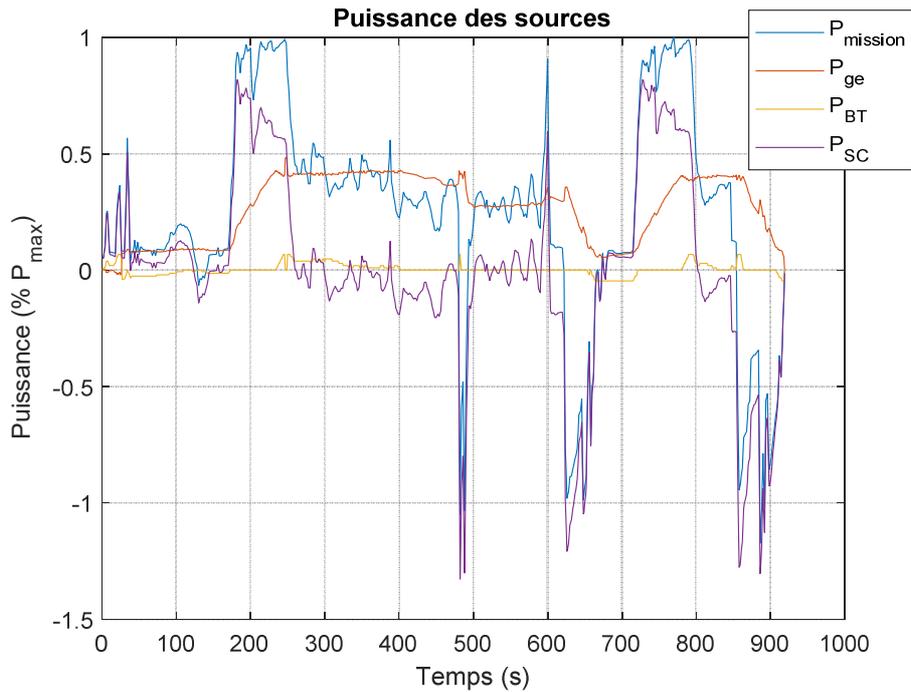


Figure V.7 : Profils de puissance des sources dans le cas de la gestion par programmation dynamique

où :

$P_{mission}$	W	Puissance de la mission ferroviaire
P_{ge}	W	Puissance du groupe diesel
P_{BT}	W	Puissance des batteries
P_{SC}	W	Puissance des supercondensateurs

V.3.4. Analyse

Quel que soit la gestion énergétique utilisée, l'hybridation du train permet une réduction de la consommation de carburant par rapport à un train diesel conventionnel. La plus grande diminution est proposée par le modèle ayant une gestion par programmation dynamique (presque 10L). L'ajout de système de stockage en embarqué permet donc bien de répondre à notre objectif qui est la réduction de carburant afin de diminuer les émissions polluantes.

Cependant, l'optimisation faite avec le modèle utilisant la programmation dynamique demande beaucoup plus de temps que celui utilisant une gestion à base de règles alors que le nombre d'itérations est bien inférieur : 1h6min pour 4 itérations contre 36s pour 76 itérations. En revanche, le résultat obtenu est plus intéressant en terme de coût économique. Le coût d'investissement est sensiblement le même mais le coût d'exploitation est bien inférieur, notamment car la répartition batteries/supercondensateurs n'est pas la même. En effet, dans le cas de la programmation dynamique, ce sont les supercondensateurs qui sont privilégiés alors que pour la seconde gestion, ce sont les batteries qui sont les plus utilisées. Ce

choix va impacter la consommation de carburant (réduction annuelle de plus de 8000L) mais aussi le coût d'exploitation. En effet, plus les batteries sont utilisées, plus le coût de remplacement sera important. Dans le cas des supercondensateurs, aucun modèle de vieillissement n'a été ajouté au modèle en raison de leur aptitude à faire des millions de cycles sans perdre de leur capacité. En conséquence, leur coût n'est pas impacté par leur utilisation.

Nous pouvons aussi remarquer que les contraintes sur l'état de charge des systèmes de stockage sont mieux respectées dans le cas de la programmation dynamique. Pour les batteries, l'algorithme de gestion impose d'avoir le même état de charge en début et en fin de mission (cf. le paragraphe III.4.2.1) tandis que la gestion par règles charge trop les batteries (récupération du freinage). Pour les supercondensateurs, la gestion à base de règles ne parvient pas à les recharger complètement contrairement à la gestion par programmation dynamique. Cependant, il faut noter que dans tous les cas, les écarts d'état de charge restent faibles (0.008% de la capacité maximale pour les batteries et moins de 2% de la capacité maximale des supercondensateurs). Finalement, le comportement du groupe diesel est fortement impacté par la gestion : dans le premier cas, il a un comportement très haché et il fonctionne essentiellement à sa puissance nominale. Tandis que dans le cas de la programmation dynamique, il suit plus la courbe de tendance de la puissance de la mission ferroviaire, tout en fonctionnant la majorité du temps entre 60% et 100% de sa puissance nominale.

Le cas utilisant de la programmation dynamique propose donc une gestion plus intéressante en termes de coût économique et de respect des contraintes. Cependant, ce modèle est moins viable en industrie. En effet, la gestion (telle que développée) ne peut être appliquée en temps réel. De plus, l'optimisation demande une forte capacité de mémoire morte (75 Go, en raison de la dérivation de code) et du temps de calcul. Le modèle est difficilement applicable sur des cas d'étude où la mission dure plus longtemps car cela nécessite beaucoup de mémoire sur le disque dur pour construire l'arbre de dérivation. En effet, une branche est créée pour chaque état possible. Plus la mission dure longtemps ou plus le maillage est fin, plus il y a d'états possibles et donc plus il est nécessaire d'avoir une grande capacité de mémoire morte. A l'inverse, la gestion à base de règles demande peu de temps de calcul et peu de mémoire (21.7Mo) ce qui rend ce modèle intéressant à utiliser en industrie. De plus, elle présente un résultat acceptable et à l'avantage de pouvoir être appliquée telle quelle en temps réel.

Pour conclure, la gestion énergétique a une forte influence sur le dimensionnement. Son intégration dans un modèle de dimensionnement orienté pour l'optimisation permet de prendre

en compte cette influence. Ainsi, pour un dimensionnement donné, le modèle propose aussi la répartition de puissance la plus adaptée entre les sources d'énergie. L'utilisation d'une gestion d'énergie dite optimale permet également d'améliorer la fonction objective mais aussi de mieux respecter les contraintes par rapport à une gestion heuristique.

Le Tableau V.4 résume la comparaison faite entre les deux modèles.

Tableau V.4 : Bilan sur la comparaison entre les deux gestions

Critère	Modèle avec programmation dynamique	Modèle avec une gestion à base de règles
Utilisation de la mémoire morte	Elevée	Faible
Temps d'exécution	Lent	Rapide
Applicable en temps réel	Non	Oui
Qualité de l'optimum obtenu	Bonne	Correcte
Respect des contraintes	Excellent	Bon

Remarque 1. *L'écart sur le coût total actualisé du train est très important entre les deux gestions. Cela est notamment dû à la forte extrapolation que l'on fait sur les 30 ans de vie du train. En effet, pour estimer le coût d'exploitation total, nous faisons l'hypothèse que la même mission est répétée afin que les kilomètres parcourus correspondent aux kilomètres effectués chaque année par un train diesel-électrique conventionnel sur la même ligne. La mission étudiée est très courte (environ 15min). Elle est donc répétée environ 4400 fois chaque année pendant 30 ans. Les écarts constatés sont donc fortement amplifiés ce qui donne cette grande différence de résultats.*

Remarque 2. *Dans le cas du modèle avec une gestion par programmation dynamique, les supercondensateurs sont très favorisés par rapport aux batteries alors que c'est le fonctionnement inverse dans le cas de la gestion par règles. Cette différence s'explique en partie par le maillage de la programmation dynamique qui est assez grossier. D'un pas de temps à un autre, seuls quelques états sont possibles (charge à 50%, à 100%, décharge à 50%, à 100% ou ne rien faire). Par conséquent, l'usage des batteries est assez contraint. L'optimisation va alors reporter une plus grosse partie de la mission sur les supercondensateurs et le groupe diesel.*

V.4. ANALYSE DE LA GESTION PAR REGLES INTEGREE DANS UN MODELE DE DIMENSIONNEMENT ORIENTE POUR L'OPTIMISATION

V.4.1. Problématique de la gestion à base de règles dans un modèle de dimensionnement orienté pour l'optimisation

La gestion à base de règles détermine, pour un pas de temps, la répartition de puissance entre les sources d'énergie. Elle ne tient pas compte de ce qui s'est passé avant ou de ce qui se passera ensuite. Elle a donc un point de vue ponctuel (local) plutôt que global. Par conséquent, ce type de gestion est fortement influencé par les points « critiques » du profil temporel. Par exemple, un point critique est l'instant où le train réclame sa puissance maximale de traction. Les paramètres de la gestion et du dimensionnement vont donc se calibrer de manière à répondre à cette demande tout en assurant le respect des contraintes. Une gestion avec un point de vue global est en mesure de prévoir ce fort pic de puissance et d'adapter la répartition de puissances des pas de temps précédents afin de « lisser » ce pic.

Pour notre application, nous avons intégré une gestion à base de règles dans le modèle de dimensionnement. Celui-ci est ensuite déterminé par un algorithme d'optimisation qui va aussi définir les critères de la gestion. Un profil temporel (fixe) est donné en entrée du modèle (cf. Figure II.9). Il y a donc le risque que la gestion se trouve imposée par les points critiques de ce profil temporel. Le modèle orienté pour l'optimisation aurait alors un espace de solution qui se réduirait à un seul point, n'offrant pas la possibilité à l'algorithme d'optimisation de chercher une autre solution.

Nous souhaitons étudier cette hypothèse. Pour cela, nous avons mis en place une étude de sensibilité sur le modèle de simulation.

V.4.2. Analyse de sensibilité : indice de Sobol

L'analyse de sensibilité permet d'estimer l'influence d'une variable d'entrée sur la sortie du modèle. Il est possible de faire cette analyse de manière locale ou globale. Dans le cas d'une analyse locale, la variable d'entrée varie autour d'un point nominal. Nous étudions alors les variations induites sur la sortie du modèle (calcul de la dérivée partielle de la sortie par rapport à cette entrée). Cependant, le calcul étant effectué à partir d'un point nominal, l'influence de celui-ci ne ressort pas dans les résultats [95]. Ainsi, nous privilégierons une méthode d'analyse globale qui ne dépend d'aucun point. Celle-ci utilise des lois de probabilités sur les entrées du modèle afin d'obtenir la distribution de la sortie. Il en existe plusieurs :

- par la variance (indice de Sobol) [95], [96], [97], [98]. Cet indicateur statistique permet de mesurer l'importance d'une variable d'entrée sur la variabilité de la sortie.
- au moyen d'estimateurs globaux. Ce sont des techniques basées sur l'échantillonnage et qui peuvent faire appel à la relation de Parseval (par exemple : la méthode FAST, Fourier Amplitude Sensitivity Test [99], [100]).
- à l'aide de métamodèles. Ce sont des modèles mathématiques équivalents (modèle linéaire gaussien, régression linéaire ou encore polynôme du chaos) [101], [102]. Ils traduisent la physique du système dans le langage mathématiques (par exemple un circuit équivalent électrique pour représenter la thermique du bâtiment [95]).

Pour notre étude, nous avons choisi d'utiliser la méthode des indices de Sobol qui permet d'évaluer l'impact de la variance conditionnelle sur la variance de sortie. C'est une méthode globale et robuste mais avec un temps de calcul long. Il existe plusieurs indices de Sobol :

- indice du 1^{er} ordre (rapport de la variance conditionnelle par rapport à X_i sur la variance de la sortie) :

$$S_i = \frac{Var(\mathbb{E}(Y|X_i = x_i))}{Var(Y)} \quad (V.1)$$

où :

S_i	-	Indice de Sobol de 1 ^{er} ordre pour la variable X_i
Y	-	Sortie vectorielle du modèle
X_i	-	Composante d'indice i de la variable d'entrée vectorielle X
$\mathbb{E}(Y X_i = x_i)$	-	Esperance de la sortie avec la composante X_i fixe
x_i	-	Valeur de la composante X_i

- indice du 2nd ordre :

$$S_{ij} = \frac{Var(\mathbb{E}(Y|X_i = x_i, X_j = x_j)) - Var(\mathbb{E}(Y|X_i = x_i)) - Var(\mathbb{E}(Y|X_j = x_j))}{Var(Y)} \quad (V.2)$$

où :

S_{ij}	-	Indice de Sobol de 2 nd ordre pour les variables X_i et X_j
Y	-	Sortie du modèle
X_i, X_j	-	Composantes i et j de la variable d'entrée vectorielle X

Ainsi, il est possible de définir de manière successive les indices de Sobol d'ordre n. Le premier indice permet de déterminer l'influence de la variable X_i sur la sortie vectorielle Y (lorsque l'indice de Sobol s'approche de 1 alors la sortie est très sensible à la variable d'entrée).

Les indices d'ordre n permettent de prendre en compte l'influence des variables les unes sur les autres (si S_i est différent de S_{ij} alors il y a un effet d'interaction entre X_i et X_j).

Afin de réduire le nombre de calculs, il peut être intéressant de commencer par classer les variables en fonction de leur influence. Cela permet de sélectionner pour l'analyse de sensibilité uniquement celles qui vont avoir un impact sur la sortie (méthode de screening comme la méthode de Morris [103]).

V.4.3. Mission ferroviaire

Pour notre étude, nous avons choisi de travailler sur le cas de la traction hybride électrique. Il est donc nécessaire de considérer l'ensemble des trains qui circulent sur la ligne et non un unique train. La mission ferroviaire est alors composée de la puissance et de la position de chaque train pour la durée d'étude (cf. Figure V.8 et Figure V.9). Cette mission, issue de données réelles, concerne le trajet entre une gare G_1 et une gare G_2 (avec un terminus pour certains trains à une gare G_3) et dure environ 9h avec un pas de temps de 1s. La ligne ferroviaire est composée de 6 sous-stations et d'un poste de mise en parallèle. Les trains, au nombre de 25, peuvent circuler sur deux voies. La Figure V.10 donne la représentation nodale de cette ligne ferroviaire.

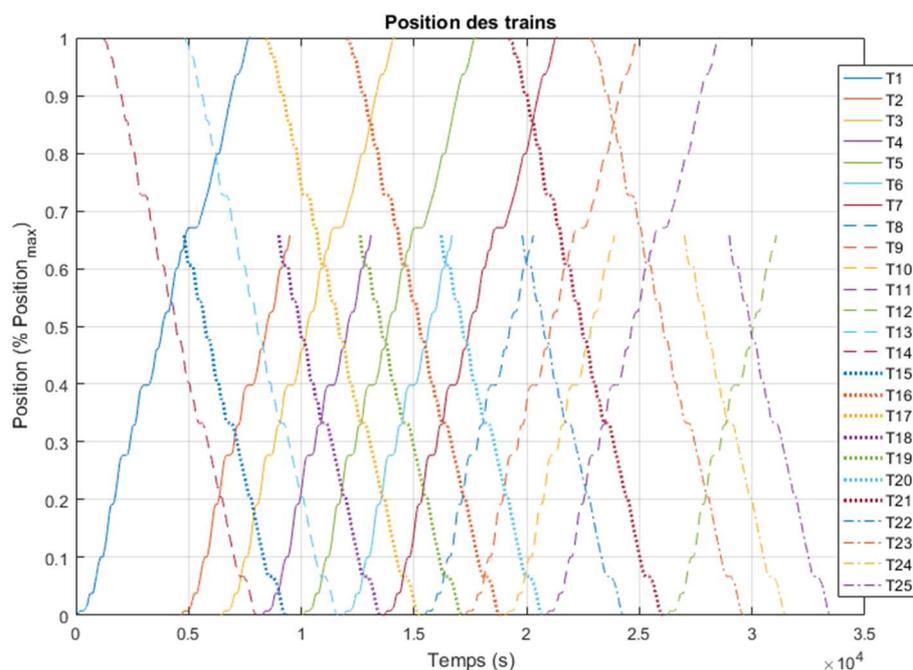


Figure V.8 : Position des trains de la mission ferroviaire entre les gares G_1 et G_2

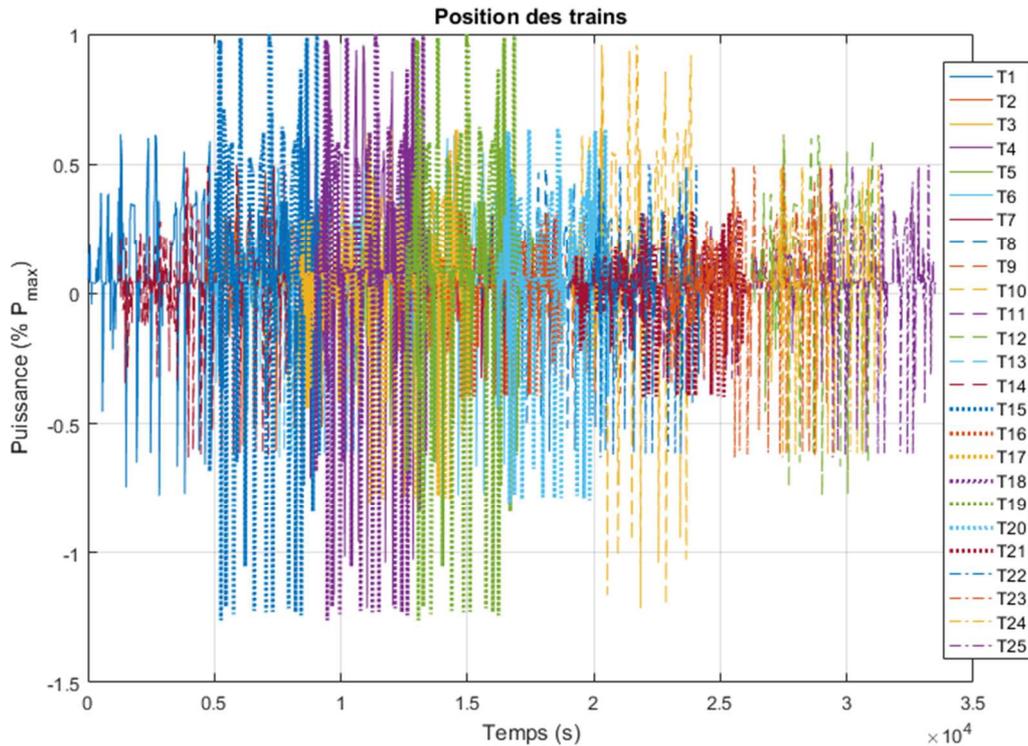


Figure V.9 : Puissance des trains de la mission ferroviaire entre les gares G_1 et G_2

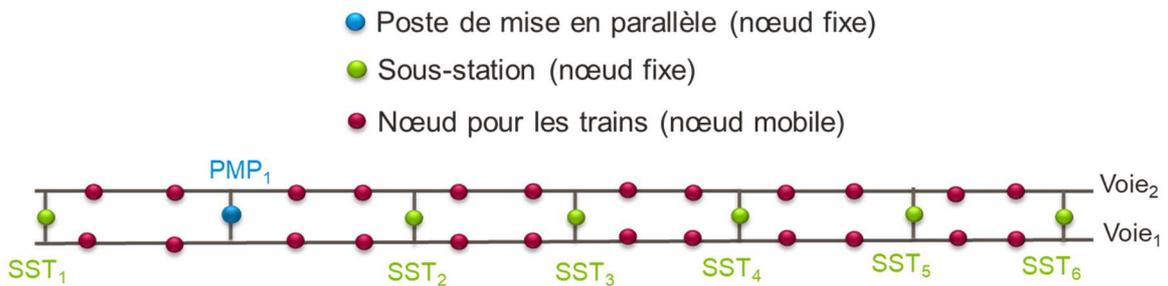


Figure V.10 : Représentation nodale de la ligne ferroviaire

V.4.4. Modèle orienté pour l'optimisation

Nous choisissons de faire l'étude dans le cas de la gestion par seuils (cf. le paragraphe IV.4.2) avec des trains ayant des batteries Lithium-ion en embarqué. Le modèle orienté pour l'optimisation est donné sur la Figure V.11. Sur cette ligne ferroviaire circulent 4 types de trains différents (A, B, C et D), ce qui va impliquer des profils de puissance ainsi qu'une masse et volume maximaux différents.

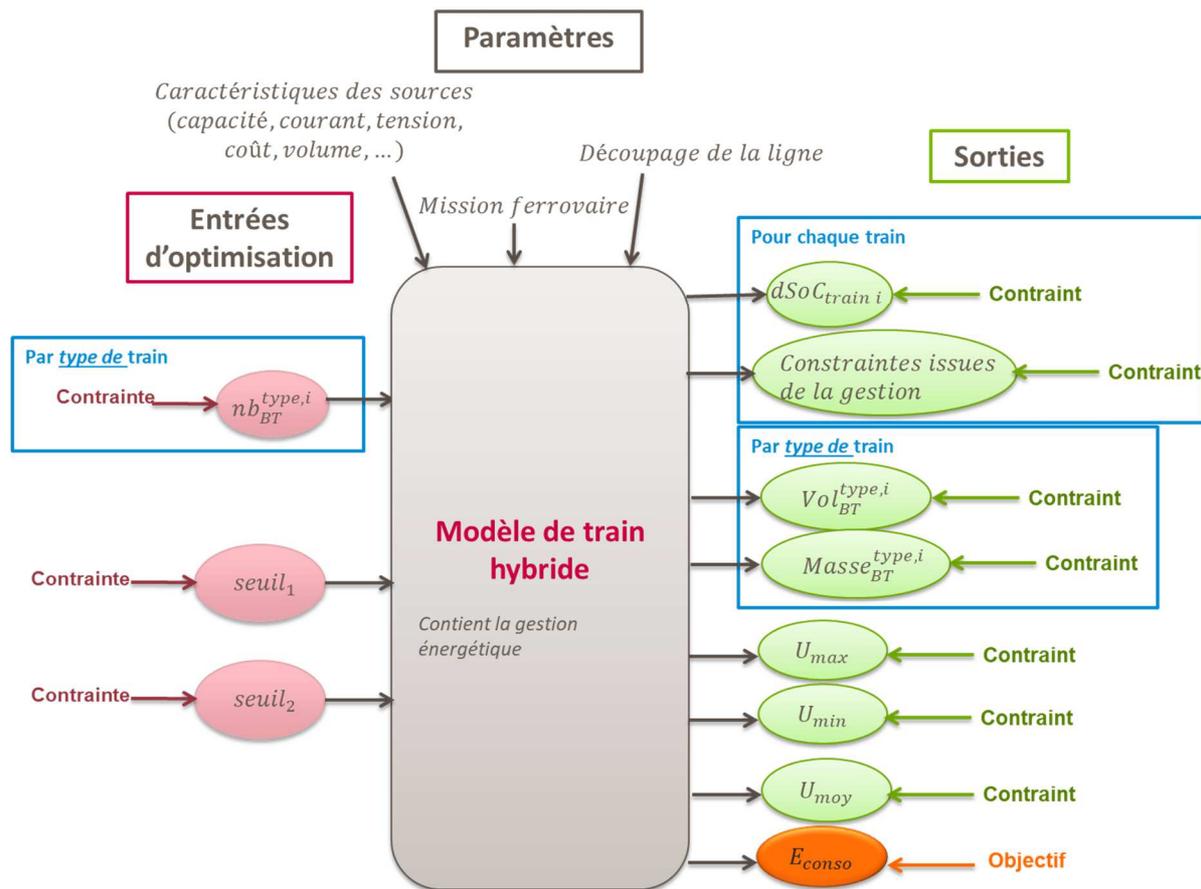


Figure V.11 : Modèle orienté pour l'optimisation dans le cas de la traction hybride électrique

Les entrées d'optimisation sont :

- Le nombre de cellules du système de stockage (par type de train). Dans le cas de cette mission ferroviaire, les trains qui circulent sont de 4 types différents A, B, C et D. Il y a donc 4 variables.
- Le seuil inférieur de la gestion $seuil_1$ (cf. Figure IV.15)
- Le seuil supérieur de la gestion $seuil_2$ (cf. Figure IV.15)

Les contraintes du modèle portent sur :

- Le minimum des tensions des trains : U_{min} (qui doit être supérieure à 1000V),
- Le maximum des tensions des trains : U_{max} (qui doit être inférieur à 1950V),
- La tension moyenne utile des trains : U_{moy} (qui doit être supérieure à 1350V),
- La différence entre l'état de charge initial et l'état de charge final de chacun des systèmes de stockage embarqués à bord des trains : $dSoC_{train}$ (qui doit être égale à 0),

- Les puissances et énergies utilisés de chacun des systèmes de stockage embarqués à bord des trains (qui ont pour obligation de respecter le dimensionnement),
- La masse et le volume de chacun des systèmes de stockage embarqués à bord des trains ($Masse_{BT}$ et Vol_{BT}) qui ne doivent pas dépasser une valeur maximale (par type de train).

La fonction objective est la consommation d'énergie au niveau des sous-stations (E_{conso}).

V.4.5. Choix des variables d'étude

Pour étudier l'hypothèse présentée à la partie V.4.1, nous choisissons de sélectionner les entrées d'optimisation comme étant les variables dont nous souhaitons connaître l'influence.

Nous avons alors :

$$X = (nb_{BT}^A, nb_{BT}^B, nb_{BT}^C, nb_{BT}^D, seuil_1, seuil_2) \quad (V.3)$$

où :

X	-	Vecteur des variables d'entrées
nb_{BT}^i	-	Nombre de cellules de batteries pour les trains A, B, C et D
$seuil_i$	V	Seuil de la gestion ($i = 1,2$)

Nous souhaitons analyser les influences de ces variables sur les sorties suivantes au moyen de l'indice de Sobol de 1^{er} ordre :

- la consommation d'énergie au niveau des sous-stations (fonction objective) : E_{conso}
- le minimum des tensions minimales : U_{min}
- le minimum des tensions moyennes : U_{moy}
- le maximum des tensions maximales : U_{max}

V.4.6. Résultats

Nous avons choisi de calculer les variances sur un échantillon de 3200 valeurs générées au moyen d'une loi normale autour d'un point de fonctionnement répondant à toutes les contraintes (méthode de Pick and Freeze [95]). Le Tableau V.5 présente les indices de Sobol du 1^{er} ordre. L'ensemble des simulations a demandé 35 jours de calcul et a été fait dans MATLAB à l'aide du package MEX permettant d'appeler les codes C des modèles. Les simulations ont été faites

sur un serveur de calcul ayant un Intel® Xeon® CPU ES-2698v4 @ 2.20GHz (2 processeurs) avec 256Go de RAM et un système d'exploitation en 64bit.

Tableau V.5 : Indices de Sobol de 1^{er} ordre

Variables d'entrée	E_{conso}	U_{min}	U_{moy}	U_{max}
nb_{BT}^A	0.84	1	0.91	0
nb_{BT}^B	0.84	1	0.91	0
nb_{BT}^C	0.84	1	0.91	0
nb_{BT}^D	0.84	1	0.91	0
$seuil_1$	0.96	1	1	0
$seuil_2$	0.84	1	0.91	0

V.4.7. Analyse

Nous pouvons voir que certaines sorties sont plus sensibles que d'autres aux variables d'optimisation. Par exemple, la tension minimale est fortement sensible à toutes les entrées alors que la tension maximale ne dépend d'aucune.

Il n'est pas surprenant que cette tension ne dépende pas du nombre de cellules des systèmes de stockage car elle est liée au renvoi du freinage sur la caténaire. Celui-ci ne dépend pas de la capacité de stockage des batteries embarquées mais uniquement de la capacité caténaire évaluée au moyen de la tension maximale permanente U_{max1} . De plus, le freinage entraîne une élévation de tension et n'est donc pas concerné par le seuil minimum de la gestion ($seuil_1$). Son indépendance vis-à-vis du $seuil_2$ de la gestion s'explique par le fait que ce seuil est déterminé lorsque le train est en traction (cas plus problématique car nous souhaitons faire du renforcement) et non lorsqu'il est en freinage.

Le minimum de tension dépend fortement de toutes les variables d'entrées. En effet, en l'absence de système de stockage embarqué, il n'est pas possible de maintenir cette tension au-dessus du seuil imposé (1000V). Le nombre de cellules est donc déterminant pour cette sortie. De même, les valeurs des seuils de la gestion vont être décisives pour assurer le respect ou non de cette contrainte.

Pour les mêmes raisons, la tension moyenne dépend de toutes les variables d'entrées. Sa dépendance est plus faible car la contrainte (être supérieure à 1350V) est plus facilement respectée que celle portant sur la tension minimale.

Dans le cas de la fonction objective, la dépendance la plus forte est celle du seuil inférieur de la gestion. En effet, ce seuil est déterminant en traction pour répartir la demande de puissance entre caténaire et système de stockage en embarqué. En conséquence, cette variable influence fortement la quantité d'énergie soutirée aux sous-stations pour alimenter les trains.

En conclusion, l'analyse avec les indices de Sobol demande un grand nombre d'échantillons pour que les résultats obtenus soient pertinents. Pour notre application, la plupart des sorties étudiées sont influencées par les entrées d'optimisation (avec une forte influence pour certaines d'entre elles). Cependant, cette analyse a été menée sans tenir compte du respect des autres contraintes (état de charge et puissance/énergie des systèmes de stockage). Il est possible que certains des échantillons utilisés pour cette analyse ne donnent pas une solution qui respectent ces contraintes. En conséquence, ils devraient être retirés de l'analyse. Pour cela, il faudrait augmenter le nombre d'échantillons total afin que, même si certains résultats sont supprimés, il en reste un nombre suffisant pour faire une analyse de sensibilité.

V.5. OUVERTURE : UTILISATION DU STOCKAGE STATIONNAIRE

V.5.1. Stockage stationnaire vs stockage embarqué

Un étude précédente a montré l'intérêt de mettre un système de stockage stationnaire en bordure de voie pour aider au soutien de la tension [5]. Du point de vue économique, cette solution est plus intéressante que l'ajout de système de stockage embarqué à bord des trains. En effet, un seul système est nécessaire alors que pour la solution que nous avons étudiée chaque train doit être équipé de batteries ou de supercondensateurs. Le coût d'investissement mais aussi d'exploitation (maintenance, coût de remplacement) est donc nettement supérieur. Cependant, le stockage stationnaire ne permet de faire du soutien de tension que dans une zone limitée contrairement à l'embarqué qui peut être sollicité quel que soit la position du train sur la ligne. Lorsqu'il est nécessaire de relever la tension à différent endroits, cette solution est donc plus intéressante. Cependant, certaines lignes peuvent nécessiter un renforcement uniquement dans une zone précise. C'est ce qui se dégage des résultats que nous avons obtenus dans le cas de la ligne R du transilien présentée dans la partie suivante.

V.5.2. Cas d'étude de la ligne R et intérêt d'une solution mixte

La ligne R que nous avons étudié est composée de 5 sous-stations et 9 postes de mise en parallèle répartis sur 70km (cf. Figure IV.25, Figure IV.26 et Figure IV.27). 24 trains (équipés de supercondensateurs) de 6 types différents circulent sur cette ligne composée de deux voies. La mission ferroviaire dure environ 7h avec un pas de temps de 1s. Nous avons fait l'optimisation dans MATLAB (utilisation de fmincom et des fonctions MEX) avec l'algorithme SQP. Nous avons choisi d'utiliser le modèle avec une gestion par règles selon des seuils de tension. La Figure V.12 présente la puissance des systèmes de stockage embarqués à bord des trains et le Tableau V.6 donne le dimensionnement obtenu.

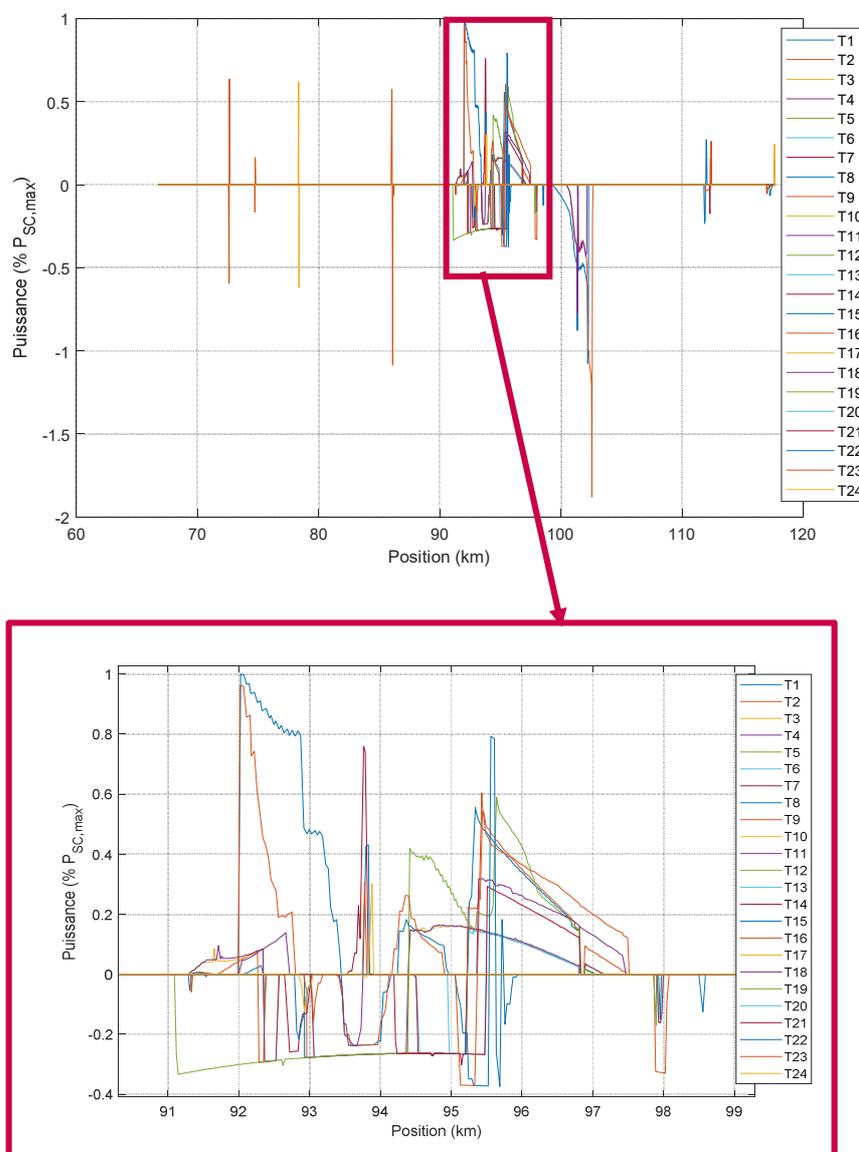


Figure V.12 : Puissance des supercondensateurs embarqués dans les trains

Tableau V.6 : Dimensionnement obtenu après optimisation

Type de trains	Puissance des supercondensateurs (MW)	Energie des supercondensateurs (kWh)
A	1.9	3
B	1.8	3.6
C	17.9	36.3
D	23.7	48.1
E	10.3	20.8
F	17.8	36

Nous pouvons voir que les systèmes de stockage sont un peu sollicités entre 70 et 80km et après 110km pour des puissances d'environ 3MW. Cependant, entre 90km et 100km, tous les trains font appels à leur système de stockage et pour des puissances supérieures à celles sollicitées précédemment. Il est donc pertinent de faire du renforcement dans cette zone spécifique.

Nous proposons alors d'ajouter un système de stockage stationnaire à 92km pour aider au soutien de tension. Les trains restent hybrides puisqu'il est nécessaire de relever la tension à d'autres endroits de la ligne. Cette solution permettrait de réduire la taille des systèmes de stockage embarqués baissant ainsi leur coût global (investissement et exploitation).

V.5.3. Modélisation du système de stockage stationnaire

Le système de stockage stationnaire (STA) est symbolisé par un nœud de courant fixe. Dans le cas d'une ligne composée de plusieurs voies, il est possible de connecter le système de stockage stationnaire sur chacune des voies. Par conséquent, il est symbolisé par un nœud de courant par voie (cf. Figure V.13 et l'annexe A.3.7.1).

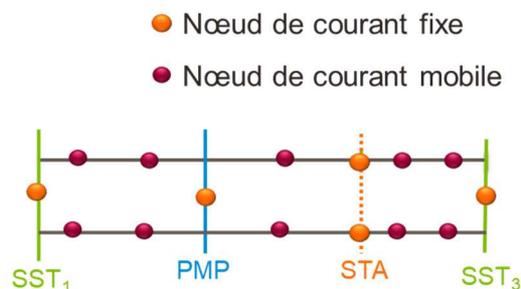


Figure V.13 : Modélisation du système de stockage stationnaire

Lorsque le système de stockage stationnaire est sollicité pour aider au soutien de tension, nous l'avons modélisé par un train fictif en freinage : il produit une puissance qui est renvoyée sur le réseau (cf. Figure V.14a). Lorsqu'il se recharge, il est modélisé par un train fictif en traction (cf. Figure V.14b).

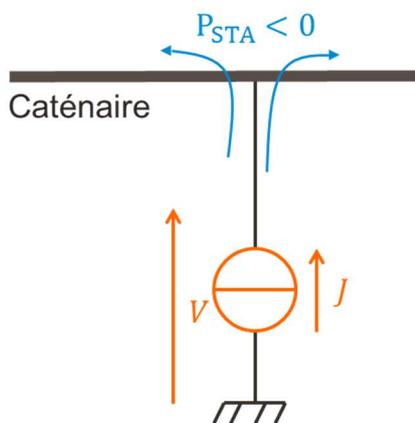


Figure V.14a : Comportement du système de stockage stationnaire en support

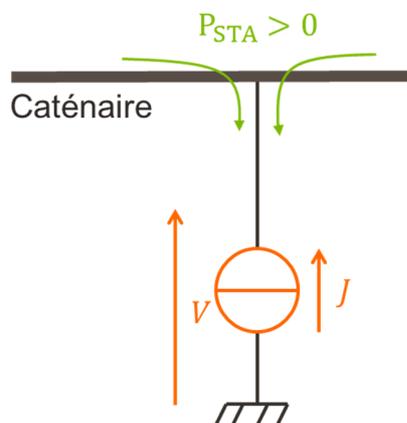


Figure V.14b : Comportement du système de stockage stationnaire en charge

V.5.4. Gestion énergétique

V.5.4.1. Zone isolée

Pour déterminer la gestion, nous isolons la zone où se trouve le système de stockage stationnaire. Celle-ci est composée des deux sous-stations de part et d'autres du système de stockage stationnaire et des PMP qui se trouvent dans cette portion de ligne (cf. en exemple la Figure V.13). Lorsqu'un train se trouve dans cette zone, c'est la gestion spécifique au stockage stationnaire qui s'applique. Lorsqu'il est en dehors de cette zone, c'est la gestion propre à un train hybride qui est utilisée (une de celles présentées au Chapitre IV, cf. IV.4). Pour ce cas d'étude, nous avons choisis la gestion à base de règles selon des seuils de tension.

V.5.4.2. Calcul des contributions

Pour savoir quelle puissance doit fournir le système de stockage stationnaire, il faut déterminer la tension en chaque nœud de la portion de ligne. En effet, chaque train va impacter le plan de tension : un train en traction entrainera une diminution de la tension de la ligne tandis qu'un train en freinage augmentera celle-ci. De plus, si la ligne possède des postes de mise en parallèle, alors un train présent sur la voie 1 affectera aussi les tensions de la voie 2. Pour déterminer l'impact des trains, nous calculons alors la chute de tension induite par chacun d'eux

en tout point de la ligne (cf. l'annexe A.3.7.2). Cette méthode a été développée par Eli RAKOTOMISA pendant son projet de fin d'étude d'école d'ingénieur.

V.5.4.3. Organigramme de la gestion énergétique

La gestion énergétique de cette portion de ligne se décompose en 3 étapes :

- 1) Calcul des tensions en chaque point de la ligne
- 2) Evaluation de la puissance que doivent fournir les systèmes de stockage (embarqué et stationnaire) pour relever la tension
- 3) Si les systèmes de stockage n'ont pas été sollicités :
 - a. recharge des systèmes de stockage en embarqué (si possible)
 - b. recharge du système de stockage stationnaire (si possible)

Tout d'abord, le plan de tension est calculé à l'aide du modèle de contribution (cf. l'annexe A.3.7.2). Chaque tension de la ligne est ensuite comparée à une tension limite (V_{limite}). Si une des tensions est inférieure à cette limite alors il est nécessaire de solliciter les systèmes de stockages (cf. l'annexe A.3.7.4).

Nous calculons tout d'abord la puissance que fournirait le système de stockage stationnaire s'il répondait *seul* au soutien de tension ($P_{STA}^{soutien}$). De même, nous calculons la puissance que fournirait le système de stockage embarqué s'il répondait *seul* au besoin de soutien de tension ($P_{emb}^{soutien}$). Ensuite, nous déterminons les pertes maximales autorisées qui sont un certain pourcentage de la puissance de soutien de l'embarqué (cf. l'équation (V.4)). Le coefficient α est une entrée d'optimisation.

$$Pertes_{max} = \alpha * P_{emb}^{soutien} \quad (V.4)$$

Où :

$Pertes_{max}$	(en W)	Pertes maximales autorisées
α	-	Coefficient des pertes (entrée d'optimisation)
$P_{emb}^{soutien}$	(en W)	Puissance apportée par le système de stockage embarquée s'il répondait seul au besoin de soutien de tension

La puissance fournie par le système de stockage stationnaire ne peut dépasser la puissance de l'embarqué plus les pertes maximales autorisées (cf. l'équation (V.5)). Nous recalculons alors la puissance de l'embarqué nécessaire pour faire le complément.

$$P_{STA} = \begin{cases} P_{STA}^{soutien} & \text{si } P_{STA}^{soutien} \leq pertes_{max} + P_{emb}^{soutien} \\ pertes_{max} + P_{emb}^{soutien} & \text{sinon} \end{cases} \quad (V.5)$$

Où :

$P_{STA}^{soutien}$	(en W)	Puissance apportée par le système de stockage stationnaire s'il répondait seul au besoin de soutien de tension
$P_{emb}^{soutien}$	(en W)	Puissance apportée par le système de stockage embarqué s'il répondait seul au besoin de soutien de tension
$pertes_{max}$	(en W)	Pertes maximales autorisées
P_{STA}	(en W)	Puissance effective que doit fournir le système de stockage stationnaire pour relever la tension

La répartition entre stationnaire et embarqué est détaillée à l'annexe A.3.7.4.1.

Si aucun soutien n'est nécessaire alors il est peut-être possible de recharger les systèmes de stockage. Ceux qui sont embarqués dans les trains sont rechargés en priorité sous réserve que l'ensemble des tensions de la zone restent au-dessus d'une valeur limite (V_{rch} , cf. l'annexe A.3.7.4.3). Ensuite, s'il y a un reste de capacité, c'est le système de stockage stationnaire qui est rechargé (cf. l'annexe A.3.7.4.4). Celui-ci peut aussi être rechargé lorsqu'aucun train n'est présent sur la portion de ligne. La Figure V.15 résume les étapes de la gestion.

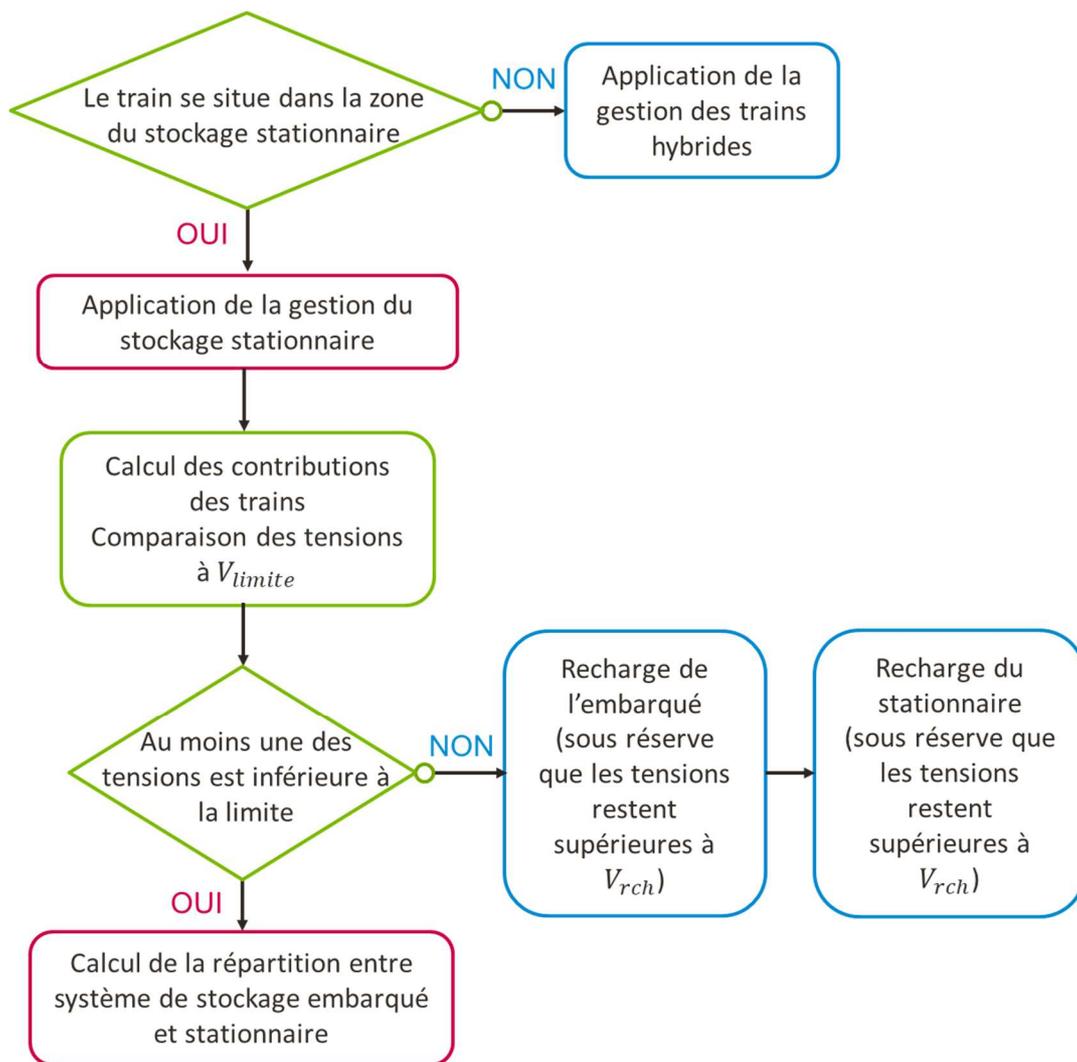


Figure V.15 : Gestion énergétique de la zone du stationnaire

V.5.5. Modèle orienté pour l'optimisation

Le modèle orienté pour l'optimisation est très semblable à celui de la traction électrique (cf. Figure IV.29). Cependant, nous ajoutons à ce modèle deux entrées d'optimisation :

- le nombre de cellule du système de stockage stationnaire,
- le coefficient α des pertes maximales autorisées pour le système de stockage stationnaire (cf. l'équation (V.4)).

Nous ajoutons aussi les mêmes contraintes que celles des systèmes de stockage embarqués :

- l'état de charge du système de stockage stationnaire doit être le même à la fin qu'au début de la mission ferroviaire,

- la puissance maximale de décharge et l'énergie utile doivent respectées le dimensionnement (cf. les équations (III.46) à (III.49)).

La Figure V.16 présente le modèle orienté pour l'optimisation dans le cas du stationnaire.

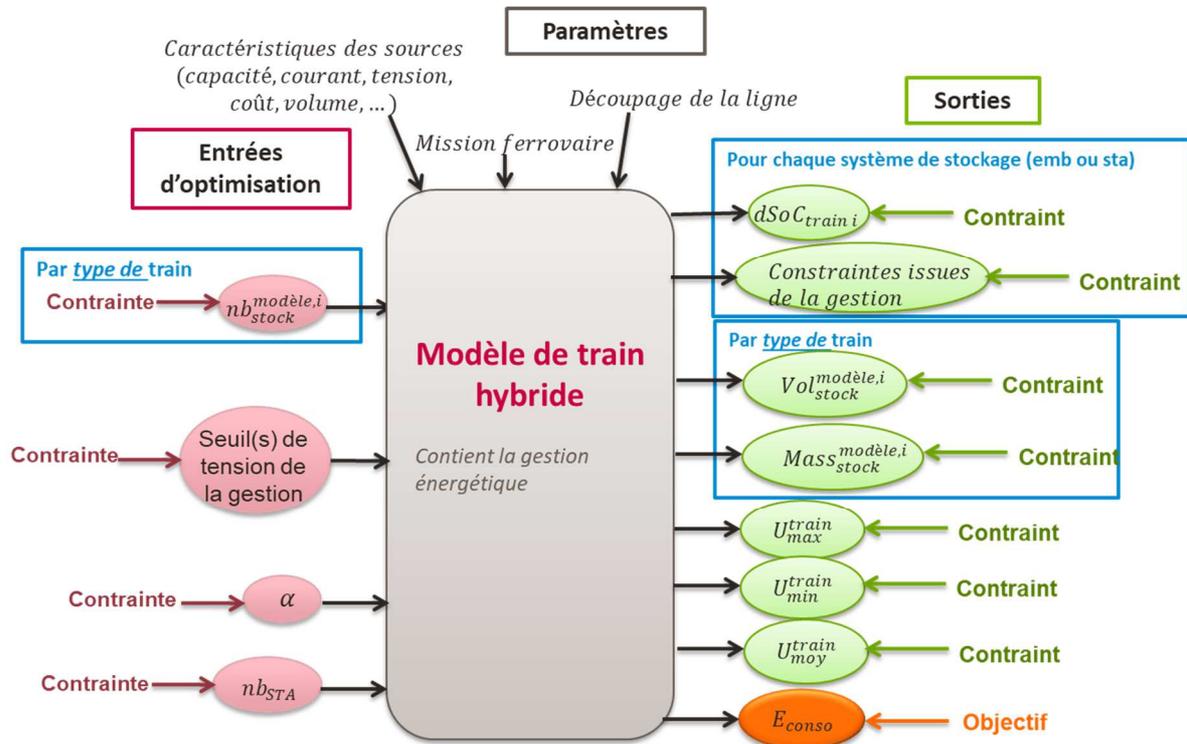


Figure V.16 : Modèle orienté pour l'optimisation dans le cas d'une ligne ferroviaire équipé d'un système de stockage stationnaire

V.5.6. Résultats

L'optimisation a été faite dans MATLAB avec l'algorithme SQP. Elle dure 4 jours et demande 5 itérations sur un serveur de calcul ayant un Intel® Xeon® CPU ES-2698v4 @ 2.20GHz (2 processeurs) avec 256Go de RAM et un système d'exploitation en 64bit. Le Tableau V.7 donne le dimensionnement obtenu avec un pourcentage de pertes à 42%. La Figure V.17 présente les profils de puissance des systèmes de stockage embarqués et la Figure V.18 le profil de puissance du système de stockage stationnaire.

Tableau V.7 : Dimensionnement obtenu

Type de trains	Sans stationnaire		Avec stationnaire	
	Puissance des supercondensateurs (MW)	Energie des supercondensateurs (kWh)	Puissance des supercondensateurs (MW)	Energie des supercondensateurs (kWh)
A	1.9	3	1.9	3
B	1.8	3.6	1.2	2.4
C	17.9	36.3	7.3	14.7
D	23.7	48.1	11.5	23.3
E	10.3	20.8	4.7	9.5
F	17.8	36	4.6	9.3
Stationnaire	-	-	51	104

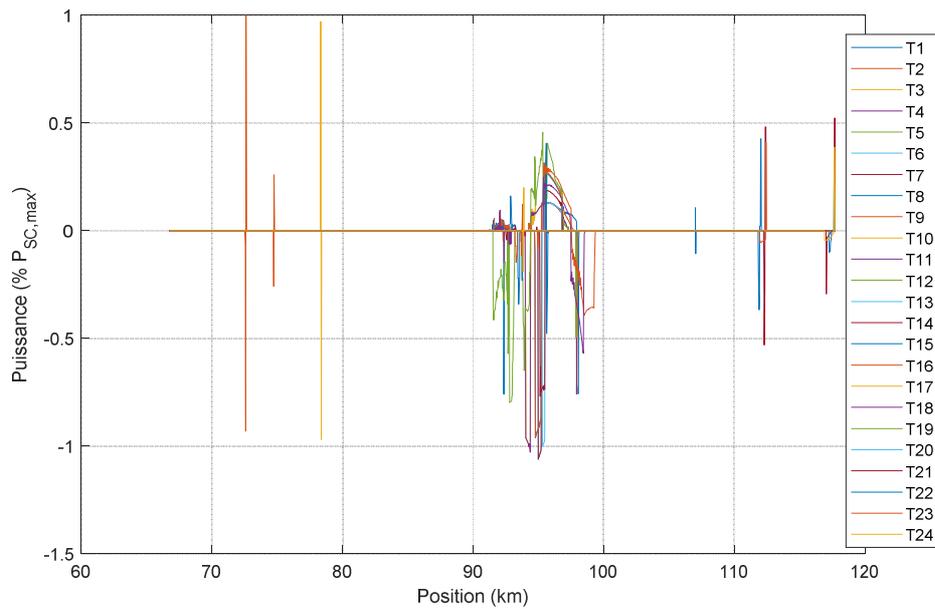


Figure V.17 : Puissance des supercondensateurs embarqués dans les trains circulant sur la ligne R sur une ligne avec un système de stockage stationnaire

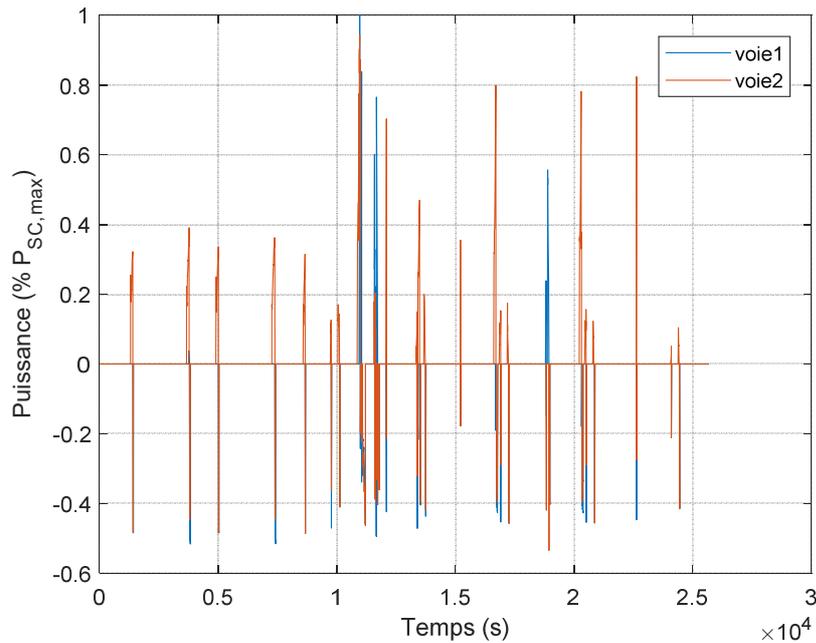


Figure V.18 : Puissance des supercondensateurs du système stockage stationnaire

V.5.7. Analyse

Nous pouvons voir que l'ajout du système de stockage stationnaire permet de réduire la taille des systèmes de stockage embarqués. En effet, les trains de types C, D, E et F ont un système de stockage qui a été réduit de plus de la moitié. Le soutien qui leur était nécessaire a été majoritairement apporté par le système de stockage stationnaire. Cela permet de diminuer le coût global de ces trains. Le système de stockage stationnaire semble donc être la solution pour faire le renforcement de la ligne R. Cependant, il n'est pas entièrement suffisant pour soutenir la tension en tout point de la ligne, les trains doivent donc toujours être hybridés.

De plus, le système de stockage stationnaire est composé de supercondensateurs, le dimensionnement est donc fait selon l'énergie. En effet, la puissance demandée est de 4,5MW mais 104kWh sont nécessaires ce qui impose d'avoir un système de stockage de 51MW. La majorité de la puissance disponible n'est donc pas utilisée. Les supercondensateurs ne sont donc peut-être pas le système de stockage le plus pertinent pour ce cas d'étude. Il serait plus intéressant d'avoir soit des batteries, soit une association de batteries et de supercondensateurs. Il serait alors nécessaire d'ajouter une gestion énergétique pour déterminer la répartition entre ces deux types de systèmes de stockage.

La répartition de puissance entre stationnaire et embarqué que nous avons mise en place pourrait être améliorée. En effet, nous avons probablement un surdimensionnement du système de stockage stationnaire car la tension moyenne est de 1480V alors qu'il suffit qu'elle soit à 1350V. Ainsi, un développement possible serait d'introduire une gestion d'énergie optimale qui ferait la répartition entre stationnaire et embarqué. L'objectif serait de trouver le bon compromis entre un système de stockage embarqué le plus petit possible et le moins de pertes en ligne.

V.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux cas d'étude portant sur la traction hybride diesel-électrique et la traction hybride électrique et une ouverture sur l'utilisation d'un système de stockage stationnaire.

Dans le premier cas, nous avons étudié l'influence de la gestion sur le dimensionnement d'un train hybride diesel-électrique. Nous avons pu voir que selon le type de gestion (à base de règles ou par programmation dynamique), la répartition de puissance entre batteries et supercondensateurs n'était pas la même. Cela influence le nombre de cellules de chacun des stockeurs mais aussi le coût d'investissement et le coût d'exploitation. Ainsi, une gestion optimale offrira un meilleur choix en terme de coût économique. Cependant, ce type de gestion implique des modèles plus complexes et de plus grandes tailles qui mettent du temps à converger.

Dans le second cas, nous avons étudié l'influence des entrées d'optimisation sur quelques sorties pour la traction hybride électrique. L'objectif était de s'assurer que la gestion à base de règles n'était pas prédéterminée par le profil temporel de la mission ferroviaire mais offrait un certain espace de solution où l'algorithme d'optimisation pouvait évoluer. Nous en avons conclu que certaines variables avaient une très forte influence mais que le nombre d'échantillons devrait être élargi afin de pouvoir écarter certains cas qui ne respectent éventuellement pas les contraintes.

Enfin, nous avons proposé en ouverture d'ajouter du stockage stationnaire pour faire du renforcement sur un cas d'étude spécifique qui nécessitait du soutien dans une zone géographique précise. Cela a permis de réduire fortement la taille des systèmes de stockage embarqués à bord des trains hybrides électriques. Cependant, la répartition entre stationnaire et embarqué pourrait être améliorée afin de trouver un bon compromis entre coût économique et coût énergétique.

Conclusion générale

Face aux enjeux sociétaux et environnementaux auxquels le ferroviaire doit répondre (émissions de gaz à effet de serre dans le cas du train diesel-électrique ou chutes de tension pour le train électrique), nous nous sommes intéressés, dans nos travaux de thèse, à l'ajout de systèmes de stockage embarqué dans les trains. Un tel système permet de moins solliciter la source primaire (groupe diesel ou caténaire) et donc de réduire les impacts négatifs.

Nos travaux, avant tout méthodologiques, ont porté sur la mise en place d'une méthode générique permettant de pré-dimensionner les sources d'énergie par des algorithmes d'optimisation. Pour prendre en compte l'interaction entre la gestion énergétique et le dimensionnement et éviter que l'un ne soit une contrainte subie par l'autre, nous avons choisi de les coupler en intégrant la gestion énergétique dans le modèle de dimensionnement. Nous avons développé cette méthode pour deux cas d'application très différents : la traction hybride diesel-électrique et la traction hybride électrique.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les différents types de traction et les difficultés auxquelles elles font face. Dans le cas de la traction diesel, nous avons pu voir que le groupe diesel fonctionnait souvent avec un mauvais rendement. Cela occasionne une importante consommation de carburant entraînant un coût d'exploitation élevé et des émissions importantes de gaz à effet de serre. Le système de stockage embarqué permet alors de mieux gérer la source primaire et donc d'améliorer le rendement sur la mission ferroviaire. Dans le cas de la traction électrique, il est utilisé pour relever le niveau de tension et permet donc d'accroître le trafic. De plus, nous avons aussi pu voir dans ce chapitre, que les batteries et les supercondensateurs présentaient le meilleur choix pour notre applicatif embarqué. Enfin, nous avons présenté les différentes familles de gestion énergétique. Nous avons fait la distinction entre les gestions à base de règles qui sont très utilisées en milieu industriel et les gestions dites « optimales » plus complexes à mettre en place.

Le chapitre II introduit la méthode développée. Notre objectif est de déterminer le pré-dimensionnement des sources d'énergie mais également la gestion énergétique à leur appliquer. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser une méthode d'optimisation. Au vu des caractéristiques de notre problème, l'algorithme SQP nous a paru être le meilleur choix en dépit de la nécessité de calculer la matrice jacobienne (calcul qui peut s'avérer complexe). De plus, la gestion

énergétique étant intégrée au modèle de dimensionnement, cela impose de faire une optimisation sur une mission ferroviaire. Dans le cas de la traction diesel, cette mission se présente sous la forme d'un profil de puissance d'un unique train, mais dans le cas de la traction électrique, il est nécessaire d'avoir ce profil pour chacun des trains circulant sur la ligne.

Notre modèle orienté pour l'optimisation a donc les caractéristiques suivantes : c'est un modèle prévu pour une optimisation combinant gestion et dimensionnement, et c'est un modèle temporel (utilisation d'un cycle) donc soumis à un pas de discrétisation. Cependant, chaque type d'alimentation a ses propres spécificités. Ainsi, nous avons choisi de séparer la modélisation selon le type d'alimentation du train : diesel ou électrique.

Le chapitre III concerne la traction diesel-électrique. Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation en flux d'énergie du groupe diesel et du système de stockage. Nous avons aussi détaillé la méthode permettant d'obtenir une fonction équivalente pour le calcul de la consommation de carburant. De plus, afin de tenir compte de l'impact du cyclage sur le vieillissement des batteries, nous avons introduit deux méthodes de calcul pour déterminer l'usure des batteries suite à une mission ferroviaire. Enfin, plusieurs gestions ont été développées pour ce type de traction. La première gestion est à base de règles. Cela nous a permis de répondre à des demandes industrielles (comme stopper le groupe diesel en gare : fonction start – and –stop). Cependant, elle peut ne pas être optimale du fait qu'elle fonctionne au fur et à mesure de la mission. Ainsi, nous avons choisi de mettre en place une gestion par programmation dynamique (gestion idéale et théorique) qui a un point de vue global. En effet, elle détermine la gestion en tenant compte de l'ensemble des pas de temps. Elle fournit donc l'optimalité en terme de gestion énergétique. Le modèle orienté pour l'optimisation a été développé pour chacune de ces gestions. De plus, il peut s'avérer plus intéressant d'avoir deux types de stockage différents (ayant des caractéristiques complémentaires comme les batteries et les supercondensateurs). Ainsi, chacun des modèles développés, se déclinent en deux catégories : avec un seul ou deux types de systèmes de stockages d'énergie. Dans le cas de plusieurs stockeurs différents, une gestion fréquentielle est ajoutée.

Dans le chapitre IV, nous avons présenté la modélisation d'un train hybride électrique. Pour ce type de traction, il est nécessaire de prendre en compte la ligne électrique ferroviaire. Nous avons alors choisi de modéliser cette ligne au moyen de la méthode nodale avec des impédances variables. Les différents équipements électriques (sous-stations, postes de mise en parallèle, ...) et les trains sont représentés par des nœuds. Cela permet de prendre en compte les différents trains circulants sur la ligne et leur influence mutuelle. Nous avons ensuite

présenté différentes gestions d'énergie pour ce type de trains. L'objectif est de maintenir le plan de tension de la caténaire dans une plage acceptable fixée par la norme ferroviaire. Les gestions développées sont soit à base de règles et utilisent des seuils de tension pour déterminer la répartition de puissance entre la caténaire et le système de stockage, soit selon un algorithme d'optimisation. De même que pour la traction diesel, nous avons développé un modèle orienté pour l'optimisation pour chacune des gestions avec la possibilité d'avoir un ou deux types de systèmes de stockage.

Dans le Chapitre V, nous avons validé notre méthodologie sur deux cas concrets. Le premier cas d'étude met en avant l'influence de la gestion sur le dimensionnement. Il concernait un train hybride diesel-électrique avec deux systèmes de stockage à bord (batteries Li-ion et supercondensateurs). Nous avons pu voir que dans le cas d'une gestion à base de règles les batteries étaient privilégiées alors que pour une gestion par programmation dynamique, ce sont les supercondensateurs qui sont favorisés. La gestion énergétique a aussi un fort impact sur le coût global du système. Cependant, l'emploi d'une gestion énergétique optimale implique des modèles utilisant une grande capacité mémoire (RAM et ROM), demandant beaucoup de temps de calcul et non réalisable en temps réel.

Nous avons ensuite choisi d'étudier un train hybride électrique avec des batteries en embarqué. L'objectif de ce second cas d'étude était d'identifier l'influence des variables d'optimisation sur les sorties du modèle. Nous avons pu voir que les variables d'entrées sont très influentes pour les contraintes critiques. En effet, l'objectif d'hybrider les trains est de maintenir le plan de tension dans une plage acceptable. La contrainte la plus critique porte alors principalement sur la tension minimale atteinte. Les variables d'optimisation ont donc une forte influence sur cette contrainte.

Finalement, nous avons présenté une ouverture sur un usage mixte entre système de stockage stationnaire et système de stockage en embarqué pour le soutien de tension. L'ajout du système de stockage stationnaire permet de réduire la taille de ceux embarqué à bord des trains réduisant ainsi le coût économique de ces trains.

La Figure 2 résume les principaux travaux effectués pour répondre aux problématiques.

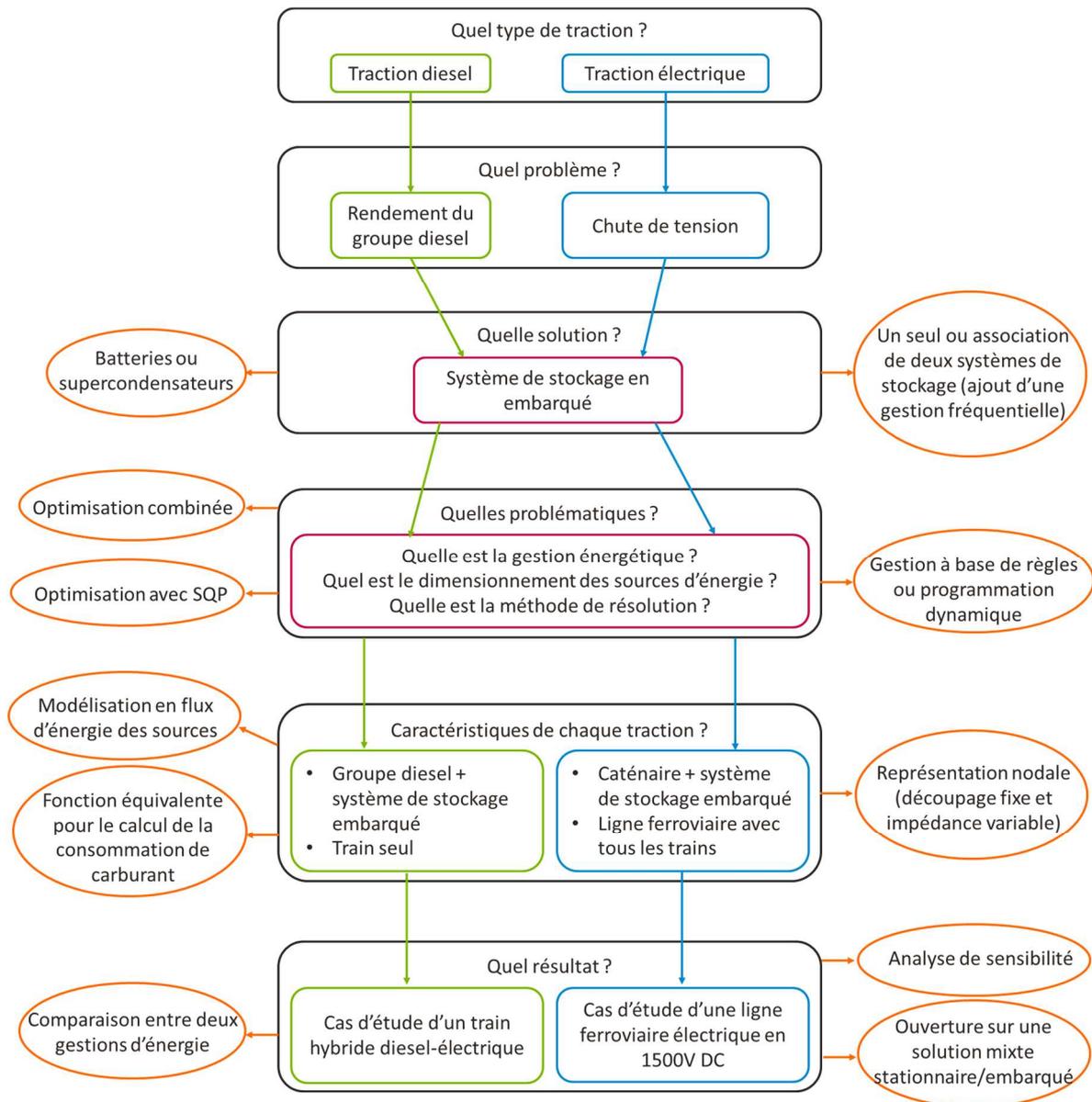


Figure 2 : Bilan des travaux

La méthode développée est générique et nous l'avons mis en application sur deux types de traction. Or, il existe des trains, appelés bimodes, qui peuvent circuler en diesel ou avec une alimentation électrique. Une perspective intéressante serait de combiner les deux modèles créés afin de dimensionner les trains de type bimode qui circulent sur les deux types de ligne.

Une autre piste de développement concerne le cas de la traction hybride diesel-électrique. En effet, la gestion à base de règles de ce type de train ne tient pas compte des temps de montée en puissance du groupe diesel. Celui-ci ne peut pas passer d'une puissance nulle à sa puissance maximale de manière instantanée. Il serait intéressant de développer cette gestion de manière à introduire cette dynamique de variation.

De plus, la gestion offre la possibilité de faire fonctionner les systèmes de stockage à leur puissance crête, cela entraîne un échauffement du système. Il n'est donc possible de solliciter cette puissance que pendant une certaine durée et il faut alors attendre un certain temps avant de pouvoir de nouveau l'utiliser. Actuellement, ce délai d'attente est un paramètre du modèle mais il serait pertinent d'introduire un modèle thermique du système de stockage afin de mieux le prendre en compte au niveau des gestions énergétiques et du dimensionnement.

Dans le cas de la traction hybride électrique, nous n'avons pas introduit de gestion d'énergie optimale. En effet, ce type de modèle demande une forte capacité mémoire morte et nous avons vu avec la traction hybride diesel-électrique que la taille du modèle augmentait fortement dans le cas d'une gestion d'énergie optimale (ici la programmation dynamique). Il serait cependant intéressant de développer ce type de gestion qui propose souvent de meilleures performances et permettraient donc d'avoir une référence « optimale ». Cependant, il est alors nécessaire de trouver une solution pour réduire la mémoire nécessaire à l'optimisation.

Pour cela, plusieurs méthodes sont possibles afin de réduire la taille du problème d'optimisation : faire le calcul de la matrice jacobienne à la main ou utiliser un autre dérivateur automatique de code qui exigerait moins de mémoire. Il existe notamment des dérivateurs créant des codes dérivés avant l'exécution (contrairement à ADOL-C). Par exemple, Tapenade, dérivant initialement du code Fortran, et maintenant du C, est une réelle alternative à ADOL-C. Cette méthode pourrait aussi être utilisée dans le cas de la traction diesel pour affiner le maillage de la programmation dynamique afin d'améliorer la répartition de puissance entre les sources d'énergie.

Finalement, nous avons présenté une ouverture sur un cas d'étude mêlant système de stockage stationnaire et embarqué. La méthode de répartition des puissances entre les deux sources n'est pas très recherchée. Un développement intéressant serait d'introduire un algorithme d'optimisation qui déterminerait cette distribution. L'objectif serait de minimiser le coût énergétique du système de stockage stationnaire (minimiser les pertes en ligne) et de minimiser le coût économique du système de stockage embarqué (réduire la taille de l'embarqué), tout en respectant les contraintes sur le plan de tension.

Bibliographie

- [1] Groupe SNCF, «Le train en France depuis 1827,» [En ligne]. Available: <https://www.sncf.com/sncv1/fr/portrait-du-groupe/histoire-sncf?date=1939#anchor-1939>. [Accès le 9 Juillet 2018].
- [2] SNCF réseau, «sncf-reseau.fr,» [En ligne]. Available: [sncf-reseau.fr/fr/le-reseau](https://www.sncf-reseau.fr/fr/le-reseau). [Accès le 03 Avril 2018].
- [3] SNCF Réseau, «Toutes nos cartes ferroviaires,» [En ligne]. Available: https://www.sncf-reseau.fr/fr/projets-chantiers-ferroviaires/cartes?field_localisation_carte_tid%5B%5D=148. [Accès le 25 Juin 2018].
- [4] P.-V. Buzila, Gestion énergétique optimale des Installations Fixes de Traction Electrique Ferroviaire Hybrides, Thèse en Génie électrique, Université Lille 1 - Sciences et Technologies, Lille, 2015.
- [5] O. Bossi, Contribution au dimensionnement et à la gestion par optimisation de systèmes de stockage d'énergie pour les réseaux électriques ferroviaires, Thèse en Génie électrique, COMUE, Grenoble, 2016.
- [6] J. Duscher, Le guide de la production ferroviaire. Document interne, 2018.
- [7] J. Pouget, Matériel Roulant ferroviaire. Document interne, 2013.
- [8] P. Chapas et D. Coiffet, «Matériel roulant ferroviaire - Architecture et conception mécanique,» *Techniques de l'ingénieur*, 10 Février 2014.
- [9] P. Chapas et D. Coiffet, «Traction à moteur thermique - Architecture d'ensemble,» *Techniques de l'ingénieur*, 01 Juillet 2015.
- [10] A. Jeunesse, M. Debruyne et G. Coquery, «Traction ferroviaire bimode et hybride - Impact des nouvelles technologies,» *Energies et Réseaux électrique et applications*, 10 mai 2013 .
- [11] J. Beretta, «Motorisation hybride thermique-électrique,» *Techniques de l'ingénieur*, 10 Janvier 2010.
- [12] C. C. Chan, «The state of the art of electric, hybrid and fuel cell vehicles,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, n° 4, 2017.
- [13] R. Andriamalala et B. Francois, «Consolidation des connaissances et définition des concepts,» *CONIFER – Conception et Outils iNnovants pour un réseau électrique Intelligent appliqué au FERroviaire* , 2011.
- [14] H. Hirose, K. Yoshida et K. Shibanuma, «Development of Catenary and Storage Battery Hybrid Train System,» *International Power Electronics Conference (IPEC)*, 21 June 2010.

- [15] «Paquet sur le climat et l'énergie à l'horizon 2020,» [En ligne]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_fr. [Accès le 04 Avril 2018].
- [16] SNCF, «Protéger l'environnement,» 2016. [En ligne]. Available: <https://www.sncf.com/fr/engagements/climat/environnement>. [Accès le 04 Avril 2018].
- [17] C. 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 en Génie électrique, Institut National Polytechnique Toulouse, Toulouse, 2008.
- [18] S. Le Ballois, T. Talakhadze, L. Vido et A. Zarifyan, «An experimental setup to study a hybrid drivetrain for a shunting locomotive,» *Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2016.
- [19] K. Halicka, P. A. Lombardi et Z. Styczynski, «Future-oriented analysis of battery technologies,» *IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 1019-1024, 17-19 March 2015.
- [20] T. Christen et M. W. Carlen, «Theory of Ragone plots,» *Journal of Power Sources*, vol. 91, pp. 210-216, 2000.
- [21] C. Ngo, «Stockage de l'énergie,» *Techniques de l'ingénieur*, 2016.
- [22] S. J. Moura, J. B. Siegel, H. K. Fathy et A. G. Stefanopoulou, «Education on Vehicle Electrification: Battery Systems, Fuel Cells, and Hydrogen,» *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion*, 10 March 2010.
- [23] A. Li, Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages: application aux véhicules électriques et hybrides, Thèse en Génie électrique, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, 2013.
- [24] N. Ghaviha, J. Campillo, M. Bohlin et E. Dahlquist, «Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation,» *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 4561-4568, 2017.
- [25] K. Yiu, «Battery Technologies for Electric Vehicles and other Green industrial Projects,» *4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, pp. 1-2, 8-10 June 2011.
- [26] A. d. Guibert, «Batteries pour le stockage d'énergie,» SAFT, 2009.
- [27] D. Chatroux, «Transport électrique routier - Batteries pour véhicules électriques,» *Techniques de l'ingénieur*, 2015.
- [28] S. Pélissier, A. Sari et P. Venet, «Batteries électriques pour applications portables et embarquées - Technologies,» *Techniques de l'ingénieur*, 2018.
- [29] R. S. Kate, S. A. Khalate et R. J. Deokate, «Overview of nanostructured metal oxides and pure nickel oxide (NiO) electrodes for supercapacitors,» *Journal of Alloys and Compound*, vol. 734, pp. 89-111, 2018.

- [30] J. Libich, J. Maca, J. Vondrak, O. Cech et M. Sedlarikova, «Supercapacitors: Properties and applications,» *Journal of Energy Storage*, vol. 17, pp. 224-227, 2018.
- [31] H. Gualous et R. Gallay, «Applications des supercondensateurs,» *Techniques de l'ingénieur*, 2007.
- [32] O. Shynkaruk et V. Martynyuk, «Supercapacitor Modeling and Testing for Hybrid Vehicle,» *Proceedings of International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, pp. 497-499, 19-23 February 2008.
- [33] H. Alloui, F. Khoucha, N. Rizoug, M. Benbouzid et A. Keloui, «Comparative study between rule-based and frequency separation energy management strategies within fuel-cell/battery electric vehicle,» *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 13 July 2017.
- [34] H. Hemi, J. Ghouili et A. Cheriti, «A real time energy management for electrical vehicle using combination of rule-based and ECMS,» *IEEE Electrical Power & Energy Conference*, 08 May 2014.
- [35] M. Fikar et K. Kostur, «Optimal Process Control,» *13th International Carpathian Control Conference*, pp. 153-172, 28-31 May 2012.
- [36] L. S. Pontryagin, *Mathematical Theory of Optimal Processes*, CRC Press, 1987.
- [37] P. Borne et F. Rotella, «Commande optimale,» *Techniques de l'ingénieur*, 10 juillet 1996.
- [38] E. Trelat, *Contrôle optimal : théorie et applications*, Paris: Vuibert, 2013.
- [39] T. Zeng, D. Upadhyay et G. Zhu, «Linear quadratic air-path control for diesel engines with regenerative and assisted turbocharger,» *IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control*, 12-15 December 2017.
- [40] I. Kisszolygyemi, K. Beneda et Z. Faltin, «Linear quadratic integral (LQI) control for a small scale turbojet with variable exhaust nozzle,» *International Conference on Military Technologies*, 24 July 2017.
- [41] B. Gao, J. Hong, S. Yu et H. Chen, «Linear-quadratic output regulator with disturbance rejection: application to vehicle launch control,» *American Control Conference*, 03 July 2017.
- [42] G. Granato, *Optimisation de Lois de Gestion Energétiques des Véhicules hybrides*, Thèse en mathématiques appliquées, Ecole Polytechnique, Paris, 2013.
- [43] V. Reinbold, *Méthodologie de dimensionnement d'un moteur électrique pour véhicules hybrides : optimisation conjointe des composants et de la gestion d'énergie*, Thèse en Génie électrique, UGA, Grenoble, 2014.
- [44] Y. Noda et M. Miyatake, «Methodology to apply dynamic programming to the energy-efficient driving technique of lithium-ion battery trains,» *2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, 2-4 Novembre 2016.

- [45] P. Haessig, Dimensionnement et gestion d'un stockage d'énergie pour l'atténuation des incertitudes de production éolienne, Thèse en Electronique - Electrotechnique - Automatique, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Rennes, 2015.
- [46] W. Hankache, Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène à pile à combustible, Thèse en Systèmes Automatiques, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 2011.
- [47] B. Favre, Etude de stratégies de gestion énergétiques des bâtiments par l'application de la programmation dynamique, Thèse spécialité "Energétique", Ecole nationale supérieure des mines de Paris, Paris, 2013.
- [48] D. P. Bertsekas, Dynamic Programming and Optimal Control: 4th edition, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge: Athena Scientific, 2017.
- [49] D. Kirk, Optimal Control Theory, 1970.
- [50] D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao et P. O. M. Scokaert, «Constrained model predictive control: Stability and optimality,» *Automatica*, vol. 36, n° 16, pp. 789-814, June 2000.
- [51] F. Schanzenbacher, R. Chevrier et N. Farhi, «Fluidification du trafic Transilien : approche prédictive et optimisation quadratique,» *17ème Conférence ROADEF*, Février 2016.
- [52] J. Lee, P. Zhang, L. K. Gan, D. Howey, M. Osborne, A. Tosi et S. Duncan, «Optimal operation of an energy management system using model predictive control and Gaussian process time-series modelling,» *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power electronics*, p. 1, 28 March 2018.
- [53] H. F. Prasetyo, A. S. Rohman, H. Hindersah et M. R. Santabudi, «Implementation of model predictive control (MPC) in electric vehicle testing simulator,» *4th International Conference on Electric Vehicle Technology*, 26 March 2018.
- [54] Z. Ye, K. Li, M. Stapelbroek, R. Savelsberg, M. Günther et S. Pischinger, «Variable step-size discrete dynamic programming for vehicle speed trajectory optimization,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1-9, 20 March 2018.
- [55] J. Wu, B. Gao, Q. Zheng et H. Chen, «Optimal equivalence factor calculation based on dynamic programming for hybrid electric vehicle,» *Chinese Automation Congress*, 20-22 October 2017.
- [56] S. Rohkamper, M. Hellwig et W. Ritschel, «Energy optimization for electric vehicles using dynamic programming,» *International Conference on Research and Education in Mechatronics*, 14-15 September 2017.
- [57] F. Gillon, Méthodologies de conception optimale des composants électromagnétiques, HDR en Génie électrique, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, 2009.
- [58] C. Mayet, A. Bouscayrol, J. Pouget, W. Lhomme et T. Letrouvé, «Different models of an energy storage subsystem for a hybrid locomotive,» *15th European Conference on Power Electronics and Applications*, September 2013.

- [59] F. Wurtz, Conceptions de la conception pour le génie électrique : de l'approche "Objets - Savoirs - Méthodes - Outils" à l'approche "Systèmes - Connaissances - Compétences - Organisations", HDR, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 2008.
- [60] S. Brisset, Démarches et outils pour la conception optimale des machines électriques, HDR, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, 2007.
- [61] B. Sareni, Méthodes d'optimisation multimodales associées à la modélisation numérique en électromagnétisme, Thèse en Génie électrique, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, 1999.
- [62] D. Magot, Méthodes et outils logiciels d'aide au dimensionnement. Application aux composants magnétiques et aux filtres passifs, Thèse en Génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 2004.
- [63] B. Delinchant, La CAO et l'optimisation de systèmes, une approche par couplages dynamiques de composants, HDR en Génie électrique, UGA, Grenoble, 2011.
- [64] P. T. Boggs et J. W. Tolle, Sequential Quadratic Programming, 1996.
- [65] J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright et P. E. Wright, «Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions,» *Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 9, n° 1, pp. 112-147, 1998.
- [66] D. R. Jones, M. Schonlau et W. J. Welch, «Efficient global optimization of expensive black-box functions,» *Journal of Global Optimization*, vol. 13, pp. 455-492, 1998.
- [67] D. R. Jones, C. D. Perttunen et B. E. Stuckman, «Lipschitzian Optimization without the Lipschitz Constant,» *Journal of Optimization Theory and Application*, vol. 79, n° 1, 1993.
- [68] B. Delinchant, D. Lahaye, F. Wurtz et J.-L. Coulomb, «Manifold mapping optimization with or without true gradients,» *Mathematics and Computers Simulation*, n° 90, pp. 256-265, 2013.
- [69] J. D. Schaffer, «Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithm,» *Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms*, 1985.
- [70] C. M. Fonseca et P. J. Fleming, «Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization,» *Genetic Algorithms: Proceeding of the 5th International conference*, 1993.
- [71] K. Keb, A. Pratap, S. Agarwal et T. Meyarivan, «A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,» *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, n° 2, pp. 182-197, 2002.
- [72] D. H. Wolper et W. G. Macready, «No free lunch theorems for optimization,» *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 1, n° 1, 1997.
- [73] C. Amzallag, J. P. Gerey, J. L. Robert et J. Bahuauudt, «Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis,» *International Journal of Fatigue*, vol. 16, n° 4, pp. 287-293, 1994.

- [74] A. Nieslony, «Rainflow Counting Algorithm,» MathWorks, 4 April 2010. [En ligne]. Available: <https://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3026-rainflow-counting-algorithm>. [Accès le 08 November 2016].
- [75] A. E. Trippe, A. Jossen et T. Hamacher, «Charging Optimization of Battery Electric Vehicles including Cycle Battery Aging,» *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, pp. 1-6, 12-15 October 2014.
- [76] R. Valentina, A. Viehl, O. Bringmann et W. Rosenstiel, «Battery Aging Estimation for Eco-Driving Strategy and Electric Vehicles Sustainability,» *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 5622-5627, 29-1 October - November 2014.
- [77] L. Serrao, Z. Chehab, Y. Guezennec et G. Rizzoni, «An Aging Model of Ni-MH Batteries for Hybrid Electric Vehicles,» *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 7-9 September 2005.
- [78] S. Sarabi, Contribution du Vehicle-to-Grid (V2G) à la gestion énergétique d'un parc de Vehicule Electrique sur le réseau de distribution, Thèse en Génie électrique, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2016.
- [79] B. Xu, Degradation-limiting Optimization of Battery Energy Storage Systems Operation, Zürich, 2013.
- [80] A. Miller, «Modeling Lithium Ion Battery degradation in electric vehicles,» *IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply*, 27-29 September 2010.
- [81] R. A. Jabr et I. Dzafic, «Solution of DC railway traction power flow systems including limited network receptivity,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1-1, 28 March 2017.
- [82] L. Pugi, A. Frilli, D. Nocciolini et A. Rindi, «Development and validation of a model for the optimization of regenerative braking of high speed trains,» *IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 7-10 June 2016.
- [83] Z. Tian, S. Hillmansen, C. Roberts, P. Weston, L. Chen, N. Zhao, S. Shu et T. Xin, «Modeling and simulation of DC railway systems for energy saving,» *IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 8-11 October 2014.
- [84] A. Frilli, Z. Meli, D. Nocciolini, S. Panconi, L. Pugi et A. Rindi, «An extended library of models of railway vehicles for fast simulation and optimization of regenerative braking and energy management,» *AEIT International Annual Conference*, 5-7 October 2016.
- [85] B. Desjouis, G. Remy, F. Ossart, C. Marchand, J. Bignon et E. Sourdille, «A new generic problem formulation dedicated to electrified railway systems,» *2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles*, 3-5 March 2015.
- [86] A. Ovalle, J. Pouget, S. Bacha, L. Gerbaud, E. Vinot et B. Sonier, «Energy storage sizing methodology for mass-transit direct-current wayside support: Application to French railway company case study,» *Applied Energy*, vol. 230, pp. 1673-1684, 2018.

- [87] J. W. Bandler, R. M. Biernacki, S. H. Chen, P. A. Grobelny et R. H. Hemmers, «Space mapping techniques for electromagnetic optimization,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 42, n° 12, pp. 2536-2544, 1994.
- [88] J. W. Bandler, Q. S. Cheng, S. A. Dakroury, A. S. Mohamed, M. H. Bakr, K. Madsen et J. Sondergaard, «Space mapping: the state of the art,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, n° 1, pp. 337-361, 2004.
- [89] «Vesta Cades,» [En ligne]. Available: <http://www.vesta-system.fr/fr/produits/cades/vesta-cades.html>. [Accès le 19 October 2017].
- [90] «AD Tools for C/C++,» [En ligne]. Available: <http://www.autodiff.org/?language=C%2FC%2B%2B&module=Tools>. [Accès le 27 April 2018].
- [91] «Adol-C - COIN-OR,» [En ligne]. Available: <https://projects.coin-or.org/ADOL-C>. [Accès le 18 October 2017].
- [92] P. Enciu, F. Wurtz et L. Gerbaud, «Automatic Differentiation for Sensitivity Calculation in Electromagnetism: Application for Optimization of a Linear Actuator,» *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, n° 5, pp. 1238-1241, May 2011.
- [93] P. Enciu, F. Wurtz, L. Gerbaud et B. Delinchant, «AD for Optimization in Electromagnetism Applied to Semi-Analytical Models Combinging Composed Functions,» *COMPEL : The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 28, n° 5, pp. 1313-1326, 2009.
- [94] «Science & Technology Facilities council,» 8 February 2011. [En ligne]. Available: <http://www.hsl.rl.ac.uk/archive/>. [Accès le 21 November 2016].
- [95] M. Grandjacques, Analyse de sensibilité pour des modèles stochastiques à entrées dépendantes : application en énergétique du bâtiment, Thèse en Génie électrique, UGA, Grenoble, 2015.
- [96] Sobol, «Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Model,» *Mathematical Modelling and Computer Experiments*, vol. 1, pp. 407-414, 1993.
- [97] I. M. Sobol et S. Kucherenko, «Derivative based global sensitivity measures and their link with global sensitivity indices,» *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 79, pp. 3009-3017, 2009.
- [98] I. M. Sobol, «Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their monte carlo estimates,» *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 55, pp. 271-280, 2001.
- [99] R. I. Cukier, J. H. Schaibly et K. E. Shuler, «Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients,» *The Journal of Chemical Physics*, vol. 63, pp. 1140-1149, 1975.
- [100] A. Saltelli, S. Tarantola et K. Chan, «A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model outputs,» *Technometrics*, vol. 41, pp. 39-56, 1999.

- [101] C. B. Storlie, L. P. Swiler, J. C. Helton et C. J. Sallaberry, «Implementation and evaluation of nonparametric regression procedures for sensitivity analysis of computationally demanding models,» *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 94, pp. 1735-1763, 2009.
- [102] B. Sudret, «Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions,» *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 93, pp. 964-979, 2008.
- [103] M. D. Morris, «Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments,» *Technometrics*, vol. 33, n° 2, pp. 161-174, 1991.

ANNEXES

A.1. L'HYBRIDATION DANS LE MONDE DU TRANSPORT

Il existe plusieurs architecture d'hybridation dans le monde du transport [11]. Il est possible de distinguer deux familles principales :

- l'hybride série où les sources d'énergie sont connectées au même arbre de transmission (cf. Figure A.1). Le principal inconvénient de cette architecture est son rendement plus faible en raison des différentes conversions d'énergie. De plus, il est nécessaire de dimensionner les sources en fonction de la puissance maximale requise au niveau des roues [12],
- l'hybride parallèle où chaque source d'énergie a son propre arbre de transmission (cf. Figure A.2). Cette technologie offre plus de libertés dans la façon de fournir l'énergie mais peut s'avérer plus coûteuse.

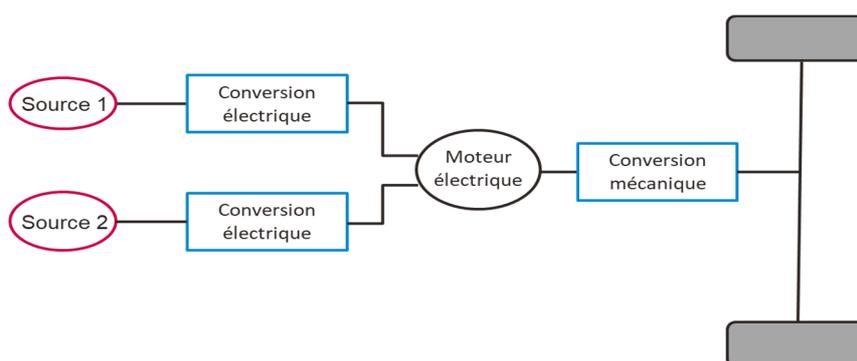


Figure A.1 : Architecture hybride série [12]

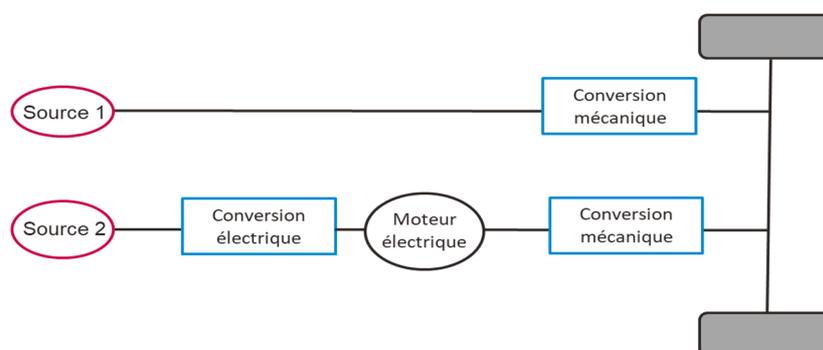


Figure A.2 : Architecture hybride parallèle [12]

Il est possible de combiner ces deux architectures. La chaîne de traction est alors appelée série-parallèle (cf. Figure A.3). Cette double architecture permet d'avoir les avantages de chacune des chaînes de traction hybride. Il existe aussi des structures plus complexes combinant plusieurs moteurs et arbre de transmissions [12].

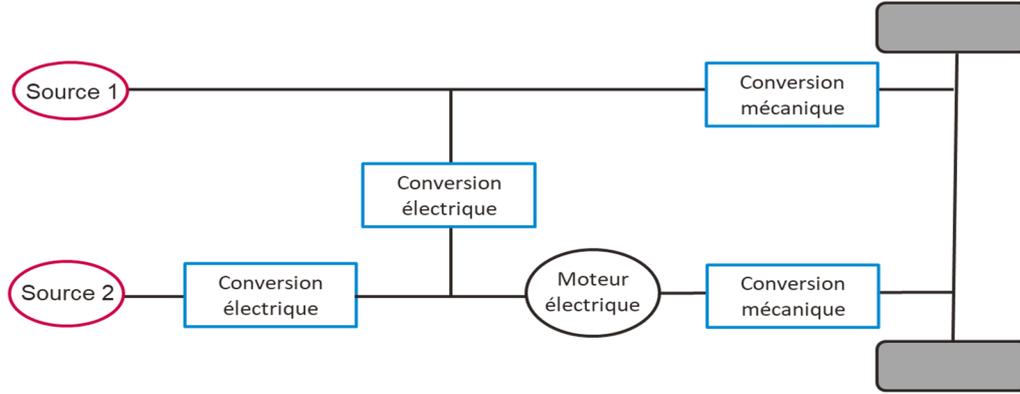


Figure A.3 : Architecture hybride série-parallèle [12]

A.2. TRACTION HYBRIDE DIESEL-ELECTRIQUE

A.2.1. Equations du train hybride diesel-électrique

$$Vol_{mot} = 0.03 * \frac{P_{genom}}{1000} + 0.09 \quad (A.1)$$

$$Vol_{refroidisseur} = Vol_{refroidisseur_norm} * P_{genom} \quad (A.2)$$

$$M_{moteur} = 0.0037 * P_{genom} + 238.66 \quad (A.3)$$

$$M_{refroidisseur} = M_{refroidisseur_norm} * P_{genom} \quad (A.4)$$

$$Cout_{inv,ge} = 0.28 * P_{genom} + 4.5 \quad (A.5)$$

$$f_{co}(P_{genom}, P_{ge}(k), C_{sn}) \quad (A.6)$$

$$= C_{sn}$$

$$* \left[-5.58 * \left(\frac{P_{ge}(k)}{P_{ge,nom}} \right)^5 + 19.7 * \left(\frac{P_{ge}(k)}{P_{ge,nom}} \right)^4 - 27.22 * \left(\frac{P_{ge}(k)}{P_{ge,nom}} \right)^3 \right.$$

$$\left. + 18.57 * \left(\frac{P_{ge}(k)}{P_{ge,nom}} \right)^2 - 6.44 * \left(\frac{P_{ge}(k)}{P_{ge,nom}} \right) + 1.94 \right]$$

$$* \frac{P_{ge}(k)}{1000 * 3600}$$

$$Conso_{ge}(k) = \begin{cases} f_{co}(P_{genom}, P_{ge}(k), C_{sn}) & \text{si } 20\%P_{genom} \leq P_{ge}(k) \leq 100\%P_{genom} \\ C_{smax} & \text{si } 0 < P_{ge}(k) < 20\%P_{genom} \\ C_{smin} * dt & \text{si } P_{ge}(k) = 0 \end{cases} \quad (A.7)$$

$$Conso_{mission} = \sum_{k=1}^N Conso_{ge}(k) \quad (A.8)$$

$$Distance = \sum_{k=1}^N \frac{v(k) * dt}{3600} \quad (A.9)$$

$$nb_{mission} = \frac{Autonomie_{KM}}{Distance} \quad (A.10)$$

$$Carburant_{emb} = Conso_{mission} * nb_{mission} \quad (A.11)$$

$$Vol_{fuel} = \frac{Carburant_{emb}}{\rho_{diesel} * 1000} \quad (A.12)$$

$$M_{fuel} = \frac{Carburant_{emb}}{1000} + M_{cont_{vide}} * \frac{Carburant_{emb}}{\rho_{diesel}} \quad (A.13)$$

$$Cout_{conso}^{mission} = \frac{Conso_{mission}}{\rho_{diesel}} * Prix_{carburant} \quad (A.14)$$

$$Vol_{ge} = Vol_{mot} + Vol_{refroidisseur} + Vol_{fuel} \quad (A.15)$$

$$M_{ge} = M_{moteur} + M_{fuel} + M_{refroidisseur} \quad (A.16)$$

$$E_{ESS}(k+1) = -dt * \frac{P_{ESS}(k)}{3600} + E_{ESS}(k) \quad (A.17)$$

$$P_{ESS,max}^{dch} = nb_{ESS} * P_{ESS,cell}^{dch} \quad (A.18)$$

$$P_{ESS,max}^{ch} = nb_{ESS} * P_{ESS,cell}^{ch} \quad (A.19)$$

$$E_{ESS,min} = (1 - DoD) * nb_{ESS} * E_{ESS}^{cell} \quad (A.20)$$

$$E_{ESS,max} = nb_{ESS} * E_{ESS}^{cell} \quad (A.21)$$

$$Vol_{ESS} = nb_{ESS} * Vol_{ESS,cell} \quad (A.22)$$

$$M_{ESS} = nb_{ESS} * M_{ESS,cell} \quad (A.23)$$

$$Cout_{ESS} = nb_{ESS} * Cout_{ESS,cell} \quad (A.24)$$

$$SoC_{BT}(k) = \frac{E_{BT}(k)}{\max_k(E_{BT}(k))} \quad (A.25)$$

$$L_{rest} = 1 - L_{conso} \quad (A.26)$$

$$L_{conso}(DoD) = DoD * C_0 \quad (A.27)$$

$$nb_{cycle}(DoD) = 965.73 * DoD^{-2.3748} \quad (A.28)$$

$$L_{cycle}(DoD) = nb_{cycle}(DoD) * DoD * C_0 \quad (A.29)$$

$$L_{res} = L_{start} - \sum_{i=0}^M \frac{L_{conso}(DoD(i))}{L_{cycle}(DoD(i))} \quad (A.30)$$

$$L_{rest} = 1 - (p_{SEI}e^{-r_{SEI}f_d} + (1 - p_{SEI})e^{-f_d}) \quad (A.31)$$

$$f_{cycle} = \sum_i^M f_{DoD}(DOD(i)) * f_{SoC}(SoC(i)) * f_c(C(i)) * n(i) \quad (A.32)$$

$$f_{cal} = K_t * dt * f_{SoC}(SoC_{avg}) \quad (A.33)$$

$$f_{DOD}(DOD(i)) = (K_{DOD_1}DOD(i)^{K_{DOD_2}} + K_{DOD_3})^{-1} \quad (A.34)$$

$$f_{SoC}(SoC(i)) = e^{K_{SoC}*(SoC(i)-SoC_{ref})} \quad (A.35)$$

$$f_c(C(i)) = e^{K_c*(C(i)-C_{ref})} \quad (A.36)$$

$$SoC_{avg} = \frac{\sum_{i=0}^M SoC(i)}{M} \quad (A.37)$$

$$P_{ge,lim}^{max}(k) = \left\{ \begin{array}{ll} (P_{train}(k) - P_{ge,min}) * \eta_{ESS} & si P_{train}(k) \leq P_{ge,min} \\ \frac{P_{train}(k) - P_{ge,min}}{\eta_{ESS}} & sinon \end{array} \right\} \quad (A.38)$$

$$P_{ge,lim}^{min}(k) = \left\{ \begin{array}{ll} (P_{train}(k) - P_{ge,nom}) * \eta_{ESS} & si P_{train}(k) \leq P_{ge,nom} \\ \frac{P_{train}(k) - P_{ge,nom}}{\eta_{ESS}} & sinon \end{array} \right\} \quad (A.39)$$

$$P_{ESS,lim}^{dch}(k) = \min(P_{ESS,max}^{dch}, P_{ge,lim}^{max}(k)) \quad (A.40)$$

$$P_{ESS,lim}^{ch}(k) = \max(P_{ESS,max}^{ch}, P_{ge,lim}^{min}(k)) \quad (A.41)$$

$$E_{div}^{dch}(k) = E_{div}^{dch}(k-1) - dt * \frac{P_{ESS,lim}^{dch}(k-1)}{3600} \quad (A.42)$$

$$E_{div}^{ch}(k) = E_{div}^{ch}(k-1) - dt * \frac{P_{ESS,lim}^{ch}(k-1)}{3600} \quad (A.43)$$

$$E_{conv}^{ch}(k) = E_{conv}^{ch}(k+1) + dt * \frac{P_{ESS,lim}^{ch}(k+1)}{3600} \quad (A.44)$$

$$E_{conv}^{dch}(k) = E_{conv}^{dch}(k+1) + dt * \frac{P_{ESS,lim}^{dch}(k+1)}{3600} \quad (A.45)$$

$$E_{min}(k) = \max(E_{div}^{dch}(k), E_{conv}^{ch}(k), E_{ESS,min}) \quad (A.46)$$

$$E_{max}(k) = \min(E_{div}^{ch}(k), E_{conv}^{dch}(k), E_{ESS,max}) \quad (A.47)$$

$$R(j, k) = \min_{j'} \left(R(j', k+1) + Cons_{oge}(j, j', k) \right) \quad (A.48)$$

$$P_{ESS}(k) = -3600 * \left(\frac{E_{ESS}(k+1) - E_{ESS}(k)}{dt} \right) \quad (A.49)$$

$$P_{ge}(k) = P_{train}(k) - P_{ESS}(k) \quad (A.50)$$

$$P_{BF}(k+1) = dt * 2\pi * f_{sc} * (P_{train}(k) - P_{BF}(k)) + P_{BF}(k) \quad (A.51)$$

$$P_{HF}(k) = P_{train}(k) - P_{BF}(k) \quad (A.52)$$

$$Vol_{sources} = Vol_{ge} + \sum_{i=1}^{nb_{type,stock}} Vol_{ESS,i} \quad (A.53)$$

$$M_{sources} = M_{ge} + \sum_{i=1}^{nb_{type,ESS}} M_{ESS,i} \quad (A.54)$$

$$\max_k (P_{ESS}(k)) - P_{ESS,max}^{dch} \leq 0 \quad (A.55)$$

$$\left| \min_k (P_{ESS}(k)) \right| - P_{ESS,max}^{ch} \leq 0 \quad (A.56)$$

$$\max_k (E_{ESS}(k)) - E_{ESS,max} \leq 0 \quad (A.57)$$

$$\min_k (E_{ESS}(k)) - E_{ESS,min} \leq 0 \quad (A.58)$$

$$Cout_{inv} = Cout_{ge} + \sum_{i=1}^{nb_{type,ESS}} Cout_{ESS,i} \quad (A.59)$$

$$Cout_{exploitation} = Cout_{BT}^{act} + Cout_{conso}^{act} + Cout_{maintenance}^{act} \quad (A.60)$$

$$Cout_{train}^{act} = Cout_{inv} + Cout_{exploitation} \quad (A.61)$$

où :

$Autonomie_{KM}$	(en km)	Autonomie demandée
C	(en s ⁻¹)	Capacité des batteries
C_0	(en Ah)	Capacité nominale de la batterie
$Carburant_{emb}$	(en g)	Quantité totale de carburant embarqué pour avoir l'autonomie demandée
C_{min}	(en g/s)	Consommation à vide
$Conso_{mission}$	(en g)	Consommation totale de carburant sur la mission
$Conso_{ge}(k)$	(en g)	Consommation du groupe diesel au pas de temps d'indice k
$Conso_{ge}(j, j', k)$	(en g)	Consommation du groupe diesel pour passer du pas de temps d'indice k+1 au pas de temps d'indice k en partant de l'état d'énergie j' pour aller vers l'état d'énergie j
$Cout_{inv,ge}$	(en k€)	Coût d'investissement du groupe diesel
$Cout_{BT}^{act}$	(en k€)	Coût actualisé de rachat des batteries en fn de vie
$Cout_{ESS,cell}$	(en k€/cellule)	Coût d'une cellule du système de stockage
$Cout_{ESS}$	(en k€)	Coût d'investissement du système de stockage
$Cout_{conso}^{act}$	(en k€)	Coût de consommation de carburant actualisé pour la durée de vie du train
$Cout_{conso}^{mission}$	(en k€)	Coût de consommation de carburant pour la mission ferroviaire choisie
$Cout_{exploitation}$	(en k€)	Coût d'exploitation du train sur toute sa durée de vie
$Cout_{ge}$	(en k€)	Coût d'achat du groupe diesel
$Cout_{inv}$	(en k€)	Coût d'investissement pour acheter les sources d'énergie composant le train diesel-électrique
$Cout_{maintenance}^{act}$	(en k€)	Coût actualisé de maintenance pour la durée de vie du train
$Cout_{ESS,i}$	(en k€)	Coût d'achat du système de stockage i
$Cout_{train}^{act}$	(en k€)	Coût total actualisé du train diesel-électrique
C_{ref}	-	Capacité de référence
C_{smax}	(en g)	Consommation maximale
C_{sn}	(en g/kWh)	Consommation nominale
DOD	-	Profondeur de décharge
$Distance$	(en km)	Distance totale parcourue au cours de la mission
dt	(en s)	Pas de temps
$E_{BT}(k)$	(en Wh)	Energie stockée dans les batteries au pas de temps d'indice k
$E_{ESS,max}$	(en Wh)	Energie maximale du système de stockage
$E_{ESS,min}$	(en Wh)	Energie minimale du système de stockage
$E_{ESS}(k)$	(en Wh)	Energie du système de stockage au pas de temps d'indice k
E_{ESS}^{cell}	(en Wh/cellule)	Energie d'une cellule du système de stockage
$E_{conv}^{ch}(k)$	(en Wh)	Energie maximale de convergence vers le point final en charge du système de stockage au pas de temps d'indice k
$E_{conv}^{dch}(k)$	(en Wh)	Energie maximale de convergence vers le point final en décharge du système de stockage au pas de temps d'indice k

$E_{div}^{ch}(k)$	(en Wh)	Energie maximale de divergence du point initial en charge du système de stockage au pas de temps d'indice k
$E_{div}^{dch}(k)$	(en Wh)	Energie maximale de divergence du point initial en décharge du système de stockage au pas de temps d'indice k
$E_{max}(k)$	(en Wh)	Borne maximale de l'énergie au pas de temps d'indice k pour le maillage de la programmation dynamique
$E_{min}(k)$	(en Wh)	Borne minimale de l'énergie au pas de temps d'indice k pour le maillage de la programmation dynamique
f_c	-	Fonction de dégradation liée à la capacité
f_{DoD}	-	Fonction de dégradation due à la profondeur de décharge
f_{SoC}	-	Fonction de dégradation liée à l'état de charge
f_{cal}	-	Fonction de vieillissement calendaire
$f_{co}(P_{genom}, P_{ge}(k), C_{sn})$	(en g)	Consommation du groupe diesel au pas de temps d'indice k
f_{cycle}	-	Fonction de dégradation par cycle (quantité de « vie » perdue en raison des cycles effectués)
f_d	-	Fonction linéarisée de dégradation (cyclique et calendaire)
f_{sc}	(en Hz)	Fréquence de coupure du filtre passe-bas
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle
K_C	-	Coefficient du modèle de dégradation lié à la capacité
$K_{DOD_1}, K_{DOD_2}, K_{DOD_3}$	-	Coefficients du modèle de dégradation liés à la profondeur de décharge
K_{SoC}	-	Coefficient du modèle de dégradation lié à l'état de charge
K_t	(en s ⁻¹)	coefficient de vieillissement calendaire
$L_{conso}(DoD)$	Ah	Quantité de vie « consommée » par la profondeur de décharge <i>DoD</i>
L_{cycle}	Ah	Quantité de vie totale d'une batterie pour la profondeur de décharge <i>DoD</i> .
L_{rest}	-	Quantité de vie restante dans les batteries après une mission
L_{start}	-	Indicateur de vie du module de batteries en début de mission (est égale à 1 lorsque les batteries sont neuves)
$M_{ESS,cell}$	(en kg/cellule)	Masse d'une cellule du système de stockage
$M_{ESS,i}$	(en kg)	Masse du système de stockage i
M_{ESS}	(en kg)	Masse du système de stockage
$M_{contvide}$	(en kg/L)	Masse à vide du réservoir par litre de carburant embarqué
M_{fuel}	(en kg)	Masse du carburant embarqué
M_{ge}	(en kg)	Masse globale du groupe diesel
M_{moteur}	(en kg)	Masse du moteur à vide
$M_{refroidisseur}$	(en kg)	Masse du groupe de refroidissement
$M_{refroidisseur_norm}$	(en kg/W)	Masse normalisée du groupe de refroidissement
$M_{sources}$	(en kg)	Masse total des sources d'énergie du train diesel-électrique hybride
M	-	Nombre de cycles
N	-	Nombre de pas de temps de la mission ferroviaire
n	-	Cycle complet (égal à 1) ou demi-cycle (égal à 0.5) défini par l'algorithme de rainflow
nb_{Ess}	-	Nombre de cellules du système de stockage
nb_{cycle}	-	Nombre maximal de cycles que peut réaliser la batterie au cours de sa vie pour la profondeur de décharge <i>DoD</i>
$nb_{mission}$	-	Nombre de fois qu'il faut répéter la mission pour parcourir le nombre de kilomètres demandés par l'autonomie
$nb_{type,stock}$	-	Nombre de stockeurs différents
$P_{BF}(k)$	(en W)	Puissance basse-fréquence au pas de temps d'indice k
$P_{ESS,cell}^{ch}$	(en W/cellule)	Puissance en charge d'une cellule du système de stockage
$P_{ESS,cell}^{dch}$	(en W/cellule)	Puissance en décharge d'une cellule du système de stockage
$P_{ESS,lim}^{ch}(k)$	(en W)	Borne maximale en puissance de charge au pas de temps d'indice k pour la programmation dynamique

$P_{ESS,lim}^{dch}(k)$	(en W)	Borne maximale en puissance de décharge au pas de temps d'indice k pour la programmation dynamique
$P_{ESS,max}^{ch}$	(en W)	Puissance maximale de charge du système de stockage
$P_{ESS,max}^{dch}$	(en W)	Puissance maximale de décharge du système de stockage
$P_{ESS,max}^{dch}(k)$	(en W)	Borne maximale en puissance de décharge au pas de temps d'indice k pour la programmation dynamique
$P_{ESS}(k)$	(en W)	Puissance du système de stockage au pas de temps d'indice k (convention générateur : la puissance est positive en décharge, négative en charge)
$P_{ESS}(k)$	(en W)	Puissance du système de stockage au pas de temps d'indice k
P_{HF}	(en W)	Puissance haute fréquence de la mission
$P_{ge,nom}$	(en W)	Puissance nominale du groupe diesel
$P_{ge,lim}^{max}(k)$	(en W)	Borne maximale imposée par le groupe diesel au système de stockage au pas de temps d'indice k
$P_{ge,lim}^{min}(k)$	(en W)	Borne maximale imposée par le groupe diesel au système de stockage au pas de temps d'indice k
$P_{ge,min}$	(en W)	Puissance minimale du groupe diesel (égale à 0)
$P_{ge}(k)$	(en W)	Puissance fournie par le groupe diesel au pas de temps d'indice k
$P_{train}(k)$	(en W)	Puissance du train au pas de temps d'indice k
$P_{train}(k)$	(en W)	Puissance de la mission ferroviaire au pas de temps d'indice k
$Prix_{carburant}$	(en k€/L)	Prix d'achat du carburant
$R(j', k + 1)$	(en g)	« Coût » (soit la consommation) pour l'état j' de l'énergie du système de stockage au pas de temps d'indice k+1 (il regroupe le coût de tous les instants précédents)
$R(j, k)$	(en g)	« Coût » pour l'état j du système de stockage au pas de temps d'indice k
$SoC_{BT}(k)$	-	Etat de charge du module de batteries au pas de temps d'indice k
SoC_{avg}	-	Etat de charge moyen au cours de la mission
SoC_{ref}	-	Etat de charge de référence
SoC	-	Etat de charge des batteries
$Vol_{ESS,cell}$	(en m ³ /cellule)	Volume d'une cellule du système de stockage
$Vol_{ESS,i}$	(en m ³)	Volume du système de stockage i
Vol_{ESS}	(en m ³)	Volume du système de stockage
Vol_{fuel}	(en m ³)	Volume du carburant
Vol_{ge}	(en m ³)	Volume du groupe diesel
Vol_{mot}	(en m ³)	Volume du moteur diesel
$Vol_{refroidisseur}$	(en m ³)	Volume du groupe de refroidissement
$Vol_{refroidisseur_norm}$	(en m ³ /W)	Volume normalisé du groupe de refroidissement
$Vol_{sources}$	(en m ³)	Volume total des sources d'énergies du train diesel-électrique hybride
$v(k)$	(en km/h)	Vitesse de la mission au pas de temps d'indice k
p_{SEI}	-	Portion de lithium consommée dans la formation de l'interface d'électrolyte solide
r_{SEI}	-	Ratio constant de de dégradation
η_{ESS}	-	Rendement du système de stockage
ρ_{diesel}	(en kg/m ³)	Masse volumique du diesel

A.2.2. Fonction normalisée de la cartographie

La cartographie d'un moteur diesel se présente de la façon suivante :

$$\begin{array}{c} \text{Couple moteur (N.m)} \nearrow \\ \hline \begin{pmatrix} Conso_{11} & \dots & Conso_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Conso_{n1} & \dots & Conso_{nn} \end{pmatrix} \begin{array}{l} \downarrow \text{Vitesse de de} \\ \text{l'alternateur} \\ \text{(tr/min)} \nearrow \end{array} \end{array} \quad (\text{A.62})$$

$Conso_{ij}$ (g/kWh) est la consommation de carburant pour un moteur avec un couple Γ_j et une vitesse de rotation Ω_i .

La puissance d'un groupe diesel est le produit de son couple par sa vitesse. Il est donc possible de calculer pour chaque couple {Couple ; Vitesse} la puissance correspondante. Nous obtenons alors la matrice suivante :

$$\begin{array}{c} \text{Couple moteur (N.m)} \nearrow \\ \hline \begin{pmatrix} P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix} \begin{array}{l} \downarrow \text{Vitesse de de} \\ \text{l'alternateur} \\ \text{(tr/min)} \nearrow \end{array} \end{array} \quad (\text{A.63})$$

P_{ij} (W) est la puissance pour un moteur avec un couple Γ_j et une vitesse de rotation Ω_i .

Il est donc possible de connaître la consommation du moteur pour chacune de ses puissances. Cependant, plusieurs couples $\{\Gamma ; \Omega\}$ peuvent donner la même valeur de puissance. Il y a donc plusieurs valeurs de consommations pour une même puissance (cf. Figure A.4).

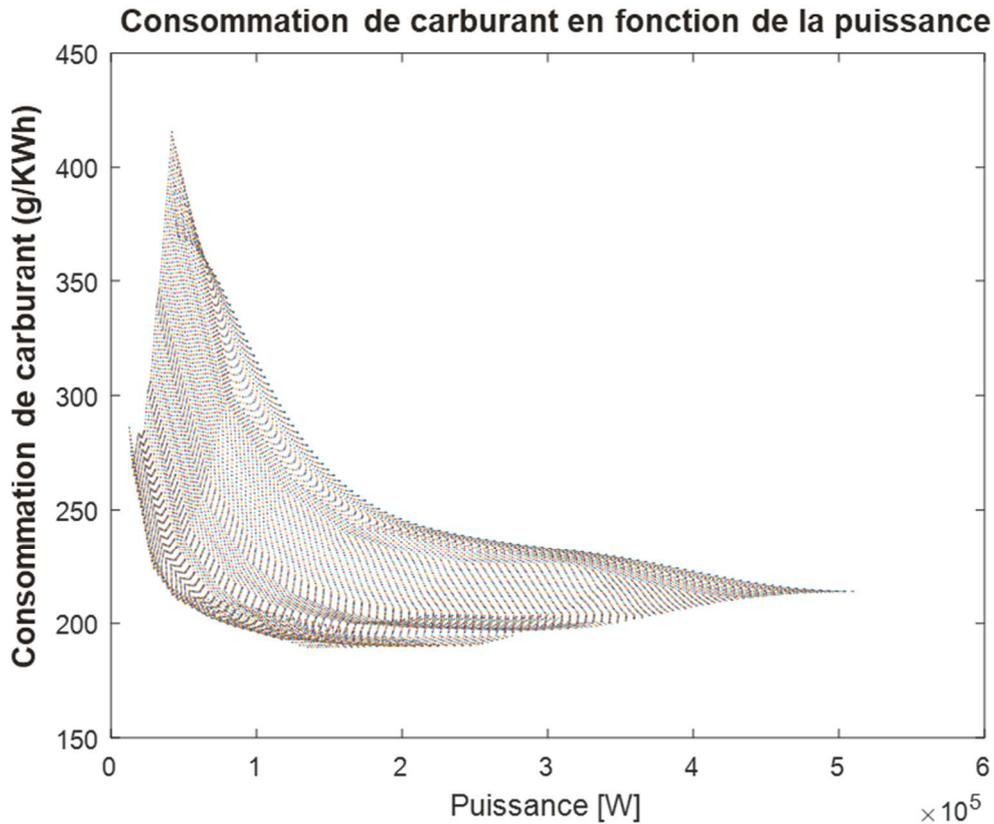


Figure A.4 : Consommation de carburant selon la puissance

A partir de cette cartographie {consommation ; puissance}, nous pouvons obtenir une tendance globale de consommation de carburant. Pour cela, la matrice de consommation est parcourue selon un certain intervalle de puissance, puis, nous calculons la médiane des consommations sélectionnées.

Par exemple, pour des puissances de $100W \pm 10W$, il existe 6 consommations possibles. Nous calculons la médiane de ces 6 consommations. Pour la suite, nous considérons alors que toute puissance dans l'intervalle [90W ; 110W] donnera lieu à une consommation de carburant égale à cette valeur. Le nuage de points se condensent alors sur une zone (cf. Figure A.5) dont il est possible d'extraire une tendance.

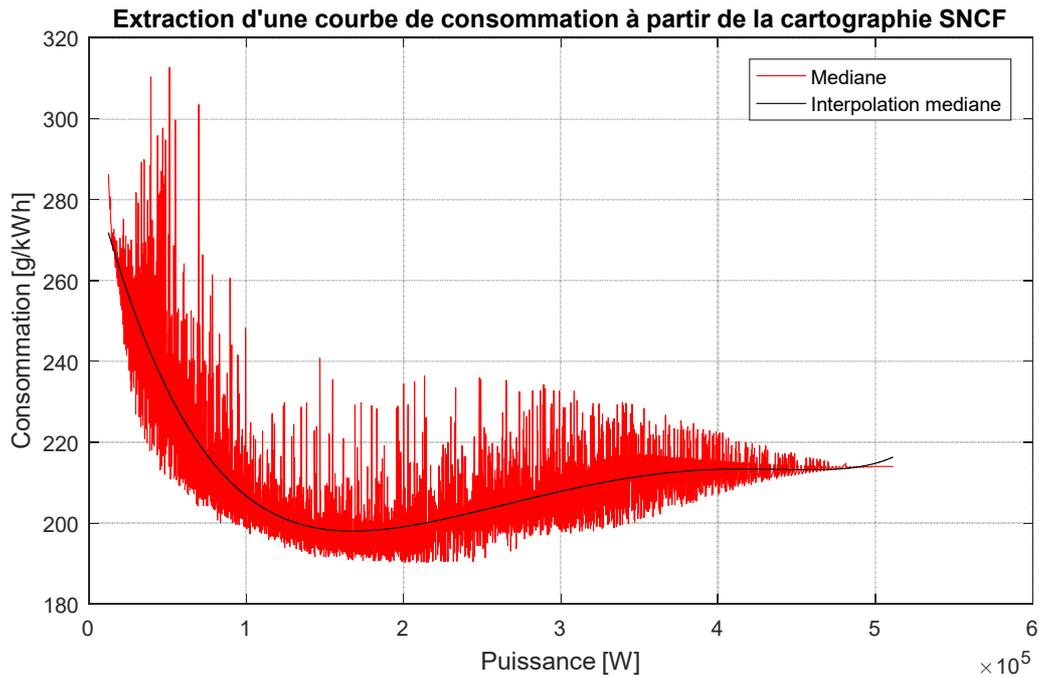


Figure A.5 : Interpolation de la cartographie

Nous interpolons alors cette tendance afin d'obtenir une fonction normalisée de la cartographie permettant de calculer selon la puissance demandée, la consommation de carburant associée. Sur les cas d'étude, cette méthode donne lieu à un écart de $\pm 1\%$ en moyenne par rapport à une consommation mesurée expérimentalement sur un train diesel-électrique conventionnel.

Cette méthode qui permet de déterminer une fonction normalisée d'une cartographie de consommation a été développée par Charley LANNELUC pendant son stage de fin d'étude d'école d'ingénieur.

A.2.3. Algorithme rainflow

L'algorithme « rainflow » a été créé pour analyser la fatigue des matériaux. Cependant, il s'adapte parfaitement au comptage des cycles de charge/décharge d'une batterie [78]. Le Tableau A.1 et la Figure A.6 présente un exemple de profil d'état de charge d'une batterie.

Tableau A.1 : Extremums de l'état de charge

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Valeur	0.32	0.52	0.78	0.41	0.15	0.58	0.45	0.48	0.3	1	0.6

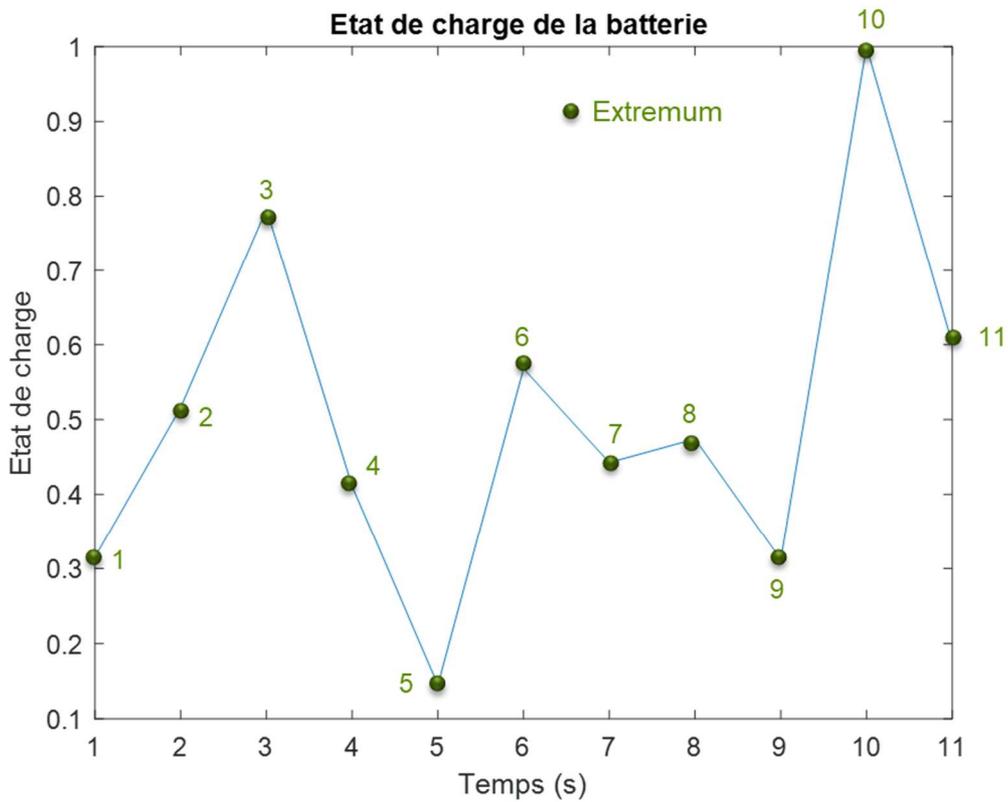


Figure A.6 : Etat de charge de la batterie

✓ *Etape 1*

L'algorithme parcourt le tableau dans l'ordre. Il commence par calculer les pentes entre les 4 premiers points :

$$\Delta_1 = |SoC_2 - SoC_1| \quad (A.64)$$

$$\Delta_2 = |SoC_3 - SoC_2| \quad (A.65)$$

$$\Delta_3 = |SoC_4 - SoC_3| \quad (A.66)$$

Si $\Delta_2 \leq \Delta_1$ et $\Delta_2 \leq \Delta_3$ alors les points 2 et 3 forment un cycle. Dans le cas contraire, le point 1 est écarté et rangé dans le tableau des résidus. Dans notre cas, nous avons :

- $\Delta_1 = 0.2$
- $\Delta_2 = 0.26$
- $\Delta_3 = 0.37$

D'où : $\Delta_2 > \Delta_1$ et $\Delta_2 < \Delta_3$. Le premier extremum est donc un résidu (cf. Tableau A.3). Il est écarté du tableau des extremums du signal (cf. Tableau A.2).

Tableau A.2 : Extremums de l'état de charge après la 1^{ère} étape de l'algorithme

N°	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Valeur	0.52	0.78	0.41	0.15	0.58	0.45	0.48	0.3	1	0.6

Tableau A.3 : Résidus après la 1^{ère} étape

N°	1
Valeur	0.32

✓ Etape 2

Les calculs de l'étape 1 sont réitérés mais avec les points : 2-3-4-5. Nous avons alors :

- $\Delta_1 = 0.26$
- $\Delta_2 = 0.37$
- $\Delta_3 = 0.26$

D'où : $\Delta_2 > \Delta_1$ et $\Delta_2 > \Delta_3$. L'état de charge 2 est donc un résidu (cf. Tableau A.5). Il est écarté du tableau des extremums du signal (cf. Tableau A.4).

Tableau A.4 : Extremums de l'état de charge après la 2^{ème} étape de l'algorithme

N°	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Valeur	0.78	0.41	0.15	0.58	0.45	0.48	0.3	1	0.6

Tableau A.5 : Résidus après la 2^{ème} étape

N°	1	2
Valeur	0.32	0.52

✓ **Etape 3**

Les calculs de l'étape 1 sont réitérés mais avec les points : 3-4-5-6. Nous avons alors :

- $\Delta_1 = 0.37$
- $\Delta_2 = 0.26$
- $\Delta_3 = 0.43$

D'où : $\Delta_2 < \Delta_1$ et $\Delta_2 < \Delta_3$. Les états de charge 4 et 5 forment alors un cycle. Ils sont donc écartés du tableau des extremums du signal (cf. Tableau A.6) et rangés dans le tableau des cycles (cf. Tableau A.7). Le tableau des résidus reste inchangé (cf. Tableau A.5).

Tableau A.6 : Extremums de l'état de charge après la 3^{ème} étape de l'algorithme

N°	3	6	7	8	9	10	11
Valeur	0.78	0.58	0.45	0.48	0.3	1	0.6

Tableau A.7 : Cycles

N°	1
Profondeur de décharge	26%

✓ **Etape final**

Le calcul de l'étape 1 est réitéré jusqu'à parcourir tout le tableau des extremums. Au final, le tableau des résidus est de la forme suivante :

Tableau A.8 : Résidus en fin de calcul

N°	1	2	3	6	9	10	11
Valeur	0.32	0.52	0.78	0.58	0.3	1	0.6

Les résidus vont alors former des demi-cycles. La Figure A.7 présente les cycles complets et demi-cycles effectués par la batterie :

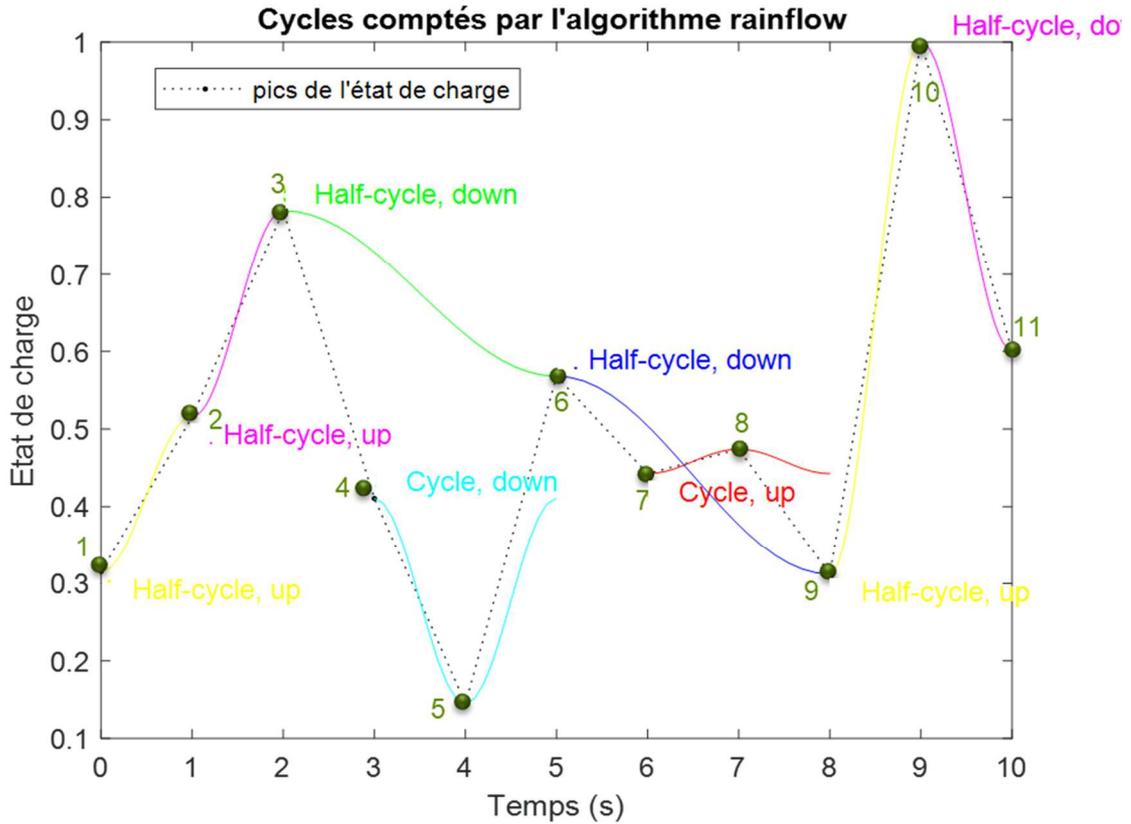


Figure A.7 : Cycles complet et demi-cycles

A.2.4. Coefficient du modèle de vieillissement des batteries Li-ion

Les coefficients du modèle de vieillissement des batteries de types Li-Ion sont rassemblés dans le Tableau A.9.

Tableau A.9 : Coefficients du modèle de vieillissement des batteries de type Li-ion [78]

Fonction de dégradation liée à la profondeur de décharge	
k_{DOD1}	$8.99 \cdot 10^4$
k_{DOD2}	$4.86 \cdot 10^{-1}$
k_{DOD3}	$-7.28 \cdot 10^4$
Fonction de dégradation liée à l'état de charge	
k_{SOC}	1.04
SOC_{ref}	0.5

Fonction de dégradation liée à la capacité	
k_C	$2.63 \cdot 10^{-1}$
C_{ref}	1
Viellissement calendaire	
k_t	$4.14 \cdot 10^{-10}$
Coefficient globaux	
p_{SEI}	$5.75 \cdot 10^{-2}$
r_{SEI}	121

A.2.5. Gestion à base de règles

Dans le cas de la gestion à base de règles pour un train hybride diesel-électrique, il est possible de distinguer en traction 3 modes possibles présentés dans le Tableau A.10.

Tableau A.10 : Mode de fonctionnement en traction pour la gestion par règles

Mode	Puissance (W)	Source(s) sollicitée(s)
Traction combinée	$P_{train} > P_{genom}$	Groupe diesel et système de stockage (en décharge)
Traction électrique	$P_{train} < 60\%P_{genom}$	Système de stockage si possible sinon groupe diesel avec charge éventuelle du système de stockage
Traction et recharge	$P_{train} \in [60\% ; 100\%]P_{genom}$	

Où P_{genom} (W) est la puissance nominale du groupe diesel et P_{train} (W) la puissance du train.

✓ *Traction combinée*

Dans le cas de la traction combinée, la puissance demandée par le train est supérieure à celle que peut fournir le groupe diesel. Le système de stockage va donc fournir le complément nécessaire (cf. Figure A.8). Si les conditions le permettent, la puissance du système de stockage est sa puissance crête.

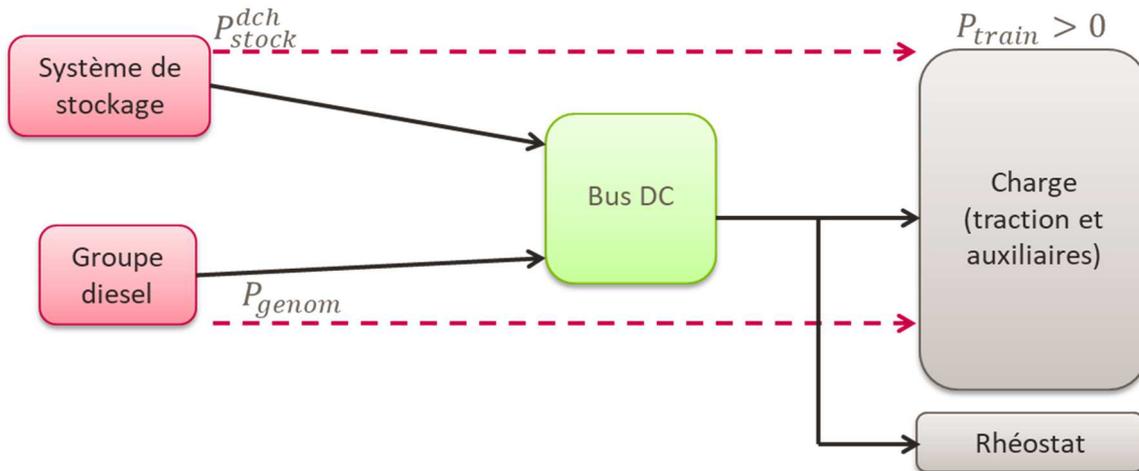


Figure A.8 : Traction combinée

✓ **Traction électrique**

Lorsque la demande du train est de faible puissance (auxiliaires), il est intéressant de répondre à la demande en utilisant uniquement le système de stockage (cf. Figure A.9). De plus, lorsque la vitesse du train est nulle (arrêt en gare), le groupe diesel est obligatoirement coupé. Le système de stockage doit alors répondre seul à la demande des auxiliaires.

Dans le cas où la puissance est supérieure à celle des auxiliaires et que le système de stockage n'a pas les capacités de répondre à la demande en terme d'énergie, il est nécessaire d'utiliser le groupe diesel. Celui-ci fonctionne soit à la puissance demandée par le train, soit à sa puissance nominale (le système de stockage est alors chargé, cf. Figure A.10).

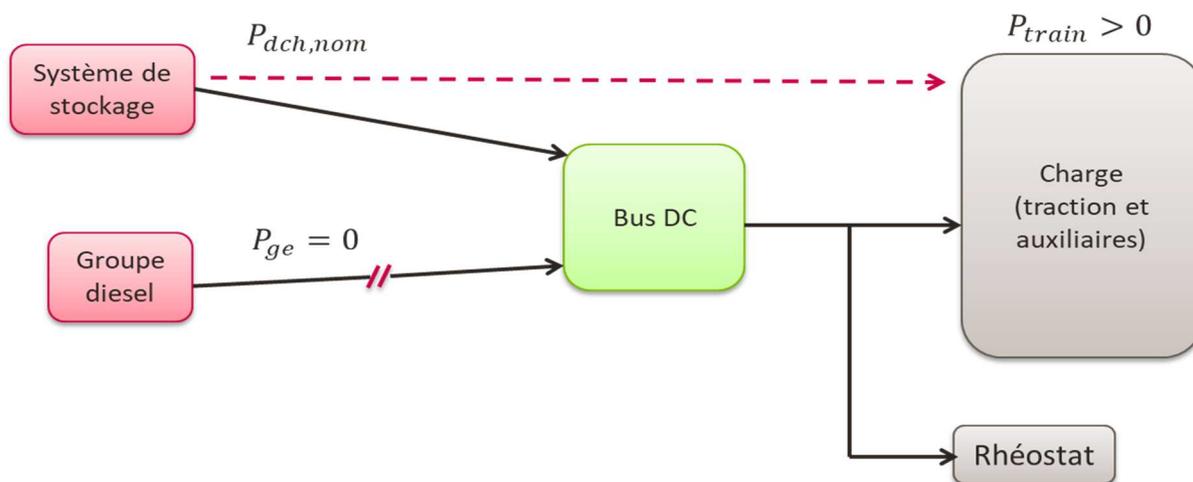


Figure A.9 : Traction électrique

✓ **Traction et recharge**

Pour la traction de moyenne puissance, il est plus intéressant d'utiliser le groupe diesel à son point de puissance nominale et de charger le surplus dans le système de stockage (cf. Figure A.10). Cependant, il est possible que le stockeur ait les capacités de répondre à la demande dans ce cas, nous privilégions le fonctionnement tout électrique (cf. Figure A.9).

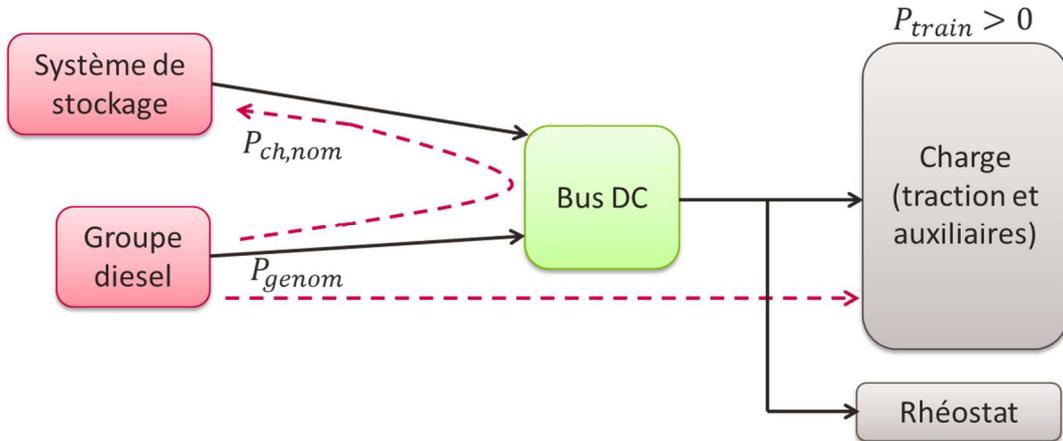


Figure A.10 : Traction et recharge

✓ **Freinage de forte puissance**

Dans le cas d'un freinage de forte puissance, la majorité est captée par le système de stockage dans la limite de ses capacités (puissance de charge et énergie maximale, la puissance crête peut être utilisée). Le reste est dissipé dans un rhéostat (cf. Figure A.11).

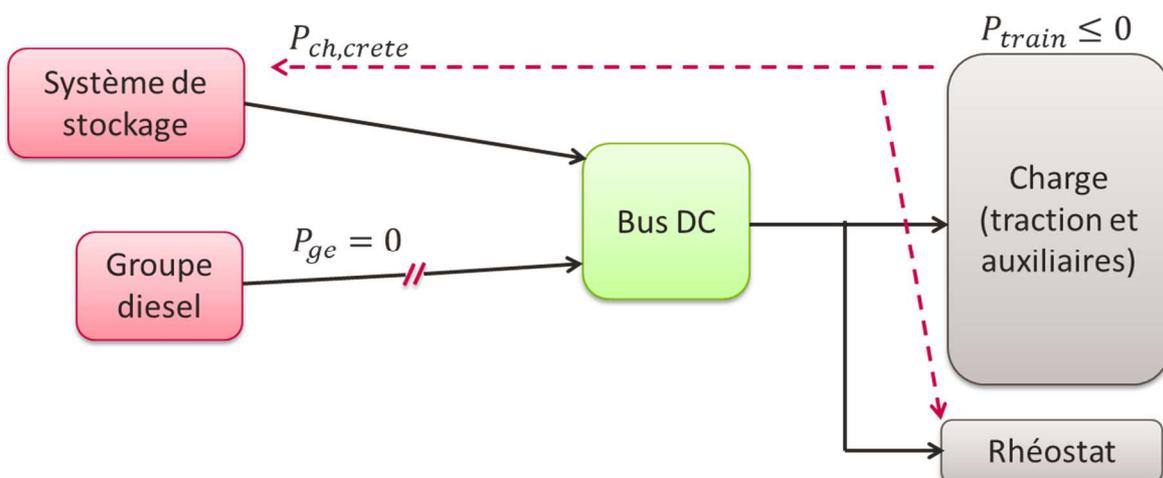


Figure A.11 : Freinage de forte puissance

✓ *Freinage de faible puissance*

Dans le cas d'un freinage de faible puissance, le système de stockage peut tout récupérer. Afin de terminer avec le même état de charge en début et fin de mission, le groupe diesel fonctionne à sa puissance nominale pour recharger le stockeur sous condition (cf. Figure A.12) :

- qu'une recharge soit nécessaire
- que le train ne soit pas à l'arrêt (vitesse nulle).

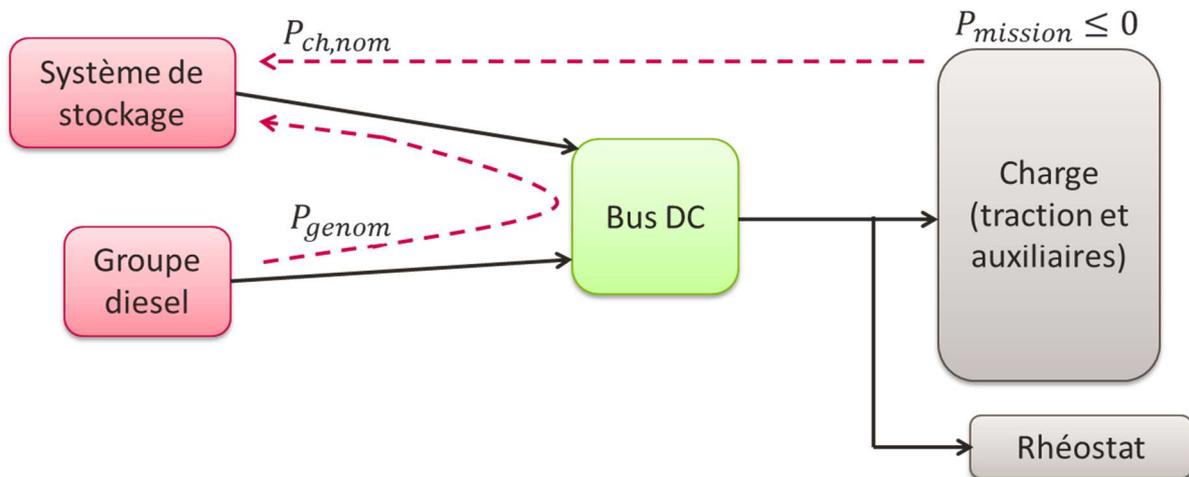


Figure A.12 : Freinage de faible puissance

✓ *Bilan*

Finalement, la gestion à base de règles dans le cas d'un train hybride diesel-électrique est résumée sur la Figure A.13.

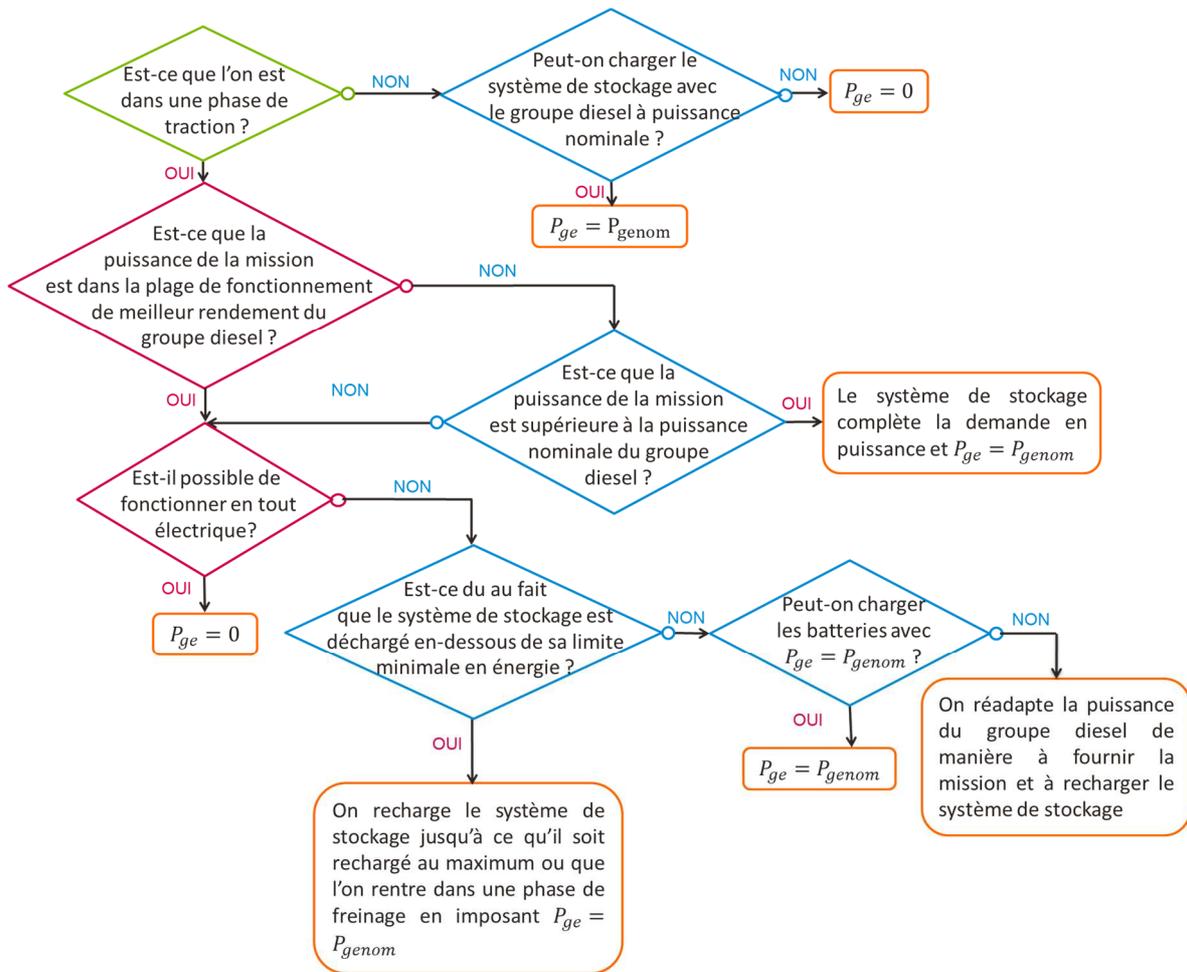


Figure A.13 : Gestion à base de règles

A.2.6. Coût d'exploitation

A.2.6.1. Coût actualisé de consommation de carburant

Pour déterminer le coût de consommation de carburant sur les 30 ans d'utilisation du train, nous faisons l'hypothèse que le train répète toujours le même trajet. Il effectue chaque année un certain nombre de kilomètres, nous pouvons alors en déduire le nombre de fois que la mission est répétée sur une année :

$$nb_{mission}^{annuel} = \frac{nb_{km}^{annuel}}{Distance} \quad (A.67)$$

où :

$nb_{mission}^{annuel}$	-	Nombre de fois qu'il faut répéter la mission pour effectuer le nombre de kilomètres annuels
nb_{km}^{annuel}	(en m)	Nombre de kilomètres effectués chaque année par le train
$Distance$	(en m)	Totalité de la distance parcourue au cours de la mission

Le coût actualisé de consommation de carburant est alors :

$$Cout_{conso}^{act} = \sum_{i=1}^{nb_{annee}} \frac{Conso_{ge} * Prix_{carbu}(i)}{(1+a)^i} * nb_{mission}^{annuel} \quad (A.68)$$

où :

$Cout_{conso}^{act}$	(en k€)	Coût de consommation de carburant actualisé pour la durée de vie du train
$Conso_{ge}$	(en L)	Consommation de carburant sur une mission
$Prix_{carbu}(i)$	(en k€/L)	Prix du carburant au litre pour l'année i
$nb_{mission}^{annuel}$	-	Nombre de fois qu'il faut répéter la mission pour effectuer le nombre de kilomètres annuels
a	(en %)	Taux d'actualisation
nb_{annee}	(en ans)	Durée de vie du train (nombre d'année)

A.2.6.2. Coût actualisé de maintenance

Nous faisons l'hypothèse que la maintenance est proportionnelle aux kilowattheures du système de stockage. Pour chaque système de stockage, le coût de maintenance se calcule de la manière suivante :

$$Cout_{maintenance,ESS}^{act} = \sum_{i=annee_{maintenance,ESS}} \frac{Cout_{ESS}^{maintenance} * E_{ESS,max}}{(1+a)^i} + \quad (A.69)$$

où :

$Cout_{ESS}^{maintenance}$	(en k€/Wh)	Coût de maintenance par kilowattheure du système de stockage
$annee_{maintenance,ESS}$	(en ans)	Nombre d'années au bout duquel une maintenance du système de stockage est nécessaire
$E_{ESS,max}$	(en Wh)	Capacité énergétique du système de stockage
$Cout_{maintenance,ESS}^{act}$	(en k€)	Coût actualisé de maintenance du système de stockage
a	(en %)	Taux d'actualisation

Dans le cas du groupe diesel, la maintenance est liée au nombre de kilomètre parcouru :

$$Coût_{maintenance,ge}^{act} = \sum_{i=0}^{nb_{annee}} nb_{km}^{annuel} * Coût_{maintenance,ge}(i) \quad (A.70)$$

où :

nb_{km}^{annuel}	(en m)	Nombre de kilomètres effectués chaque année par le train
$Coût_{maintenance,ge}(i)$	(en k€/km)	Prix de la maintenance pour l'année i
nb_{annee}	(en ans)	Durée de vie du train (nombre d'année)
$Coût_{maintenance,ge}^{act}$	(en k€)	Coût actualisé de maintenance du groupe diesel

A.2.6.3. Coût de rachat des batteries

Le coût actualisé de rachat des batteries en fin de vie se calcule en fonction des années où il a été nécessaire de les changer (information donnée par le modèle de vieillissement) :

$$Coût_{BT}^{act} = \sum_{i=annee_{remplacement}} \frac{Coût_{inv}^{BT}}{(1+a)^i} + \frac{Coût_{recyclage}^{BT}}{(1+a)^i} \quad (A.71)$$

où :

$Coût_{conso}^{act}$	(en k€)	Coût de consommation de carburant actualisé pour la durée de vie du train
$Conso_{ge}$	(en L)	Consommation de carburant sur une mission
$Prix_{carbu}(i)$	(en k€/L)	Prix du carburant au litre pour l'année i
$nb_{mission}^{annuel}$	-	Nombre de fois qu'il faut répéter la mission pour effectuer le nombre de kilomètres annuels
a	(en %)	Taux d'actualisation
nb_{annee}	(en ans)	Durée de vie du train (nombre d'année)

A.2.7. Cahier des charges complet du cas d'étude

Les différents paramètres du modèle orienté pour l'optimisation du train hybride diesel-électrique sont rassemblés dans le Tableau A.11.

Tableau A.11 : Paramètres du train hybride diesel-électrique

Variable	Descriptif	Unité	Valeur
a	Taux d'actualisation	%	8.5
$Annee_{maintenance,BT}$	Nombre d'année au bout desquelles il est nécessaire d'effectuer une maintenance des batteries	ans	1
$Annee_{maintenance,GE}$	Nombre d'année au bout desquelles il est nécessaire d'effectuer une maintenance du groupe diesel	ans	0
$Annee_{maintenance,SC}$	Nombre d'année au bout desquelles il est nécessaire d'effectuer une maintenance des supercondensateurs	ans	1
$autonomie_{KM}$	Autonomie demandée au train (distance parcourue sans remplissage du réservoir)	km	1000
C_5	Capacité nominale des batteries	Ah	20
$choiceStartandStop$	Indicateur pour l'utilisation de la fonction start and stop du groupe diesel (=1 signifie que lorsque le groupe diesel n'est pas sollicité pendant plus de xs alors il est définitivement coupé)	-	1

$coeff_{E_{bt,init}}$	Pourcentage de l'énergie maximale pour indiquer la quantité d'énergie initialement prévue dans les batteries	-	0.8
$Cout_{BT,cell}$	Coût d'une cellule de batterie	k€	confidentiel
$Cout_{BT}^{maintenance (Wh)}$	Coût de maintenance annuelle des batteries par kWh embarqué	k€/Wh	confidentiel
$Cout_{SC}^{maintenance (Wh)}$	Coût de maintenance annuelle des supercondensateurs par kWh embarqué	k€/Wh	confidentiel
$Cout_{SC,cell}$	Coût d'une cellule de supercondensateurs	k€	confidentiel
$Cout_{recyclage}^{BT}$	Coût de recyclage des batteries	k€	confidentiel
C_r	Capacité d'une cellule de supercondensateur	F	5000
C_{smin}	Consommation à vide du groupe diesel	g/s	confidentiel
C_{sn}	Consommation nominale du groupe diesel	g/kWh	confidentiel
DoD_{BT}	Profondeur de décharge des batteries	-	0.4/0.8
DoD_{SC}	Profondeur de décharge des supercondensateurs	-	0.8
ESR_{dc}	Résistance du supercondensateur	-	$350 \cdot 10^{-6}$
I_{cho}	Courant de charge nominale des batteries	A	85
I_{dcho}	Courant de décharge nominale des batteries	A	85
$initialPP$	Puissance nominale du groupe diesel du train conventionnel	W	300 000
$masse_{bat,dem}$	Masse de la batterie de démarrage du groupe diesel	kg	100
$M_{BT,cell}$	Masse d'une cellule de batterie	kg	1.1
$M_{cont_{vide}}$	Masse du conteneur de carburant à vide	kg/L	0.31
$M_{SC,cell}$	Masse d'une cellule de supercondensateur	kg	1.05
$maxYearReplacement$	Année au bout desquelles il est nécessaire de changer les systèmes de stockage si cela n'a pas été fait avant	ans	10
$methodAgeing$	Indicateur de la méthode de calcul de vieillissement des batteries (1 = batteries de type NiMH et 2 = batteries de type Li-ion)	-	2
nb_{km}^{annuel}	Nombre de kilomètres effectués chaque année par le train	km	confidentiel
$nb_{année}$	Durée de vie du train	ans	30
$option_{carburant}$	indicateur pour choisir la méthode de calcul du coût de consommation de carburant (= 1 prix annuel réévalué chaque année, sinon prix fixe mais actualisation)	-	1

$option_{maintenance}$	indicateur pour choisir la méthode de calcul du coût de maintenance du groupe diesel de carburant (= 1 prix annuel réévalué chaque année, sinon prix fixe mais actualisation)	-	1
$Prix_{carbu}$	Prix fixe du carburant	k€/L	confidentiel
ρ_{diesel}	Masse volumique du diesel	kg/L	845
$time_{stop}$	Durée d'arrêt du groupe diesel pour appliquer la fonction start-and-stop	s	30
V_0	Tension nominale des batteries	V	2.3
$Vol_{bat,dem}$	Volume de la batterie de démarrage du groupe diesel	m ³	0.25
$Vol_{BT,cell}$	Volume d'une cellule de batterie	m ³	4.34*10 ⁻⁴
$Vol_{SC,cell}$	Volume d'une cellule de supercondensateurs	m ³	9.9*10 ⁻⁴
V_r	Tension nominale des supercondensateurs	V	2.5

A.3. TRACTION HYBRIDE ELECTRIQUE

A.3.1. Equations du train hybride électrique

$$AX = S \quad (A.72)$$

$$X = \begin{pmatrix} V \\ I_{SST} \end{pmatrix} \quad (A.73)$$

$$S = \begin{pmatrix} J \\ E_{SST} \end{pmatrix} \quad (A.74)$$

$$R_{lin}^{cat} = \frac{\rho_{Cu}}{S_{cat}} \quad (A.75)$$

$$R_{lin}^{rail} = \frac{\rho_{fe}}{S_{rail}} \quad (A.76)$$

$$R_{lin}^{tot} = R_{lin}^{cat} + \frac{1}{2} R_{lin}^{rail} \quad (A.77)$$

$$Z_{ligne} = L_{ligne} * R_{lin}^{tot} \quad (A.78)$$

$$A = \begin{pmatrix} Y_{ligne} & -I \\ I & Z_{SST} \end{pmatrix} \quad (A.79)$$

$$I_{SST} = \frac{1}{Z_{SST}} * \frac{1}{\pi} * (E_{SST} - V) * \arctan \left[(E_{SST} - V) * C_{Diode} + \frac{1}{2} \pi + \frac{\pi}{C_{Diode}} \right] \quad (A.80)$$

$$P_{train} = V_{train} * J_{train} \quad (A.81)$$

$$A \left(\begin{matrix} V \\ I_{SST} \end{matrix} \right) = \left(\begin{matrix} P \\ \bar{V} \\ E_{SST} \end{matrix} \right) \quad (A.82)$$

$$F(X) = A \left(\begin{matrix} V \\ I_{SST} \end{matrix} \right) - \left(\begin{matrix} P \\ \bar{V} \\ E_{SST} \end{matrix} \right) \quad (A.83)$$

$$U_{min} = \min_k (V_{train}(k)) \quad (A.84)$$

$$U_{moy}^{utile} = \frac{1}{N_{tract}} \sum_{P_{train}(k) > 0} V_{train}(k) \quad (A.85)$$

$$U_{max} = \max_k (V_{train}(k)) \quad (A.86)$$

$$derive = \frac{V(k-1) - V(k-2)}{dt} \quad (A.87)$$

$$V_{estimée}(k) = V(k-1) + derive \cdot dt \quad (A.88)$$

$$(R_1 + R_2)V_{estimée}^2 - V_{SST}(R_1 + R_2)V_{estimée} + P_{node}R_1R_2 = 0 \quad (A.89)$$

$$V_{estimée}(k) = V_{estimée}(k) * \left(1 + \frac{V(k-1) - V_{estimée}(k-1)}{V(k-1)} \right) \quad (A.90)$$

$$P_{cat}^{max} = \frac{V_{ref}(R_1 + R_2)V_{limit} - (R_1 + R_2)V_{limit}^2}{R_1R_2} \quad (A.91)$$

$$P_{cat}(k) = \begin{cases} P_{node}(k) & \text{si } P_{node}(k) < P_{cat}^{max} \\ P_{cat}^{max} & \text{sinon} \end{cases} \quad (A.92)$$

$$P_{ESS}(k) = \begin{cases} \frac{P_{node}(k) - P_{cat}(k)}{\eta_{ESS}} & \text{pour la décharge} \\ (P_{node}(k) - P_{cat}(k)) * \eta_{ESS} & \text{pour la charge} \end{cases} \quad (A.93)$$

$$P_{train}(k) = P_{cat}(k) + P_{ESS}(k) + P_{rheostat}(k) \quad (A.94)$$

$$E_{conso} = \sum_{i=1}^{nb_{SST}} \sum_{k=1}^N I_{SST,i}(k) * E_{SST,i} * dt \quad (A.95)$$

où :

A	-	Matrice d'admittance – impédance globale
C_{Diode}	-	Coefficient de lissage pour assurer la continuité (le choix de la valeur a été déterminé par [5])
$derive$	(en V/s)	Coefficient de la dérivée
dt	(en s)	Pas de temps
$E_{SST,i}$	(en V)	Tension à vide de la sous-station i
E_{SST}	(en V)	Vecteur des tensions à vide des sous-stations
E_{conso}	(en J)	Energie consommée au niveau des sous-stations
$I_{SST,i}(k)$	(en A)	Courant consommé à la sous-station i pour le pas de temps d'indice k
I_{SST}	(en A)	Vecteur des courants issus des sous-stations
I	-	Matrice d'incidence (vaut 1 lorsque le nœud est un nœud symbolisant une sous-station, 0 sinon)
J	(en A)	Vecteur des courants soutirés par les trains
J_{train}	(en A)	Courant absorbé ou renvoyé par le train
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle
L_{ligne}	(en m)	Longueur du tronçon de ligne
N_{tract}	-	Nombre de pas de temps durant lesquels le train est en traction
N	-	Nombre de pas de temps de la mission
nb_{SST}	-	Nombre de sous-stations de la ligne
P	(en W)	Vecteur des puissances consommées ou fournies par les trains au niveau des nœuds de courant. Lorsque le nœud de courant n'est pas rattaché au train, alors cette puissance est nulle (cf. IV.3.2.6).
$P_{ESS}(k)$	(en W)	Puissance fournie/reçue par le système de stockage au pas de temps d'indice k
$P_{cat}(k)$	(en W)	Puissance que fournit ou reçoit la caténaire pour le pas de temps d'indice k
P_{cat}^{max}	(en W)	Puissance maximale que peut fournir (ou recevoir) la caténaire au nœud
$P_{node}(k)$	(en Ω)	Puissance demandée/renvoyée par le train au nœud auquel il est attaché au pas de temps d'indice k
$P_{rheostat}(k)$	(en W)	Puissance dissipée dans le rhéostat du train pour le pas de temps d'indice k
$P_{train}(k)$	(en W)	Puissance du train (traction ou freinage) pour le pas de temps d'indice k
R_1	(en Ω)	Résistance du tronçon de ligne à gauche du train
R_2	(en Ω)	Résistance du tronçon de ligne à droite du train
R_{lin}^{cat}	(en Ω/m)	Résistance linéique de la caténaire
R_{lin}^{rail}	(en Ω/m)	Résistance linéique du rail
R_{lin}^{tot}	(en Ω/m)	Impédance linéique totale
S	-	Second membre
S_{cat}	(en m ²)	Section de la caténaire
S_{rail}	(en m ²)	Section de rail
U_{max}	(en V)	Tension maximale mesurée au niveau du pantographe
U_{min}	(en V)	Tension minimale mesurée au niveau du pantographe
U_{moy}^{utile}	(en V)	Tension moyenne utile mesurée au niveau du pantographe
V	(en V)	Vecteur des tensions au niveau des nœuds
$V(k-1)$	(en V)	Tension au nœud au pas de temps d'indice k-1
$V(k-2)$	(en V)	Tension au nœud au pas de temps d'indice (k-2)
V_{SST}	(en V)	Tension à vide de la sous-station
$V_{estimée}(k)$	(en V)	Tension estimée au nœud pour le pas de temps d'indice k
$V_{estimée}(k-1)$	(en V)	Tension estimée au nœud pour le pas de temps d'indice (k-1)
V_{limit}	(en V)	Tension limite imposée
V_{ref}	(en V)	Tension de référence choisie
V_{train}	(en V)	Tension du train mesurée au niveau du pantographe
X	-	Vecteur des inconnus du système

Y_{ligne}	(en Ω^{-1})	Matrice contenant l'admittance de chaque tronçon de ligne (morceau entre deux nœuds qu'ils soient fixes ou mobiles)
Z_{SST}	(en Ω)	Matrice contenant l'impédance des sous-stations
Z_{ligne}	(en Ω)	Impédance du tronçon de ligne
η_{ESS}	-	Rendement du système de stockage
ρ_{Cu}	(en Ω/m^3)	Résistivité du cuivre
ρ_{Fe}	(en Ω/m^3)	Résistivité du fer

A.3.2. Mise en équation de la ligne et résolution

A.3.2.1. Résolution

La représentation nodale utilisée dans la traction électrique pour modéliser la ligne donne le système suivant à résoudre pour chaque pas de temps (cf. IV.3.2.7) :

$$AX = S \quad (A.96)$$

A est la matrice d'admittance – impédance globale, $X^T = (V \ I_{SST})$ le vecteur des inconnus du système et $S^T = (P/V \ E_{SST})$ le second membre.

Pour notre application, nous utilisons une méthode de Newton-Raphson implicite appliquée à la fonction :

$$F(X) = A \begin{pmatrix} V \\ I_{SST} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} P \\ \bar{V} \\ E_{SST} \end{pmatrix} = 0 \quad (A.97)$$

où :

P	(en W)	Vecteur des puissances consommées ou fournies par les trains au niveau des nœuds de courant. Lorsque le nœud de courant n'est pas rattaché au train, alors cette puissance est nulle (cf. IV.3.2.6).
V	(en V)	Vecteur des tensions au niveau des nœuds
I_{SST}	(en A)	Vecteur des courants issus des sous-stations
E_{SST}	(en V)	Vecteur des tensions à vide des sous-stations
A	-	Matrice d'admittance – impédance globale

L'objectif est donc de trouver X tel que $F(X) = 0$. A , P et E_{SST} sont des paramètres connus. La méthode de Newton-Raphson s'écrit alors :

$$Jac_X(F) * dX = F(X) \quad (A.98)$$

où :

$Jac_X(F)$	-	Matrice jacobienne de F par rapport à X
$dX = X_{k+1} - X_k$	-	Ecart entre deux itérations de Newton-Raphson
$F(X)$	-	Fonction F en X

Nous itérons sur l'équation (A.98) jusqu'à ce que dX tende vers 0 avec une précision donnée.

Pour résoudre le système linéaire (A.98), nous utilisons une méthode de décomposition LU sur la matrice jacobienne. Nous avons alors :

$$LU(X) * dX = F(X) \quad (A.99)$$

Lorsque $dX < \varepsilon$ (ε étant la précision choisie) alors nous considérons que l'algorithme de Newton-Raphson a convergé. La dernière valeur de X est alors retenue.

A.3.2.2. Calcul de la matrice jacobienne

Dans le système (A.97), A est imposé par la position des trains et E_{SST} est un paramètre d'entrée fixe. Ce ne sont donc pas des variables dérivables. L'entrée dérivable est alors la puissance des trains (P) et la sortie, les inconnues du système (V et I_{SST}). Le théorème des fonctions implicites donne l'équivalence suivante :

$$F(P, X) = 0 \Leftrightarrow X = \varphi(P) \quad (A.100)$$

où :

P	(en W)	Vecteur des puissances consommées (ou renvoyées) aux nœuds par les trains
X	-	Vecteur des inconnus du système
F	-	Fonction (vectorielle) à résoudre
φ	-	Fonction (vectorielle) liant entrées et sorties

La matrice jacobienne se calcule selon l'équation (A.101).

$$d\varphi(P) = -jac_X(F)^{-1} \circ jac_P(F) \quad (A.101)$$

où :

$d\varphi(P)$	-	Matrice jacobienne de la fonction à résoudre
$Jac_X(F)$	-	Matrice jacobienne de F par rapport à X
$Jac_P(F)$	-	Matrice jacobienne de F par rapport à P

A.3.3. Calcul des résistances du modèle équivalent approché pour l'estimation de tension des nœuds

A.3.3.1. Méthode générale

Pour estimer la tension mesurée au niveau du pantographe par le modèle équivalent approché présenté au paragraphe IV.4.2.3, il est nécessaire de connaître R_1 et R_2 . A chaque pas

de temps, une décision est prise concernant la répartition de puissance entre caténaire et système de stockage embarqué. Si la caténaire a été sollicitée au pas de temps précédent cette prise de décision, alors les valeurs de R_1 et R_2 sont mises à jour.

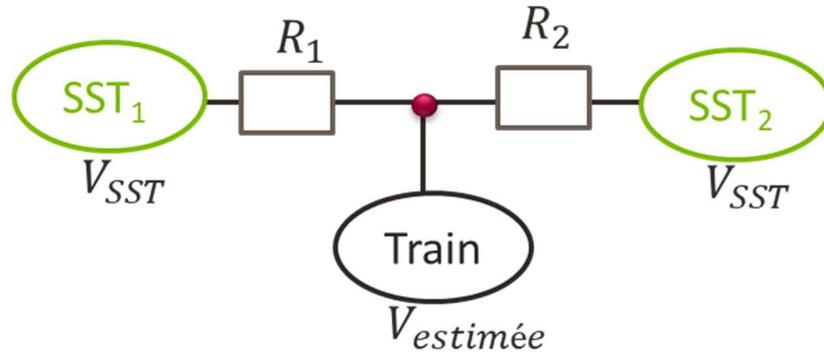


Figure A.14 : Modèle équivalent approché de la ligne

Nous calculons R_1 et R_2 de la façon suivante :

$$R_1 = \frac{V_{SST} - X_{train}(k - 1)}{I_1} \quad (\text{A.102})$$

$$R_2 = \frac{V_{SST} - X_{train}(k - 1)}{I_2} \quad (\text{A.103})$$

où :

V_{SST}	(en V)	Tension à vide des sous-stations
$X_{train}(k - 1)$	(en V)	Tension du train mesurée au pantographe (la tension du nœud) au pas de temps d'indice $(k - 1)$
I_1	(en A)	Courant circulant dans le tronçon gauche de la ligne
I_2	(en A)	Courant circulant dans le tronçon droit de la ligne
R_1	(en Ω)	Résistance du tronçon gauche de la ligne
R_2	(en Ω)	Résistance du tronçon droit de la ligne
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

Les courants des portions de ligne sont déterminés par les valeurs de puissance et tension ainsi que la position des trains au pas de temps précédent :

$$I_{node} = \frac{P_{cat}(k - 1)}{X_{train}(k - 1)} \quad (\text{A.104})$$

$$I_1 = I_{node} * \frac{l_2}{l_{tot}} \quad (\text{A.105})$$

$$I_2 = I_{node} * \frac{l_1}{l_{tot}} \quad (\text{A.106})$$

où :

$P_{cat}(k-1)$	(en W)	Puissance demandée à la caténaire au pas de temps d'indice $(k-1)$
$X_{train}(k-1)$	(en V)	Tension du train mesurée au pantographe (la tension du nœud) au pas de temps d'indice $(k-1)$
I_1	(en A)	Courant circulant dans le tronçon gauche de la ligne
I_2	(en A)	Courant circulant dans le tronçon droit de la ligne
I_{node}	(en A)	Courant consommé par le train au nœud auquel il est attaché
l_1	(en m)	Distance entre le train et la sous-station de gauche
l_2	(en m)	Distance entre le train et la sous-station de droite
l_{tot}	(en m)	Distance entre les deux sous-stations
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

Ces références sont alors transmises au pas de temps suivant. Elles seront mises à jour en fonction du déplacement du train :

$$R_1^{act} = R_1 * \frac{pos_{train}(k-1) + \Delta l}{pos_{train}(k-1)} \quad (A.107)$$

$$R_2^{act} = R_2 * \frac{pos_{train}(k-1) + \Delta l}{pos_{train}(k-1)} \quad (A.108)$$

où :

$pos_{train}(k-1)$	(en m)	Position du train au pas de temps d'indice $(k-1)$
Δl	(en m)	Ecart entre la position actuelle du train et sa position au pas de temps précédent
R_1	(en Ω)	Résistance du tronçon gauche de la ligne
R_2	(en Ω)	Résistance du tronçon droit de la ligne
R_1^{act}	(en Ω)	Résistance du tronçon gauche de la ligne mise à jour
R_2^{act}	(en Ω)	Résistance du tronçon droit de la ligne mise à jour
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

A.3.3.2. Cas particuliers

Pour la méthode de calcul des résistances, il faut distinguer plusieurs cas :

- 1) au pas de temps étudié, le train est attaché à un nœud fixe qui symbolise une sous-station
- 2) au pas de temps précédent, le train était attaché à un nœud fixe qui symbolise une sous-station
- 3) au pas de temps précédent, le train a commencé à circuler sur la ligne
- 4) le train ne remplit aucune des conditions précédentes

Pour le cas 1 : si l'on est rattaché à une sous-station alors le modèle équivalent n'a pas de sens. Les références R_1 et R_2 renvoyées au pas de temps suivant sont nulles.

Pour le cas 2 : si le train était attaché à une sous-station au pas de temps précédent, alors des références nulles ont été renvoyées. Il est donc impossible de mettre à jour les valeurs des résistances. Nous faisons le choix de calculer R_1 et R_2 directement à l'aide des équations (A.102) à (A.106) en utilisant la position actuelle du train.

Pour le cas 3 : si le train a commencé à circuler au pas de temps précédent, alors il n'a pas pu renvoyer des références puisque ces références sont calculées à l'aide des données du pas de temps qui le précédait (soit juste avant le début de circulation). Nous avons fait le choix de calculer R_1 et R_2 directement à l'aide des équations (A.102) à (A.106) en utilisant la position du train au pas de temps précédent.

Pour le cas 4 : la méthode présentée en A.3.3.1 s'applique.

A.3.3.3. Limites du modèle équivalent approché

Le modèle équivalent présente deux limites principales :

- ce modèle ne tient pas compte de la présence ou non d'autres trains sur la ligne
- le calcul des résistances se faisant au pas de temps précédent, une augmentation brusque de la demande fait que ces références sont « fausses »

Dans le premier cas le risque est de faire une mauvaise évaluation des références de résistances qui seront transmises au pas de temps suivant. En effet, le calcul des valeurs de référence des résistances R_1 et R_2 se fait à partir de la puissance qui a transité sur la caténaire au niveau du nœud considéré. Si plusieurs trains se trouvent entre les mêmes sous-stations, la puissance qui transite au total sur la ligne est donc bien différente de celle qui transite au niveau d'un seul nœud. Par conséquent, le courant permettant de calculer les résistances peut s'avérer très différent du courant réel de la ligne. Les références sont alors « fausses » ce qui peut avoir des conséquences sur la valeur de la puissance maximale au pas de temps suivant et donc impacter le choix de la gestion au pas de temps suivant.

Il a été fait le choix de conserver cette erreur en raison d'un applicatif industriel futur. En effet, en pratique, les trains ne communiquent pas d'information entre eux. Cela signifie qu'un train ne sait pas s'il y a d'autres trains que lui entre les mêmes sous-stations et il ne connaît pas

non plus la puissance qu'ils demandent. Il n'est donc pas possible d'avoir une gestion qui communique avec les autres trains. De plus, les erreurs induites restent acceptables. Sur les cas étudiés, la gestion s'est avérée suffisamment robuste pour qu'un écart de références des résistances R_1 et R_2 n'empêche pas le respect des critères de tension.

Le second cas se présente lors de la recharge des systèmes de stockage. En effet, les cas d'étude ont un pas de temps de l'ordre de la seconde. En conséquence, la variation de puissance d'un train entre deux pas de temps reste raisonnable. Cependant, la recharge du système de stockage s'effectue à sa puissance maximale (si possible). Par conséquent, la puissance demandée par le train peut subir une forte augmentation. Les références estimées au pas de temps précédent deviennent obsolètes puisque la puissance demandée est beaucoup plus élevée que celle du pas de temps précédent. Le calcul de la puissance maximale que peut délivrer la caténaire peut alors être faux. La conséquence est que la tension minimale est atteinte lorsque le système de stockage se recharge.

Afin d'éviter cette problématique, il a fallu s'affranchir du transit de puissance pour le calcul des résistances R_1 et R_2 . Pour cela, nous avons fait le choix d'utiliser la résistance linéique de la ligne. Connaissant la position du train, il a été possible de calculer de nouvelles valeurs pour R_1 et R_2 . Ainsi, la tension minimale n'est plus atteinte lorsque le système de stockage se recharge.

A.3.4. Modes de fonctionnement de la gestion par seuil

Dans le cas de la gestion par seuil, le niveau de la tension estimée ainsi que le cas de la traction ou de freinage permet de faire apparaître les 6 modes présentés dans le Tableau A.12.

Tableau A.12 : Modes de fonctionnement de la gestion par seuils

Mode	Tension (V)	Puissance (W)	V_{limit} (V)
Traction limitée	$V_{estimée}(k) < seuil_1$	$P_{node}(k) > 0$	$V_{traction}$
Freinage interdit	$V_{estimée}(k) < seuil_1$	$P_{node}(k) < 0$	-
Traction sans limite et recharge	$V_{estimée}(k) > seuil_2$	$P_{node}(k) > 0$	$V_{traction}$ et V_{rch}

Freinage limité	$V_{estimée}(k) > seuil_2$	$P_{node}(k) < 0$	$V_{freinage}$
Traction limitée et recharge	$V_{estimée}(k) \in [seuil_1; seuil_2]$	$P_{node}(k) > 0$	$V_{traction}$ et V_{rch}
Freinage sans limite	$V_{estimée}(k) \in [seuil_1; seuil_2]$	$P_{node}(k) < 0$	$V_{freinage}$

où :

$V_{estimée}(k)$	(en V)	Tension estimée au nœud pour le pas de temps d'indice k
$P_{node}(k)$	(en Ω)	Puissance demandée/renvoyée par le train au nœud auquel il est attaché au pas de temps d'indice k
$seuil_1$	(en V)	Seuil de tension minimale à partir duquel le stockeur vient en support pour la traction
$seuil_2$	(en V)	Seuil de tension maximale à partir duquel le stockeur vient en support pour le freinage
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle
V_{limit}	(en V)	Tension limite pour le calcul de la puissance maximale de la caténaire (cf. IV.4.2.4)

✓ *Traction limitée*

Dans ce cas, la tension estimée est inférieure au $seuil_1$ de la gestion. La puissance maximale que peut fournir la caténaire est évaluée à l'aide de la limite $V_{traction}$. Deux modes sont alors possibles :

- la caténaire peut répondre à la demande seule : on est très proche de $seuil_1$ mais légèrement inférieur (cf. Figure A.15a)
- la caténaire fournit une partie de la puissance et le système de stockage fait le complément. (cf. Figure A.15b)

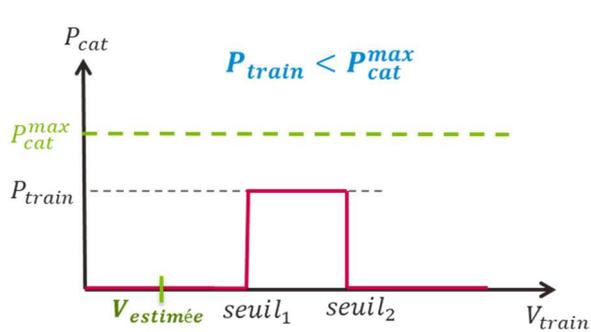


Figure A.15a: Caténaire seule

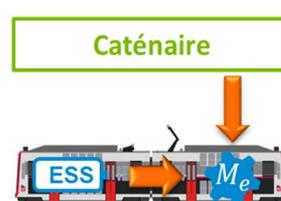
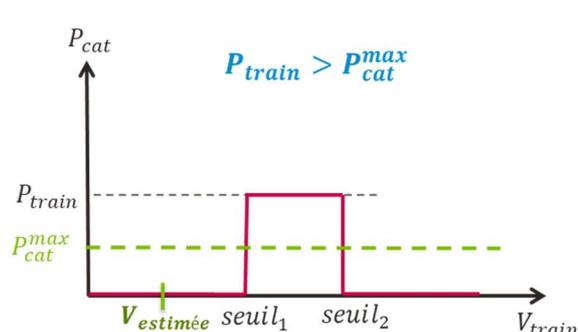


Figure A.15b : Caténaire et stockeur

ESS est le système de stockage et M_e le moteur électrique.

✓ **Freinage interdit**

Lorsque la tension est inférieure au $seuil_1$ avec une puissance négative (freinage), cela signifie que l'estimation de la tension est très certainement fausse. Nous ne disposons alors pas d'information pour déterminer ce que la caténaire est apte à recevoir. Dans ce cas, le système de stockage reçoit l'intégralité de la puissance renvoyée par le train (cf. Figure A.16).

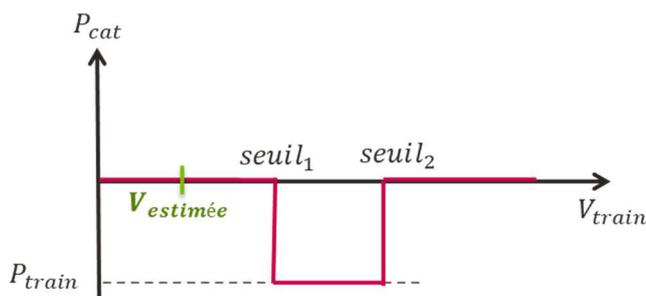


Figure A.16 : Freinage interdit

✓ **Traction sans limite et recharge**

Lorsque la tension est supérieure au $seuil_2$ avec une puissance positive (demande de traction), cela signifie la caténaire peut fournir ce qui lui est demandé. De plus, si le stockeur est déchargé, il peut être alors possible de le recharger à l'aide de la caténaire. Pour cela, nous évaluons la puissance maximale que peut fournir la caténaire à l'aide de la limite V_{rch} (cf. le paragraphe IV.4.2.4). Si cette limite est toujours supérieure à la puissance demandée par le train alors le surplus est utilisé pour charger le système de stockage (sous respect de ses capacités, cf. Figure A.17b). Dans le cas où une recharge n'est pas nécessaire, la caténaire apporte uniquement la puissance demandée par le train (cf. Figure A.17a).

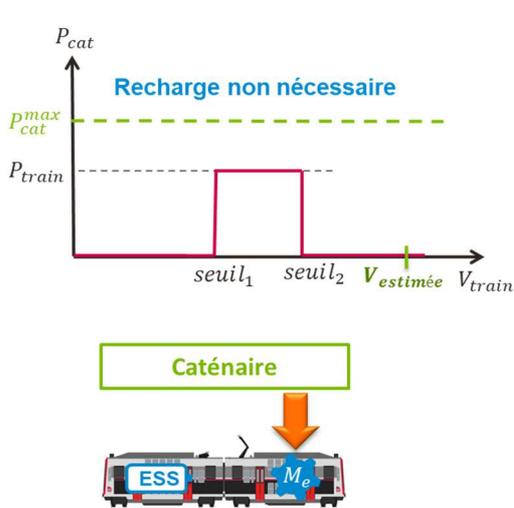


Figure A.17a : Caténaire seule

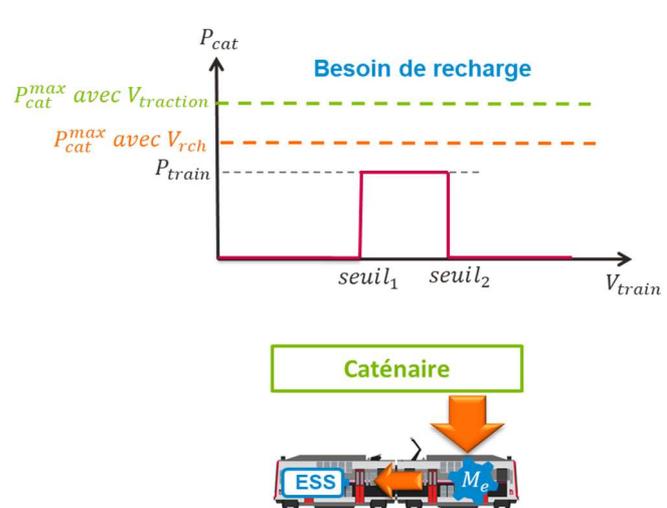


Figure A.17b : Caténaire et recharge

✓ **Freinage limitée**

Lorsque la tension est supérieure au $seuil_2$ avec une puissance négative (freinage), il n'est probablement pas possible de renvoyer toute la puissance de freinage sur la caténaire. Nous évaluons alors la puissance maximale que la caténaire peut recevoir à l'aide la limite $V_{freinage}$ (cf. la paragraphe IV.4.2.4). Si la puissance renvoyée est supérieure à la puissance maximale que peut recevoir la caténaire, alors la puissance reçue est limitée (cf. Figure A.18b). Sinon, la caténaire reçoit toute la puissance de freinage du train (cf. Figure A.18a).

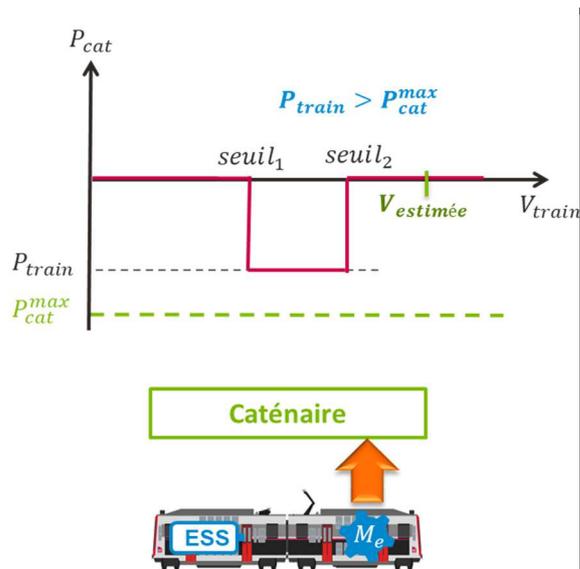


Figure A.18a : Caténaire seule

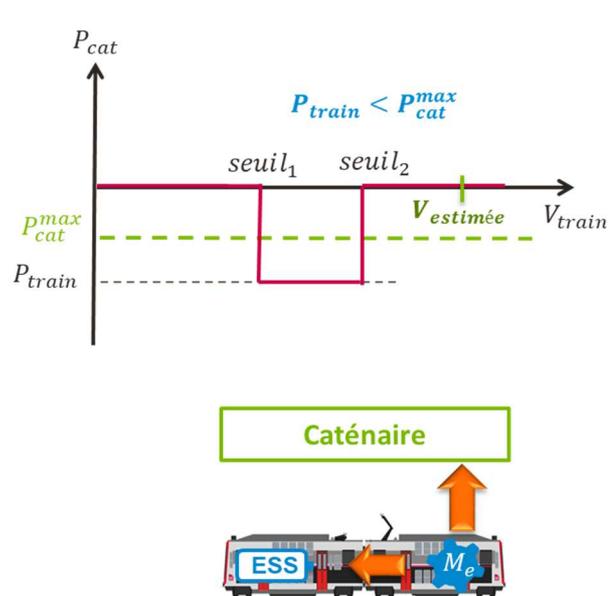


Figure A.18b : Caténaire et recharge

✓ *Traction limitée et recharge*

Lorsque la tension est entre les deux seuils avec une puissance positive (demande de traction), cela signifie qu'il est possible de fournir l'intégralité de la demande par le biais de la caténaire. Nous vérifions cette hypothèse en calculant la puissance maximale de la caténaire à l'aide de la limite $V_{traction}$ (cf. le paragraphe IV.4.2.4). Si la puissance demandée par le train est bien inférieure, alors la caténaire répond seule à la demande (cf. Figure A.19a), sinon le système de stockage fournit le complément (cf. Figure A.19b).

Dans le premier cas, nous disposons d'un reste de puissance. Il pourrait être intéressant de l'utiliser pour recharger le stockeur (sous réserve qu'une recharge soit nécessaire, cf. Figure A.20a). Nous évaluons alors la puissance maximale que la caténaire peut délivrer à l'aide la limite V_{rch} . Si la puissance demandée par le train reste inférieure à cette nouvelle limite, alors il est possible de recharger le système de stockage avec le surplus de puissance (cf. Figure A.20b).

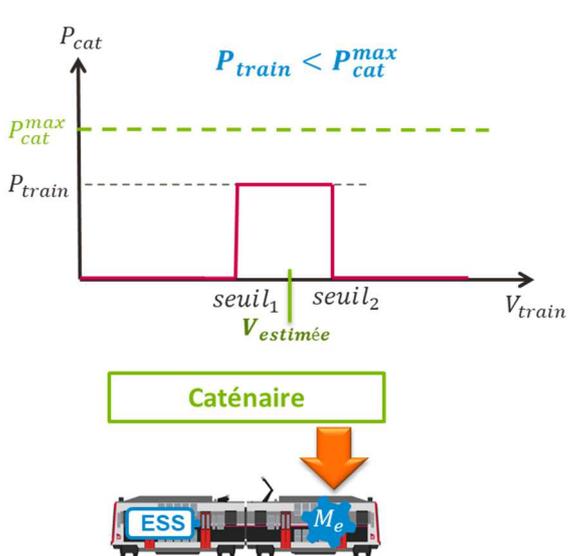


Figure A.19a : Caténaire seule

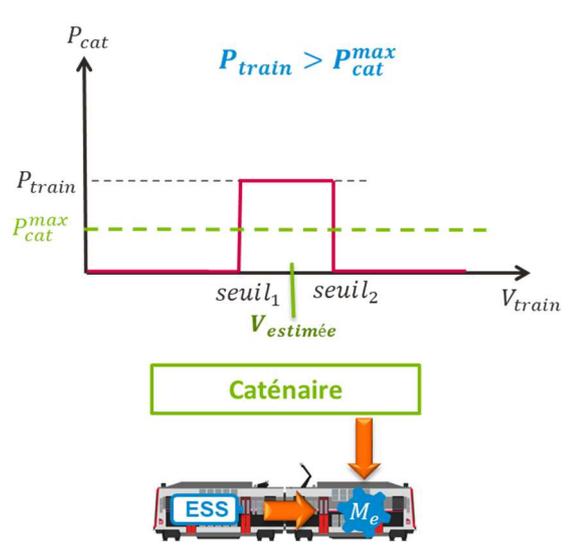


Figure A.19b : Caténaire et stockeur

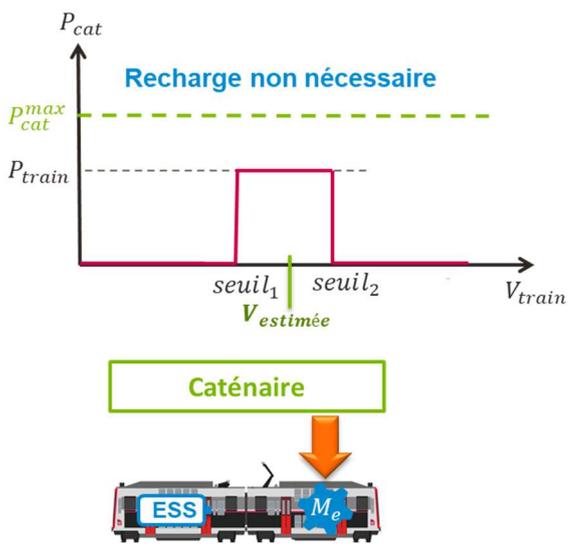


Figure A.20a : Caténaire seule

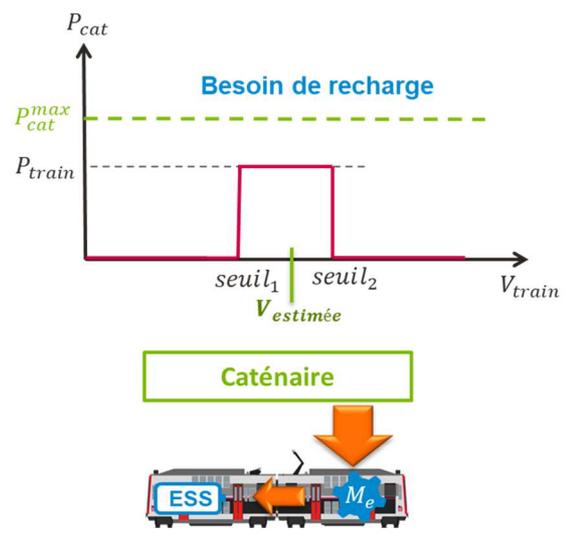


Figure A.20b: Caténaire et recharge

✓ **Freinage sans limite**

Lorsque la tension est entre les deux seuils avec une puissance négative (freinage), cela signifie qu'il est possible de renvoyer l'intégralité de la demande à la caténaire. Nous vérifions cette hypothèse en calculant la puissance maximale que la caténaire peut recevoir en utilisant la limite $V_{freinage}$. Si la puissance renvoyée est bien plus faible que cette limite alors la caténaire absorbe tout (cf. Figure A.21a). Sinon le système de stockage reçoit le surplus (cf. Figure A.21b).

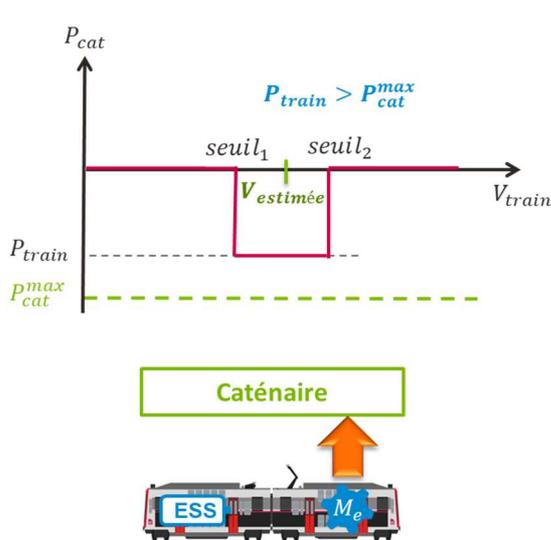


Figure A.21a : Caténaire seule

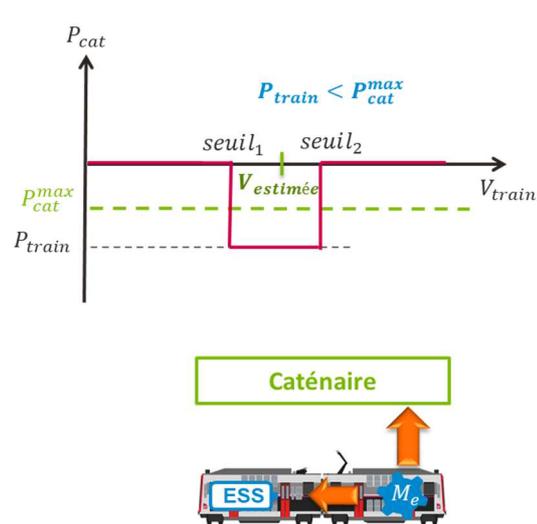


Figure A.21b : Caténaire et recharge

A.3.5. Gestion énergétique selon la norme ferroviaire

A.3.5.1. Principe de la gestion

Afin de maintenir la tension de la caténaire, nous avons étudié une autre gestion inspirée par la norme ferroviaire EN50641. Cette gestion impose une limite de puissance qui peut être soutirée ou renvoyée à la caténaire selon la tension du train mesurée au niveau du pantographe. Le système de stockage doit alors faire la compensation. La gestion en traction est présentée sur la Figure A.22 et la gestion en freinage sur la Figure A.23.

✓ Traction

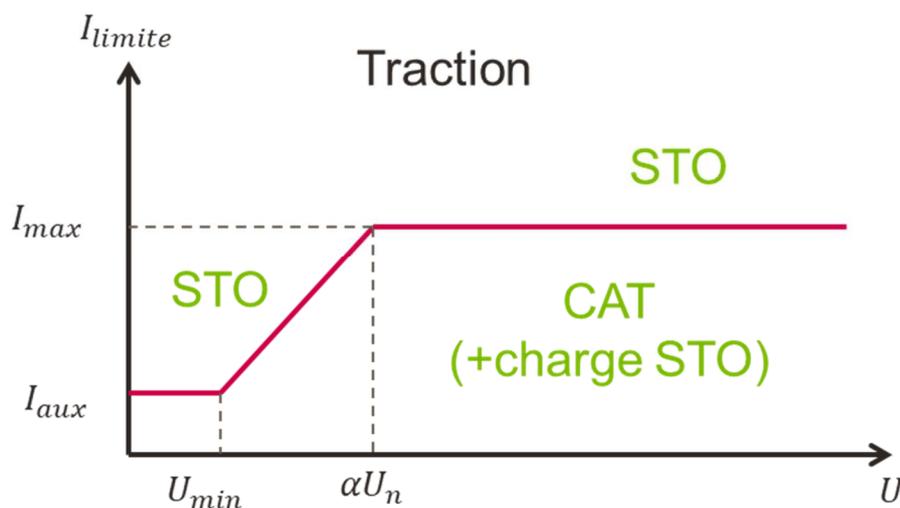


Figure A.22 : Gestion énergétique selon la norme pour la traction

La tension minimale non permanente est U_{min} (en V), ce seuil ne peut être conservé plus de 2min. Nous notons U_n (en V) la tension nominale et α un facteur dépendant du type de réseau (AC, DC, niveau de tension, ...). Pour notre application (1500V DC), ce coefficient est imposé à 0.9. I_{aux} (en A) et I_{max} (en A) sont respectivement le courant des auxiliaires et le courant maximal que peut délivrer la caténaire.

Par cette gestion, nous obtenons le courant acceptable que l'on peut soutirer à la caténaire. La puissance maximale que l'on peut soutirer à la caténaire tout en respectant la norme est alors calculée ainsi :

$$P_{cat}^{max} = I_{limit} * V_{estimée} \quad (A.109)$$

où :

P_{cat}^{max}	(en W)	Puissance maximale que peut fournir la caténaire au nœud
I_{limit}	(en A)	Courant limite imposé par la gestion
$V_{estimée}$	(en V)	Tension estimée au nœud

Lorsque la tension est inférieure à αU_n , la puissance qu'il est possible de demander à la caténaire commence à être limitée. Plus la tension baisse, plus cette puissance se réduit jusqu'à n'être plus que celle demandée par les auxiliaires. Lorsque la tension est supérieure à αU_n , il est possible de solliciter la caténaire à 100%. De plus, nous imposons de terminer avec le même état de charge dans le système de stockage qu'au début de la mission. Ainsi, lorsque la tension est supérieure à αU_n , il est possible de prendre un peu plus sur la caténaire afin de recharger le système de stockage.

✓ Freinage

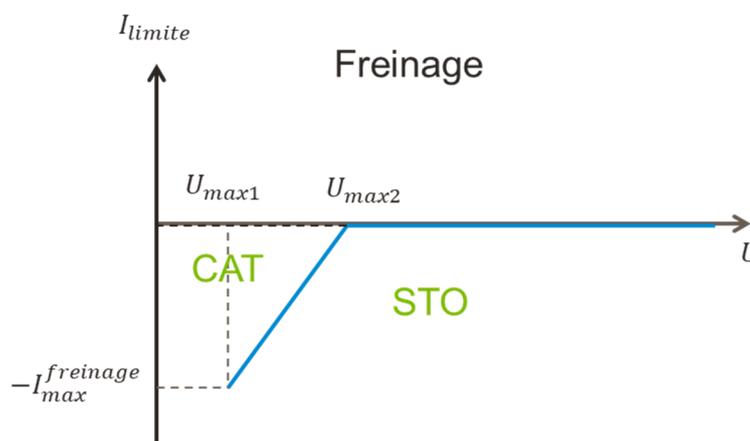


Figure A.23 : Gestion énergétique selon la norme pour le freinage

où :

U_{max1}	(en V)	Tension permanente la plus élevée
U_{max2}	(en V)	Tension non permanente la plus élevée. Elle ne peut être conservée plus de 5min.
$I_{max}^{freinage}$	(en A)	Courant maximal de freinage

Cette gestion donne le courant limite que l'on peut renvoyer à la caténaire. La puissance maximale que l'on peut renvoyer à la caténaire est alors calculée de la même façon que pour la traction (cf. équation (A.109)).

Lorsque la tension est supérieure à U_{max1} , la puissance que l'on peut renvoyer à la caténaire commence à être limitée. Plus la tension augmente, moins il est possible d'en renvoyer. Lorsque la tension devient supérieure à U_{max2} , il n'est plus possible de renvoyer de l'énergie sur le réseau. Cette énergie doit alors être stockée dans le système de stockage d'énergie embarqué, ou si besoin, dissipée dans un rhéostat.

A.3.5.2. Fonctionnement

Le fonctionnement de cette gestion est très semblable à celui de la gestion énergétique selon des seuils (cf. IV.4.2). Pour l'appliquer, nous avons besoin d'estimer la tension. Nous utilisons la même méthode que celle présentée au paragraphe IV.4.2.3.

Au contraire de la gestion selon des seuils, la gestion inspirée de la norme donne directement la puissance maximale de la caténaire. Cependant, pour évaluer la puissance maximale dans le cas d'une recharge du système de stockage au moyen de la caténaire, nous appliquerons la même méthode que celle présentée au paragraphe IV.4.2.4. De plus, la répartition de la puissance entre la caténaire et le système de stockage suit le même principe que celui présenté au paragraphe IV.4.2.5.

Tout comme pour la gestion selon deux seuils de tension, nous pouvons distinguer plusieurs modes de fonctionnement selon le niveau de tension estimée et si c'est un cas de traction ou de freinage. Ces modes sont détaillés dans la partie suivante.

A.3.5.3. Modes de fonctionnement

Cette gestion permet de distinguer 6 modes, comme le résume le Tableau A.13 :

Tableau A.13 : Modes de fonctionnement de la gestion selon la norme

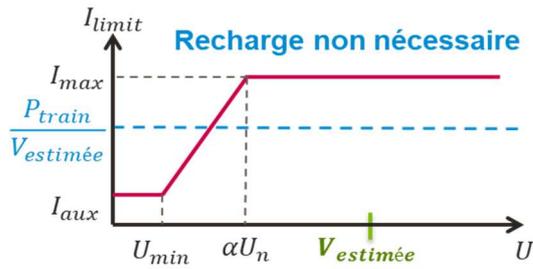
Mode	Tension (V)	Puissance (W)	V_{limit} (V)
Traction sans limite	$V_{estimée}(k) \geq \alpha U_n$	$P_{node}(k) > 0$	V_{rch}
Traction limitée	$V_{estimée}(k) \in] U_{min}; \alpha U_n[$	$P_{node}(k) > 0$	-
Alimentation des auxiliaires	$V_{estimée}(k) \leq U_{min}$	$P_{node}(k) > 0$	-
Freinage interdit	$V_{estimée}(k) > U_{max2}$	$P_{node}(k) < 0$	-
Freinage limité	$V_{estimée}(k) \in] U_{max1}; U_{max2}[$	$P_{node}(k) < 0$	-
Freinage sans limite	$V_{estimée}(k) \leq U_{max1}$	$P_{node}(k) < 0$	-

où :

$V_{estimée}(k)$	(en V)	Tension estimée au nœud pour le pas de temps d'indice k
$P_{node}(k)$	(en W)	Puissance du nœud pour le pas de temps d'indice k
U_{max1}	(en V)	Tension permanente la plus élevée
U_{max2}	(en V)	Tension non permanente la plus élevée (seuil qui ne doit pas être maintenue plus de 5min)
U_{min}	(en V)	Tension non permanente la plus basse (seuil qui ne doit pas être maintenue plus de 2min)
U_n	(en V)	Tension nominale
α	-	Facteur dépendant du type de réseau (AC, DC, niveau de tension, ...). Pour notre application (1500V DC) ce coefficient est imposé à 0.9
k	-	Indice du pas de discrétisation temporelle

✓ *Traction sans limite*

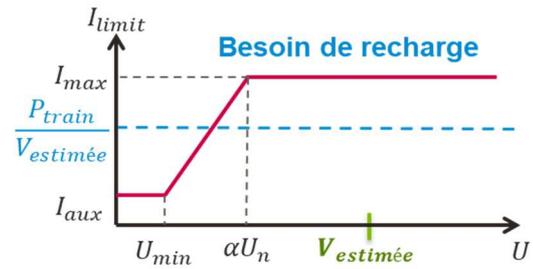
Lorsque la tension est supérieure à αU_n avec une puissance positive (demande de traction), cela signifie qu'il est possible de fournir l'intégralité de la demande par le biais de la caténaire. Nous vérifions cette hypothèse en calculant la valeur limite donnée par la gestion en traction (cf. Figure A.22). Si, une fois la puissance du train fournie, il y a un reste de puissance, alors il est possible de recharger les systèmes de stockage par la caténaire si une recharge est nécessaire (cf. Figure A.24b). Sinon, la caténaire ne fournit que la puissance demandée par le train (cf. Figure A.24a). Pour évaluer le reste de puissance disponible, nous appliquons la méthode développée au IV.4.2.4 avec la limite V_{rch} .



Caténaire



Figure A.24a : Caténaire seule



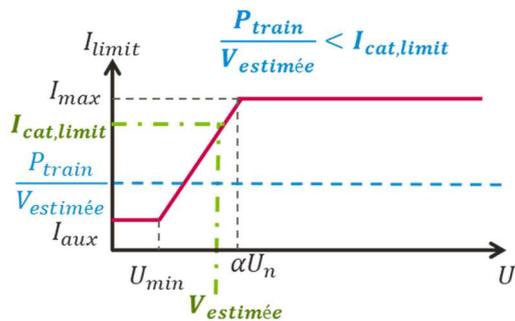
Caténaire



Figure A.24b : Caténaire et recharge

✓ **Traction limitée**

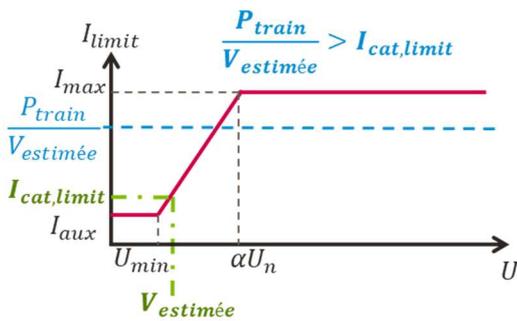
Lorsque la tension est entre U_{min} et αU_n avec une puissance positive (demande de traction), alors il n'est probablement pas possible de fournir toute la puissance demandée par le seul biais de la caténaire. Nous évaluons à la limite en puissance selon la norme (cf. Figure A.22). Si la puissance demandée est supérieure à la puissance maximale que peut fournir la caténaire alors la puissance est limitée et le système de stockage fait le complément (cf. Figure A.25b). Sinon, la caténaire fournit toute la puissance du train (cf. Figure A.25a).



Caténaire



Figure A.25a : Caténaire seule



Caténaire



Figure A.25b : Caténaire et stockeur

✓ Alimentation des auxiliaires

Lorsque la tension est inférieure à U_{min} avec une puissance positive (demande de traction), cela signifie qu'il est impossible de fournir la puissance demandée par le train uniquement avec la caténaire (sauf si la demande est celle des auxiliaires). Nous évaluons au moyen de la gestion (cf. Figure A.22) la puissance maximale que peut fournir la caténaire. La même répartition que celle présentée précédemment est mise en place (cf. Figure A.25a et Figure A.25b).

✓ Freinage interdit

Lorsque la tension est supérieure à U_{max2} avec une puissance négative (freinage), cela signifie qu'il est impossible de renvoyer de la puissance sur la caténaire (cf. Figure A.23). Le système de stockage reçoit alors l'intégralité de cette puissance (cf. Figure A.26).

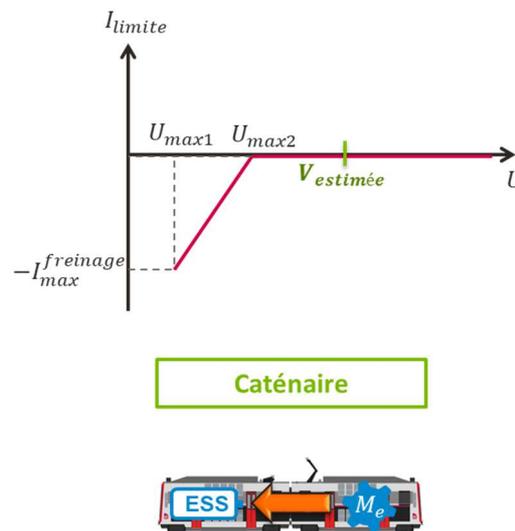
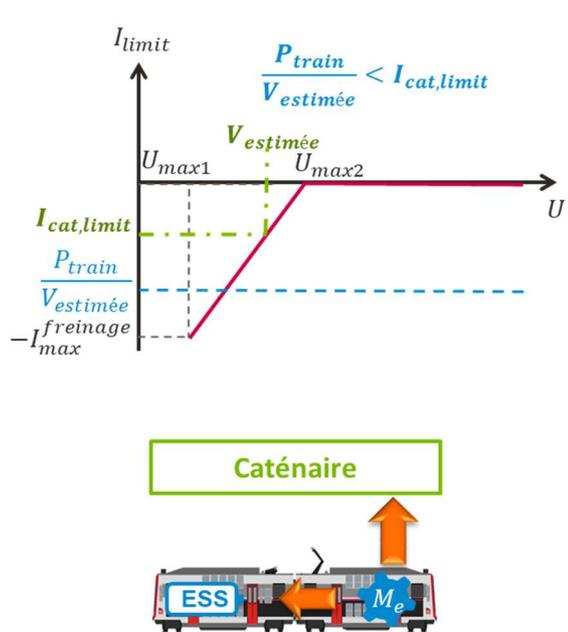
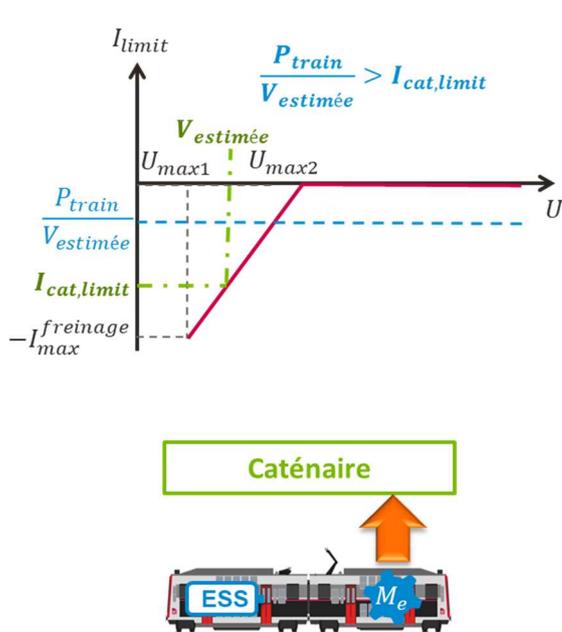


Figure A.26 : Freinage interdit

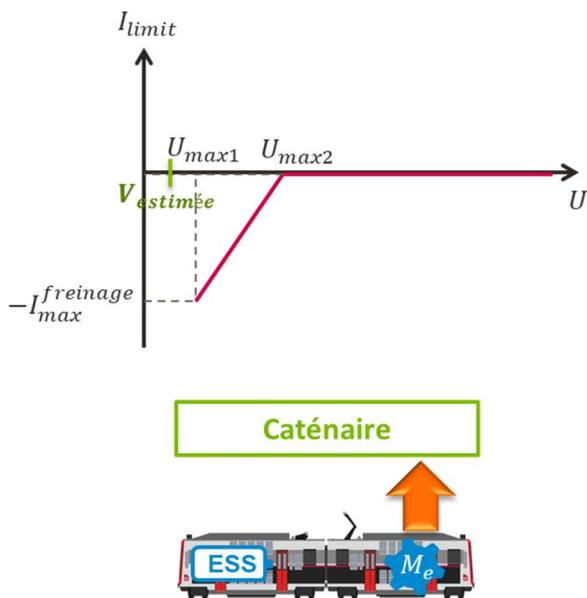
✓ Freinage limitée

Lorsque la tension est entre les deux seuils $] U_{max1}; U_{max2}[$ avec une puissance négative (freinage), cela signifie qu'il est possible pour la caténaire de recevoir une partie ou l'intégralité de la puissance de freinage renvoyée par le train. Nous évaluons à l'aide de la norme (cf. Figure A.23) la puissance maximale que peut recevoir la caténaire. Si la puissance qu'elle reçoit ne dépasse pas cette limite alors l'intégralité de la puissance est envoyée sur la caténaire (cf. Figure A.27a). Sinon, le système de stockage reçoit le surplus sous réserve de ses capacités (le reste étant dissipé par un rhéostat, cf. Figure A.27b).



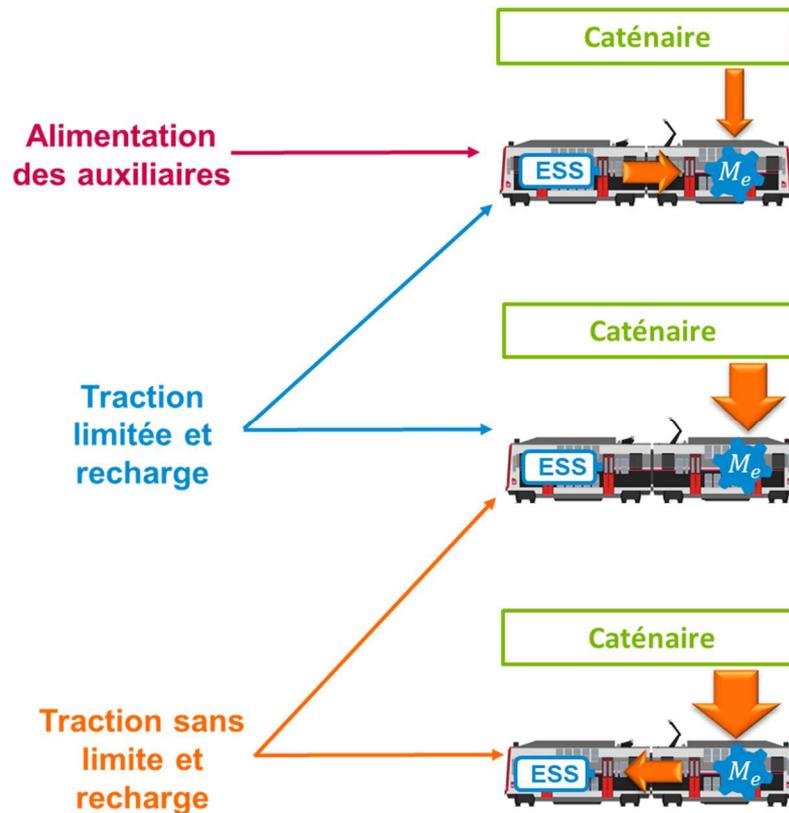
✓ **Freinage sans limite**

Lorsque la tension est inférieure à U_{max1} avec une puissance négative (freinage), cela signifie qu'il est possible de renvoyer l'intégralité de la demande à la caténaire (cf. Figure A.28).



✓ *Bilan*

En conclusion, en traction, nous avons les comportements décrits sur la Figure A.29 :

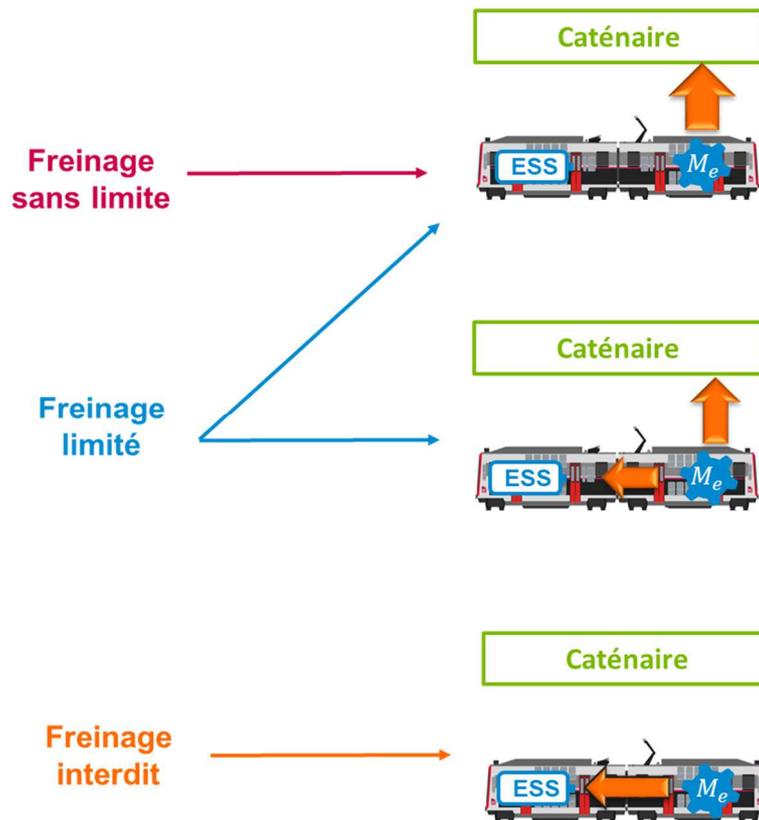


ESS = système de stockage embarqué

M_e = moteur électrique

Figure A.29 : Modes de fonctionnement en traction dans le cas de la gestion selon la norme

De même, dans le cas du freinage, les modes de fonctionnements vont adopter les comportements décrits sur la Figure A.30.



ESS = système de stockage embarqué

M_e = moteur électrique

Figure A.30 : Modes de fonctionnement en freinage dans le cas de la gestion selon la norme

A.3.6. Mise en application de la gestion par algorithme d'optimisation sur un cas d'étude

A.3.6.1. Mission ferroviaire

La mission ferroviaire étudiée est composée de 2 trains équipés de batteries Li-ion qui circulent sur une ligne ayant 3 sous-stations et aucun poste de mise en parallèle. Elle dure environ 6min avec un pas de temps de 1s. La Figure A.31 et la Figure A.32 présente les positions et puissances des deux trains au cours du temps. La Figure A.33 donne la représentation nodale de cette ligne.

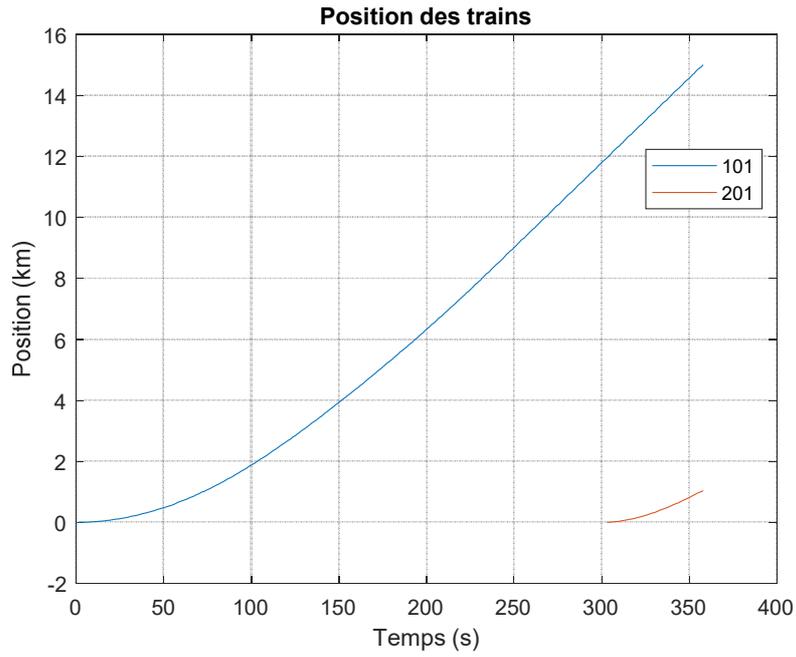


Figure A.31 : Position des trains (mission inspirée du cas normatif EN50641)

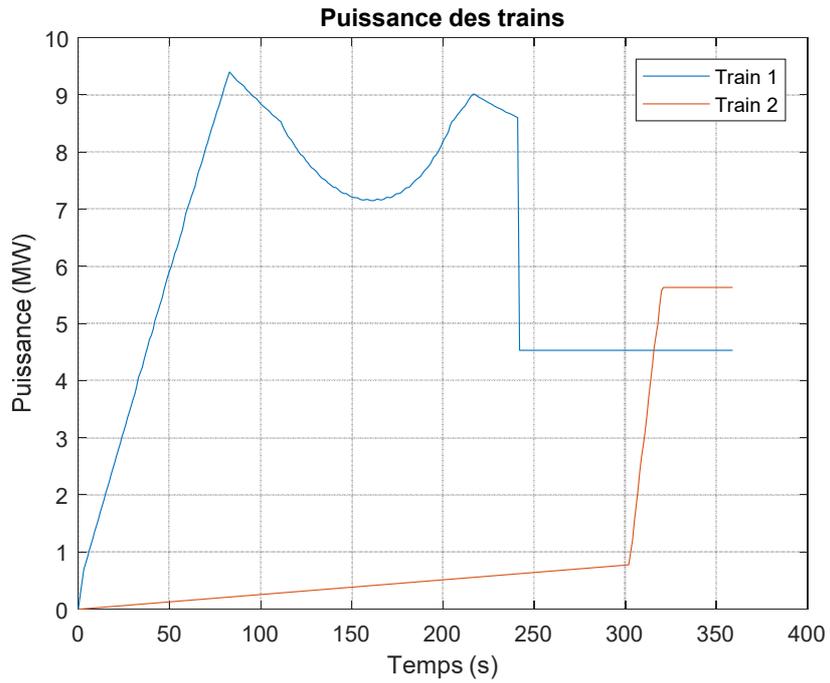


Figure A.32 : Puissance des trains (mission inspirée du cas normatif EN50641)

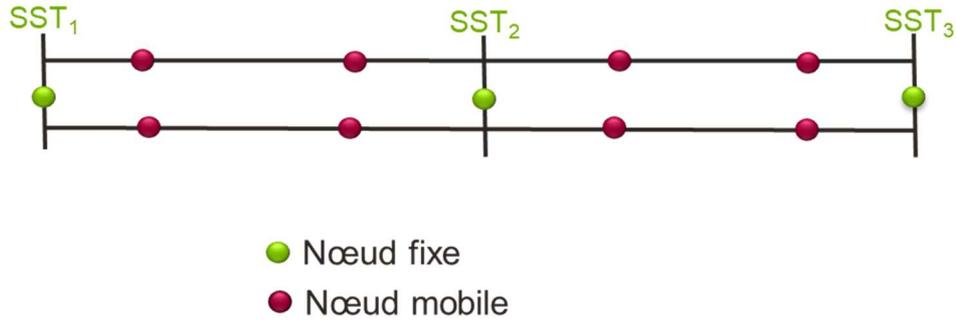


Figure A.33 : Représentation nodale de la ligne ferroviaire

A.3.6.2. Cahier des charges

A.3.6.2.1. Entrées d'optimisation

Les entrées d'optimisation du modèle sont les puissances de chacun des systèmes de stockage et ce pour chaque pas de temps. Pour ce cas d'étude, nous avons alors 1752 entrées d'optimisation.

A.3.6.2.2. Sorties contraintes et fonction objective

Les contraintes du modèle portent sur les tensions, la masse et le volume des systèmes de stockage embarqués ainsi que sur leur état de charge. Le Tableau A.14 rassemble les différentes contraintes.

Tableau A.14 : Contraintes du cas d'étude de la gestion par algorithme d'optimisation

Nom de la variable	Unité	Contrainte
Tension minimale	V	[1000 ; 1100]
Tension moyenne utile	V	[1350 ; 1500]
Tension maximale	V	≤ 1950
Masse du système de stockage	T	≤ 23
Volume du système de stockage	m ³	≤ 52
Etat de charge du système de stockage	Wh	[-0.01 ; 0.01]

L'objectif à minimiser est la consommation d'énergie au niveau des sous-stations pour l'ensemble de la mission.

A.3.6.3. Résultats et analyse

Le Tableau A.15 rassemble le dimensionnement obtenu par l'optimisation. Celle-ci a demandé 3 itérations et a duré 1min sur un ordinateur avec un processeur Intel® Core™ i5-6600 CPU@ 3.3GHz, avec 8Go de RAM et un système d'exploitation en 64bits.

Tableau A.15 : Résultats du dimensionnement du cas d'étude de la gestion par algorithme d'optimisation

Nom de la variable	Unité	Contrainte	Résultats
Energie consommée	MW	-	0.99
Nombre de cellule du système de stockage du train 1	-	-	35000
Nombre de cellule du système de stockage du train 2	-	-	9200
Tension minimale	V	[1000 ; 1100]	1096
Tension moyenne utile	V	[1350 ; 1500]	1500
Tension maximale	V	≤ 1950	1800
Masse du système de stockage	T	≤ 23	23
Volume du système de stockage	m ³	≤ 52	4.8
Etat de charge	Wh	[-0.01 ; 0.01]	0

Les Figure A.34 et Figure A.35 présentent la puissance et l'énergie des systèmes de stockage.

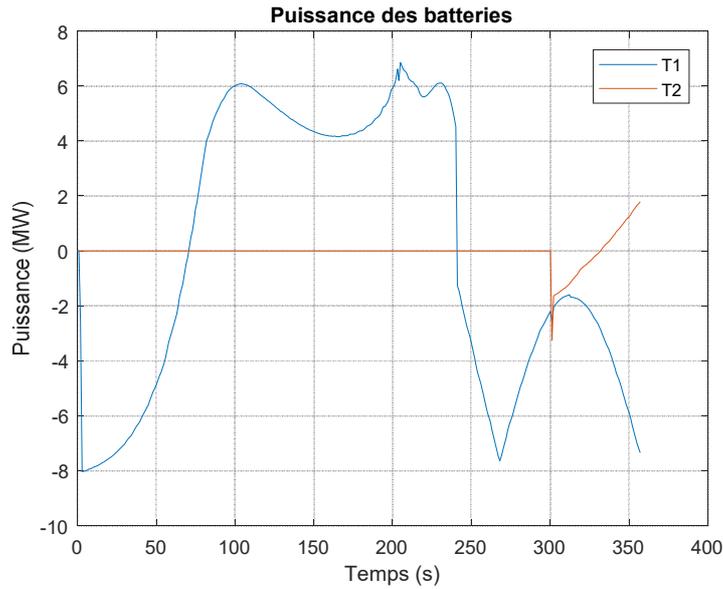


Figure A.34 : Puissance des systèmes de stockage

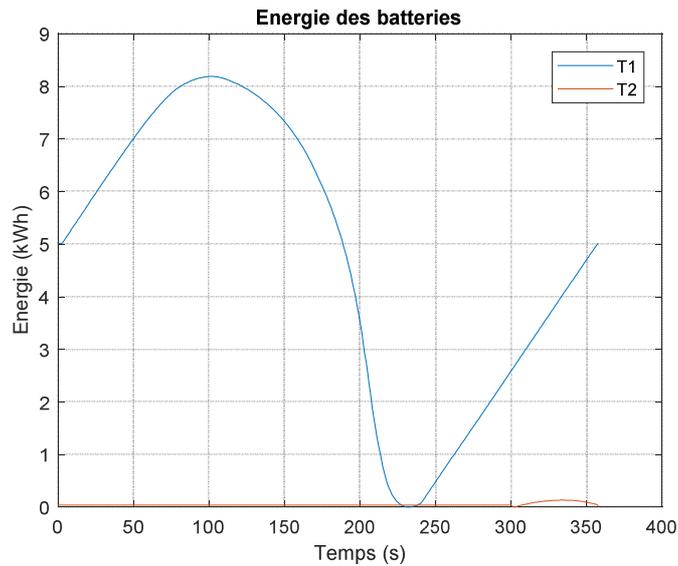


Figure A.35 : Energie des systèmes de stockage

L'ensemble des contraintes du modèle sont respectées. En effet, la tension minimale est bien supérieure à 1000V, la tension maximale inférieure à 1950V et la tension moyenne supérieure à 1350V. Cependant, afin de maintenir ce plan de tension, nous avons un fort surdimensionnement du système de stockage. La tension moyenne est en effet de 1500V alors qu'il suffirait qu'elle soit de 1.350V. Nous pouvons voir sur les Figure A.32 et Figure A.34 que la puissance fournie par le système de stockage est quasiment toute la puissance demandée par le train. Une amélioration possible pour éviter un surdimensionnement est d'ajouter à la fonction objective la taille du système de stockage. L'objectif serait alors de minimiser la consommation énergétique et le système de stockage embarqué.

A.3.7. Modélisation du système de stockage stationnaire

A.3.7.1. Modélisation du système de stockage stationnaire

Afin de faire du soutien de tension, nous ajoutons à la ligne électrique un système de stockage stationnaire. Celui-ci peut se connecter sur chacune des voies de la ligne. Dans la représentation nodale, il est donc symbolisé par un nœud fixe par voie afin d'éviter de créer une connexion entre deux voies. En effet, lorsque le système de stockage stationnaire n'est pas sollicité pour du soutien de tension, sa représentation est celle d'un nœud de courant (cf. Figure IV.12). Si un unique nœud est utilisé pour le représenter, cela revient à l'assimiler à un poste de mise en parallèle. Le système d'équation tient alors compte de cette représentation et peut autoriser des transits de puissance entre deux voies par le biais de ce système de stockage stationnaire. Pour éviter cette situation, il est donc représenté en utilisant un nœud fixe par voie (cf. Figure A.36).

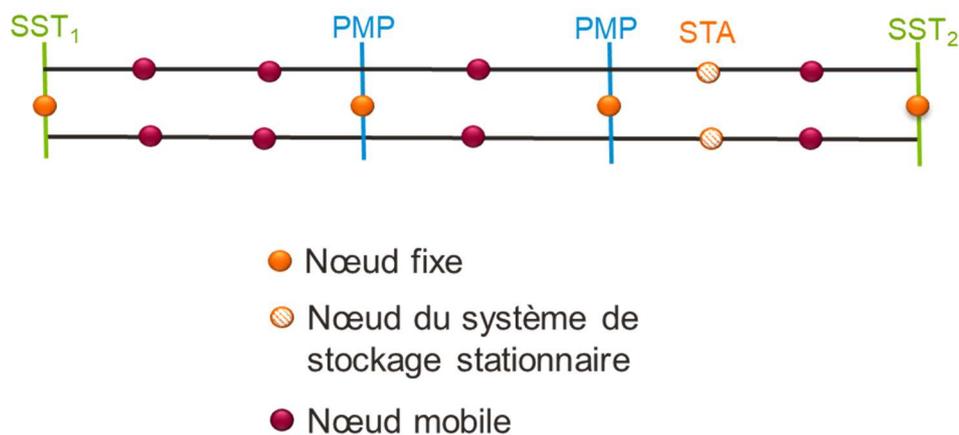


Figure A.36 : Représentation nodale du système de stockage stationnaire

A.3.7.2. Calcul des contributions

Pour déterminer la puissance que doit fournir le système de stockage stationnaire, il est nécessaire de connaître l'impact des trains sur la tension de la ligne. Cette étude est menée uniquement dans la zone où se situe le stockage stationnaire (zone composée des sous-stations de part et d'autre du stationnaire ainsi que des PMP éventuels). Pour effectuer ces calculs, chaque train est étudié de manière isolé et les contributions sont ensuite sommées.

Quel que soit la position du train sur la ligne et la topologie de celle-ci, il est toujours possible de se ramener au système équivalent de la Figure A.37.

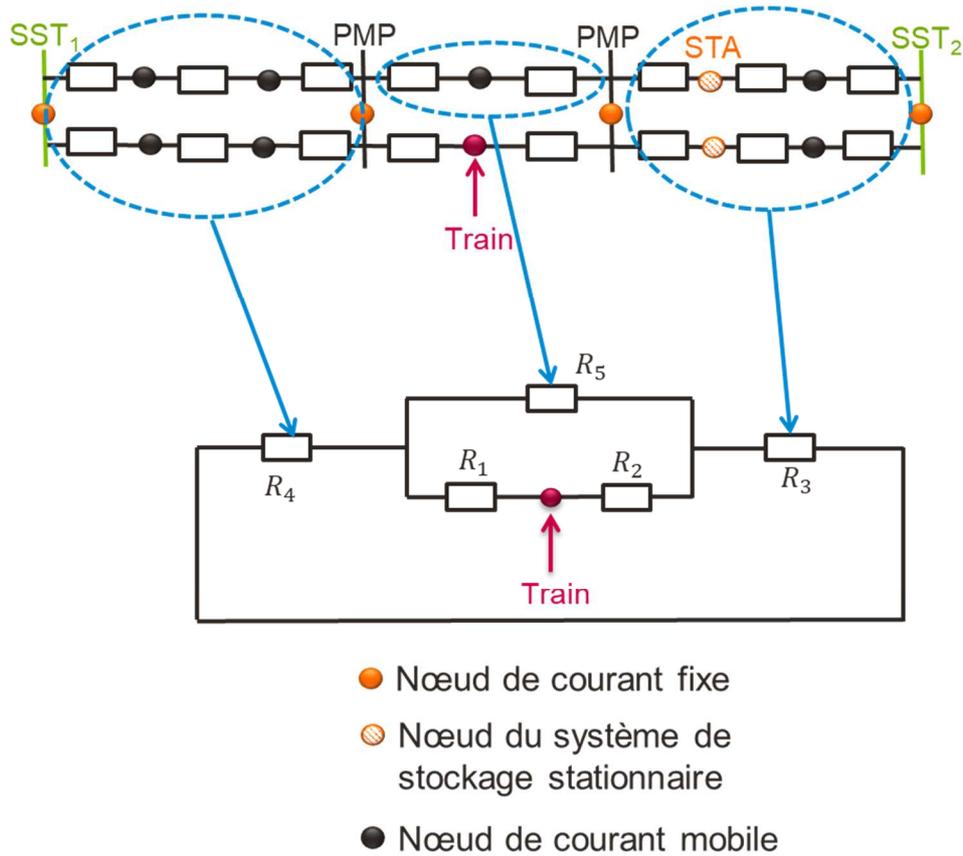


Figure A.37 : Modèle équivalent pour le calcul des contributions

Il est donc possible de calculer pour chaque train, les différentes résistances ainsi que les courants transitant dans chacune d'elle. Pour calculer les courants, nous utilisons le courant du train calculé à l'aide de sa puissance demandée au pas de temps k et d'une tension estimée (cf. l'équation (A.110)).

$$J_{train} = \frac{P_{train}(k)}{V_{estimée}} \quad (\text{A.110})$$

où :

J_{train}	(en A)	Courant du train au pas de temps d'indice k
$P_{train}(k)$	(en W)	Puissance du train au pas de temps d'indice k
$V_{estimée}$	(en V)	Tension du train estimée (cf. A.3.7.3)

Une fois ce courant calculé, nous pouvons déterminer le courant de chacune des branches du modèle équivalent. Les résistances sont calculées à l'aide de la résistance linéique. Il est alors possible d'en déduire la chute de tension induite par la consommation énergétique du train (cf. l'équation (A.111)).

$$\Delta V_i = I_i * R_i \quad (\text{A.111})$$

où :

ΔV_i	(en V)	Chute de tension aux bornes de la résistance i
I_i	(en A)	Courant circulant dans la résistance i
R_i	(en Ω)	Résistance de la portion de ligne i

Le processus est réitéré pour chaque train et l'ensemble des contributions est ensuite sommée. La tension de chaque nœud peut alors être calculée (la tension des sous-stations étant toujours à 1500V, cf. l'équation (A.112)).

$$V_i = V_{i-1} - \Delta V_{tot,i} \quad (\text{A.112})$$

où :

V_i	(en V)	Tension au nœud i
V_{i-1}	(en V)	Tension du nœud i-1 précédent le nœud i sur la voie
$\Delta V_{tot,i}$	(en V)	Chute de tension totale sur la portion de ligne séparant les nœuds i et i-1 (en tenant compte des contributions de tous les trains).

A.3.7.3. Estimation de la tension et choix de l'initialisation

Pour déterminer le courant demandé par les trains nous utilisons l'équation (A.110). Il faut donc choisir la tension à utiliser pour effectuer ce calcul. La tension au pas de temps précédent n'est valable que lorsque le système de stockage stationnaire n'a pas été sollicité. En effet, lorsqu'il est appelé, la tension remonte et donc le critère de tension est respecté. Par conséquent, le système de stockage stationnaire est estimé non nécessaire, ce qui entraîne une chute de tension trop importante. Afin de maintenir l'utilisation du système de stockage stationnaire suffisamment longtemps nous prenons une tension moyenne (cf. l'équation (A.113)).

$$V_{estimée} = \frac{\frac{(1) \quad V(k-1) + V(k-2)}{2} + \frac{(2) \quad V(k-1) + V_{NoSTA}(k-1)}{2}}{2} \quad (\text{A.113})$$

où :

$V(k-1)$	(en V)	Tension au nœud au pas de discrétisation $(k-1).dt$
$V(k-2)$	(en V)	Tension au nœud au pas de discrétisation $(k-2).dt$
$V_{NoSTA}(k-1)$	(en V)	Tension au nœud au pas de discrétisation $(k-1).dt$ si aucun soutien de tension n'avait été apporté

La première partie de l'équation, (1), permet d'éviter les oscillations de tension entre deux pas de temps. La seconde partie, (2), permet de « réduire » l'impact de l'utilisation du système de stockage stationnaire afin de pouvoir mieux évaluer si celui-ci est toujours nécessaire.

A.3.7.4. Gestion énergétique

A.3.7.4.1. Répartition stationnaire et embarqué

L'utilisation d'un système de stockage embarqué permet de relever de manière plus efficace la tension puisque le soutien est fait là où la tension est la plus basse sur la ligne et, de plus, il n'y a pas de pertes en lignes. Cependant, plus la taille du système de stockage embarqué est grande, plus son coût d'investissement et son coût de maintenance sont élevés. En comparaison un système de stockage stationnaire va avoir un coût économique plus faible et peut faire du renforcement pour tous les trains circulants sur la ligne. Mais le soutien apporté se fait avec plus de pertes en ligne. Ainsi, nous choisissons de privilégier le système de stockage stationnaire par rapport au système de stockage embarqué tout en mettant une limite sur les pertes en ligne.

La répartition entre stationnaire et embarqué se fait en plusieurs étapes :

- 1) calcul de la puissance apportée par le système de stockage **embarqué** s'il répondait **seul** au besoin de soutien de tension : $P_{emb}^{soutien}$
- 2) calcul de la puissance apportée par le système de stockage **stationnaire** s'il répondait **seul** au besoin de soutien de tension : $P_{STA}^{soutien}$
- 3) évaluation des pertes en lignes maximales : $Pertes_{max}$ (cf. l'équation (V.4))
- 4) calcul de la puissance apportée par le stationnaire sous respect de ne pas fournir plus que la somme : $P_{emb}^{soutien} + Pertes_{max}$
- 5) calcul du complément apporté par le système de stockage embarqué (si nécessaire)

✓ **Puissance du système de stockage embarqué seul**

Nous calculons tout d'abord le soutien que devrait apporter le système de stockage embarqué s'il répondait seul au besoin de soutien de tension. Pour déterminer sa participation,

nous itérons en incrémentant sa puissance jusqu'à ce que la tension soit supérieure à la valeur limite (cf. Figure A.38).

Pour déterminer la valeur de l'incrément nous utilisons l'équation (A.114).

$$incr_{train} = -J_{train} * (V_i - V_{limite}) \quad (A.114)$$

où :

V_i	(en V)	Tension au nœud i où est rattaché le train
V_{limite}	(en V)	Tension minimale imposée
J_{train}	(en A)	Courant demandé par le train
$incr_{train}$	(en W)	Incrément de puissance du système de stockage embarqué dans le train

La Figure A.38 montre les différentes étapes de cet algorithme.

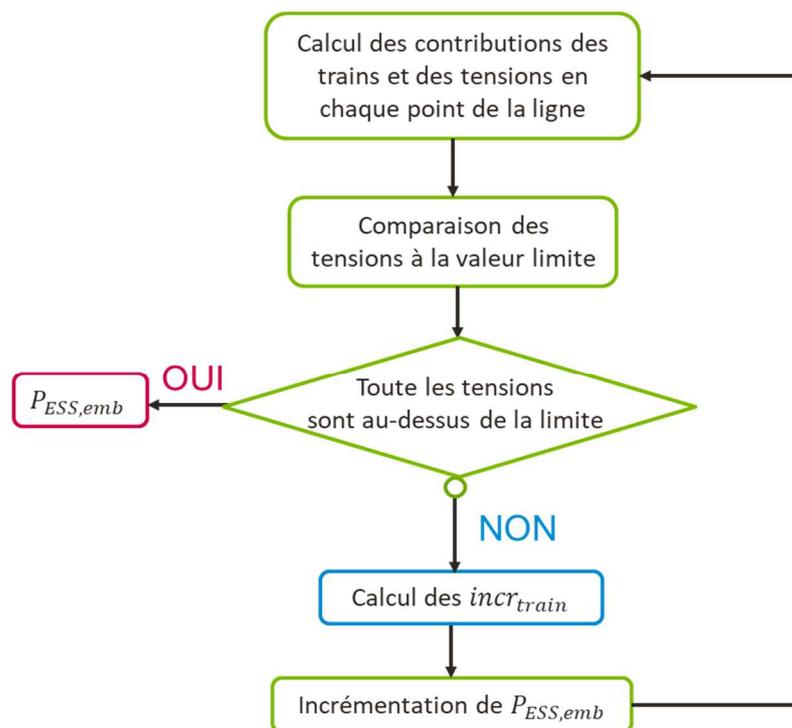


Figure A.38 : Algorithme pour déterminer la puissance fournie par le système de stockage embarqué

Remarque : à chaque itération il est nécessaire de recalculer le courant du train car la puissance demandée par le train diminue et donc le courant aussi (cf. (A.110)).

✓ **Puissance du système de stockage stationnaire seul**

Nous calculons ensuite le soutien que devrait apporter le système de stockage stationnaire s'il répondait seul au besoin de soutien de tension. Tout d'abord, la puissance du système de

stockage stationnaire est initialisée à la valeur qu'il a fournie au pas de temps précédent et sa contribution est ajoutée à celle des trains. Nous pouvons alors distinguer 3 cas :

- 1) Cette puissance est suffisante pour relever le niveau de tension
- 2) Cette puissance est insuffisante pour remonter toutes les tensions
- 3) Cette puissance est trop importante : les tensions sont relevées bien au-dessus de la valeur limite

Dans le premier cas, aucun autre calcul n'est nécessaire : le système de stockage stationnaire fournie donc la même puissance.

Dans le second cas, il est nécessaire d'augmenter l'apport du stationnaire. Nous calculons alors l'incrément selon l'équation (A.115).

$$incr_{STA} = incr_{STA} - J_{train} * (V_i - V_{limite}) \quad (A.115)$$

où :

V_i	(en V)	Tension au nœud i où est rattaché le train
V_{limite}	(en V)	Tension minimale imposée
J_{train}	(en A)	Courant du train
$incr_{STA}$	(en W)	Puissance que doit fournir le système de stockage stationnaire pour relever la tension

Le courant du train est recalculé à chaque itération. En effet, le système de stockage stationnaire relevant le niveau de tension, le courant demandé par le train va alors diminuer (cf. l'équation (A.110)). Pour éviter de surévaluer l'apport du stockage stationnaire, il est donc nécessaire de recalculer ce courant.

Dans le dernier cas, il n'est pas nécessaire de trop relever le niveau de tension. En conséquence, la puissance du système de stockage est revue à la baisse. Pour cela, nous calculons un décrétement de la même manière que l'incrément (cf. l'équation (A.115)). Tout comme pour le second cas, il est nécessaire à chaque itération de recalculer le courant fourni par les trains.

La Figure A.39 présente l'algorithme mis en place.

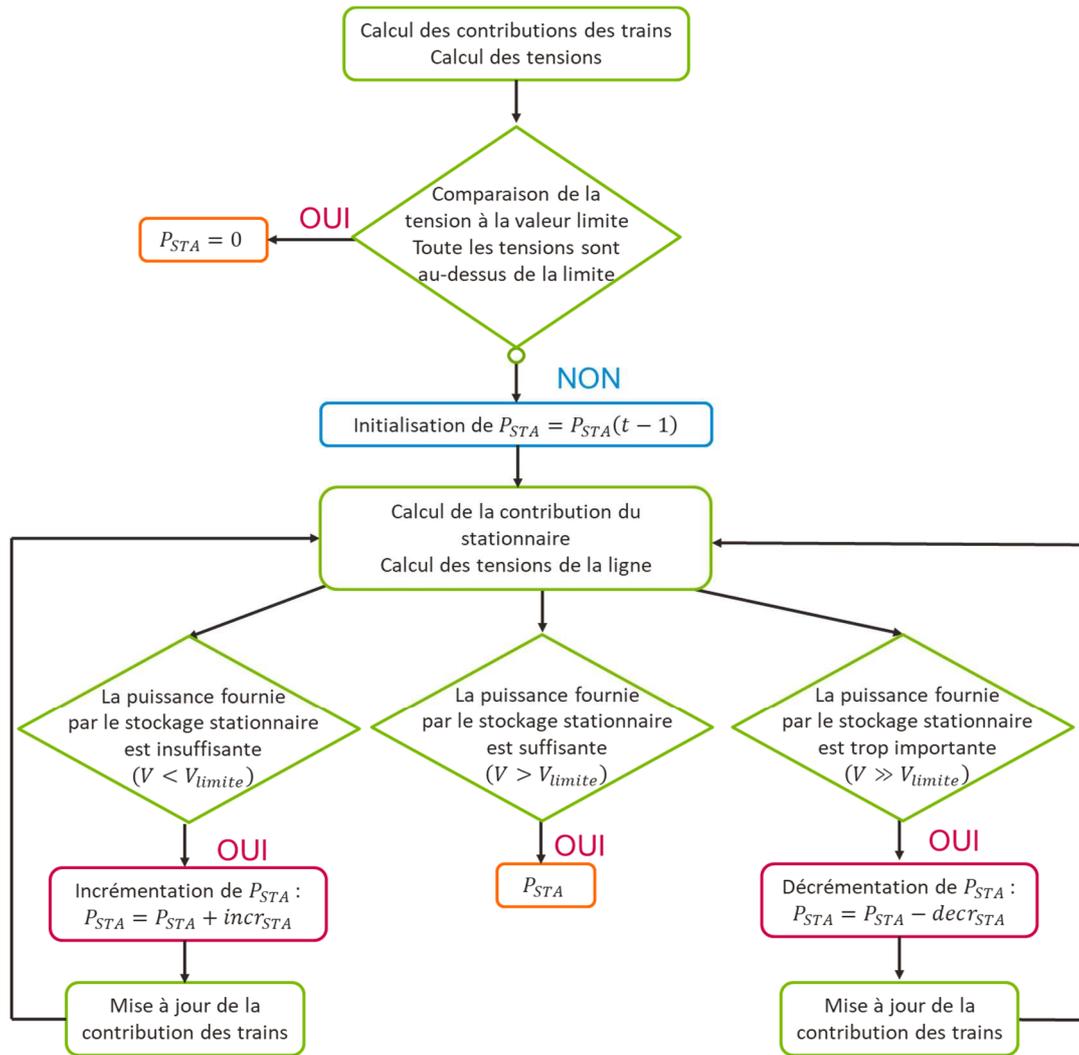


Figure A.39 : Algorithme pour déterminer la puissance fournie par le système de stockage stationnaire

✓ **Puissance effective du système de stockage stationnaire**

Nous comparons ensuite cette valeur à celle des pertes maximales plus la part de l'embarqué.

La puissance fournie par le système de stockage stationnaire est alors donnée par :

$$P_{STA} = \begin{cases} P_{STA}^{soutien} & \text{si } P_{STA}^{soutien} \leq pertes_{max} + P_{emb}^{soutien} \\ pertes_{max} + P_{emb}^{soutien} & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

Où :

$P_{STA}^{soutien}$	(en W)	Puissance apportée par le système de stockage stationnaire s'il répondait seul au besoin de soutien de tension
$P_{emb}^{soutien}$	(en W)	Puissance apportée par le système de stockage embarqué s'il répondait seul au besoin de soutien de tension
$pertes_{max}$	(en W)	Pertes maximales autorisées
P_{STA}	(en W)	Puissance effective que doit fournir le système de stockage stationnaire pour relever la tension

Le système de stockage embarqué fait alors le complément (la puissance qu'il doit fournir est calculée de la même manière que dans la Figure A.38).

La Figure A.40 résume l'algorithme mis en place.

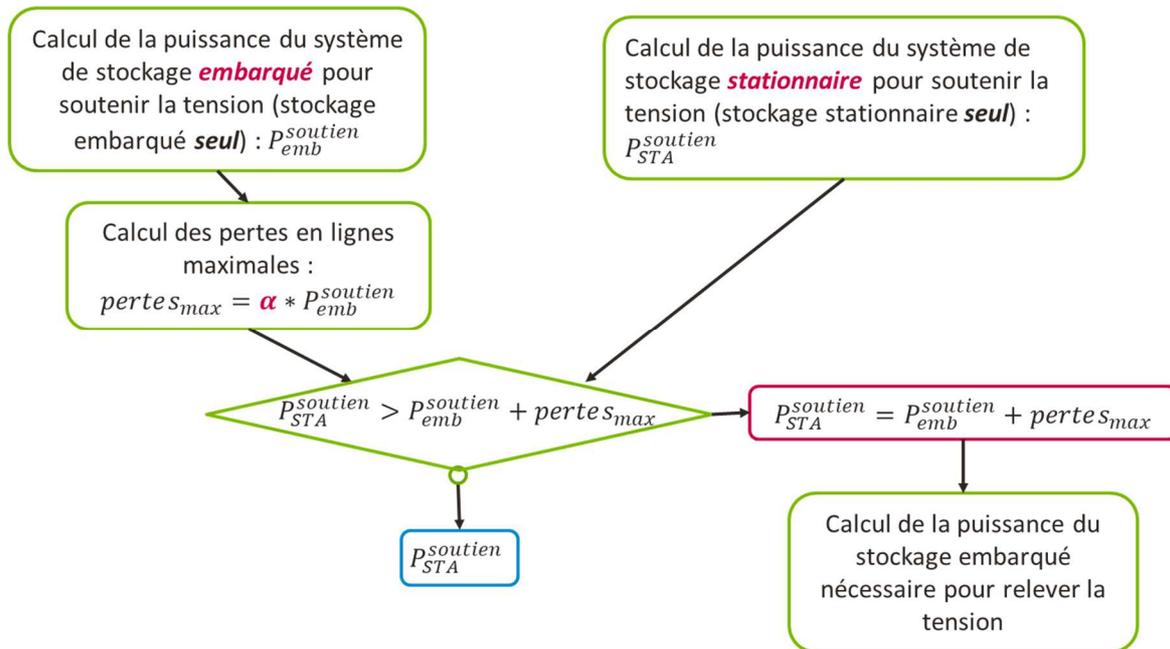


Figure A.40 : Algorithme pour déterminer la répartition de puissance entre stationnaire et embarqué

A.3.7.4.2. Cas du freinage

Pour le freinage : lorsque la puissance de freinage renvoyée est trop importante pour la ligne électrique alors celle-ci est stockée autant que possible dans le système de stockage embarqué avant d'être captée par le système de stockage stationnaire ou d'être dissipée par les rhéostats.

A.3.7.4.3. Recharge du système de stockage embarqué

Il est possible qu'aucun soutien ne soit nécessaire. Dans ce cas, nous regardons s'il est possible et pertinent de recharger les systèmes de stockage. Celui embarqué dans le train est privilégié puisqu'il est possible de recharger le système de stockage stationnaire lorsqu'aucun train n'est présent sur la portion de ligne.

Nous procédons de la même manière : les contributions des trains et les tensions en chaque nœud ont calculées. Nous comparons ensuite les tensions à une valeur limite (V_{rch}).

Tant que les tensions sont supérieures à cette limite alors nous incréments la puissance de charge du système de stockage embarqué sous réserve que la puissance reste inférieure à la puissance maximale de charge. Le calcul de l'incrément se fait selon le même principe que pour le soutien de tension (cf. (A.114)) et l'algorithme utilisé est le même (cf. Figure A.38).

A.3.7.4.4. Recharge du système de stockage stationnaire

De même, nous appliquons la même méthode pour la recharge du système de stockage stationnaire que celle utilisée pour le soutien de tension. L'incrément de la puissance de charge se fait de manière successive tant que les tensions restent au-dessus de la limite V_{rch} (cf. (A.115)). Il est possible de recharger le système de stockage stationnaire en le connectant sur une ou plusieurs voies. Il y a alors un incrément par voie. La puissance du système de stockage stationnaire est incrémentée sous réserve que la somme globale des incréments reste inférieure à sa puissance maximale de charge.

Résumé

En France, il existe deux modes de traction pour les trains : la traction diesel ou la traction électrique. Chaque mode fait face à des problématiques qui lui sont propres. Dans le cas du diesel, les émissions de gaz à effet de serre étant de plus en plus contrôlées, il devient nécessaire de faire évoluer ce type de train vers une solution moins polluante. Dans le cas de la traction électrique, la consommation d'énergie entraîne une chute de tension qui peut imposer un ralentissement des trains, empêchant ainsi le développement du trafic. La solution étudiée par la SNCF est l'hybridation des trains (ajout de systèmes de stockage embarqué).

Ces travaux de thèse ont pour objectif de mettre en place une méthode permettant de faire le pré-dimensionnement des systèmes de stockage embarqués dans le train. De plus, afin de tenir compte de l'influence réciproque de la gestion sur le dimensionnement, celle-ci est incluse dans le modèle de dimensionnement. La résolution du modèle global se fait à l'aide d'un algorithme d'optimisation.

La méthode a été mise en place sur les deux modes de traction ferroviaire (diesel et électrique) et l'optimisation a été faite avec l'algorithme SQP (Sequential Quadratic Programming).

Abstract

In France, there are two traction modes for railway: the diesel and electric traction. Each mode has its own issues. For diesel, the increasing control of the greenhouse gas emissions imposes to evolve this type of train to a less polluting solution. For electric traction, the energy consumption creates a voltage drop which can cause a traffic slowdown, which will limit the traffic development. The studied solution by SNCF is the hybridization of the train (adding storage system).

Thus, these works have the objective to build a method to do the pre-sizing of storage systems embedded in trains. Moreover, to take into account the mutual influence of the sizing and the energy management, this last one is included in the sizing model. An optimization algorithm solves the global model.

The method has been developed for the two traction modes (diesel and electric) and the optimization has been made with SQP algorithm (Sequential Quadratic Programming).