N° d'ordre : 42012

Université Lille1 – Sciences et Technologies

École Doctorale des Sciences Pour l'Ingénieur

Thèse

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Lille1

Spécialité : Génie Électrique

Présentée et soutenue publiquement par

Clément MAYET

Le 24 mars 2016

SIMULATION ENERGETIQUE FLEXIBLE D'UN CARROUSEL DE METROS BASEE SUR LA REPRESENTATION ÉNERGETIQUE MACROSCOPIQUE

Membres du jury :

Pr. Alain BOUSCAYROL	Université Lille1, France	Directeur de la thèse
Dr. Philippe DELARUE	Université Lille1, France	Codirecteur de la thèse
Pr. Philippe LADOUX	INP Toulouse, France	Président
Pr. Eric MONMASSON	Université de Cergy Pontoise, France	Rapporteur
Pr. Nicolas RETIÈRE	Université Grenoble Alpes, France	Rapporteur
Mr. Juan SANCHEZ	Siemens, France	Invité
Pr. Joeri VAN MIERLO	Vrije Universiteit Brussel, Belgique	Examinateur
Dr. Jean-Noël VERHILLE	ATJNV, France	Examinateur

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

« *Laissez tomber la certitude. L'inverse n'est pas l'incertitude.*
C'est l'ouverture, la curiosité et la volonté d'embrasser le paradoxe,
plutôt que de choisir les bons côtés. Le défi ultime est de nous accepter
exactement tels que nous sommes, mais sans jamais cesser d'essayer
d'apprendre et de grandir »

Tony Schwartz

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Remerciements

Ce mémoire est issu de travaux réalisés au cours d'une thèse CIFRE entre le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP) de Lille et le groupe industriel Siemens. Il conclut environ 3 années de recherches passionnantes au sein de l'équipe Commande du L2EP.

Mes premiers remerciements vont tout naturellement à mon directeur de thèse **Alain Bouscayrol** et mon co-directeur **Philippe Delarue**, respectivement Professeur et Maitre de Conférence à l'Université Lille1. Merci pour la qualité de vos encadrements, pour votre rigueur scientifique indéniable, et pour tous les débats scientifiques et non-scientifiques que nous avons pu avoir ensemble. Merci également pour vos côtés humains qui ont permis un environnement de travail très stimulant et enrichissant. Ces travaux n'auraient pas été les mêmes sans toutes vos qualités.

Je tiens à remercier particulièrement mes encadrants industriels, **Jean-Noël Verhille** et **Eric Chattot**, tous deux anciens ingénieurs chez Siemens. Un grand merci également à **Valérie Cornetet**, ancienne responsable du Management et de l'Innovation chez Siemens pour son optimiste à toute épreuve. Merci à tous les trois pour vos fortes implications dans ce projet de thèse et pour votre ouverture d'esprit essentielle à l'innovation. J'espère sincèrement que nos chemins se rencontreront à nouveau dans d'autres projets tout aussi passionnants.

J'aimerais également remercier l'ensemble des membres de mon jury. Merci à monsieur **Philippe Ladoux**, Professeur à l'INP de Toulouse, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury et d'être examinateur de cette thèse. Merci à monsieur **Eric Monmasson**, Professeur à l'Université de Cergy Pontoise, et monsieur **Nicolas Retière**, professeur à l'Université Grenoble Alpes, pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce mémoire et pour leurs remarques constructives effectuées dans leurs rapports et discutées pendant la soutenance. Merci à monsieur **Joeri Van Mierlo**, professeur à la Vrije Universiteit de Bruxelles, et à monsieur **Jean-Noël Verhille**, docteur à ATJNV, d'avoir examiné ma thèse et d'avoir enrichi les discussions lors de la soutenance. Enfin, merci à monsieur **Juan Sanchez**, responsable du Département Ingénierie Systèmes chez Siemens, et invité à la soutenance, de m'avoir intégré au sein de son département.

Merci également au Professeur **Francis Piriou** et au Professeur **Betty Lemaire-Semail**, respectivement ancien directeur et actuelle directrice du L2EP, pour m'avoir accueilli pendant toutes ces années dans le L2EP et plus particulièrement dans l'équipe Commande.

Un grand merci à **Philippe Barrade**, Professeur à HES-SO Valais-Wallis, à **Loic Boulon**, Professeur à l'Université du Quebec à Trois-Rivières, et à **João Pedro Trovão**, Professeur à l'Université de Sherbrooke, pour les échanges enrichissants que nous avons pu avoir, notamment au cours de leurs escales à Lille et lors des écoles d'été REM à l'international.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Je remercie ensuite bien évidement tous les doctorants du P2 que j'ai pu côtoyer pendant ces 3 années et qui ont créé une ambiance de travail exceptionnelle et avec qui, pour certains, nous avons créé de vrais liens d'amitié : Ali, Antoine, Carlos, Clément, Clément, Ehdi, Guillaume, Hui, Jalal, Ke, Kevin, Laure, Laurent, Ludo, Marc, Medhi, Mircea, Oriol, Quang, Radu, Roberta, Smail, Tony, Zifu, Zuqi.

Un grand merci également à toutes les personnes du P2 pour l'accueil chaleureux et les échanges humains et scientifiques qui ont rendu cette expérience inoubliable : Abdelkader, Abdelmounaïm, Alain, Arnaud, Claire, Etienne, Francis, Frédéric, Geneviève, Jean-François, Ilyes, Julien, Loïc, Mélanie, Nadir, Olivier, Philippe, Thierry, Thierry, Thomas, Virginie, Walter, Yvonnick.

Bien évidemment, je remercie mes parents, Diane et Joël, et mes frères, Antonin et Basile, pour m'avoir soutenu tout au long de ces années et pour m'avoir poussé à persévérer.

Enfin, je tiens à remercier mes amis de Lille, ma famille adoptive, pour m'avoir soutenu et encouragé au quotidien, pour avoir partagé tous ces moments au cours de ces années de thèse, que ça soit dans les voyages, les bœufs musicaux, les débats philosophiques (de comptoir quelquefois à refaire le monde) ou tout simplement les soirées passées ensemble, bref merci pour votre présence réconfortante : Amandine (merci pour le pot de thèse et pour nos expérimentations musicales), Andréa, Angéline (merci pour toutes ces années et pour ton aide énorme pour le pot), Charley, Guillaume, Ingrid, Laura (promis on connaitra un jour les paroles de Stupeflip), Léa, Manon, Robbie (merci d'être au cœur de ces nombreuses rencontres), Valentine.

A toutes ces personnes, et celles que j'ai oubliées, MERCI car ces années ont été parmi les plus enrichissantes et épanouissantes.

« *Pour que la loi du progrès existât, il faudrait que chacun voulût la créer;*
c'est-à-dire que, quand tous les individus s'appliqueront à progresser,
alors l'humanité sera en progrès »

Charles Baudelaire

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Résumé

La sobriété énergétique des systèmes de transport est primordiale afin de limiter leur impact environnemental. Ainsi, les transports en communs électriques, tels que les métros ou tramways, sont fortement sollicités dans les zones urbaines. Diverses solutions innovantes sont apparues récemment afin d'accroître d'avantage leur efficacité énergétique (sous-systèmes de stockage d'énergie, stations d'alimentation réversibles, etc.). Cependant, au vu de la complexité des études de dimensionnement et d'optimisation, les outils de simulation numérique sont devenus indispensables. Or, ces outils sont particulièrement délicats à développer en raison des non-linéarités (non-réversibilité des sous-stations), des non-stationnarités (mouvement des rames), et des fortes interactions énergétiques qui existent au sein des systèmes ferroviaires. Cette thèse propose un nouvel outil de simulation de carrousel de métros basé sur le formalisme REM (Représentation Energétique Macroscopique). Ce formalisme a pour volonté de structurer les modèles suivant les propriétés énergétiques du système. Il conduit à une approche de simulation « forward » et à un usage exclusif de la causalité intégrale. De ce fait, le programme de simulation proposé est issu d'une approche innovante et permet d'avoir un nouveau regard sur le système de carrousel de métros. Ces approches accroissent notamment la flexibilité de la simulation, tout en garantissant des résultats physiques. Cette thèse a, de plus, une volonté affichée de valider expérimentalement l'ensemble des modèles développés. Ainsi, au terme de ce mémoire, un programme de simulation énergétique et flexible, permettant l'étude de structures d'alimentation innovantes, est obtenu.

Mots clés : Carrousel de métros, systèmes ferroviaires, Représentation Energétique Macroscopique (REM), simulation « Hardware-In-the-Loop (HIL) », validation expérimentale, approche « forward », causalité intégrale.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Abstract

Transportation systems have to be efficient in terms of energy in order to limit their environmental impact. Electric public transportation, such as subways or tramways, is thus strongly requested in urban areas. Various innovative solutions have emerged recently to increase their energy efficiency (energy storage subsystems, reversible traction power substations, etc.). However, due to the complexity of the development and optimization of such systems, numerical simulation tools are essential. Nevertheless, simulators of railway systems are particularly delicate to develop due to non-linearity (non-reversibility of traction power substations), non-stationary (displacement of trains), and multiple energetic interactions, which exists within these kind of systems. This PhD thesis then proposes a new simulation tool of subway system based on EMR formalism (Energetic Macroscopic Representation). This formalism structures the models according to the energetic properties of the system. It leads to a forward simulation approach with exclusive use of the integral causality. In that way, the proposed simulation tool is stemming from an innovative approach and allows a new vision of subway systems. These approaches allow especially the increasing of the simulator flexibility and the obtaining of physical simulation results. Moreover, this PhD thesis has the particularity to experimentally validate all the developed models. At the end, an energetic and flexible simulation tool of subways systems is obtained. It allows the study of innovative supply systems.

Keywords: Subway systems, railway systems, Energetic Macroscopic Representation (EMR), Hardware-In-the-Loop (HIL) simulation, experimental validation, forward simulation approach, integral causality.

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Table des matières

Nomenclature XIII

Introduction générale ..... - 1 -

Chapitre I - Le carrousel de métros : contexte, enjeux et problématiques ..... - 5 -

I.1 – Contexte et enjeux du secteur des transports ..... - 6 -
I.1.a – Contexte et enjeux sociétaux et environnementaux ..... - 6 -
I.1.b – Vers une mobilité plus économe en énergie ..... - 7 -
I.2 – Réduction de la consommation énergétique dans les TCSP ..... - 10 -
I.2.a – Présentation du système et de ses problématiques énergétiques ..... - 10 -
I.2.b – Nouvelles structures d'alimentation et gestions d'un carrousel ..... - 13 -
I.3 – La simulation numérique : une aide à la décision ..... - 19 -
I.3.a – Du système réel à la simulation numérique ..... - 19 -
I.3.b – Particularité des programmes de simulation ferroviaires ..... - 25 -
I.4 – Objectif et positionnement de la thèse ..... - 31 -
I.4.a – Objectif de la thèse ..... - 31 -
I.4.b – Moyens utilisés ..... - 31 -
I.4.c – Résultats attendus ..... - 33 -
I.4.d – Positionnement de la thèse ..... - 34 -
I.5 – Conclusion du chapitre ..... - 35 -

Chapitre II - Modélisation énergétique des sous-systèmes d'un carrousel de métros ..... - 37 -

II.1 – Modélisation du sous-système d'alimentation ..... - 38 -
II.1.a – Modélisation dynamique du sous-système d'alimentation ..... - 38 -
II.1.b – Validation du modèle dynamique du sous-système d'alimentation ..... - 43 -
II.1.c – Réduction du modèle dynamique du sous-système d'alimentation ..... - 45 -
II.1.d – Intérêts pour une simulation flexible ..... - 50 -

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

II.2 – Modélisation du sous-système matériel roulant ..... - 51 -
II.2.a – Modélisation dynamique du sous-système matériel roulant ..... - 52 -
II.2.b – Validation du modèle dynamique du sous-système matériel roulant ..... - 61 -
II.2.c – Réduction du modèle dynamique du sous-système matériel roulant ..... - 63 -
II.2.d – Intérêts pour une simulation flexible ..... - 66 -
II.3 – Modélisation du sous-système de pilotage ..... - 67 -
II.3.a – Modélisation générique du sous-système de pilotage ..... - 70 -
II.3.b – Validation du modèle du sous-système de pilotage ..... - 74 -
II.3.c – Réduction du modèle du sous-système de pilotage ..... - 75 -
II.3.d – Intérêt pour une simulation flexible ..... - 76 -
II.4 – Conclusion du chapitre ..... - 78 -

Chapitre III - Modélisation énergétique d'un carrousel de métros ..... - 79 -

III.1 – Modélisation d'un carrousel « mono-train » ..... - 80 -
III.1.a – Problématique d'association des sous-systèmes ..... - 80 -
III.1.b – Modélisation « multi-dynamique » d'un carrousel « mono-train » ..... - 83 -
III.1.c – Validation expérimentale du modèle du carrousel « mono-train » ..... - 84 -
III.2 – Modélisation d'un carrousel « multi-train » ..... - 87 -
III.2.a – Problématiques du couplage multi-source ..... - 87 -
III.2.b – Méthodes de formulation et de résolution d'un couplage multi-source ..... - 88 -
III.2.c – Choix d'une méthode ..... - 96 -
III.3 – Validation expérimentale au travers d'une simulation HIL ..... - 98 -
III.3.a – Simulation HIL d'un carrousel de métros « multi-train » ..... - 99 -
III.3.b – Validation expérimentale du modèle « multi-train » ..... - 106 -
III.4 – Conclusion du chapitre ..... - 108 -

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Chapitre IV – Extensions et applications pour une simulation flexible d'un carrousel de métros.....- 111 -

IV.1 – Extension du modèle d'un carrousel de métros.....- 112 -

IV.1.a – Extension pour prendre en compte un nombre de sources indéfini.....- 112 -

IV.1.b – Extension pour prendre en compte les mises en parallèle des rails .....- 114 -

IV.1.c – Extension pour prendre en compte des SSE stationnaires.....- 119 -

IV.1.d – Flexibilité du modèle étendu .....- 121 -

IV.2 – Applications de simulations flexibles d'un carrousel .....- 122 -

IV.2.a – Exploitation de la simulation flexible d'un carrousel de métros .....- 123 -

IV.2.b – Exemples de simulations flexibles d'un carrousel de métros.....- 124 -

IV.3 – Conclusion du chapitre .....- 133 -

Conclusion générale.....- 135 -

Annexes .....- 139 -

Annexe 1 – REM et SMC.....- 140 -

Annexe 2 – Modélisation dynamique de la station d'alimentation avec prise en compte de l'empiétement.....- 144 -

Annexe 3 – Plate-forme expérimentale : émulateur d'un carrousel de métros.....- 147 -

Annexe 4 – Résolution du conflit d'association du matériel roulant .....- 151 -

Annexe 5 – Calcul de la distance de décélération d'une rame .....- 154 -

Bibliographie.....- 159 -

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Nomenclature

AC	Alternative Current
BHNS	Bus à Haut Niveau de Service
CBTC	Communication-Based Train Control
C-MNA	Causal Modified Nodal Analysis
DC	Direct Current
EnR	Energies Renouvelables
GES	Gaz à Effet de Serre
HIL	Hardware-In-the-Loop
HT	Haute Tension
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
L2EP	Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance
LAC	Ligne Aérienne de Contact
LGV	Ligne à Grande Vitesse
MCM	Méthode Classique Matricielle
MEGEVH	Modélisation Energétique et Gestion d'Energie de Véhicules Hybrides
MNA	Modified Nodal Analysis
MREQ	Méthode des Résistances EQuivalentes
MSAP	Machine Synchrone à Aimants Permanents
OMC	Organisation Mondiale du Commerce
ONU	Organisation des Nations Unies
PCC	Poste de Commande Centralisé
PLATHEE	PLAte-forme pour Trains Hybrides Economes en Energie
PR	Poste de Redressement
REM	Représentation Energétique Macroscopique
SMC	Structure Maximale de Commande
SSE	Sous-système de Stockage d'Energie
TCSP	Transport en Communs en Site Propre
Val	Véhicule Automatique Léger

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Introduction générale

L'évolution de la société actuelle tend à une augmentation considérable de la consommation d'énergie, sous toutes ses formes. Par exemple, les technologies de communication sont de plus en plus énergivores. De plus, les hommes et marchandises ne se sont jamais autant déplacés dans le monde, induisant l'utilisation de moyens de transport plus ou moins consommateurs d'énergies. Par ailleurs, et à juste titre, les pays en voie de développement cherchent à atteindre les niveaux de vie des pays occidentaux, ce qui accentue un peu plus encore cette tendance mondiale de surconsommation de l'énergie. Une des problématiques principales est alors le dégagement important de gaz à effet de serre (GES) produit par la combustion des matières premières utilisées pour créer cette énergie. De plus, les réserves mondiales de ces matières diminuent fortement, ce qui laisse à prévoir leurs épuisements d'ici quelques décennies à quelques siècles. Ces changements sociétaux touchent à leurs paroxysmes en engendrant des nuisances environnementales et sanitaires importantes telles que le dérèglement et le réchauffement climatique. La prise de conscience de ces problèmes, engendrés par l'homme, demande à modifier les mentalités et habitudes de chacun et à développer des systèmes plus sobres énergétiquement, dans tous les secteurs d'activités.

Cette sobriété énergétique est particulièrement souhaitée dans le secteur des transports. De nombreuses recherches sont menées pour améliorer l'efficacité des véhicules individuels et réduire les émissions de GES. Ces recherches visent à hybrider les véhicules thermiques, ou encore à développer les véhicules électriques [EHS 05], [CHA 07]. Les transports en commun (trains, métros, tramways, etc.) sont également fortement sollicités. Ils constituent une alternative durable et économe énergétiquement au transport individuel. Pour inciter d'avantage leurs développements, plusieurs recherches sont menées afin d'améliorer encore leur efficacité énergétique.

Ces recherches visent principalement à récupérer l'énergie cinétique stockée dans les parties mécaniques des véhicules pendant les phases de freinage (freinage régénératif ou récupératif). Cette récupération peut diminuer de 30 % à 40 % la consommation d'énergie d'un système de métros par exemple [ADI 98], [BAR 08a]. Plusieurs solutions innovantes sont envisagées telles que la synchronisation des phases de traction et de freinage des différentes rames, ou encore l'introduction de Sous-systèmes de Stockage d'Énergie (SSE) (ex : batteries, supercondensateurs, systèmes inertiels, etc.) ou de récupération d'énergie (ex : stations d'alimentation réversibles).

Néanmoins, le développement de ces systèmes passe par une étude de rentabilité entre leurs coûts d'installation et les gains potentiels d'énergie. Plusieurs questions se posent alors : quels sont les gains d'énergie possibles ? Quelle solution est la plus adaptée au système étudié ? Quel est le meilleur emplacement pour les divers sous-systèmes ? Ou encore, comment dimensionner le système choisi ? Or, les réponses à ces questions ne sont pas triviales. L'utilisation de la simulation numérique devient alors indispensable pour prévoir les comportements et consommations d'énergie d'un système sous différentes conditions.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Le développement de ces outils de simulation est cependant un défi en soi, en raison de la complexité des systèmes concernés. Ils sont effectivement généralement constitués d'une multitude de sous-systèmes alimentés en énergie par une distribution commune. De nombreuses interactions énergétiques sont donc engendrées au travers de cette distribution. De plus, la non-stationnarité (mouvement des véhicules) et la non-linéarité (non-réversibilité du sous-système d'alimentation, limites des différents sous-systèmes) du système mènent à développer des modèles non-triviaux. Par ailleurs, plusieurs approches de simulation sont possibles. Elles doivent considérer des paramètres fortement variables, des sources pouvant être de différentes natures (courant, tension), ou encore diverses limites et contraintes du système. Plusieurs logiciels existants ont certaines lacunes dans ces pré-requis et considèrent diverses simplifications. D'un autre côté, la taille du système à simuler implique de développer des modèles ayant un compromis suffisant entre la durée de simulation et la précision. Un modèle trop complexe induirait des temps de simulation prohibitifs alors qu'un modèle trop simplifié conduirait à des erreurs de simulation trop importantes [GAO 07].

Cette thèse CIFRE est une collaboration entre l'industriel Siemens et le Laboratoire d'Électrotechnique et d'électronique de Puissance (L2EP) de Lille. Elle a pour objectif de développer un outil de simulation flexible permettant d'estimer précisément les consommations énergétiques d'un carrousel de métros afin d'évaluer différentes solutions de réduction des consommations (SSE, stations d'alimentation réversibles, etc.). L'estimation des gains d'énergie possibles permettra de proposer des structures d'alimentation innovantes dans les futurs carrousels de métros. Par ailleurs, cette thèse est basée sur l'utilisation du formalisme de représentation REM (Représentation Energétique Macroscopique) [BOU 00], [BOU 12] afin de mieux mettre en exergue les interactions énergétiques du système. Ce formalisme a pour volonté de simuler le système, suivant ses propriétés et contraintes énergétiques, au travers d'une approche de simulation « forward » et un respect strict de la causalité physique du système. De ce fait, le programme de simulation proposé sera issu d'une approche innovante visant à mieux reproduire le comportement énergétique du système. Cette approche permettra d'avoir un nouveau regard sur le système de carrousel de métros étudié. De plus, la validation expérimentale des modèles établis est une des volontés fortes de cette thèse.

Le premier chapitre de ce mémoire présentera le contexte et les enjeux sociétaux et environnementaux du secteur des transports. Les différentes solutions envisagées permettant de tendre vers une mobilité plus économe en énergie seront évoquées. De plus, les aspects liés à la simulation numérique seront introduits en présentant différentes approches de simulations possibles. Enfin, l'objectif de la thèse sera détaillé.

Le deuxième chapitre concernera la modélisation des différents sous-systèmes constitutifs d'un carrousel de métros classique (le matériel roulant, le sous-système d'alimentation, et celui du pilotage des rames). Une méthodologie particulière visera, pour chacun des sous-systèmes, à établir un modèle dynamique précis en utilisant la REM, à le valider expérimentalement, et à effectuer plusieurs réductions de modèles. Un modèle, approprié à l'étude envisagée, sera donc finalement sélectionné parmi les modèles déduits.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Le troisième chapitre assemblera les modèles des différents sous-systèmes afin de simuler un carrousel de métros. Dans un premier temps, un carrousel « mono-train » composé d'une rame alimentée par une station d'alimentation via des rails de distribution d'énergie sera considéré. L'interconnexion délicate des divers sous-systèmes sera particulièrement abordée. La modélisation de ce carrousel sera validée expérimentalement avant d'être étendue dans un deuxième temps. Cette extension consistera à définir une méthode de modélisation « multi-train » permettant de considérer plusieurs rames alimentées par une distribution commune d'énergie. La prise en compte des interactions engendrées sera un point crucial. Enfin, le modèle du carrousel « multi-train » sera validé expérimentalement, au travers d'une simulation « Harware-In-the-Loop (HIL) ».

Le dernier chapitre visera finalement à étendre le modèle de carrousel de métros afin de prendre en compte un nombre quelconque de sous-systèmes. De plus, diverses applications seront effectuées sur le cas concret du projet de la seconde ligne (B) de métros de la ville de Rennes. Ce projet est en cours de réalisation par Siemens. Les applications ainsi menées viseront à démontrer l'intérêt et la flexibilité de l'outil développé.

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Chapitre I - Le carrousel de métros : contexte, enjeux et problématiques

Le but de ce chapitre est de définir l'objectif de cette thèse, son positionnement scientifique, et les moyens mis en œuvre. Pour cela, le contexte général est tout d'abord introduit. Il expose les problématiques énergétiques générales, et plus spécifiquement celles liées au secteur des transports.

Les solutions permettant de réduire la consommation d'énergie dans le secteur des transports, en particulier des Transports en Communs en Site Propre (TCSP), sont présentées. Néanmoins, l'intégration de ces solutions complexifie les TCSP, ce qui rend ardues les études de développement et d'optimisation. La simulation numérique devient alors aujourd'hui une nécessité.

Par la suite, les différentes méthodes et approches existantes de modélisation, de représentation, et de simulation de ces systèmes sont abordées. Elles mettent en exergue certaines problématiques spécifiques qui nécessitent de nouvelles approches de simulation.

Sommaire du chapitre

I.1 – Contexte et enjeux du secteur des transports ..... - 6 -
I.1.a – Contexte et enjeux sociétaux et environnementaux ..... - 6 -
I.1.b – Vers une mobilité plus économe en énergie ..... - 7 -
I.2 – Réduction de la consommation énergétique dans les TCSP ..... - 10 -
I.2.a – Présentation du système et de ses problématiques énergétiques ..... - 10 -
I.2.b – Nouvelles structures d'alimentation et gestions d'un carrousel ..... - 13 -
I.3 – La simulation numérique : une aide à la décision ..... - 19 -
I.3.a – Du système réel à la simulation numérique ..... - 19 -
I.3.b – Particularité des programmes de simulation ferroviaires ..... - 25 -
I.4 – Objectif et positionnement de la thèse ..... - 31 -
I.4.a – Objectif de la thèse ..... - 31 -
I.4.b – Moyens utilisés ..... - 31 -
I.4.c – Résultats attendus ..... - 33 -
I.4.d – Positionnement de la thèse ..... - 34 -
I.5 – Conclusion du chapitre ..... - 35 -

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

I.1 – Contexte et enjeux du secteur des transports

I.1.a – Contexte et enjeux sociétaux et environnementaux

La population mondiale croît et s'urbanise. L'Organisation des Nations Unies (ONU) estime la part des citadins à 66 % en 2050, alors qu'elle était de 54 % en 2014 et de 30 % en 1950 [ONU 14]. De plus, les échanges entre pays s'intensifient et s'accélèrent sous la tendance de mondialisation des marchés. Le volume des échanges a été multiplié par 4 ces 30 dernières années selon les observations de l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC) [OMC 13]. Ces 2 constats marquent une évolution de la société actuelle, intensifiant le besoin de mobilité des biens et des personnes, aussi bien de manière locale (zone urbaine) que globale (échange international). Cette mobilité est également synonyme de liberté et porteuse de lien social avec un trafic de voyageur en augmentation de 32 % entre les années 1990 et 2012 [ADE 14]. La mobilité est donc devenue un vecteur de développement important des sociétés modernes.

Néanmoins, l'intensification de cette mobilité conduit à des nuisances sanitaires et environnementales importantes telles que le bruit, le réchauffement de la planète et le dérèglement climatique [EEA 15]. Les principales causes de ces problèmes sont liées aux émissions de Gaz à Effet de Serre (GES). Afin de limiter ces problèmes environnementaux, les gouvernements européens se sont engagés à diminuer de 20 % les émissions de GES, de 20 % la consommation d'énergie, et à intégrer 20 % d'Energie Renouvelable (EnR) d'ici 2020. L'objectif est de réduire de 75 % les émissions européennes de GES d'ici 2050 par rapport à 1990 [ADE 15].

En France, le secteur des transports est le premier émetteur de GES avec 27,8 % des émissions nationales (le second en Europe) (Figure I.1) [MIN 15a]. Avec le secteur résidentiel (19,7 %), ce sont les 2 seuls secteurs où les émissions de GES sont en hausse. Afin de répondre aux exigences européennes et enrayer l'augmentation de ces émissions, l'ensemble des secteurs est en mutation pour les rendre plus durables. Par exemple, le secteur résidentiel a pour objectif de généraliser les bâtiments à basse consommation, ou encore de développer les bâtiments à énergie positive. Le secteur industriel vise à améliorer l'efficacité énergétique des procédés de fabrication. Le secteur de l'énergie doit quant à lui intégrer une part plus importante d'EnR afin d'améliorer le « mix-énergétique » européen. L'agriculture peut également y contribuer par la création de centrales biomasses, ou encore de biocarburants. Indéniablement, le secteur des transports doit également intensifier ses efforts afin d'aboutir à une mobilité responsable.

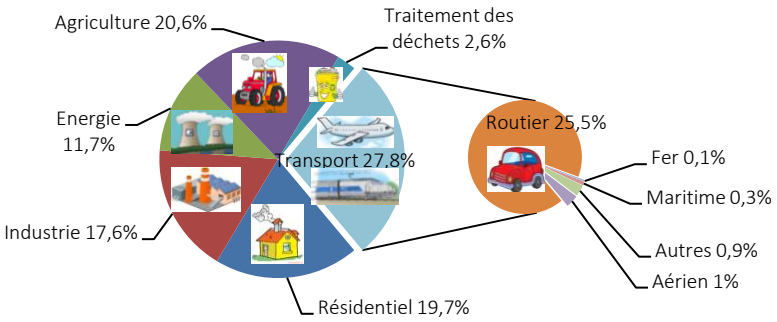


Figure I.1 : Emissions des GES par secteur d'activité en 2013 en France.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

I.1.b – Vers une mobilité plus économe en énergie

Afin d'augmenter la qualité de l'offre de transport, tout en réduisant ses émissions de GES, d'importants efforts sont à effectuer sur leurs systèmes énergétiques et sur l'organisation globale de la mobilité. Le mode routier est aujourd'hui largement prédominant, aussi bien pour le transport de passager (83 % des trafics voyageurs), que de marchandise (87,6 % du trafic intérieur) [ADE 15]. Apprécié par sa flexibilité et sa praticité, il montre pourtant dorénavant ses limites, surtout en zone urbaine. La population citadine grandissante, la congestion des villes et de leurs périphéries a largement augmentée ces dernières années, complexifiant les déplacements urbains [EAS 03]. De plus, c'est le mode de transport terrestre le plus énergivore et le plus polluant. Il est responsable à lui seul de 25 % des émissions de GES mondiales (90 % des émissions des transports en France et 75 % dans le monde) [CEM 07] [MIN 15b]. Il consomme en moyenne 8 fois plus d'énergie qu'un transport par rails (train, métro, etc.) et émet environ 30 fois plus de GES (Figure I.2). Ce dernier chiffre est à prendre avec précaution car il dépend des modes de production d'énergie électrique considérés.

Les émissions de GES dépendent effectivement de la source primaire d'énergie utilisée. La production thermique, à base d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), dégage beaucoup plus de GES que le renouvelable ou le nucléaire. Ce dernier étant considéré comme propre sur le court terme, faiblement émetteur de GES, bien qu'il puisse être source d'autres nuisances ou de dangers qui ne seront pas abordés. Un véhicule électrique (métro, tram, train, etc.) est donc moins polluant dans les pays privilégiant l'énergie nucléaire (ex : en France où la part du nucléaire dans la production d'électricité annuelle était de 73 % en 2013 alors qu'elle n'est que de 11 % dans le monde) [RTE 14]. En revanche, la différence entre transport électrique et thermique (véhicule particulier) s'amenuise fortement si le « mix-énergétique » européen moyen est considéré (part du thermique de 45 % par rapport à 8 % en France) [EU 13], [EEA 14]. Dans ce cas, le transport par rail (électrique) devient similaire au bus d'un point de vue des émissions polluantes [ADE 15].

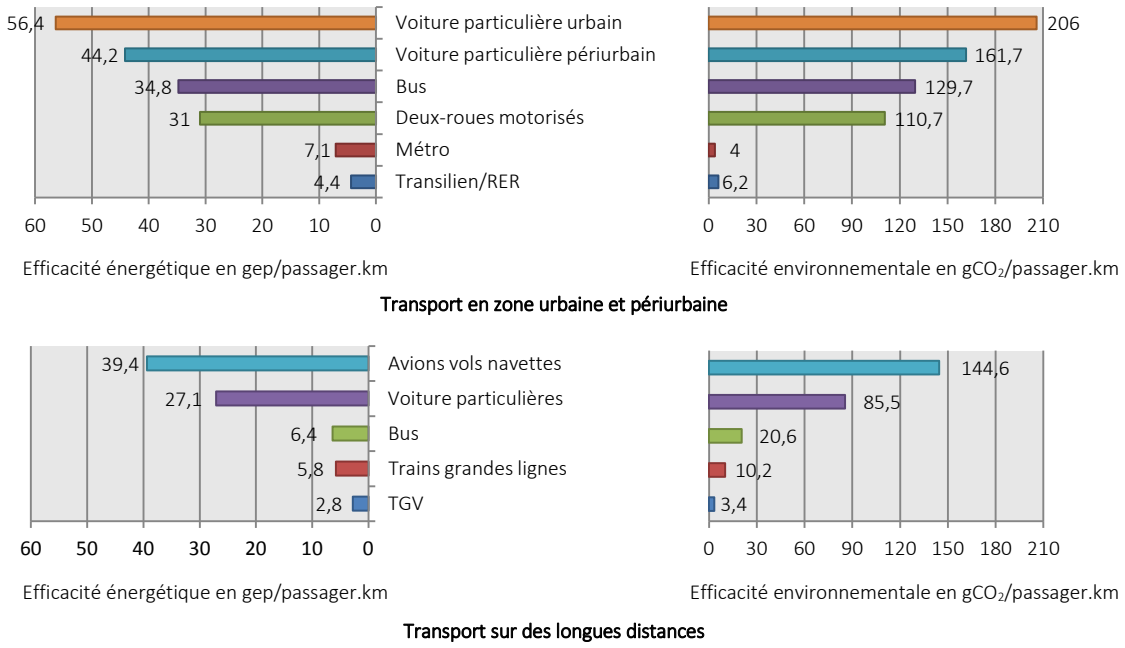


Figure I.2 : Efficacités énergétique et environnementale des modes de transport en France en 2012 [ADE 15].

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Néanmoins, différentes solutions sont possibles et à l'étude pour diminuer l'impact environnemental des transports. Elles visent principalement à améliorer l'efficacité énergétique des véhicules individuels et à favoriser le transport multimodal et collectif.

Evolution des transports individuels

Amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules individuels thermiques – L'un des objectifs européen est de réduire les émissions moyennes de CO_2 du parc automobile de 176 gCO2/km en 2006 à 120 gCO2/km en 2020 [ADE 15]. Cela est envisagé au travers d'avancées technologiques telles que l'augmentation des rendements des moteurs thermiques, ou encore la diminution des masses des véhicules. Afin de stimuler ces développements, des politiques incitatives ont été mises en place. Elles visent à favoriser l'achat de voitures plus respectueuses de l'environnement et à inciter les constructeurs à développer des produits moins énergivores. Néanmoins, ces innovations technologiques auront un jour une limite et l'avenir du transport individuel dépendra d'autres d'avancées [MIE 06]. Ce constat est d'autant plus marqué que les réserves pétrolières se raréfient, obligeant à réfléchir à d'autres modes de motorisation [EHS 05].

Développement des véhicules électriques, à pile à combustible, ou hybrides – Le développement de ces véhicules constitue une étape inconditionnelle à l'essor d'une mobilité plus propre [EHS 05], [MIE 06]. D'importantes recherches sont menées afin de mieux maitriser ces technologies [CHA 07], [CHA 10]. Elles font parties de l'avenir et rentrent dans les objectifs européens et français qui, par exemple, visent 2 millions de véhicules électriques et hybrides en circulation en France d'ici 2020 [GRE 09]. Ces véhicules seront essentiels pour remplacer les véhicules thermiques actuels. Les véhicules particuliers resteront effectivement indispensables pour desservir les zones rurales par exemple. Ces solutions s'inscrivent aujourd'hui pleinement dans le développement de la multi-modalité du transport en complétant l'offre des transports alternatifs et collectifs.

Evolution des transports alternatifs et collectifs

Les mobilités alternatives et collectives sont par essence des solutions responsables pour développer et organiser les transports du futur. Contrairement aux solutions individuelles, celles-ci demandent une adaptation des modes de vie en envisageant une mobilité différente de celles des dernières décennies, moins individuelle et plus collective.

Développement du covoiturage – Le covoiturage est un exemple de cette évolution avec l'apparition de plusieurs sites internet ces dernières années. Il présente un grand nombre d'intérêts : économique (partage des frais), écologique (division des émissions de GES) et social (mobilité à taille humaine) [BLA 15]. Il est incité par des politiques actuelles avec, entre autres, la création d'aires de covoiturage autour des grands axes de circulations.

Développement des vélos en libre service – Le vélo en libre service fait également parti de ces modes de transport alternatif actuellement en développement. Economiques et pratiques, ils complètent de manière locale l'offre des transports [CGD 10]. L'intégration du vélo fluidifie la transition entre plusieurs systèmes de transport dans une politique multimodale. Une quarantaine de villes françaises sont aujourd'hui équipées de ces systèmes (ex : Vélib à Paris).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Evolution des transports collectifs – La fréquentation des transports collectifs a augmentée d'environ 25 % entre 2000 et 2013 (Figure I.3) [CGD 15]. Les Transports Collectifs en Site Propre (TCSP), qui évoluent sur voies dédiées (métros, tramways, Bus à Haut Niveau de Service BHNS, trains, etc.), ont une part importante à jouer dans les nouvelles mobilités [GRE 09]. Par exemple, l'état français s'est engagé à construire 1 500 km de lignes de TCSP supplémentaires d'ici 2020 (hors Ile-de-France) et 2 000 km de Lignes à Grande Vitesse (LGV) [ADE 15]. Une cinquantaine de projets ont été retenus, représentant un investissement public total de 5,2 milliards d'euros [MIN 14]. Cet appel à projet concerne plus de 950 km de lignes nouvelles dont 811 km de BHNS, 81 km de tramway, et 27 km de métro. Par exemple, l'extension de la ligne B du métro toulousain rentre dans ce projet.

D'autre part, des projets de TCSP sont en cours de réalisation en France et dans le monde. Par exemple, la ville de Riyad (Arabie Saoudite) construit actuellement 6 nouvelles lignes de métro. En Europe, plusieurs extensions ou modernisations sont en cours comme à Helsinki (Finlande) ou Istanbul (Turquie). En France, Lille est en train de doubler la capacité de sa ligne 1 de métro et Rennes construit actuellement sa 2nd ligne de métro (Rennes B) d'une longueur de 13 km environ. Pour cette dernière, c'est le groupe Siemens qui fournira le matériel roulant « CityVal » (Figure I.4).

Les TCSP ont donc un rôle très important dans la mobilité de demain. Pourtant, bien qu'ils soient peu consommateur d'énergie par rapport aux autres modes de transport, il existe encore une marge plus ou moins importante de diminution de leur consommation.

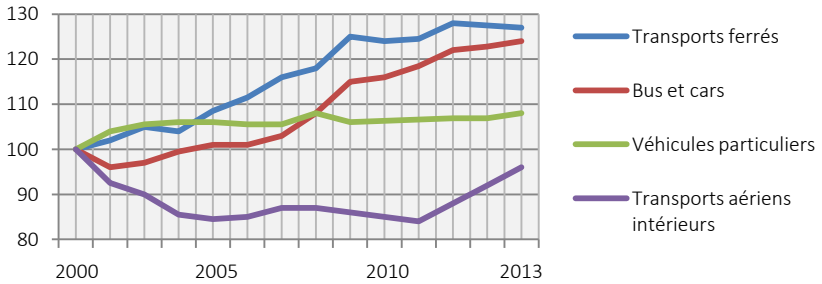


Figure I.3 : Evolution en % des transports intérieurs de voyageurs par mode en France par rapport à l'année 2000 [CGD 15].

Figure I.4 : Ligne B du métro de Rennes en construction (gauche) et le matériel roulant CityVal (droite) [SIE 15].

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

 Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

I.2 – Réduction de la consommation énergétique dans les TCSP

La nécessité de réduire, d'un point de vue global, la consommation d'énergie incite à proposer de nouvelles structures d'alimentation plus économes. Cette partie introduit succinctement le système, ses problèmes énergétiques, et des solutions à ces problématiques.

I.2.a – Présentation du système et de ses problématiques énergétiques

Les TCSP sont parfaitement adaptés au milieu urbain (arrêts nombreux, cadences élevées, stationnements brefs, etc.), notamment grâce à l'utilisation du roulement pneu permettant des accélérations importantes [FRE 90]. Ils permettent un haut niveau de capacité de transport, de performance, de disponibilité, et de qualité [SEI 11].

Le type d'alimentation dépend de plusieurs critères [KUR 99]. Le domaine des tensions continues est généralement utilisé pour les transports urbains, alors que l'alternatif est plutôt dédié aux grandes lignes [TER 12]. Un réseau d'alimentation alternatif est plus simple à réaliser en raison de la conversion des niveaux de tension qui s'effectue via des transformateurs, alors que le continu implique l'utilisation de convertisseurs statiques [MOR 05]. D'un autre côté, l'alternatif requiert un double étage de conversion au sein de la traction qui n'est pas nécessaire en continu. Une des raisons du choix du domaine de tension est donc liée au ratio entre le nombre de véhicules et la distance couverte. Dans un réseau urbain, les cadences élevées impliquent un nombre de véhicules important. Il est donc préférable de privilégier les équipements de traction simples et légers, et des équipements fixes plus complexes. Inversement, sur une ligne inter-urbaine, le nombre de véhicule est moindre et la distance est plus importante. Dans ce cas, des équipements fixes simples sont privilégiés, quitte à complexifier la traction. Concernant les métros, ce choix s'explique aussi par leur implantation souterraine où il s'agit essentiellement de réduire au maximum la section des tunnels grâce aux faibles distances d'isolement permises par la tension continue [SEI 11]. Une autre des raisons est d'ordre historique, puisque les machines à courant continu (DC) ont été les premières à être contrôlées en vitesse. La variation de vitesse en alternatif (AC) a été développée plus récemment avec le développement de l'électronique de puissance [DEB 10], [FAB 15].

Ce mémoire se focalise sur les systèmes métros alimentés en continu. Leur fonctionnement en carrousel (circuit fermé et intervalle d'exploitation régulier) permet une répartition constante de la capacité de transport sur la ligne. Cependant, ces travaux peuvent être étendus à tout type de transport dont la distribution est en tension continue (tramways, trolley bus, trains, etc.).

Présentation du carrousel de métros

Le fonctionnement en carrousel peut être illustré par l'équation (I.1) où *Int* est l'intervalle (temps entre 2 métros successifs), $t_{trajets}$, $t_{arrêts}$, et $t_{rebrous}$ sont respectivement les temps de parcours, d'arrêts en station, et de rebroussements (changement de direction) sur un tour de ligne, et N_{rame} le nombre de rames en service [SEI 11]. L'intervalle correspond à la période de fonctionnement du carrousel et induit une répétitivité des profils du système. De plus, un système de métros est constitué de sous-systèmes, tous interconnectés par une distribution d'énergie commune (Figure I.5).

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

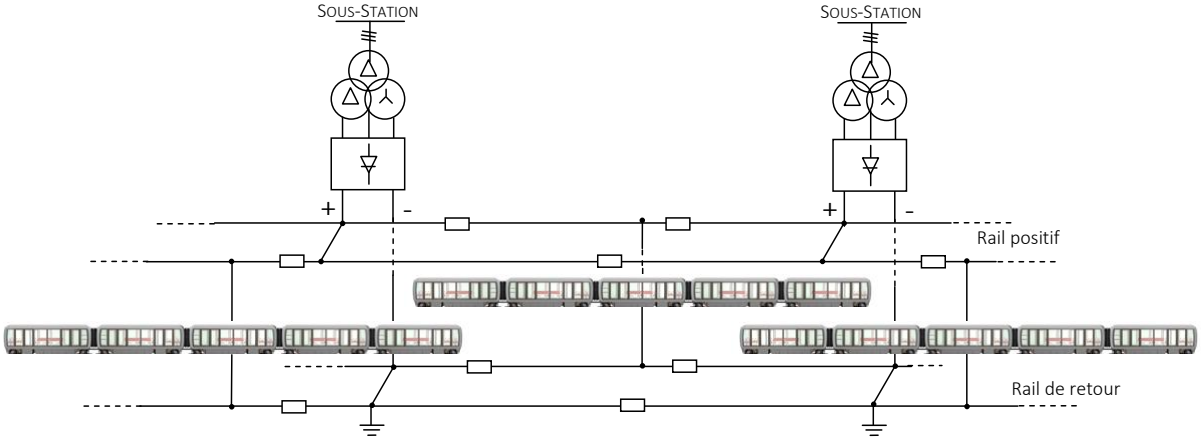


Figure I.5 : Schéma de principe d'une ligne d'alimentation de métros.

$$Int = \frac{t_{boucle}}{N_{rame}} \quad \text{avec} \quad t_{boucle} = t_{trajets} + t_{arrêts} + t_{rebrous} \tag{I.1}$$

Le matériel roulant – L'élément essentiel d'un système de transport est le matériel roulant. Il déplace les passagers entre les stations. La traction est assurée par des dispositifs réversibles en puissance composés de machines électriques alimentées par une source distribuée le long de la ligne via des convertisseurs statiques [SAB 98], [CHA 04]. Lors du démarrage, les rames absorbent une énergie importante afin de vaincre l'inertie du véhicule et le mettre en mouvement (Figure I.6). Cette énergie est accumulée sous forme mécanique par le châssis de la rame. Elle peut être rendue, sous forme électrique, sur la source distribuée lors du freinage grâce à la réversibilité des dispositifs de traction. Afin d'accroitre l'efficacité énergétique, le freinage électrique est donc privilégié. Néanmoins, des freins mécaniques ou rhéostatiques sont prévus à bord en complément, et par sécurité. Vu de la distribution d'énergie, la rame se comporte donc comme un consommateur en traction, et comme un potentiel producteur en freinage.

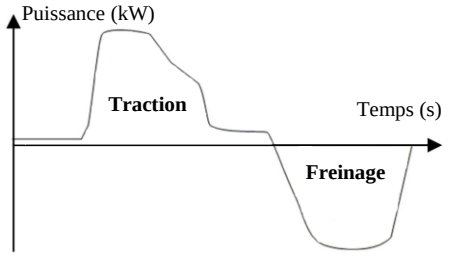


Figure I.6 : Profil de puissance d'une rame de métro sur un cycle de vitesse.

La distribution d'énergie – La distribution d'énergie est réalisée le long de la ligne par des rails de contact (au sol) ou des Lignes Aériennes de Contact (LAC) qui permettent les transferts d'énergie. Dans le cas des rails, l'isolation avec le sol doit être assurée afin d'éviter les courants vagabonds [SEI 11]. De plus, différents niveaux de tension existent et sont référencés par la norme EN 50163 (CEI 60850) [COU 09], [CHY 12]. Généralement, une tension continue comprise entre 600 et 750 V alimente les métros légers et les tramways [MUL 12]. Elle vaut entre 1 500 et 3 000 V pour les métros lourds. Les rames captent l'énergie grâce à des frotteurs (au sol) ou des pantographes (en aérien).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Les stations d'alimentation – Aussi appelées Poste de Redressement (PR) en raison de leur rôle de redressement de la tension, les sous-stations sont l'interface entre le réseau triphasé alternatif et la distribution en continu. Elles sont réparties le long de la ligne en fonction des exigences d'exploitation, mais aussi des contraintes d'implantation liées à l'espace urbain. La distance entre chaque PR est à mettre en adéquation avec la tension minimale acceptée (en raison des chutes de tension) [MOR 05], [SEI 11]. Toutefois, des solutions existent afin de limiter ces chutes de tension (cf. § 1.2.b) [LAD 15]. Classiquement, les PR sont composés de 2 ponts redresseurs, en série ou parallèle, alimentés par un transformateur à 2 enroulements secondaires déphasés de 30° électriques (alimentation dodécaphasée). L'utilisation d'un tel dispositif repousse les premiers harmoniques de courant au onzième rang sur le réseau triphasé alternatif, et limite ainsi les besoins en filtrage [NGU 10], [LAD 14]. Les PR sont non-réversibles dans la plupart des cas.

Problématiques énergétiques

Efficacité énergétique – Le rendement énergétique est un point aujourd'hui crucial du développement de ces systèmes. La nature non-réversible des PR ne permet pas une réinjection systématique de l'énergie de freinage sur le réseau d'alimentation. En revanche, cette énergie peut être réutilisée, toute ou partie, directement au sein de la ligne par d'autres rames. La notion de réceptivité est alors couramment utilisée afin de décrire la capacité du système à réutiliser l'énergie générée par les véhicules en freinage. Globalement, si la puissance totale requise par les rames en traction est supérieure à la puissance totale délivrée par les rames en freinage (aux pertes près), alors la réceptivité est acquise. Dans le cas contraire, elle est faible ou inexistante. La réceptivité est naturellement limitée en raison de la topologie d'alimentation du système, et dépend des conditions d'exploitation (densité du trafic, intervalles, etc.) et de la taille de la ligne. En cas de mauvaise réceptivité, l'énergie non-récupérable est dissipée dans des freins mécaniques ou rhéostatiques, réduisant alors l'efficacité énergétique globale de la ligne. L'énergie potentiellement récupérable est estimée à 30 ou 40 % de l'énergie totale absorbée [ADI 98], [BAR 08a], [DOM 12], [IAN 12].

Maintient du plan de tension – Les équipements de traction sont prévus pour fonctionner sur une certaine plage de tension [SEI 11]. La tension est à mettre en adéquation avec la réceptivité de la ligne. Lors des phases de traction, la puissance est fournie par les stations d'alimentation ou part des rames en freinage. Un courant circule alors dans la distribution en induisant des chutes de tension. Celles-ci doivent être limitées afin de respecter la tension minimale imposée. Cela se fait lors du dimensionnement, en disposant de manière appropriée les PR, ou encore en introduisant des feeders (cf. § I.2.b) [MOR 05], [VIA 10], [LAD 15]. En cas de dépassement du seuil minimal de tension les performances du véhicule sont réduites [MIE 04], [COU 09]. Pendant le freinage, les machines électriques sont utilisées en génératrice afin d'améliorer la récupération énergétique au freinage. Cependant, le manque de réceptivité peut être à l'origine d'une élévation brusque de la tension des rails. Dans ce cas, la totalité de l'énergie de freinage renvoyée sur les condensateurs (bus continus du matériel roulant) ne peut pas être évacuée sur le réseau alternatif. Elle doit donc être dissipée. En cas d'atteinte du seuil maximal de tension, une partie de l'énergie de freinage est déviée vers un freinage rhéostatique ou mécanique [SEI 11], [MUL 12]. Cela a pour conséquence de réduire le courant renvoyé sur la ligne et de stabiliser la tension à sa valeur maximale. Néanmoins, dans ce cas l'énergie cinétique accumulée par les rames est perdue, puisque dissipée sous forme de chaleur.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Appels de puissance – Les puissances absorbées aux niveaux des stations d'alimentation sont composées de pics importants en raison des profils de puissance de la traction (cf. Figure I.6). Ces pics constituent une problématique importante et sont très coûteux en conduisant à surdimensionner le sous-système d'alimentation (sous-stations, rails, LAC, etc.). De plus, ils ont également un impact majorant sur le contrat de livraison auprès du gestionnaire de transport ou de distribution d'énergie (RTE ou ERDF en France) et peuvent être à l'origine de surcoûts d'exploitation dus à des pénalités [RAI 12], [LAD 14]. L'écrêtage de ces pics permettrait un dimensionnement à la baisse du sous-système d'alimentation, mais aussi du contrat de livraison.

Autonomie énergétique – L'autonomie du matériel roulant peut être demandée dans certains cas. Par exemple, la traversée de TCSP dans certains quartiers classés patrimoine historique peut impliquer une alimentation autonome du véhicule sur une distance imposée.

Certaines solutions, telles que le stockage énergétique, permettent de résoudre ces problématiques tout en améliorant la réceptivité de la ligne. De nombreuses études sont menées sur cette thématique depuis quelques dizaines d'années. De plus, l'aspect énergétique n'était jusqu'à présent que peu abordé dans les appels d'offre des systèmes ferroviaires. Il entre aujourd'hui pleinement en compte et les constructeurs doivent dorénavant s'engager sur une consommation énergétique au kilomètre parcouru.

I.2.b – Nouvelles structures d'alimentation et gestions d'un carrousel

Différentes solutions existent déjà ou sont en cours d'études pour répondre aux problématiques précédentes. Néanmoins, bien qu'en forte progression, elles sont peu répandues. Certaines sont intrusives et nécessitent une modification de la structure du système d'origine. D'autres sont proposées sans modification. Cette partie présente certaines des solutions envisagées.

Ajustement du pilotage des rames

L'ajustement des marches types des rames vise à privilégier la récupération d'énergie lors du freinage (Figure I.7) [KHM 00], [LUK 01]. Il existe certains paramètres d'exploitation (heures d'injection, intervalles, temps d'arrêt, etc.) plus propices aux échanges énergétiques [VIA 12], [YAN 13], [YAN 14]. Cette solution vise à synchroniser les phases de traction et de freinage des différents trains (Figure I.8) [LIU 03], [LU 14], [SU 14]. Elle est relativement bien connue des exploitants, mais difficile à maitriser. En effet, une variation d'intervalle de quelques secondes peut induire une forte diminution de la réceptivité. Aujourd'hui ce réglage se fait par des retours d'expérience de manière heuristique. Cependant plusieurs études se penchent sur une optimisation en temps réel de ces paramètres [KE 09], [SHE 11], [GU 14], [YIN 14], [LES 14]. Cette solution reste tout de même limitée en cas de faible densité de trafic et dépend de la distance entre véhicules.

La Figure I.9 illustre cet aspect en montrant, sur une échelle de 0 à 100, l'énergie consommée par véhicule, dans le cas d'une ligne sans perte. Le maximum correspond à l'énergie consommée par un véhicule lorsqu'aucune récupération au freinage n'est effectuée. Ces échanges dépendent du décalage entre les trains (intervalle) et de la densité du trafic (nombre de trains en ligne).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

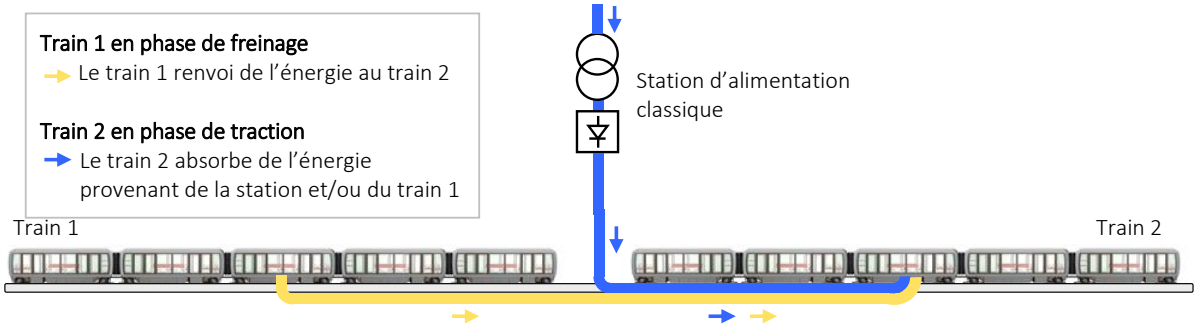


Figure I.7 : Principe de l'échange d'énergie entre plusieurs trains.

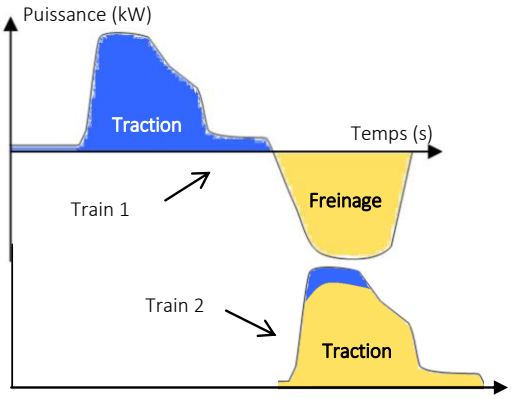


Figure I.8 : Principe de synchronisation des phases de traction et de freinage.

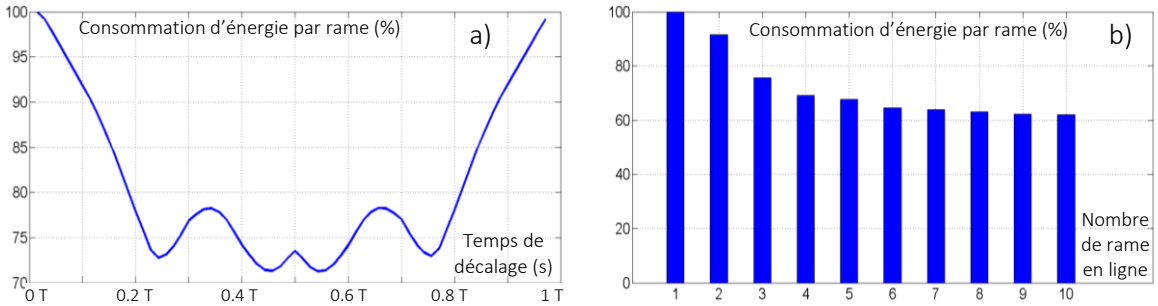


Figure I.9 : Consommation d'énergie en fonction : a) du décalage des trains (cas avec 3 trains), b) du nombre de trains en ligne (cas avec un décalage de 0,2 T).

La Figure I.9.a montre, pour un cas de 3 trains en service, l'influence sur l'énergie consommée du décalage de l'injection des trains. L'axe des abscisses correspond au décalage temporel de l'injection des véhicules, avec T la durée d'une inter-station. Si le premier train est injecté à $t = X_1$, alors le second est mis en circulation à $t = X_1 + x.T$, où x est compris entre 0 et 1. Le troisième train est quant à lui injecté à $t = X_1 + 2.x.T$. Dans ce cas, certains intervalles permettent une réduction de la consommation d'énergie d'environ 28 %. La Figure I.9.b montre, pour un intervalle de 0,2 T, l'influence du nombre de véhicules circulant sur la ligne. L'augmentation du nombre de trains conduit à une diminution de la consommation énergétique par train. Cela traduit une augmentation de la réceptivité de la ligne et permet de réduire la consommation d'énergie de 38 % lorsque le nombre de trains est supérieur à 7. Néanmoins, la prise en compte des pertes dans le sous-système d'alimentation ajoute un troisième aspect qui impacte la récupération potentielle d'énergie : la distance séparant les véhicules. Deux véhicules parfaitement synchronisés ne pourront donc pas forcement s'échanger d'énergie si la distance les séparant devient trop importante.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Diminution de la résistivité locale du sous-système d'alimentation

La diminution de la résistivité locale du sous-système d'alimentation vise à réduire les pertes en ligne (Figure I.10). Par exemple, des feeders sont fréquemment ajoutés le longs des rails ou LAC de manière à réduire la résistivité locale en proposant un « chemin » complémentaire aux courants [SEI 11], [LAD 15]. Cela réduit la résistance équivalente des rails en augmentant la section apparente des conducteurs [MUL 12]. Une autre solution consiste à mailler la distribution en connectant en parallèle les rails du même potentiel des 2 directions (Figure I.10) [ALL 08]. Cette technique est souvent mise en œuvre sur les lignes de type Val (Véhicule Automatique Léger) avec une récurrence de 200 ou 300 m. De plus, ce dispositif facilite les échanges d'énergie entre véhicules de directions opposées, et améliore la récupération au freinage. Il aide notamment, tout comme les feeders, au maintient du plan de tension en diminuant la résistivité équivalente, et donc les chutes de tension.

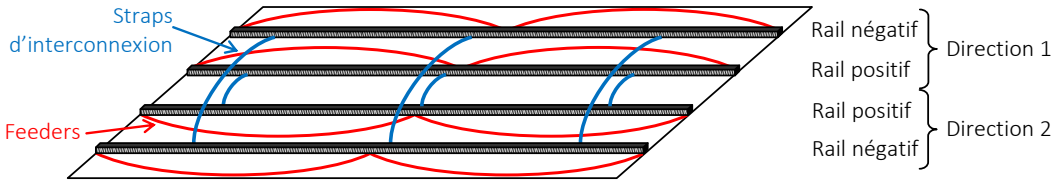


Figure I.10 : Maillage du système de distribution : ajout de feeders et/ou de straps d'interconnexion des voies.

Ce dernier aspect est illustré par la Figure I.11. Celle-ci montre la tension en fonction de la récurrence des straps, dans le cas d'un train circulant entre 2 sous-stations séparées de 5 km. La résistance linéique des rails est considérée de 22 µΩ/m et la résistance des straps est négligée dans cet exemple. Le maintient de la tension est d'autant plus assuré qu'il y a de straps entre les rails. Dans le meilleur des cas, la résistivité peut être divisée par 2. Néanmoins, le coût d'installation est élevé en raison de l'ajout de conducteurs supplémentaires.

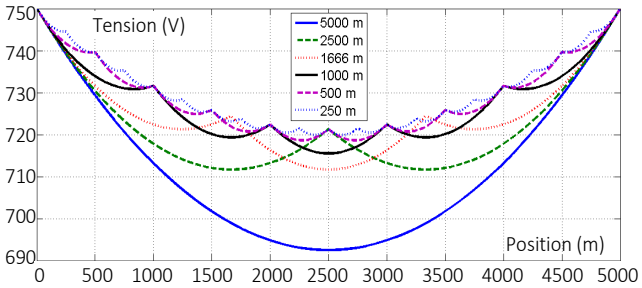


Figure I.11 : Tension des rails en fonction de la récurrence des straps d'interconnexions.

Intégration des sous-systèmes de stockage d'énergie

Les Sous-systèmes de Stockage d'Energie (SSE) (supercondensateurs, batteries, systèmes inertiels, etc.) sont une solution prometteuse en plein essor dans le secteur des transports (ferroviaire, automobile, etc.) [AKL 08], [CHA 10], [ALL 10b], [JAA 13]. Dans le ferroviaire électrique, il existe différentes possibilités d'intégration de ces stockeurs [ADI 98], [GUN 05], [DOM 12].

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Intégration de SSE embarqués – La solution la plus couramment utilisée consiste à introduire des SSE dans la chaine de traction du matériel roulant [DES 08], [BAR 08a], [IAN 12], [LAF 13], [SHE 13], [WAN 14]. Celui-ci possède alors une alimentation mixte composée de rails d'alimentation et de SSE (Figure I.12.a). Ces derniers jouent un rôle de tampons énergétiques pour accroitre la récupération au freinage et lisser la puissance appelée. Ils aident ainsi au maintien du plan de tension. De plus, grâce aux SSE, les véhicules peuvent être autonomes pour traverser certains quartiers, limitant ainsi l'usage de caténaire et l'impact visuel. Parmi les systèmes existants on peut citer le tramway CITADIS d'Alstom qui intègre un volant d'inertie à Rotterdam (Pays-Bas) et des batteries Ni-MH à Nice (France) [DUG 07]. Un autre exemple est le Mitrac Energy Saver de Bombardier, avec des supercondensateurs à Mannheim (Allemagne) [STE 07].

Cette solution s'avère efficace car elle se situe au plus proche du consommateur. Néanmoins, elle est relativement couteuse en raison des équipements supplémentaires de l'ensemble des véhicules. De plus, viennent s'ajouter les problèmes de qualification, de sécurité, d'emplacement disponible à bord, et de masse supplémentaire.

Intégration de SSE stationnaires – L'installation stationnaire plutôt qu'embarquée (cf. Figure I.12.b) permet de réduire le coût d'investissement tout en profitant des avantages prodigués par les SSE. L'alimentation mixte des véhicules se fait alors directement par un couplage des SSE avec la distribution commune d'énergie [RUF 04], [BAR 08b], [BAR 12], [CIC 14], [GEE 15]. Cette solution reste moins efficace que le stockage embarqué puisque les SSE sont déportés, et donc plus éloignés du consommateur. Des pertes plus importantes sont donc à prévoir (dans les rails par exemple). En revanche, l'implantation est nettement plus aisée. On peut citer par exemple un projet développé à Londres par l'entreprise Urenco Power Technologies sur un réseau de tramway couplé à un volant d'inertie. Le même type de sous-système a récemment été installé sur le métro de Rennes.

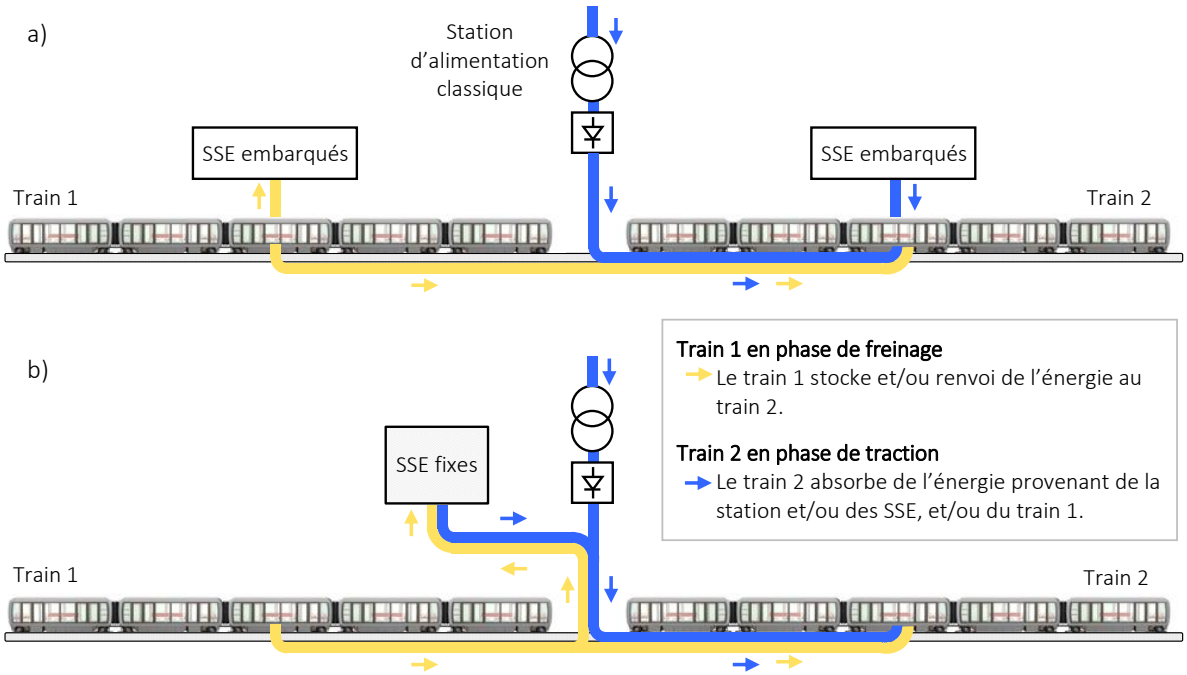


Figure I.12 : Principe de l'intégration de SSE : a) embarqués, b) stationnaires.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Alimentation par biberonnage – Un troisième type d'alimentation mixte consiste à embarquer des SSE dans le véhicule, et d'en implanter d'autres en stations (Figure I.13). Ainsi, entre 2 stations, le véhicule est totalement autonome. La distribution classique n'intervient plus dans l'alimentation du véhicule, limitant alors les pertes dans les rails et l'entretien. Son retrait peut donc se faire totalement ou partiellement. En revanche, les SSE embarqués doivent être dimensionnés pour assurer la distance à parcourir entre les stations. Pour cela, différentes technologies peuvent être associées (ex : batteries et supercondensateurs). En station, la distribution d'énergie, couplée aux SSE, permet de recharger les SSE embarqués pendant la durée d'arrêt en station (quelques dizaines de secondes). Le cycle se reproduit ainsi à chaque station. On parle d'alimentation par biberonnage [RUF 03]. Deux projets avec supercondensateurs peuvent être cités. Le premier concerne une application tramway sans caténaire développé par Bombardier. Le second est une application métro automatique sans rails d'alimentation développée par Siemens : le NéoVal [ALL 10d].

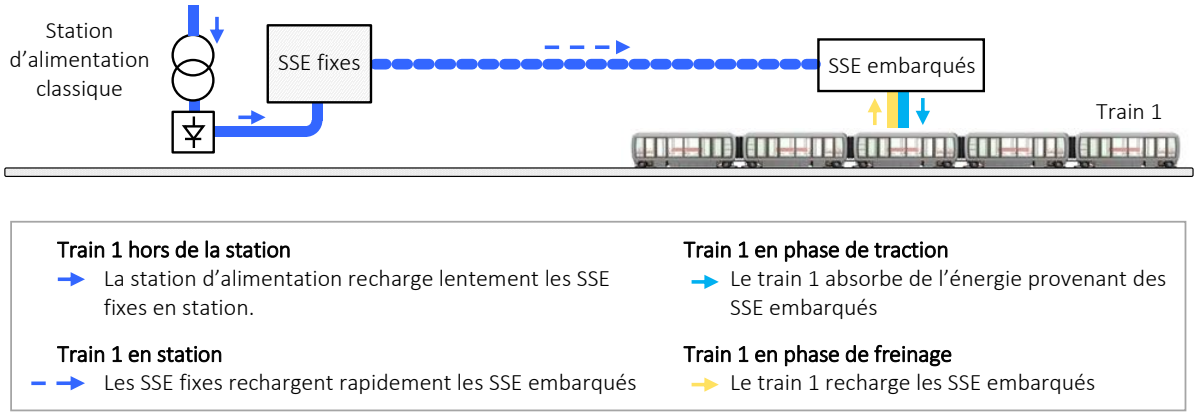


Figure I.13 : Principe de l'alimentation par biberonnage.

Intégration de stations d'alimentations réversibles

Les stations d'alimentation réversibles permettent également de réduire l'énergie consommée [TZE 98], [COR 10], [BAR 12]. Dans ce cas, l'énergie libérée au freinage est directement réinjectée sur le réseau d'alimentation HT. Cette solution est en général réalisée en disposant, en parallèle de la sous-station classique, un onduleur commandable (Figure I.14). En revanche, contrairement aux SSE, elle ne permet pas la stabilisation du plan de tension, ou encore l'écrêtage de la puissance. Elle peut donc être couplée avec des SSE en station [RUF 04].

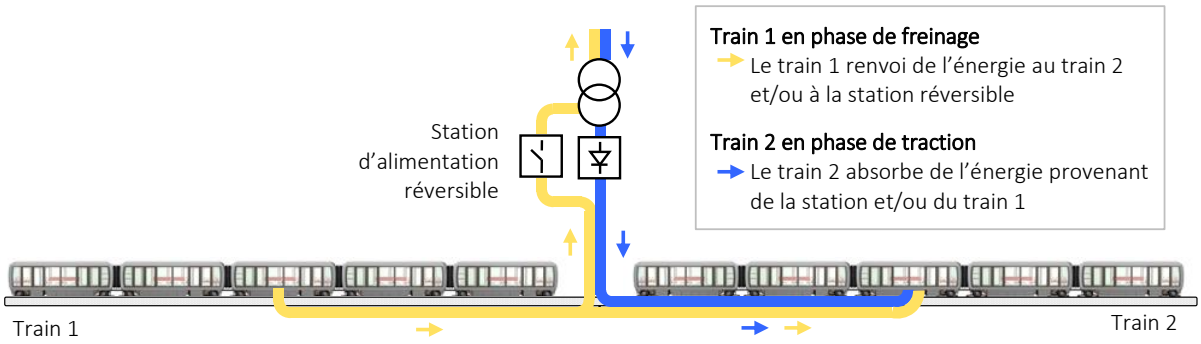


Figure I.14 : Principe de l'intégration de station d'alimentation réversible.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Bilan des solutions envisagées

Ces solutions peuvent éventuellement être couplées et permettraient une meilleure gestion des flux d'énergie au sein de la ligne. De plus, d'autres axes d'amélioration existent également tels que l'utilisation de composants plus économes en énergie, l'amélioration de la gestion énergétique, ou encore du pilotage. Ils impacteraient alors, selon les cas, directement la distribution actuelle des lignes, tout en réduisant la consommation. Ils pourraient ainsi remettre en question les straps d'interconnexion/feeders (ou leur récurrence), un redimensionnement à la baisse des PR (en nombre et/ou en puissance) et du sous-système d'alimentation, ainsi qu'une désélectrification des zones de garage et ateliers (meilleure sécurité pour le personnel). Néanmoins, malgré tous ces avantages, l'installation de tels sous-systèmes induit des surcoûts. Il est donc impératif d'optimiser leur dimensionnement afin d'avoir un compromis entre les coûts d'installation et de fonctionnement. Des études préliminaires sont donc nécessaires, et la simulation numérique devient alors indispensable.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

I.3 – La simulation numérique : une aide à la décision

Le développement de TCSP moins énergivore implique des études complexes qui nécessitent des outils de simulation performants. Ces deniers doivent prendre en compte l'ensemble des problématiques et prédire le fonctionnement du système. Une comparaison des prédictions de différents scénarios aide donc à dimensionner le système. De la même façon, les solutions de réduction de la consommation d'énergie peuvent être testées préalablement en simulation.

Cependant, la complexité du système rend la création d'un simulateur délicate et implique une bonne connaissance de son fonctionnement. Les difficultés liées à la modélisation proviennent en particulier des couplages forts entre chaque sous-système. Une réelle approche systémique est donc requise afin d'étudier l'ensemble des sous-systèmes simultanément, plutôt qu'indépendamment (approche cartésienne). De plus, le caractère variable de la structure de ces systèmes, en raison du mouvement des trains, implique d'avoir un modèle évolutif et flexible. Enfin, la forte non-linéarité des stations d'alimentation non-réversibles induit des changements de causalité au sein de la ligne. L'étude de ces causalités est primordiale pour bien comprendre le fonctionnement du système.

Le développement d'un programme de simulation d'une ligne ferroviaire, tenant compte des divers éléments ainsi que des différentes problématiques, reste donc complexe, non seulement pour la prise en compte de l'ensemble des éléments, mais également pour la conservation d'un temps de simulation compatible à son étude énergétique. Il existe par ailleurs un nombre important de logiciels propriétaires de simulation de lignes ferroviaires (Sytras Sidytrac de Siemens, Elbas-Tools de Elbas, SimAlim d'Egis Rail, Esmeralda de la SNCF, ou encore ECOtranz de Bombardier). Malheureusement, ces logiciels sont difficilement accessibles en raison de confidentialités. Néanmoins, plusieurs travaux permettent de comprendre les méthodes, modèles, et approches habituellement utilisés.

Cette partie présente différents modèles et approches de simulation possibles. Il est primordial de bien saisir les différences et point communs, ainsi que les avantages et inconvénients de chacun(e). Différents termes sont utilisés dans la littérature pour qualifier ces méthodes et approches. Une première sous-partie concerne donc les aspects généraux de la simulation. Une seconde se focalise sur des méthodes plus spécifiquement liées au ferroviaire.

I.3.a – Du système réel à la simulation numérique

Plusieurs étapes (modélisation, représentation et simulation) sont nécessaires pour développer un programme de simulation (Figure I.15) [BOU 12]. Chaque étape implique des choix qui peuvent impacter de manière significative les résultats. Bien qu'elle influe sur les méthodes de résolution numérique à utiliser, l'étape de représentation du modèle est souvent implicite.

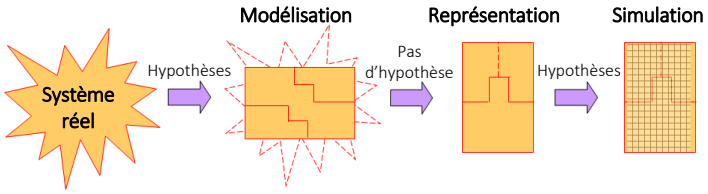


Figure I.15 : Etapes de développement d'un programme de simulation.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Modélisation du système

Un modèle est une description, souvent mathématique, du comportement du système définie selon des hypothèses associées à un objectif. Sa limite de validité est définie par ces hypothèses. Il existe plusieurs modèles pour un seul et même système [GAO 07], [CHE 10]. Ces concepts ont déjà été appliqués à la modélisation de sous-systèmes de matériel roulant [HOR 11].

Modèle dynamique – Un modèle dynamique prend en compte les états transitoires et permanents d'un système. Il permet donc d'observer le comportement détaillé de ce dernier. En revanche, cela implique une discrétisation temporelle importante de la simulation (faible pas de calcul), qui peut conduire à des temps de simulation relativement longs.

Modèle statique – Un modèle statique ne considère que les états permanents du système et néglige les états transitoires. Il permet une vision globale du comportement, induisant une simulation rapide, mais générant des erreurs plus importantes dues à une modélisation plus réduite.

Modèle quasi-statique – Un modèle intermédiaire quasi-statique ajoute au modèle statique une constante de temps principale [GUZ 99]. Celle-ci introduit l'observation d'un comportement intermédiaire apportant une précision médiane, plus ou moins éloignée de celle du modèle dynamique en fonction de la dynamique considérée.

Différents modèles seront traités dans le chapitre II [MAY 13], [MAY 14a], [MAY 16]. Un « bon » modèle peut être défini par sa capacité à décrire le comportement que l'on souhaite observer en conservant un temps de simulation convenable pour une précision donnée. Un modèle trop complexe (ou précis) conduit à une bonne précision mais à une simulation trop longue. Un modèle trop simple (ou imprécis) réduit fortement le temps de simulation mais génère des erreurs plus importantes. Le choix du modèle dépend donc du compromis souhaité entre précision et temps de simulation.

Représentation des modèles

Une représentation est une organisation d'un modèle permettant de mettre en exergue certaines propriétés du système [BOU 12]. Cette étape ne nécessite aucune hypothèse par rapport à celle de modélisation. Elle est utile lorsque le système est complexe et composé d'une multitude d'éléments. Il est parfois difficile de conserver une cohérence dans la construction et l'interconnexion des différents modèles d'un système global. Pour conserver cette cohérence et limiter les erreurs, la représentation des modèles d'un système peut être effectuée en utilisant des formalismes. Il en existe des mathématiques (représentation d'état) ou graphiques (schéma bloc, Bond Graph [PAY 61], [DAU 00], [ROB 12], Graphe Informationnel Causal [HAU 96], [HAU 04], Représentation Energétique Macroscopique (REM) [BOU 00], [BOU 12], [LHO 14], Graphe de Puissance Orienté [ZAN 96], etc.).

Représentation structurelle – Une représentation structurelle ne nécessite aucune analyse préliminaire à sa mise en œuvre puisqu'elle s'apparente à une association de composants (et de modèles). Elle est donc rapide à mettre en œuvre et est naturellement utilisée pour la conception des systèmes. Avec ce type de représentation, les différents composants sont liés les uns aux autres par des éléments physiques (arbre mécanique, câble électrique, etc.).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Représentation fonctionnelle – Ce type de représentation se base sur l'organisation des fonctions d'un système mises en jeu. Certains éléments physiques peuvent être regroupés s'ils ont une fonction commune [BOU 12]. A l'inverse, un élément peut être décomposé en plusieurs fonctions. Ces fonctions sont liées par des variables (ex : variables d'action et de réaction avec la REM) avec ce type de représentations. Ces dernières sont parfois plus complexes à comprendre puisqu'elles peuvent s'éloigner de la structure physique du système réel. Néanmoins, elles facilitent son analyse et la déduction de structure de commande puisque la priorité est mise sur les fonctions du système.

L'utilisation de ces représentations et formalismes induit l'usage de causalités.

Causalité intégrale – La causalité intégrale sous-entend la notion de non-discontinuité de l'énergie et est considérée comme la causalité physique qui lie la cause à l'effet [IWA 94], [HAU 96]. Partant du postulat que le temps s'écoule du passé vers le futur (l'effet est suivi de la cause), un système physique se décrit en exprimant les effets en fonction des causes. Cette fonction conduit nécessairement à une formulation intégrale [IWA 94], [HAU 96]. L'effet succède alors systématique la cause qui lui a donnée naissance avec un certain temps de retard qui dépend du système considéré. Le système est donc traduit de manière causale, en accord avec l'observation physique.

Causalité dérivée – A l'inverse, la causalité dérivée autorise la discontinuité de l'énergie en exprimant la cause en fonction de l'effet. Cela induit une difficulté du modèle à tenir compte du retard naturel imposé par la variation d'énergie dans le système. Le système est traduit de façon non-causale, en désaccord avec l'observation physique (l'effet précède la cause). En effet, la définition mathématique de la dérivée (I.2) montre que le futur (effet) ($t_0 + \Delta T$) nécessite d'être connu à l'avance afin de calculer le présent (cause) (t_0). Selon le point de vue mathématique, le résultat obtenu est identique quelque soit la causalité puisque le modèle est le même. Néanmoins, cela peut avoir une conséquence importante d'un point de vue de l'automatique ou de la commande du système. De plus, de telles causalités nécessitent l'utilisation de solveurs numériques spécifiques.

$$\frac{dx(t_0)}{dt} = \lim_{\substack{\Delta T \to 0 \\ \Delta T \neq 0}} \frac{x(t_0 + \Delta T) - x(t_0)}{\Delta T} \tag{I.2}$$

L'exemple d'une bobine est traité (Figure I.16). Le modèle choisi considère une inductance parfaite L_1 et sa résistance interne R_1. Dans une bobine, l'évolution du courant (effet) est causée par la différence de potentiels entre ses bornes (cause). Ainsi, le respect de la causalité implique de déterminer le courant en fonction de la tension par une formulation intégrale (I.3). A l'inverse, la causalité dérivée cherche la cause (tension) de l'évolution de ce courant (I.4). Dans ce cas, la tension $v_2(t)$ est considérée connue dans l'exemple. La cause recherchée est alors la tension $v_1(t)$. Néanmoins, l'évolution future du courant nécessite donc d'être connue sur toute la plage temporelle de l'étude.

$$i(t) = \frac{1}{L_1} \int [v_1(t) - v_2(t) - R_1 i(t)] dt \tag{I.3}$$

$$v_1(t) = v_2(t) + R_1 i(t) + L_1 \frac{d}{dt} i(t) \tag{I.4}$$

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

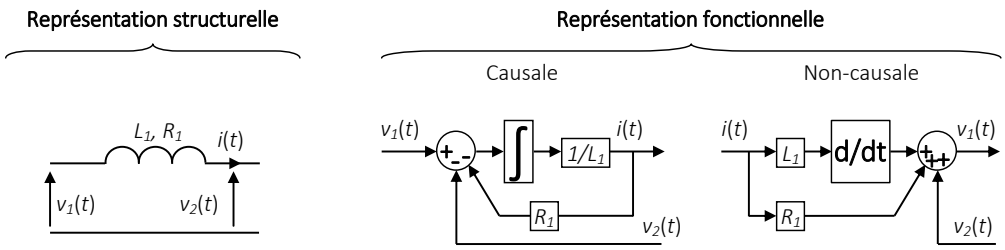


Figure I.16 : Exemple de représentations structurelles et fonctionnelles d'une bobine.

Par ailleurs, la représentation fonctionnelle de plusieurs composants peut conduire à des conflits d'association lors de l'interconnexion des différents modèles. Ces conflits apparaissent lorsque 2 modèles connectés ensemble présentent les mêmes entrées et sorties. Par exemple, dans le cas d'une représentation fonctionnelle causale, un conflit existe lors de l'association de 2 bobines en séries puisque les 2 modèles veulent imposer le courant commun traversant les bobines (Figure I.17). Ce courant constitue pourtant la variable d'état (énergétique) commune du système.

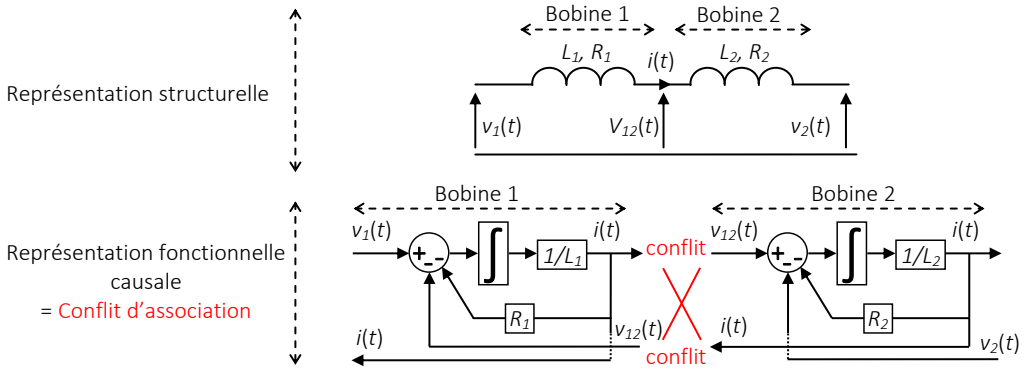


Figure I.17 : Exemple de 2 bobines connectées en série conduisant à un problème d'association.

La résolution de ces conflits peut être réalisée de différentes manières. Par exemple, dans une approche causale (utilisée par la suite), la connexion des modèles ne peut pas être effectuée en conservant la structure du système. En effet, cette approche impose la variable énergétique comme variable de sortie (ici le courant commun). Dans ce cas, le conflit est résolu en définissant une inductance équivalente aux 2 bobines initiales (I.5) (Figure I.18). Le système initial est alors représenté sans être modifié (sans ajout ni simplification d'éléments) en respectant sa causalité physique.

$$i(t)=\frac{1}{L_1+L_2}\int\left[v_1(t)-v_2(t)-(R_1+R_2)i(t)\right]dt \qquad \text{(I.5)}$$

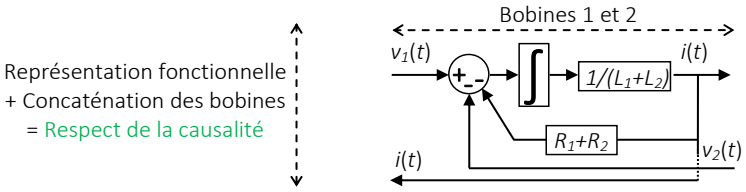


Figure I.18 : Résolution du problème d'association par concaténation des 2 bobines.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

D'autres solutions existent. Il est possible de négliger certains éléments (ex : une des 2 bobines) ou encore d'introduire des composants fictifs supplémentaires (ex : un condensateur entre les 2 bobines). Dans ce cas, les conflits d'association sont résolus en accord avec le principe de causalité, mais en modifiant le système réel. Une autre solution consiste à décrire certains modèles de façon non-causale. Le conflit est alors résolu au détriment du principe de causalité. Cette solution est souvent mise en œuvre dans les logiciels structurels. Contrairement aux autres, elle permet une résolution du conflit en respectant la structure physique du système, sans modification de ce dernier.

Les avantages de la représentation structurelle sont donc de proposer une représentation rapide d'un système. En revanche, elle ne permet pas l'étude de ses causalités, ce qui peut conduire à de mauvaises interprétations des phénomènes physiques. De plus, ce type de représentation est particulièrement inadapté à la déduction de structure de commande et de gestions énergétiques.

A l'inverse, la représentation fonctionnelle présente les avantages de représenter le système suivant son fonctionnement physique. De plus, certains formalismes sont adaptés à la déduction de commande des systèmes en étant associés à des méthodologies de déduction de structure de commande, la plupart basées sur une inversion de la représentation (commande par inversion, effet miroir, etc.) [HAU 04], [BOU 03a]. En revanche, ces représentations sont plus longues à mettre en œuvre car elles nécessitent une analyse préliminaire visant à identifier les fonctions du système.

Simulation du système

Suite à la modélisation, et éventuellement la représentation d'un système, la simulation numérique peut être réalisée suivant plusieurs approches.

Approche « forward » – Cette approche consiste à simuler un système de la cause vers l'effet, respectant ainsi les flux physiques d'énergie et l'écoulement naturel du temps (du passé vers le futur) [CHE 10], [HOR 12a]. Dans certains cas il est nécessaire de simuler la commande du système afin d'imposer l'effet désiré (référence). Cette approche induit l'avantage de tenir compte de l'ensemble des perturbations (internes ou externes) ainsi que des différentes contraintes du système. Les boucles d'asservissements adaptent alors automatiquement le système aux effets désirés (objectifs de la commande) tout en garantissant les limites physiques du système [BAR 12].

Prenons l'exemple d'une masse M, représentant le châssis d'un véhicule, sur laquelle s'applique une force de résistance à l'avancement $F_{res}(t)$ (Figure I.19). L'approche « forward » simule le système de la cause vers l'effet en exprimant l'équation fondamentale de la dynamique en causalité intégrale pour calculer la vitesse du véhicule $v_M(t)$ (effet) en fonction de la force de traction $F_{trac}(t)$ (cause) (I.6). Néanmoins, l'objectif étant d'imposer $v_M(t)$, un asservissement de vitesse est introduit pour calculer la force de traction de référence $F_{trac\text{-}ref}(t)$ (I.7).

$$v_M(t) = \frac{1}{M}\int \left[F_{trac}(t) - F_{res}(t)\right]dt \tag{I.6}$$

$$F_{trac-ref}(t) = C_v\left[v_{M-ref}(t) - v_M(t)\right] + F_{res}(t) \tag{I.7}$$

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

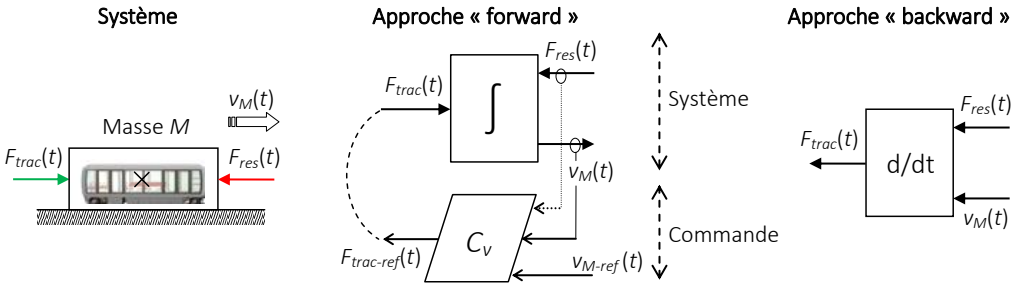


Figure I.19 : Principe des approches « forward » et « backward » sur l'exemple d'un châssis de véhicule.

Cette force est ensuite appliquée sur le système via l'utilisation de convertisseurs d'énergie (machine électrique, moteur thermique, etc.). Elle peut être limitée en fonction des contraintes du système. Ainsi, la commande adapte automatiquement $F_{trac-ref}(t)$ si la vitesse demandée n'est pas physiquement réalisable. En conséquence, la vitesse réelle du système est impactée et s'adapte au cas étudié. L'approche « forward » permet donc la simulation d'un système en respectant ses flux physiques d'énergie. De plus, elle offre une bonne flexibilité en intégrant la commande du système, ce qui permet le respect systématique des perturbations et limites du système.

Approche « backward » – A l'inverse, l'approche « backward » simule un système de l'effet vers la cause [TRI 04], [CHE 10]. Ainsi, les dynamiques principales sont souvent décrites suivant la causalité dérivée. Cette approche fait abstraction de la commande du système et détermine quelles ont été les causes de l'évolution future du système. Cela implique une connaissance parfaite de l'effet à l'avance et rend impossible la prise en compte des perturbations. D'autre part, les contraintes du système sont supposées respectées. Le cas étudié doit donc scrupuleusement correspondre à un cas physiquement réalisable à défaut d'obtenir des résultats biaisés [BAR 12].

Dans l'exemple du châssis (cf. Figure I.19) l'approche « backward » détermine la force de traction (cause) nécessaire à mouvoir le véhicule avec une vitesse de référence $v_M(t)$ (effet désiré). L'application de l'équation fondamentale de la dynamique en causalité dérivée permet d'obtenir la variable souhaitée (I.8). Cependant, comme démontré par l'équation (I.1), l'ensemble du cycle de vitesse doit être connu à l'avance, nécessitant une connaissance parfaite des effets futurs.

$$F_{trac}(t) = F_{res}(t) + M\frac{d}{dt}v_M(t) \tag{I.8}$$

L'approche « backward » ne nécessite pas de commande, ce qui permet un gain de temps dans le développement de la simulation, comme dans la simulation elle-même. Pour la même raison, elle prend difficilement en compte les perturbations et limites du système. Les résultats obtenus peuvent alors différer de la réalité car l'adéquation entre les paramètres du système (ex : masse), les perturbations (ex : force de résistance), et l'effet imposé (ex : vitesse) n'est pas garantie. Une attention particulière doit alors lui être portée afin d'éviter de simuler un cas non-physique.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

I.3.b – Particularité des programmes de simulation ferroviaires

La complexité et les spécificités du système à modéliser (non-linéaire, non-stationnaire, fortes interactions, etc.), ainsi que les choix effectués au cours des étapes de modélisation, de représentation, et de simulation, conduisent à introduire des méthodes supplémentaires de formulation et de résolution. Ces dernières sont propres à la simulation ferroviaire et se rapprochent, pour certaines, des méthodologies de modélisation des réseaux électriques. Elles permettent de traduire en une relation matricielle le caractère couplé de l'ensemble des sous-systèmes [GOO 94], [ABR 11]. Leur formulation dépend principalement des variables choisies en entrées et sorties. Or, ces dernières sont conditionnées par les choix effectués dans les étapes de modélisation et de représentation. Une des problématiques principales est de considérer la non-linéarité des stations d'alimentation. Des simplifications sur les modèles sont donc souvent effectuées, impactant les causalités et éloignant ainsi le fonctionnement du modèle du comportement physique du système.

Dans ce cas, la plupart des logiciels négligent par exemple les filtres d'entrées des véhicules. Ces derniers sont alors considérés comme des sources parfaites de courant [DES 08], [CHY 10], [VIA 12], [WAN 12], [GEE 15], [ARB 16]. Néanmoins, lorsque la ligne est peu réceptive, l'énergie renvoyée sur cette dernière provoque une élévation brusque de la tension qui active des rhéostats de freinage pour dissiper l'énergie excédentaire. Cela a pour effet de limiter et maintenir la tension des rails à une valeur limite. Pour traduire ce phénomène, certains travaux effectuent une commutation de modèle en considérant le modèle véhicule comme une source de tension constante [CHE 07], [BAR 12], [GEE 15]. Néanmoins, ce changement de nature courant/tension ne représente pas le comportement physique du système et peut impacter négativement les résultats.

D'autre part, les stations d'alimentation sont la majorité du temps modélisées par une source de tension constante (tension moyenne redressée) en série avec une résistance. Cette dernière représente les pertes internes lorsque la sous-station est passante. Lors de son blocage, la valeur de la résistance devient très grande (infinie idéalement) pour représenter la non-réversibilité [CHE 07], [GEE 15]. Cette astuce s'éloigne du comportement physique du système. En effet, l'étude des causalités n'est pas abordée dans cette représentation du système. Afin de traduire plus physiquement la non-linéarité du redresseur non-réversible, certains travaux réalisent une commutation de modèle en imposant une source de courant nul lors du blocage [BAR 12].

La modélisation de ces éléments conditionne les méthodes d'obtention des matrices impédances qui modélisent les rails et interconnectent l'ensemble des sous-systèmes présents sur la ligne (stations d'alimentation, véhicules, etc.). Elles considèrent des tensions ou courants en entrées, et définissent, à un instant donné, les variables inconnues complémentaires.

Méthode d'obtention des matrices impédances

La Méthode Nodale Modifiée (MNA) – La MNA découle d'une représentation structurelle et formule une matrice impédance (ou résistive en statique) en fonction de la topologie de la ligne [HO 75], [ACA 10]. Dans de nombreux travaux, elle est généralement mise en œuvre par des approches non-causales [GOO 94], [FAY 08], [PIR 09], [CHY 10], [VIA 12], [GEE 15], [ARB 16]. La résolution globale des différentes variables est obtenue par inversion de l'équation matricielle (I.9).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

$$\begin{bmatrix} \underline{G} & -\underline{B} \\ \underline{B}^t & \underline{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V} \\ \underline{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{J} \\ \underline{E} \end{bmatrix} \tag{I.9}$$

avec $\underline{G}$ la matrice conductance du système (de dimension n sur n avec n le nombre de nœuds) et $\underline{B}$ la matrice d'incidence des sources de tension (de dimension n sur m avec m le nombre de source de tension). $\underline{B}$ est composée de 0, 1 ou -1 selon la règle suivante : si la borne positive d'une source de tension e est connectée au nœud k, alors l'élément $B_{k,e}$ = 1. Si il s'agit de la borne négative, $B_{k,e}$ = -1. Dans tous les autres cas, il vaut 0. La matrice $\underline{R}$ (de dimension m sur m) fait apparaitre les résistances internes des sources de tension sur la diagonale. Le vecteur $\underline{V}$ correspond aux tensions nodales et le vecteur $\underline{I}$ aux courants traversant les sources de tension. Ils forment à eux 2 le vecteur des inconnues, alors que $\underline{J}$ est le vecteur des sources de courant connus, et $\underline{E}$ regroupe les tensions connues.

Une ligne composée de 2 stations d'alimentation et d'un véhicule est pris pour exemple (Figure I.20). Les modèles considérés sont ceux utilisés classiquement dans la littérature. Lors de la traction du véhicule, la rame est modélisée par une source de courant $i_{trac}(t)$. Dans ce cas, les sous-stations sont passantes. Elles sont modélisées par une source de tension $E_{ssj}(t)$ en série avec une résistance interne R_{ssj}. La MNA permet d'obtenir la relation matricielle (I.10), où l'on compte 3 nœuds. Cette relation exprime les inconnues du système (en gris) en fonction des variables connues (en vert) et de la matrice impédance (en jaune) qui traduit la topologie de la ligne.

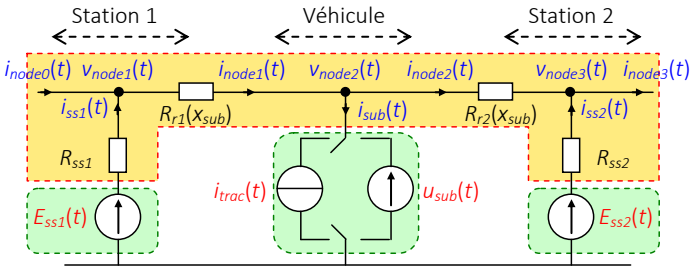


Figure I.20 : Exemple d'application de la MNA.

$$\begin{bmatrix} G_{r1}(x_{sub}) & -G_{r1}(x_{sub}) & 0 & -1 & 0 \\ -G_{r1}(x_{sub}) & G_{r1}(x_{sub})+G_{r2}(x_{sub}) & -G_{r2}(x_{sub}) & 0 & 0 \\ 0 & -G_{r2}(x_{sub}) & G_{r2}(x_{sub}) & 0 & -1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & R_{ss1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & R_{ss2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{node1}(t) \\ v_{node2}(t) \\ v_{node3}(t) \\ \hline i_{ss1}(t) \\ i_{ss2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -i_{trac}(t) \\ 0 \\ \hline E_{ss1}(t) \\ E_{ss2}(t) \end{bmatrix} \tag{I.10}$$

Lors du freinage, le véhicule renvoie un courant négatif qui peut induire un blocage des stations d'alimentation. Ce phénomène est modélisé en imposant une forte valeur de leurs résistances internes $R_{ss1\text{-}\infty}$ et $R_{ss2\text{-}\infty}$. Dans ce cas, la tension aux bornes du véhicule peut devenir trop importante, ce qui dans la réalité active l'utilisation des rhéostats de freinage afin de la limiter. Avec cette méthode, le modèle véhicule commute en source de tension pour tenir compte de ce phénomène. Néanmoins, cette commutation est à dissocier de celle ayant lieu lors du blocage de la sous-station. L'une des 2 commutations n'implique pas forcement la seconde. Elles peuvent intervenir à des instants différents. Finalement, dans le cas où les 2 auraient lieu, on obtient la relation (I.11).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} G_{r1}(x_{sub}) & -G_{r1}(x_{sub}) & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -G_{r1}(x_{sub}) & G_{r1}(x_{sub})+G_{r2}(x_{sub}) & -G_{r2}(x_{sub}) & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -G_{r2}(x_{sub}) & G_{r2}(x_{sub}) & 0 & 0 & -1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & R_{ss1-\infty} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & R_{ss2-\infty} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} v_{node1}(t) \\ v_{node2}(t) \\ v_{node3}(t) \\ \hline i_{ss1}(t) \\ -i_{sub}(t) \\ i_{ss2}(t) \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \hline E_{ss1}(t) \\ u_{sub}(t) \\ E_{ss2}(t) \end{array}\right] \quad \text{(I.11)}$$

Comme évoqué précédemment une autre manière de modéliser le blocage des stations d'alimentation consiste à remplacer son modèle en source de tension par une source de courant nul. Cependant, cette méthode n'est jamais appliquée avec MNA car elle peut conduire à des problèmes d'inversion (et donc de résolution) du système matriciel en rendant la matrice impédance non-inversible. Les trains étant vus comme des sources de courant, plus aucune source de tension ne serait alors présente dans le système lors du blocage de la sous-station. Le système modélisé correspondrait alors à un cas non-physique. De plus, les commutations de modèles sont relativement difficiles à mettre en œuvre en raison des modèles choisis et font souvent appel à des méthodes de résolution particulières (cf. § « méthode de résolution itérative »).

Le choix du modèle à activer n'est par nature pas défini avec cette méthode en raison de la non-systématisation des commutations de modèle et du non-respect des causalités (approche structurelle non-causale). A cela s'ajoute la nécessité de déterminer l'expression matricielle à chaque pas de temps de la simulation pour tenir compte des déplacements des rames sur la ligne qui changent la structure du système et la valeur des résistances des rails. De plus, la structure du sous-système d'alimentation est souvent simplifiée en négligeant les mises en parallèle des voies. Les interactions énergétiques peuvent s'en trouver fortement impactées.

Une méthode similaire – Une méthode semblable est utilisée dans [CHE 07] ainsi que dans une thèse récente [BAR 12]. Tout comme la MNA, cette méthode est basée sur une approche nodale visant à décrire la topologie électrique de la ligne en une relation matricielle de la forme suivante.

$$[\underline{A}][\underline{x}]=[\underline{U}] \quad \text{(I.12)}$$

avec $\underline{A}$ une matrice carrée impédance du système (de dimension $2n+1$ avec n le nombre de nœuds). Elle représente le système en écrivant les lois de Kirchhoff de chaque nœud. $\underline{X}$ est le vecteur des inconnues du système correspondant aux courants et tensions des nœuds. $\underline{U}$ est le vecteur des variables connues. L'inversion de l'équation matricielle permet de déterminer $\underline{X}$.

Avec cette méthode, la station d'alimentation est régie par l'équation (I.13) où $R_{ss\,j}$ correspond à la résistance interne de la sous-station lorsqu'elle est passante et $E_{ss\,j}(t)$ à la tension à vide redressée moyenne. En cas de blocage, la résistance devient très grande $R_{ss\,j\text{-}\infty}$ (proche de l'infinie idéalement).

$$E_{ss\,j}(t)=v_{nodej}(t)+R_{ss\,j}\left[i_{nodej}(t)-i_{nodej-1}(t)\right] \quad \text{(I.13)}$$

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Dans ce cas, le véhicule est modélisé par une source de courant $i_{tracj}(t)$ (I.14). Néanmoins, lorsque la tension du véhicule dépasse le seuil de tension maximale, une commutation de modèle est effectuée afin de représenter le phénomène d'activation des rhéostats de freinage. Le modèle devient une source de tension constante correspondant à la tension maximale (I.15).

$$i_{trac\,j}(t) = i_{nodej-1}(t) - i_{nodej}(t) \tag{I.14}$$

$$u_{subj}(t) = v_{nodej}(t) \tag{I.15}$$

Finalement, une équation commune est utilisée pour lier l'ensemble des sous-systèmes (I.16). Pour une meilleure compréhension, l'exemple considéré pour la MNA est décrit avec cette méthode lorsque les stations d'alimentation sont passantes (I.17), mais aussi lorsqu'elles sont bloquées et que le véhicule est en source de tension (I.18).

$$0 = R_{r\,i}(x) i_{nodej}(t) + v_{nodej+1}(t) - v_{nodej}(t) \tag{I.16}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_{ss1} & 1 & R_{ss1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & R_{r1}(x_{sub}) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & R_{r2}(x_{sub}) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{ss2} & 1 & R_{ss2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{node0}(t) \\ v_{node1}(t) \\ i_{node1}(t) \\ v_{node2}(t) \\ i_{node2}(t) \\ v_{node3}(t) \\ i_{node3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{ss1}(t) \\ 0 \\ i_{trac}(t) \\ 0 \\ E_{ss2}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{I.17}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_{ss1-\infty} & 1 & R_{ss1-\infty} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & R_{r1}(x_{sub}) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & R_{r2}(x_{sub}) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{ss2-\infty} & 1 & R_{ss2-\infty} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{node0}(t) \\ v_{node1}(t) \\ i_{node1}(t) \\ v_{node2}(t) \\ i_{node2}(t) \\ v_{node3}(t) \\ i_{node3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{ss1}(t) \\ 0 \\ u_{sub}(t) \\ 0 \\ E_{ss2}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{I.18}$$

Les inconnues (en gris) peuvent être déterminées par inversion des relations précédentes (I.17) et (I.18) en fonction des sources connues (en vert) et des matrices impédances (en orange). Tout comme la MNA, la détermination de cette relation doit être effectuée à chaque pas de temps puisque la structure du système est variable, tout comme les valeurs des résistances de ligne. Cependant, une particularité de cette méthode concerne les commutations de modèles. Elles interviennent effectivement sur la ligne matricielle du nœud correspondant. Une commutation de ligne permet donc de commuter de modèle comme cela a été fait sur la quatrième ligne correspondant au véhicule (source de courant dans (I.17) et de tension dans (I.18)). Par ailleurs, des travaux introduisent une commutation de source de courant nul pour représenter le blocage des sous-stations [BAR 12]. Ils marquent une tendance tournée vers la commutation de modèles afin de mieux prendre en compte les non-linéarités et les changements de causalité. Il introduit également la prise en compte du bus DC qui semble être un point clé dans la compréhension du fonctionnement du système.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

D'autre part, l'exemple pris pour ces 2 méthodes considère un rail équivalent sans distinction des rails positifs et négatifs. Cela réduit le nombre de nœuds du système, et donc les dimensions de l'expression matricielle sans que le résultat énergétique n'en soit affecté. Si nécessaire, ces méthodes permettent également de modéliser séparément les rails positifs et négatifs afin de visualiser leurs tensions respectives.

Une première comparaison des 2 méthodes montre que la seconde nécessite une matrice de dimension plus importante que la première. De plus, contrairement à la seconde méthode, où les dimensions matricielles sont fixes, les dimensions de la MNA sont variables et dépendent du nombre de sources de tension. La taille de l'expression matricielle peut dans certains cas être considérablement réduite. En revanche, les commutations de modèles sont plus simples à effectuer avec la seconde méthode puisqu'il suffit de commuter une ligne de l'expression matricielle pour changer de modèle. Avec la MNA, plusieurs parties de la relation matricielle sont impactées. Néanmoins, dans les 2 cas, ces méthodes d'obtention des matrices impédances sont couplées avec des méthodes itératives permettant l'activation des « bons » modèles.

Méthode de résolution itérative

La difficulté à prendre en compte les aspects non-linéaires des systèmes ferroviaires, traduite par la nécessité d'utiliser des commutations de modèles, est résolue par l'utilisation de méthodes itératives (Figure I.21) [CAI 95], [CHE 06], [CHE 07], [DES 08], [PIR 09], [GEE 15]. Les modèles initiaux sont donc activés à un instant *t* (courants pour les rames et tensions pour les sous-stations). Les inconnues du système sont ensuite déterminées par l'application de l'une des 2 méthodes nodales. En fonction des résultats, plusieurs itérations sont nécessaires. Les modèles des stations d'alimentation sont commutés si les résultats donnent des courants les traversant négatifs. Les étapes de formulation et de résolutions doivent alors de nouveau être effectuées. De la même manière, des nouvelles itérations sont nécessaires, si les tensions aux bornes des véhicules deviennent trop importantes. Chaque commutation nécessite en fait une nouvelle itération. L'étude des causalités du système réalisée dans cette thèse permettra de résoudre directement cette problématique.

Autres méthodes

D'autres méthodes existent également mais sont peu répandues et apparaissent ponctuellement au gré des besoins des travaux de recherche et des spécialités de leurs auteurs. Elles reposent généralement sur de fortes hypothèses ou simplifications des structures d'alimentation. Par exemple, le simulateur MSim [WAN 12] considère qu'il ne peut y avoir qu'un seul véhicule entre 2 sous-stations. La ligne est alors découpée en tronçons indépendants. Dans ce cas plus aucun échange d'énergie n'est considéré entre véhicules. Les résultats peuvent donc fortement différer de la réalité.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

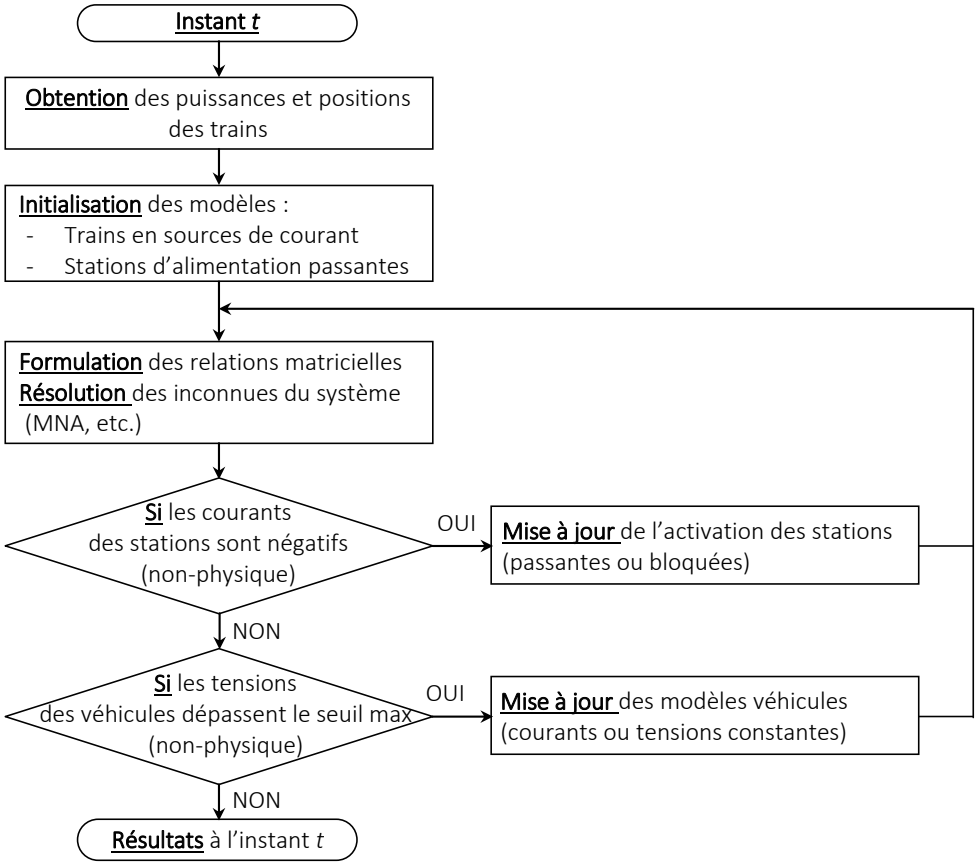


Figure I.21 : Exemple de méthode de résolution itérative.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

I.4 – Objectif et positionnement de la thèse

Comme on peut le constater, il existe de nombreux travaux visant à modéliser des lignes ferroviaires alimentées en continu. Une grande partie est basée sur des approches structurelles utilisant des méthodes de résolution nodales. En revanche, l'absence d'étude sur les causalités conduit à des modèles intuitifs mais s'éloignant parfois du comportement physique du système. Des méthodes itératives sont alors introduites pour palier ce problème. Si ces approches sont efficaces dans les cas classiques, le questionnement sur leur efficacité pour le développement de nouvelles structures d'alimentation (SSE, stations d'alimentation réversibles, etc.) est pleinement justifié, en particulier sur la capacité à prendre en compte les interactions dynamiques des flux d'énergies. On remarque d'ailleurs une tendance des travaux récents à porter une réflexion particulière sur les causes et effets au sein du système [CHE 07], [BAR 12].

I.4.a – Objectif de la thèse

Cette thèse est une collaboration entre le groupe industriel Siemens et le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP) de Lille. L'objectif est de développer un nouveau logiciel de simulation énergétique paramétrable et flexible d'un carrousel de métros prenant en compte l'ensemble des problématiques du système [MAY 15a]. Il doit estimer les gains et consommations d'énergie de différentes structures d'alimentation, en particulier des alimentations innovantes incluant des SSE ou encore des stations d'alimentation réversibles.

I.4.b – Moyens utilisés

Afin de réaliser cet objectif le formalisme REM sera utilisé. Il permettra de mettre en évidence les causalités du système. La REM devrait alors permettre d'aborder le système sous un nouveau regard et d'aboutir à une systématisation de sa modélisation.

La REM a été introduite dans les années 2000 au L2EP [BOU 00], [BOU 03b]. Cette description graphique est basée sur une approche systémique et cognitive qui mène à une approche de simulation « forward » avec une utilisation exclusive de la causalité intégrale. Elle est particulièrement adaptée pour l'étude des échanges d'énergie entre sous-systèmes d'un système complexe. La REM représente le système par des pictogrammes élémentaires selon leurs fonctions énergétiques [Annexe 1]. Ainsi, une source d'énergie (ex : réseau d'alimentation) est représentée par un ovale vert. Ces sources énergétiques définissent les limites du système étudié. Un élément de conversion d'énergie sans stockage est représenté par un carré orange pour une conversion mono-domaine (ex : réducteur mécanique pour une conversion mécanique-mécanique, électronique de puissance pour une conversion électrique-électrique), ou par un rond orange pour une conversion multi-domaine (ex : machine électrique pour une conversion électro-mécanique, résistance pour une conversion électro-thermique). Une distribution ou un couplage d'énergie est représenté par plusieurs pictogrammes oranges imbriqués (carrés si mono-domaine, ronds si multi-domaine). Enfin, un accumulateur d'énergie est représenté par un rectangle orange barré (ex : masse pour une accumulation d'énergie mécanique, inductance pour une accumulation d'énergie magnétique). C'est cet élément qui détermine la causalité du système en imposant ses variables énergétiques.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

 Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

La REM repose sur 3 principes :

Principe d'action et de réaction – Ce principe consiste à interconnecter les pictogrammes entre eux par 2 flèches représentant les variables d'action et de réaction [BOU 00]. Le produit de ces variables conduit à la puissance instantanément échangée entre les éléments connectés. Ainsi, les flux énergétiques sont mis en valeur et facilement identifiables.

Principe de causalité physique – La REM repose sur un respect exclusif de la causalité intégrale [IWA 94], [HAU 96] qui implique de décrire les éléments d'accumulation par une relation causale. Les sorties sont alors les variables d'états (appelées variables énergétiques) et sont une fonction intégrale des entrées, impliquant un retard entre les sorties et les entrées. Les autres éléments de la REM sont décrits par des relations sans retard. Afin de respecter strictement la causalité, des lois d'association d'éléments (permutation et concaténation) ont été définies pour résoudre les conflits d'association [BOU 12]. Notons que par la suite, les équations causales seront décrites classiquement suivant une expression dérivée (ex : I.19 pour une inductance) (cf. Figure I.16). Néanmoins, leurs implantations et résolution s'effectueront bien par la causalité intégrale (ex : I.20 pour une inductance).

$$L_1 \frac{d}{dt} i(t) = v_1(t) - v_2(t) - R_1 i(t) \tag{I.19}$$

$$i(t) = \frac{1}{L_1} \int \left[v_1(t) - v_2(t) - R_1 i(t) \right] dt \tag{I.20}$$

Principe d'inversion – Ce principe permet de déduire systématiquement une structure de commande d'un système en réalisant l'inversion de sa représentation [HAU 04], [BOU 12]. Une chaine de réglage est définie afin de lier les variables de réglage (ex : rapport de modulation des composants d'électronique de puissance) avec les objectifs de la commande (ex : vitesse de référence). L'inversion de la chaine de réglage permet d'obtenir la structure de commande. Les éléments d'accumulation sont inversés par un asservissement (parallélogramme bleu barré) [Annexe 1]. Les autres sont directement inversés (parallélogramme bleu non barré). De plus, des coefficients de répartition ou de pondération sont introduits pour inverser les éléments de couplage [BOU 03a]. Ce principe met également en exergue les mesures à réaliser.

Par ailleurs, une démarche scientifique particulière, décomposée en plusieurs étapes, sera scrupuleusement appliquée. Premièrement, une modélisation dynamique de chaque sous-système permettra d'approfondir la connaissance du fonctionnement du système et de ses flux d'énergie. Pour certains sous-systèmes, une commande devra être établie afin d'imposer les effets désirés (ex : vitesse des véhicules). Par la suite, une deuxième étape validera expérimentalement les hypothèses posées et les modèles dynamiques établis. Plusieurs expérimentations seront ainsi réalisées. Une troisième étape concernera la réduction des modèles dynamiques afin d'investiguer diverses granularités de modèles. Finalement, une dernière étape dédiée à la comparaison des différents modèles (de granularités différentes) servira à choisir un modèle offrant un bon compromis entre précision et temps de simulation.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

I.4.c – Résultats attendus

Les résultats attendus du point de vue scientifique sont de proposer une nouvelle démarche fonctionnelle de représentation de lignes ferroviaires basée sur l'utilisation de la REM. Par cette approche causale et systémique, elle a pour objectif de mieux mettre en évidence les flux énergétiques et les multiples interactions au sein de la ligne. D'autre part, l'équipe Commande du L2EP, qui est à l'origine du formalisme REM, a pour volonté d'étendre ce formalisme à de nouveaux besoins scientifiques et industriels. Des études de réduction de REM sont en cours par exemple. Pour cela, la modélisation du système doit être adaptée en permettant une analyse globale suffisamment précise tout en conservant des temps de simulation acceptables. Cela se traduit par la définition de modèles, à granularités adaptées, qui peuvent être obtenus par les diverses réductions de modèles investiguées dans cette thèse. De plus, des sous-systèmes jusqu'alors non étudiés avec la REM le seront dans cette thèse tels que les sous-stations non-réversibles, qui induisent un changement de nature des sources (comportement non linéaire et multi-modèle), ou encore les sources énergétiques mobiles (les métros en circulation), qui induisent des variations importantes des impédances des rails (système non-stationnaire). Les nouvelles représentations développées pourront être capitalisées, grâce au formalisme, et être réutilisées dans des travaux futurs.

Le résultat attendu du point de vue industriel est l'obtention d'un logiciel capable de prendre en compte les flux énergétiques entre les différentes composantes d'un tel carrousel. Ce logiciel devra permettre, dans un premier temps, la réalisation d'études comparatives de différentes structures, et en particulier des topologies innovantes et des différentes méthodes de pilotage des trains (marche tendue, économique, sur l'erre, etc.) [LUK 01]. Une étude postérieure à cette thèse devrait être un couplage de l'outil développé dans ce mémoire avec un logiciel d'optimisation afin de jouer sur les paramètres influant pour définir des topologies optimales.

Les verrous à lever sont multiples. Premièrement, la prise en compte du blocage des sous-stations non-réversibles pourra s'inspirer des représentations multi-modèles décries dans la thèse de R. Barrero [BAR 12], mais appliquées à la REM comme cela a été fait pour la prise en compte d'embrayage dans les véhicules hybrides [LHO 07], [LET 13a], bénéficiant ainsi du caractère unifiant de la REM. Deuxièmement, une approche devra être définie pour prendre en compte les variations des impédances de ligne. Enfin, le niveau de modélisation des différentes composantes du carrousel devra être défini de manière pertinente : un modèle trop complexe induirait des temps de simulation prohibitifs, un modèle trop simplifié conduirait à des erreurs importantes. Les dimensions d'un tel système multi-physique et les différentes constantes de temps mises en jeu nécessitent une réelle approche multi-échelle qui est difficile à appréhender.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

I.4.d – Positionnement de la thèse

Cette thèse se démarque tout d'abord des logiciels et thèses récentes par une approche purement fonctionnelle, basée sur l'étude des causes et effets du système, avec une utilisation exclusive de la causalité physique : la causalité intégrale. La méthodologie REM correspond à une démarche de modélisation systémique basée sur les lois de la physique pour souligner les propriétés énergétiques du système. Elle permet d'une part l'analyse des flux d'énergie et des contraintes au sein d'un système, d'autre part, par un principe d'inversion, de structurer la gestion d'énergie du système. Ce sont justement ses propriétés, ainsi que son aspect macroscopique bien adapté à l'étude de systèmes de cette dimension, qui ont orienté cette thèse vers le formalisme REM plutôt que d'autres comme le Bond Graph [PAY 61], [ROB 12]. Ce dernier par exemple est plus axé sur une représentation structurelle du système [DAU 00], [MAR 06], [GAW 07]. Il est certes bien adapté à l'analyse et au dimensionnement d'un système complexe, mais moins en revanche à la structuration de la gestion énergétique de tels systèmes, en prenant bien en compte les nœuds énergétiques et les articulations entre commandes locales des sous-systèmes et commande globale du système complet.

Le formalisme REM a déjà été utilisé et validé sur des systèmes très variés au sein du L2EP. De plus, il est adopté par le réseau de recherche national MEGEVH [MEG 15] dédié à la gestion d'énergie des véhicules hybrides. On trouve par exemple des travaux sur les systèmes éoliens [BOU 02], [BOU 09b], [DEL 03a], des alterno-démarreurs [BRU 09], en passant par des véhicules électriques et hybrides [LHO 07], [CHE 10], [SAY 12], [LET 13a], [DEP 14], [CAS 15], [CAS 16] ou encore en introduisant des domaines thermique [HOR 12b], [HOR 15a] ou fluidique [BOU 09a]. Elle a notamment été appliquée au métro automatique de Siemens Val 206 [VER 07] et à sa version avec stockage embarqué [ALL 10b], [ALL 10d]. Plus récemment, 2 véhicules hybrides ont étés étudiés dans le cadre de deux thèses CIFRE entre PSA et le L2EP [LET 13a], [HOR 15b]. De même, la locomotive hybride diesel PLATHEE a été étudiée dans une collaboration entre le L2EP et la SNCF [MAY 14b].

Le formalisme REM est aujourd'hui largement diffusé à l'international notamment par l'organisation d'une école d'été annuelle, de différents séminaires, ainsi que de sessions spéciales dans plusieurs conférences scientifiques (ex : IEEE-VPPC) [EMR 15]. Par exemple, on trouve des études où la REM est utilisée au laboratoire FEMTO-ST de Belfort (France) [CHR 08], [BAE 13], à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) (Canada) [BOU 10a], [BOU 13], à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse) [CHE 12], [BIL 14], à l'Université Carlos III de Madrid (Espagne) [GAU 11], à l'Université Polytechnique de Catalogne (Espagne) [MON 14], à l'Institut Polytechnique de Coimbra (Portugal) [FAR 14], etc.

Néanmoins, toutes ces études ont été jusqu'à présent limitées à un nombre restreint de sources énergétiques, la plupart du temps réversibles, et dont la structure du système est fixe. Dans cette thèse, les travaux seront étendus à un système non-stationnaire non-linéaire et dont le nombre de source d'énergie n'est pas fixé ni limité [MAY 15a].

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

I.5 – Conclusion du chapitre

L'évolution de notre société conduit à des nuisances sanitaires et environnementales importantes causées principalement par des dégagements massifs de GES. Afin d'y remédier, le secteur des transports est impliqué dans d'importantes mutations. Ce chapitre a donc présenté certaines solutions permettant de réduire la consommation énergétique des transports collectifs (métros, tramways, trains, etc.). En particulier, la récupération de l'énergie libérée lors du freinage est un levier important permettant d'y parvenir. Pour cela, différentes solutions existent telles que la synchronisation des phases de freinage et d'accélération des différents trains, ou encore l'introduction de SSE ou de sous-stations réversibles. Une des difficultés majeures est alors d'estimer les gains d'énergie que permettraient ces solutions. Leur développement passe par ailleurs par une optimisation entre le coût d'installation et les gains économiques et énergétiques engendrés.

Les programmes de simulation sont aujourd'hui indispensables pour estimer ces gains. Ils prennent en compte un grand nombre de problématiques simultanément et estiment de manière fiable l'évolution du système réel. Cependant, la réalisation de ce type de simulateur est complexe. Les problématiques de non-linéarité et de non-réversibilité des stations d'alimentation, ainsi que le caractère non-stationnaire du système étudié (mouvement des rames) impliquent une analyse et une connaissance profonde du système. De nombreuses simplifications sont donc régulièrement effectuées dans les logiciels existants, ce qui impacte les résultats de simulation.

L'objectif de cette thèse est de réaliser un simulateur énergétique précis et flexible. Pour cela le formalisme de représentation REM est utilisé. Il permet de mieux mettre en exergue les propriétés énergétiques du système en respectant les flux physiques d'énergie. La REM aide notamment à interconnecter les différents modèles pour conserver la cohérence physique du modèle global. Ainsi, le programme de simulation doit permettre de simuler des topologies d'alimentation électrique innovantes, incluant des SSE ou encore des stations d'alimentation réversibles. Les approches de simulation « forward », et l'utilisation exclusive de la causalité intégrale, imposées par la REM devraient améliorer la prise en compte de ces comportements en accentuant la modélisation sur l'étude des causalités et interactions énergétiques dans le carrousel.

Le prochain chapitre concernera la modélisation des différents sous-systèmes composant un carrousel de métros. Ces modèles seront organisés et représentés grâce à la REM afin de développer des modèles représentatifs de la réalité d'un point de vue énergétique.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Chapitre II - Modélisation énergétique des sous-systèmes d'un carrousel de métros

Ce chapitre a pour objectif de développer des modèles énergétiques des sous-systèmes d'un carrousel de métros classique : l'alimentation, le matériel roulant, et le pilotage des rames. Ces modèles doivent être appropriés à une étude énergétique. C'est-à-dire permettre une estimation suffisamment précise de la consommation d'énergie tout en conservant un temps de simulation non prohibitif. La flexibilité des modèles est également un point clé afin de pouvoir simuler différentes lignes et topologies d'alimentation.

Pour cela, et pour chacun des sous-systèmes, une première phase de modélisation consiste à établir un modèle dynamique, organisé au travers de la REM. La causalité intégrale ainsi qu'une approche de simulation « forward » sont adoptées pour assurer un certain niveau de flexibilité. Les modèles dynamiques sont validés par des essais expérimentaux. Des réductions de modèles sont ensuite proposées pour définir un meilleur compromis entre précision et temps de simulation.

Sommaire du chapitre

II.1 – Modélisation du sous-système d'alimentation ..... - 38 -

II.1.a – Modélisation dynamique du sous-système d'alimentation ..... - 38 -

II.1.b – Validation du modèle dynamique du sous-système d'alimentation ..... - 43 -

II.1.c – Réduction du modèle dynamique du sous-système d'alimentation ..... - 45 -

II.1.d – Intérêts pour une simulation flexible ..... - 50 -

II.2 – Modélisation du sous-système matériel roulant ..... - 51 -

II.2.a – Modélisation dynamique du sous-système matériel roulant ..... - 52 -

II.2.b – Validation du modèle dynamique du sous-système matériel roulant ..... - 61 -

II.2.c – Réduction du modèle dynamique du sous-système matériel roulant ..... - 63 -

II.2.d – Intérêts pour une simulation flexible ..... - 66 -

II.3 – Modélisation du sous-système de pilotage ..... - 67 -

II.3.a – Modélisation générique du sous-système de pilotage ..... - 70 -

II.3.b – Validation du modèle du sous-système de pilotage ..... - 74 -

II.3.c – Réduction du modèle du sous-système de pilotage ..... - 75 -

II.3.d – Intérêt pour une simulation flexible ..... - 76 -

II.4 – Conclusion du chapitre ..... - 78 -

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

 Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

II.1 – Modélisation du sous-système d'alimentation

Le sous-système d'alimentation est composé de stations d'alimentation associées à une distribution d'énergie en courant continu. Les sous-stations permettent l'alimentation du système. Elles sont l'interface entre le réseau alternatif HT et la distribution continue [COU 09]. Il existe différents types de stations d'alimentation (Figure II.1) [SEI 11]. Les sous-stations classiques sont non-réversibles et se composent généralement d'un filtre, d'un ou plusieurs transformateur(s) simple(s) ou dodécaphasé(s), et d'un ou plusieurs pont(s) redresseur(s) à diodes. Un transformateur dodécaphasé consiste en 2 enroulements secondaires déphasés de 30° électriques, l'un en couplage triangle et l'autre en couplage étoile. Ce dispositif repousse les premiers harmoniques de courants au onzième rang, réduisant ainsi le besoin en filtrage [ALL 08], [NGU 10]. Dans ce cas, les redresseurs sont en série ou en parallèle, ce qui peut nécessiter une bobine d'interphase pour un fonctionnement simultané des 2 ponts, et donc un dimensionnement au plus bas des diodes.

Contrairement aux sous-stations classiques, certaines sont réversibles en puissance. Néanmoins, cette solution reste peu utilisée et constitue une structure d'alimentation innovante à développer dans les applications futures. La majorité du temps, cette réversibilité est obtenue en ajoutant en parallèle un onduleur/redresseur commandable (Figure II.1). Ainsi, le redresseur à diode est conservé pour sa robustesse, et le convertisseur commandable est ajouté pour sa réversibilité.

Cette partie définit un modèle adapté à l'étude énergétique du sous-système d'alimentation. Dans un premier temps un modèle dynamique est établi afin de mettre en évidence les causalités de ce sous-système et d'avoir une bonne compréhension de son fonctionnement. Ce modèle est ensuite validé afin de confirmer les choix et hypothèses. Enfin, des réductions du modèle dynamique sont proposées pour réduire le temps de simulation.

II.1.a – Modélisation dynamique du sous-système d'alimentation

Le modèle dynamique de la station d'alimentation et de la distribution d'énergie est organisé en utilisant la REM [MAY 14d], [MAY 16]. Afin de simplifier l'étude, une sous-station classique simple est considérée (Figure II.2). Cependant, des modèles dynamiques de sous-stations plus complexes peuvent être réalisés par extension [BAR 12]. Par ailleurs, la charge considérée est une source de tension équivalente qui impose la tension des rails à ses bornes. Elle est composée d'un condensateur équivalent $C_{bus\text{-}eq}$ en parallèle avec une source de courant $i_{bus\text{-}eq}(t)$. Cette source est alimentée via une portion de rail. Dans ce cas, le courant de la charge est identique à celui débité par la sous-station. Il permet de comprendre les interactions du sous-système sur un cas simple mais réaliste.

Les limites fixées pour cette modélisation sont le réseau d'alimentation triphasé et la source de tension représentant la jonction rails/charge. L'ensemble des composants situés entre ces limites sont modélisés. De plus, certains éléments ou phénomènes sont négligés en raison de leurs faibles impacts sur la consommation. Les hypothèses posées ne considèrent pas les filtres (pertes supposées négligeables) ni les saturations magnétiques des composants. De plus, seul le fonctionnement « normal » de la station est étudié. La période d'empiètement entre plusieurs diodes est également

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

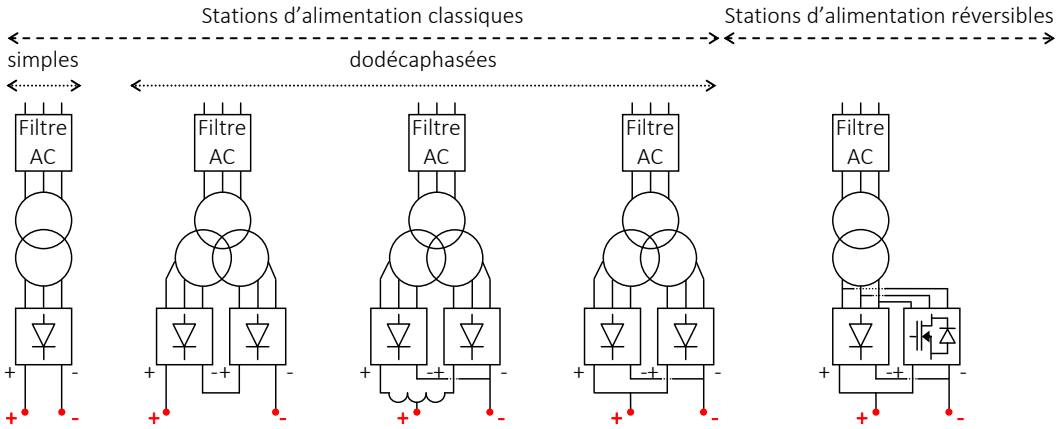


Figure II.1 : Exemple de stations d'alimentation existantes.

négligée. Une étude précédente a montré son impact limité sur la consommation d'énergie [Annexe 2] [MAY 16]. Enfin, le réseau d'alimentation est considéré équilibré et parfaitement sinusoïdal. Il est défini par l'équation ci-dessous avec V_g sa tension simple efficace, et ω_g sa pulsation.

$$\begin{cases} v_{g1}(t) = V_g\sqrt{2}\sin(\omega_g t) \\ v_{g2}(t) = V_g\sqrt{2}\sin\left(\omega_g t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{g3}(t) = V_g\sqrt{2}\sin\left(\omega_g t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \tag{II.1}$$

Les paramètres des rails sont regroupés sous une inductance et une résistance équivalentes selon l'équation (II.2). Ils dépendent de la distance qui sépare les sous-systèmes $\Delta x(t)$ et des inductances l_{lin} et résistances r_{lin} linéiques des rails dont les valeurs sont respectivement 0,4 µH/m et 22 µΩ/m (lignes de métros de Lille). Néanmoins, $L_{r\text{-}eq}$ et $R_{r\text{-}eq}$ sont supposés constant dans cette partie en raison de la charge fixe considérée.

$$\begin{cases} L_{r-eq} = L_{r-pos} + L_{r-neg} \\ R_{r-eq} = R_{r-pos} + R_{r-neg} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} L_{r-pos} = L_{r-neg} = \Delta x(t) l_{lin} \\ R_{r-pos} = R_{r-neg} = \Delta x(t) r_{lin} \end{cases} \tag{II.2}$$

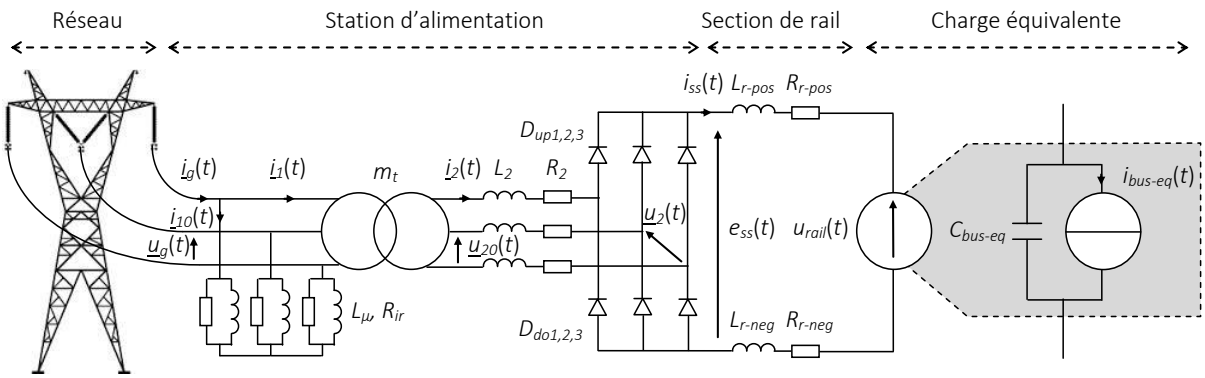


Figure II.2 : Structure du système d'alimentation considéré avec une station d'alimentation simple.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Représentation Energétique Macroscopique

Le réseau hautes tensions – Une source imposant un vecteur de 2 tensions composées $\underline{u}_g(t)$ (2 tensions indépendantes) (Figure II.3) (II.3) représente le réseau d'alimentation.

$$\underline{u}_g(t)=\begin{bmatrix} u_{g13}(t) \\ u_{g23}(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} v_{g1}(t)-v_{g3}(t) \\ v_{g2}(t)-v_{g3}(t) \end{bmatrix} \tag{II.3}$$

Le transformateur triphasé – Un schéma équivalent classique modélise le transformateur. Il contient au primaire L_μ (inductance magnétisante) et R_{ir} (pertes fers), et au secondaire L_2 (inductance fuite équivalente) et R_2 (pertes joules équivalentes). Un transformateur idéal de rapport m_t est considéré. Ces paramètres sont déterminés par des essais en court-circuit et à vide. Le transformateur impose, en réaction à la tension du réseau, un vecteur de 2 courants $\underline{i}_g(t)$ sur le réseau. Ce vecteur est déterminé en fonction de la branche primaire du transformateur, et des courants $\underline{i}_1(t)$ prélevés sur le transformateur parfait (II.4). La branche primaire induit une consommation de courants $\underline{i}_{10}(t)$ et d'énergie fixe due aux pertes fers, ainsi qu'à l'énergie de magnétisation (II.5). Elle est représentée par un élément de couplage et un élément d'accumulation. Enfin, le transformateur parfait est représenté par un élément de conversion mono-domaine. Il détermine la tension à vide secondaire $\underline{u}_{20}(t)$ et le courant de charge absorbé au primaire $\underline{i}_1(t)$ (II.6).

$$\underline{i}_g(t)=\underline{i}_{10}(t)+\underline{i}_1(t) \tag{II.4}$$

$$\frac{d}{dt}\left[L_\mu[\underline{C}]^{-1}\underline{i}_{10}(t)-\frac{L_\mu}{R_{ir}}\underline{u}_g(t)\right]=\underline{u}_g \quad \text{avec} \quad [\underline{C}]=\frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \tag{II.5}$$

$$\begin{cases} \underline{u}_{20}(t)=m_t\underline{u}_g(t) \\ \underline{i}_1(t)=m_t\underline{i}_2(t) \end{cases} \tag{II.6}$$

Le redresseur – Une des difficultés majeures est la modélisation du redresseur en raison de sa non-linéarité. Cela induit plusieurs modes de fonctionnement [CRO 09], [GER 13], [CHI 13]. Une représentation « multi-modèles commutés » est donc utilisée. La non-linéarité est décomposée en différents modes linéaires [MAY 16]. Chacun de ces modes est modélisé indépendamment des autres (Figure II.4). Des commutations de modèles sont ensuite introduites afin de sélectionner les modèles en fonction de l'état du redresseur. L'utilisation de la REM permet de bénéficier du caractère unifiant du formalisme en s'inspirant de travaux concernant les embrayages des véhicules [LHO 07], [LET 13a].

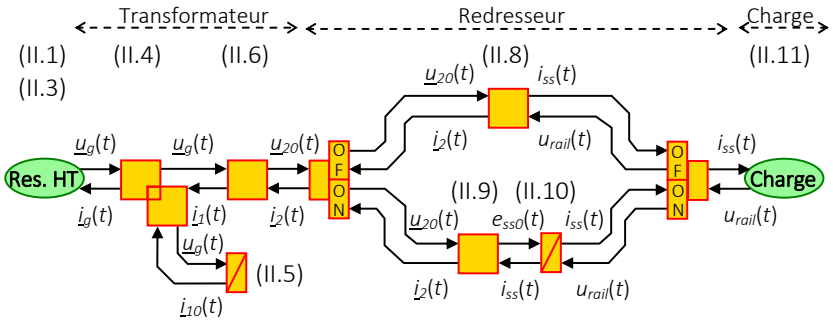


Figure II.3 : REM du modèle dynamique d'une station d'alimentation non-réversible simple.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

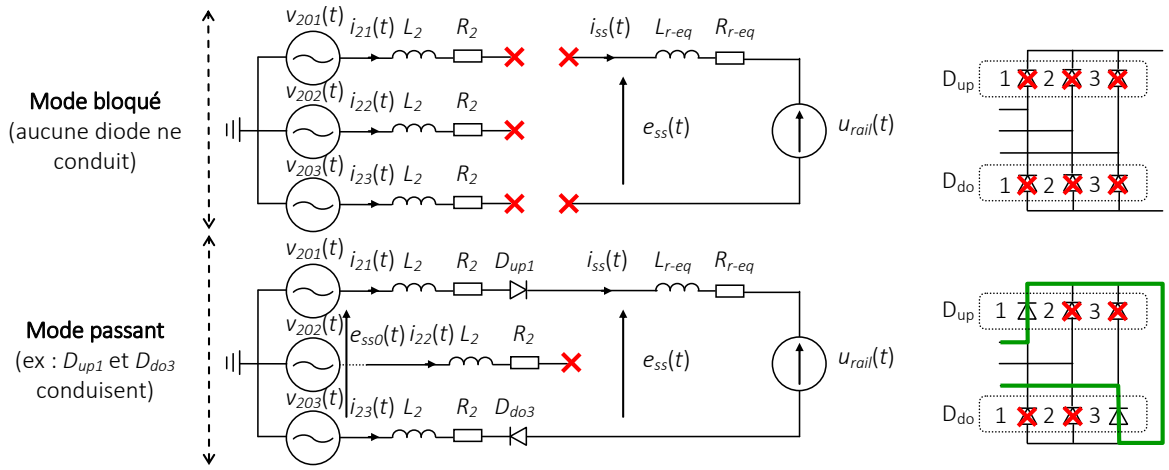


Figure II.4 : Les différents modes de fonctionnement considérés du redresseur.

Des éléments de commutation sont donc insérés dans la REM (cf. Figure II.3). Ces éléments permettent de tenir compte des non-linéarités [LHO 07]. Un élément de commutation distingue donc le redresseur lorsqu'il est bloqué (OFF) ou passant (ON). Le redresseur est composé de 2 demi-ponts : un à cathodes communes (D_{do}) et un à anodes communes (D_{up}). Pendant le mode passant, une diode conduit sur chaque demi-pont (Figure II.4). La diode du bras où la tension est la plus élevée est passante sur le demi-pont à anode commune alors que c'est celle où la tension est la plus négative sur le demi-pont à cathode commune. Lorsque le redresseur est bloqué, aucune diode ne conduit.

Afin de modéliser le blocage ou l'activation de chaque diode, un rapport de modulation équivalent $\underline{m}_{rec}(t)$ (II.7) est défini comme pour les convertisseurs commandables [DEL 03b]. Celui-ci dépend des fonctions d'activation des diodes $\underline{s}_{up\,Di}(t)$ et $\underline{s}_{do\,Di}(t)$ qui valent 0 lorsque la diode et bloquée et 1 lorsqu'elle est passante.

$$\underline{m}_{rec}(t)=\begin{bmatrix} m_{rec\,1}(t) \\ m_{rec\,2}(t) \\ m_{rec\,3}(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} s_{up\,D1}(t) \\ s_{up\,D2}(t) \\ s_{up\,D3}(t) \end{bmatrix}-\begin{bmatrix} s_{do\,D1}(t) \\ s_{do\,D2}(t) \\ s_{do\,D3}(t) \end{bmatrix} \tag{II.7}$$

Mode bloqué – Lorsque toutes les diodes sont bloquées, le circuit est ouvert (cf. Figure II.4). Des courants nuls sont alors imposés, aussi bien côté alternatif $\underline{i}_2(t)$ que continu $i_{ss}(t)$. Ce mode est représenté par un élément de conversion mono-domaine régi par l'équation (II.8).

$$\underline{i}_2(t)=\begin{bmatrix} i_{21}(t) \\ i_{22}(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad i_{ss}(t)=0 \tag{II.8}$$

Mode passant – Un élément de conversion représente le redressement alternatif-continu et détermine la tension redressée à vide $e_{ss0}(t)$ à partir des tensions à vide en sortie du transformateur $\underline{u}_{20}(t)$ et du rapport de modulation équivalent $\underline{m}_{rec}(t)$ (II.9)[1]. De plus, un élément d'accumulation

[1] D'autres méthodes sont possibles pour modéliser la conversion alternative-continue (fonctions logiques, opérateurs maximum/minimum, etc.). Un rapport de modulation a été défini en raison d'études précédentes sur la prise en compte d'un plus grand nombre de modes de fonctionnement (empiétement, court-circuit, etc.).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

représente une inductance équivalente, ramenée du côté continu, après concaténation des différentes inductances (L_2 et $L_{r\text{-}eq}$) et résistance (R_2 et $R_{r\text{-}eq}$) (II.10) (cf. Figure II.4). Il détermine ainsi de façon causale le courant continu $i_{ss}(t)$ en fonction de la tension $e_{ss0}(t)$ et de la tension des rails au niveau de la jonction avec la charge u_{rail}(t).

$$\begin{cases} e_{ss0}(t) = \left[\left[\underline{Y}\right]\underline{m}_{rec}(t)\right]^t \underline{u}_{20}(t) \\ \underline{i}_2(t) = \left[\left[\underline{Y}\right]\underline{m}_{rec}(t)\right] i_{ss}(t) \end{cases} \quad \text{avec} \quad \left[\underline{Y}\right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{II.9}$$

$$L_{eq}\frac{d}{dt}i_{ss}(t) = e_{ss0}(t) - u_{rail}(t) - R_{eq}i_{ss}(t) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} L_{eq} = 2L_2 + L_{r-eq} \\ R_{eq} = 2R_2 + R_{r-eq} \end{cases} \tag{II.10}$$

La charge – Une source de tension équivalente $u_{rail}(t)$ représente la charge. Celle-ci est composée d'un bus continu équivalent sur lequel est connectée une source de courant $i_{eq}(t)$. Sa modélisation impose la tension $u_{rail}(t)$, avec $C_{bus\text{-}eq}$ la capacité du bus équivalent et $R_{bus\text{-}eq}$ sa résistance de fuite (II.11).

$$C_{bus-eq}\frac{d}{dt}u_{rail}(t) = i_{ss}(t) - i_{bus-eq}(t) - \frac{u_{rail}(t)}{R_{bus-eq}} \tag{II.11}$$

Les modèles ainsi obtenus permettent une modélisation précise et dynamique des variables énergétiques du sous-système d'alimentation. Cependant, les différents modèles doivent être activés en fonction de l'état du redresseur. Des conditions de commutation sont donc définies.

Commutations de modèles et détermination du rapport de modulation

Un réseau de Pétri [ZUR 94] est défini afin de gérer les éléments de commutation [LHO 07] et ainsi choisir le modèle approprié (Figure II.5.a) [MAY 16]. L'état du réseau de Pétri correspond au modèle activé. Chaque changement d'état induit une commutation du modèle qui s'effectue via les éléments de commutation. Le mode bloqué est activé si le courant continu traversant la station d'alimentation $i_{ss}(t)$ décroit jusqu'à zéro (condition A_1) (Figure II.5.a). Dans ce cas les éléments de commutations passent sur la branche OFF. Le redresseur devient passant si la tension à vide redressée $e_{ss0}(t)$ est supérieure ou égale à la tension $e_{ss}(t)$ ou encore à $u_{rail}(t)$ (condition A_2). Alors les éléments de commutations passent sur la branche ON. Hormis la tension réelle en sortie du redresseur $e_{ss}(t)$, les variables nécessaires au réseau de Pétri se trouvent directement dans les modèles ($i_{ss}(t)$, $e_{ss0}(t)$ et $u_{rail}(t)$). La tension $e_{ss}(t)$ n'est pas directement disponible sur la REM en raison des concaténations effectuées. En revanche, elle peut facilement être déterminée a postériori à partir de la tension $e_{ss0}(t)$ et du courant $i_{ss}(t)$.

Le même principe de commutation est appliqué pour déterminer les rapports de modulation équivalents du redresseur en fonction de l'état du redresseur à chaque instant t. Une diode se bloque donc ($s_{Di}(t) = 0$) si le courant la traversant ($i_{up\ Di}(t)$ ou $i_{do\ Di}(t)$ en fonction du demi-pont sur lequel se trouve la diode) décroit et atteint zéro (Figure II.5.b.c). Les courants traversant les diodes sont calculés à partir des courants instantanés $\underline{i}_2(t)$ et des fonctions d'activation des diodes à l'instant $t\text{-}\Delta_t$, avec Δ_t le pas de calcul de la simulation (II.12).

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

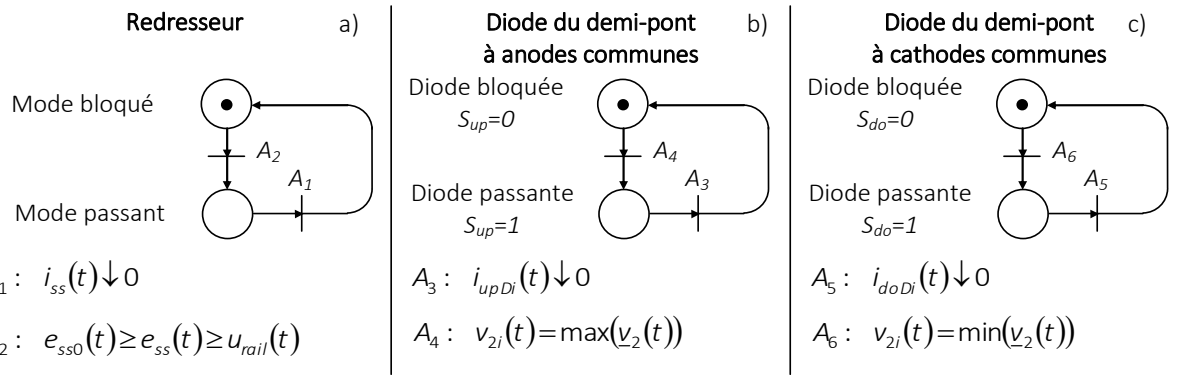


Figure II.5 : Conditions d'activation des modèles et diodes : a) conditions de commutation des modèles, b) et c) condition d'activation des diodes.

La diode devient passante ($s_{Di}(t)$ = 1) si la tension simple du bras correspondant $v_{2i}(t)$ est la plus élevée (demi-pont à anodes communes) ou la plus faible (demi-pont à cathodes communes). Cette tension est recalculée (II.13) car elle n'est pas directement accessible sur la REM en raison des concaténations des différentes inductances.

$$\begin{cases} \underline{i}_{up}(t)=[\underline{I}]\underline{i}_2(t)\underline{s}_{upD}(t-\Delta_t) \\ \underline{i}_{do}(t)=-[\underline{I}]\underline{i}_2(t)\underline{s}_{doD}(t-\Delta_t) \end{cases} \quad \text{avec} \quad [\underline{I}]=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \tag{II.12}$$

$$\underline{v}_2(t)=\frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}\left\{\underline{u}_{20}(t)-R_2\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}\underline{i}_2(t)-L_2\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}\frac{d}{dt}\underline{i}_2(t)\right\}$$

$$\text{avec} \quad \frac{d}{dt}\underline{i}_2(t)=\begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{pour le mode bloqué} \\ \dfrac{[\underline{Y}]\underline{m}_{rec}(t)}{\mathrm{L}_{eq}}\left[e_{ss0}(t)-u_{rail}(t)-R_{eq}i_{ss}(t)\right] & \text{pour le mode passant} \end{cases} \tag{II.13}$$

II.1.b – Validation du modèle dynamique du sous-système d'alimentation

Afin de valider les hypothèses choisies et le modèle établi une comparaison entre simulation et relevés expérimentaux est présentée. Ces relevés ont été effectués sur la plate-forme « eV » du L2EP où a été recrée une station d'alimentation simple non-réversible à échelle réduite (Figure II.6) [Annexe 3]. Un courant $i_{bus\text{-}eq}(t)$ est imposé sur le bus continu (cf. Figure II.2) par le biais d'un convertisseur de puissance. La tension $u_{rail}(t)$, les tensions du réseau $\underline{u}_g(t)$, le courant continu $i_{ss}(t)$, ainsi que les courants prélevés sur le réseau $\underline{i}_g(t)$ sont mesurés. La puissance absorbée est calculée et l'énergie consommée déduite.

La simulation est effectuée sous Matlab-Simulink© selon les paramètres de la station d'alimentation à échelle réduite (Tableau II.1). Le courant $i_{bus\text{-}eq}(t)$ est imposé. Les courants continu $i_{ss}(t)$ et absorbé sur le réseau $\underline{i}_g(t)$, ainsi que la tension $u_{rail}(t)$ simulés sont comparés aux mesures expérimentales (Tableau II.2) (Figure II.7).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

 Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Tableau II.1 : Paramètres du sous-système d'alimentation à échelle réduite.

Tension simple efficace du réseau	240 V	Résistance des pertes joules	75,5 mΩ
Fréquence du réseau	50 Hz	Inductance de fuite	129 µH
Rapport du transformateur	0,138	Bus DC équivalent	2 mF
Résistance des pertes fers	1864 Ω	Résistance des rails $R_{r\text{-}eq}$	1 Ω
Inductance magnétisante	2,38 H		

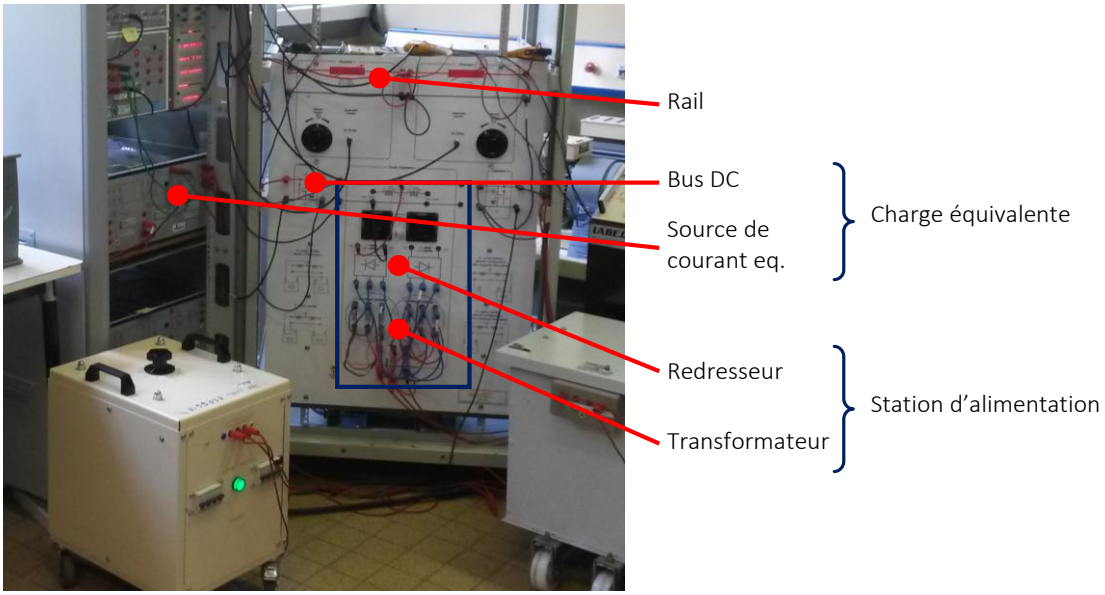


Figure II.6 : Plate-forme de validation de la station d'alimentation à échelle réduite.

Tableau II.2 : Validation du modèle dynamique du sous-système d'alimentation.

	Energie consommée	Erreur moyenne
Expérimentation	1,25 Wh	0 % (référence)
Simulation	1,12 Wh	1,4 %

Ces résultats valident expérimentalement le modèle dynamique du sous-système d'alimentation au sens des valeurs instantanée avec une précision énergétique moyenne d'environ 98,5 % (cf. Tableau II.2). Les légères disparités entre mesure et simulation proviennent majoritairement des imperfections du réseau d'alimentation et de la conception du transformateur. En effet, le réseau n'est pas parfaitement sinusoïdal et contient plusieurs harmoniques de tension non prises en compte dans le modèle. De plus, le transformateur n'est pas exactement équilibré comme supposé dans le modèle. On peut observer de légères différences des impédances entre les 3 phases lors d'essais de caractérisation[2]. Cependant, les différences entre la simulation et l'expérience restent tolérables pour l'étude énergétique envisagée. La précision du modèle est suffisante quant aux résultats attendus. Cependant, le modèle dynamique induit un temps de simulation prohibitif par rapport à l'étude envisagée. Des réductions de modèle sont donc envisagées.

[2] Les paramètres du modèle sont identiques pour chaque phase du système. Ils sont déduits d'une moyenne des 3 phases du réseau et du transformateur.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

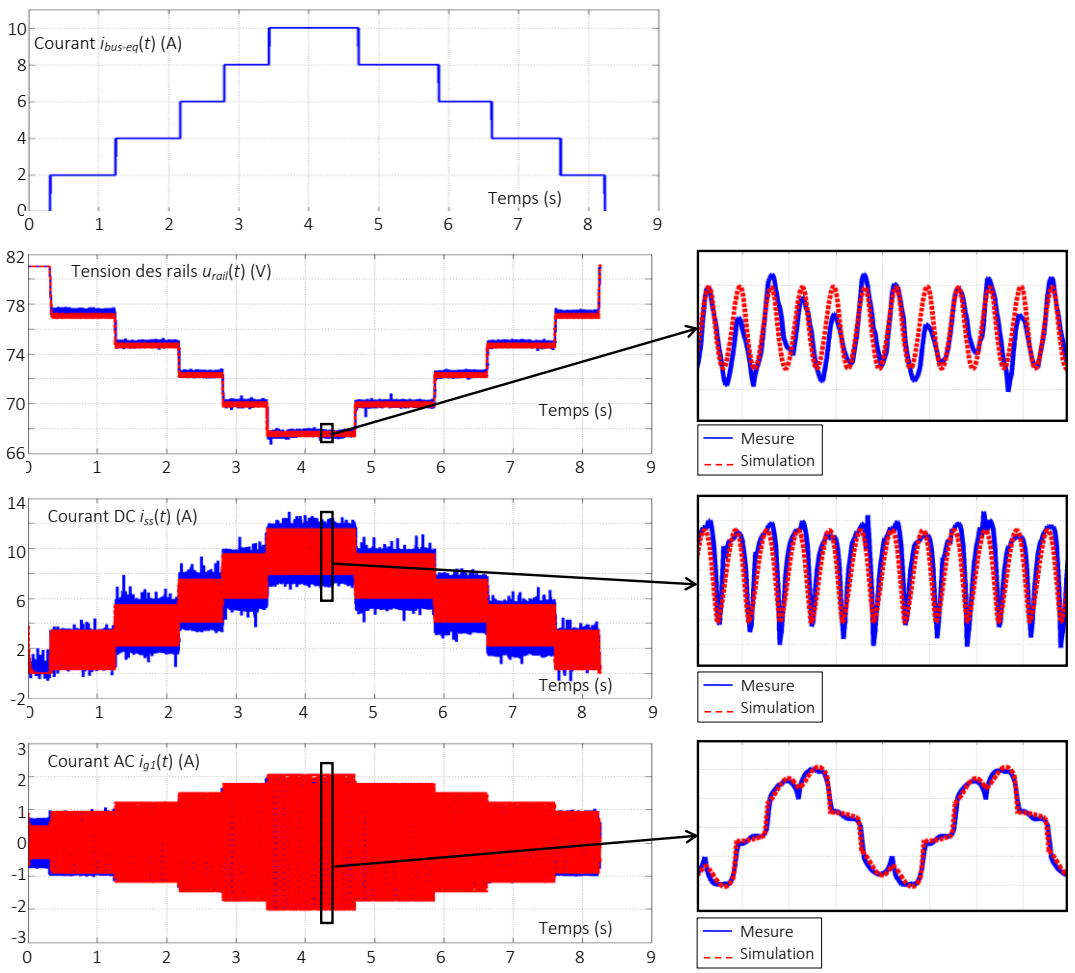


Figure II.7 : Validation expérimentale du modèle dynamique du sous-système d'alimentation.

II.1.c – Réduction du modèle dynamique du sous-système d'alimentation

Modèle statique moyen non-linéaire

Le premier modèle réduit consiste à moyenner les variables (ex : $x(t)$) sur la période électrique du réseau T_g (modèle moyen) (II.14). De plus, les dynamiques imposées par les différentes inductances sont également simplifiées (modèle statique). En effet, elles sont très rapides par rapport à la dynamique principale du système complet (celle des véhicules).

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{T_g}\int_0^{T_g} x(t)dt \qquad \text{(II.14)}$$

Afin de respecter le principe d'action et de réaction de la REM (produit action par réaction donne la puissance), les nouvelles variables d'action et de réaction sont définies en accord avec la modélisation moyenne souhaitée. Ainsi, dans le domaine continu, les variables moyennes remplacent directement les variables instantanées. En revanche, dans le domaine alternatif, l'action ou la réaction devient le produit de la valeur efficace de la tension simple $V(t)$ avec le nombre de phase du sous-système d'alimentation (ici triphasé). L'action ou la réaction complémentaire est donc le produit de la valeur efficace du courant $I(t)$ avec le facteur de puissance $PF(t)$ (sur la période T_g) (II.15).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

La REM du modèle statique moyen (Figure II.8.a) détermine les variables moyennes (en DC) ou efficaces (en AC). Pour une meilleure lisibilité la réaction $I_x(t)PF_x(t)$ est notée $I_{PFx}(t)$ par la suite.

$$\begin{cases} \bar{p}(t)=\bar{u}(t)\bar{i}(t) & \text{en DC} \\ \bar{p}(t)=3V(t)I(t)PF(t)=3V(t)I_{PF}(t) & \text{en AC} \end{cases} \quad \text{(II.15)}$$

Le transformateur – Son modèle statique moyen est aussi représenté par 3 éléments REM (Figure II.8.a). Le premier représente le couplage de la branche primaire du transformateur. Il détermine le courant $I_{PFg}(t)$ prélevé sur le réseau d'alimentation en fonction des courants primaires du transformateur (II.16). Le courant $I_{PF10}(t)$ de la branche magnétisante est déterminé par un élément de conversion (II.17). Enfin, un élément de conversion représente le transformateur idéal. Il converti les variables hautes tensions en variables basses tensions en fonction du rapport de conversion m_t (II.18).

$$I_{PFg}(t)=I_{PF10}(t)+I_{PF1}(t) \quad \text{(II.16)}$$

$$I_{PF10}(t)=\frac{V_g(t)}{R_{ir}} \quad \text{(II.17)}$$

$$\begin{cases} 3V_{20}(t)=m_t 3V_g(t) \\ I_{PF1}(t)=m_t I_{PF2}(t) \end{cases} \quad \text{(II.18)}$$

Le redresseur – Le redresseur à diode reste modélisé par 2 modèles commutés afin de tenir compte des non-linéarités : un modèle en mode bloqué, et un modèle en mode passant.

Mode bloqué – Ce mode impose des courants nuls puisque le circuit électrique est ouvert (cf. Figure II.4). Il est représenté par un élément de conversion mono-domaine (II.19).

$$I_{PF2}(t)=0 \quad \text{et} \quad \bar{i}_{ss}(t)=0 \quad \text{(II.19)}$$

Mode passant – Un élément de conversion représente la conversion alternatif-continu et détermine la tension redressée moyenne à vide à partir des tensions efficaces à vide en sortie du transformateur $V_{20}(t)$ (II.20) [BAG 04], [CRO 09]. De plus, le courant $I_{PF2}(t)$ du secondaire du transformateur est déterminé en fonction du courant moyen délivré côté continu. Un second élément de conversion représente la charge continue équivalente. Il détermine le courant DC moyen en fonction des tensions continues moyennes en sortie du redresseur et aux bornes des rails (II.21).

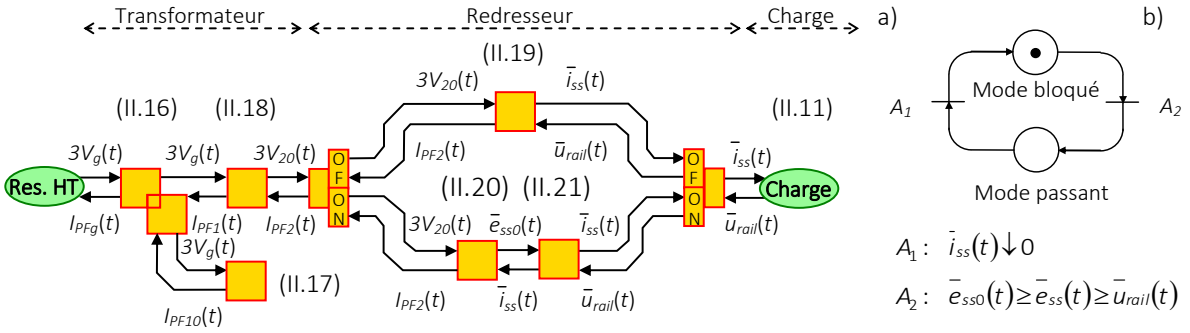


Figure II.8 : Modèle statique moyen d'une station d'alimentation non-réversible simple : a) REM, b) réseau de Pétri.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

$$\bar{e}_{ss0}(t)=\frac{\sqrt{6}}{\pi}3V_{20}(t) \quad \text{et} \quad I_{PF2}(t)=\frac{\sqrt{6}}{\pi}\bar{i}_{ss}(t)-\frac{L_2\omega_g}{\pi V_{20}(t)}\bar{i}_{ss}(t)^2 \tag{II.20}$$

$$\bar{i}_{ss}(t)=\frac{\bar{e}_{ss0}(t)-\bar{u}_{rail}(t)}{R_{eq}} \quad \text{avec} \quad R_{eq}=2R_2+R_{r-eq} \tag{II.21}$$

Les modèles obtenus permettent une modélisation statique des valeurs moyennes des variables d'une station d'alimentation classique. Un réseau de Pétri est également défini afin de gérer les éléments de commutation pour choisir le modèle (cf. Figure II.8.b). Les conditions de commutation sont identiques à celles du modèle dynamique.

Par ailleurs, le modèle présenté estime la consommation d'énergie en calculant uniquement la puissance active. Néanmoins les puissances réactives et apparentes peuvent être déterminées de la même façon en définissant des facteurs de déplacement (déphasage) et de déformations (lié aux harmoniques de courant).

Modèle statique moyen comportemental

Un modèle statique moyen cantonné au domaine continu est également réalisable [BAR 12]. Il est intéressant lorsque les données du transformateur ou du redresseur sont inconnues car une étude de son comportement suffit pour les déterminer. Il en ressort un modèle composé d'une source de tension moyenne à vide $e_{ss0}(t)$ en série avec une résistance équivalente R_{ss-eq} et une diode (Figure II.9.a) [BAR 12]. Sa REM (Figure II.9.b) est composée d'une source de tension redressée moyenne à vide, associée à un élément de conversion qui représente les résistances concaténées lorsque la station est passante (II.22). Lorsqu'elle est bloquée une source de courant nul est utilisée.

$$\bar{i}_{ss}(t)=\frac{\bar{e}_{ss0}(t)-\bar{u}_{rail}(t)}{R_{eq}} \quad \text{avec} \quad R_{eq}=R_{ss-eq}+R_{r-eq} \tag{II.22}$$

L'avantage de ce modèle est que ses paramètres sont identifiables simplement par une mesure de tension en sortie du redresseur réel (Figure II.10). La tension à vide redressée est mesurée lorsque le courant débité est nul. La résistance équivalente l'est par l'observation de la pente caractérisant la chute de tension en sortie du redresseur. De plus, ce modèle est général et s'applique à tout type de station d'alimentation. Néanmoins, la partie alternative n'est plus considérée et les variables côté réseau d'alimentation ne sont pas connues. Ainsi, les pertes dans la sous-station sont sous-estimées.

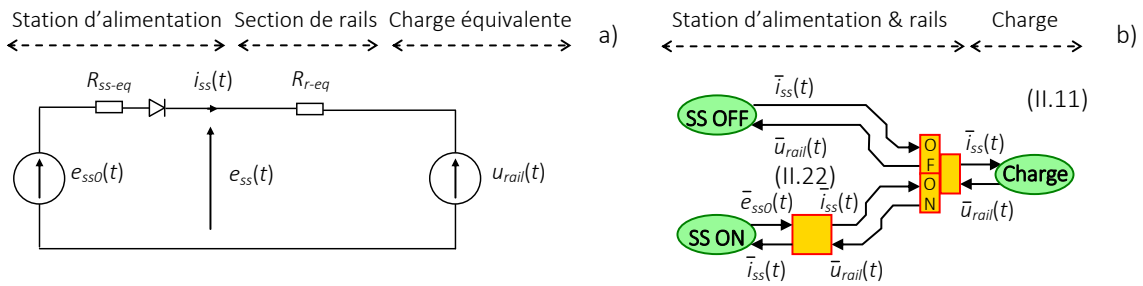


Figure II.9 : Modèle statique moyen comportemental : a) représentation structurelle, b) REM.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

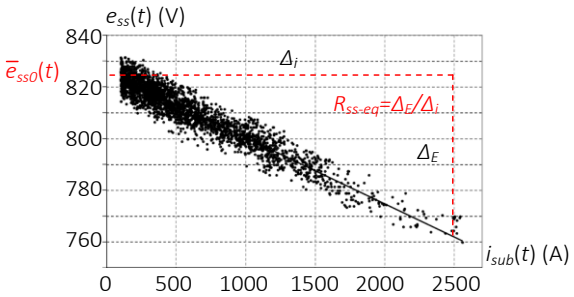


Figure II.10 : Détermination des paramètres du modèle statique moyen comportemental [BAR 12].

Modèle statique moyen linéaire

Enfin, le dernier modèle étudié est un modèle statique moyen linéaire [CHY 10], [WAN 12]. Celui-ci diffère du modèle statique moyen non-linéaire en négligeant la non-réversibilité du sous-système d'alimentation. Ainsi, aucune commutation de modèle n'est effectuée. La sous-station est systématiquement vue comme une source de tension en série avec une résistance quelque soit le sens de transfert de l'énergie. Elle est donc considérée comme réversible. Bien que très simpliste, ce modèle est parfois utilisé, en particulier dans des logiciels de dimensionnement.

Comparaisons des modèles

Une comparaison des modèles est effectuée pour déterminer quel modèle est le plus approprié pour une étude énergétique. Le modèle dynamique validé expérimentalement est pris pour référence. Les paramètres utilisés sont ceux du Tableau II.3. Ils sont fictifs mais correspondent à un cas réel dont la tension composée de l'alimentation HT serait de 20 kV.

Tableau II.3 : Paramètres du sous-système d'alimentation à pleine échelle.

Tension simple RMS du réseau	11 547 V	Résistance des pertes joules	7,6 mΩ
Fréquence du réseau	50 Hz	Inductance de fuite	12.9 µH
Rapport du transformateur	0,0296	Bus DC équivalent	12 mF
Résistance des pertes fers	466 kΩ	Résistance des rails $R_{r\text{-}eq}$	100 mΩ
Inductance magnétisante	595 H		

Le courant $i_{bus\text{-}eq}(t)$ imposé correspond à celui d'un cycle de vitesse réel et est généré par le modèle du sous-système de matériel roulant (cf. § II.2). Les simulations sont effectuées avec le même modèle de véhicule et la même vitesse de référence (charge identique), mais des différents modèles du sous-système d'alimentation.

Par ailleurs, le modèle statique moyen comportemental n'est pas comparé aux autres car il ne possède pas les mêmes limites. L'énergie absorbée sur le réseau n'est effectivement pas accessible. De plus, il donnerait exactement les mêmes résultats que le modèle statique moyen non-linéaire à condition d'imposer les même paramètres de résistance R_{eq} et de tension $\overline{e}_{ss0}(t)$. D'autre part, les pas de calcul sont adaptés aux différentes dynamiques considérées par chaque modèle.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Les résultats sont obtenus sur le même programme (Matlab-Simulink R2012b) et le même ordinateur (processeur 2,40 MHz) (Tableau II.4). L'erreur moyenne sur la consommation énergétique est donnée[3]. La comparaison des tensions aux bornes des rails $u_{rail}(t)$, des courants débités par la sous-station $i_{ss}(t)$, et des courants alternatifs appelés sur le réseau d'alimentation haute tension $i_g(t)$, est présentée (Figure II.11).

Tableau II.4 : Comparaisons des différents modèles du sous-système d'alimentation.

Modèles	Pas de calcul	Temps de sim.	Erreur moyenne	Ecart type
Dynamique instantané	0,05ms	348,3s	0 % (référence)	0
Statique moyen non-linéaire	1ms	5,2s	0,36 %	0,44
Statique moyen linéaire	1ms	5,1s	13,36 %	13,70

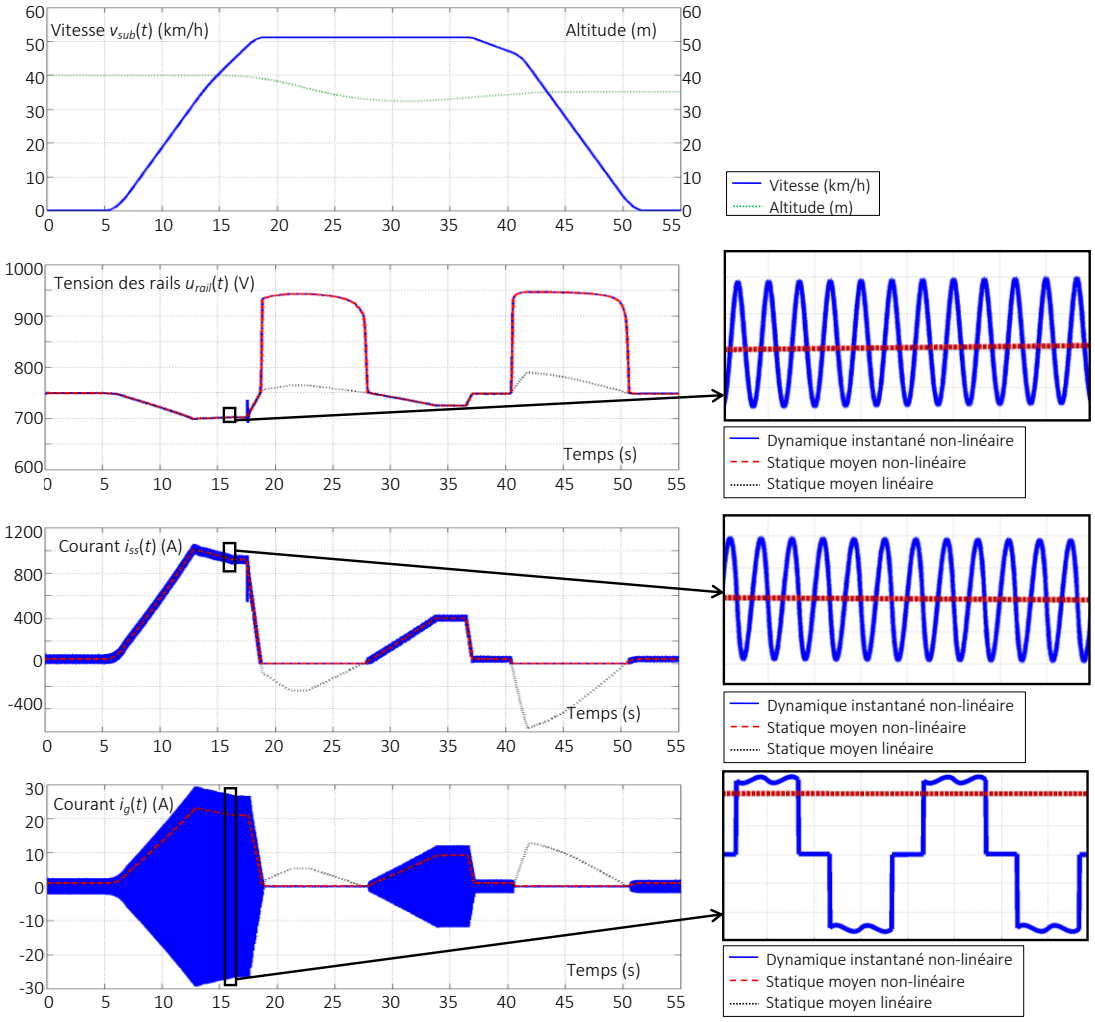


Figure II.11 : Comparaisons des différents modèles du sous-système d'alimentation.

[3] Les erreurs proviennent de la modélisation plus simpliste pour certains modèles et non de l'augmentation du pas de calcul pour ces mêmes modèles. Le choix des pas de temps a été effectué de manière à avoir une erreur de résolution numérique suffisamment faible.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

 Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Les résultats montrent que le modèle statique moyen non-linéaire fournit des résultats très satisfaisants et offre une vision moyennée des différentes variables. Son utilisation réduit considérablement le temps de simulation comparé au modèle dynamique (1/70) tout en gardant une forte précision sur l'estimation de la consommation (99 %). En revanche, comme attendu, la linéarisation du modèle induit des erreurs moyennes importantes sur l'énergie (13 %). Cela s'explique car ce modèle s'apparente au modèle simplifié d'une station d'alimentation réversible permettant la récupération de l'énergie. Même si il peut s'avérer suffisant dans des études de dimensionnement du système (car il détermine bien les pics de puissance), il n'est en revanche pas adapté à une étude énergétique. D'autre part, la simplification de l'inductance linéique des rails n'influe pas sur la consommation énergétique. D'un point de vue macroscopique, elle n'impacte pas non plus les moments de commutation de la station d'alimentation (passante/bloquée). Au vu des bons résultats du modèle moyen statique non-linéaire, ce dernier s'impose naturellement comme le plus approprié. Il sera alors utilisé par la suite.

II.1.d – Intérêts pour une simulation flexible

Le modèle statique moyen retenu permet d'acquérir une flexibilité importante de la simulation en donnant les possibilités de faire varier le niveau de tension du réseau d'alimentation et sa fréquence, de tester différents transformateurs, association de redresseurs, ou encore de distribution d'énergie ; les paramètres du modèle étant tous paramétrables.

De plus, l'extension de ce modèle est facilement réalisable pour prendre en compte des stations d'alimentation non-réversibles plus complexes (dodécaphasées). Ce type de sous-station est plus performant qu'une simple station d'alimentation équipée d'un pont de diode PD3. Les tensions et courants sont effectivement mieux redressés et se rapprochent donc d'avantage des variables continues obtenues avec le modèle statique moyen. De plus, les variables générées du côté alternatif contiennent moins d'harmoniques. Le modèle statique moyen est alors d'autant plus pertinent. Dans ce cas, seules les équations (II.20) et (II.21) sont à modifier.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

II.2 – Modélisation du sous-système matériel roulant

Le matériel roulant pris pour exemple est le métro Val 208. Cependant, la méthode de modélisation retenue est applicable à d'autre type de métro. Le Val 208 est un Véhicule Automatique Léger (Val), développé par Siemens, qui peut être composé de 2 ou 4 voitures. Historiquement, Val est l'acronyme de Villeneuve d'Ascq – Lille (France), où fut réalisé en 1983 le premier métro au monde entièrement automatique par Matra Transport. C'est à cette époque que la première version du Val (Val 206) est lancée. Les différentes versions du Val sont aujourd'hui en activités en France (Lille, Toulouse, Rennes, Paris-Orly et Paris-Charles-de-Gaulle) et dans le monde (Turin en Italie, Uijeongbu en Corée du Sud, Taipei à Taiwan, et dans l'aéroport de Chicago-O'Hare aux USA).

La traction du Val 208 est décrite sur la Figure II.12. Chaque voiture est équipée de 2 bogies constitués d'un filtre d'entrée *LC* sur lequel sont câblés en parallèle les auxiliaires de la voiture et 2 moteurs-roues. Chaque moteur-roue est composé d'un onduleur triphasé à IGBT [SAB 98], [FAB 15], d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP), d'un frein à disque, d'un réducteur, et d'une roue. Les bogies sont finalement reliés en parallèle sur les rails d'alimentation afin de capter l'énergie au travers de frotteurs. La tension nominale continue délivrée par les rails est de 750 V.

Cette partie développe un modèle propice à l'étude énergétique du Val 208. Sa granularité doit alors être adaptée à l'estimation des consommations d'énergie. Ainsi, les choix des modèles et des phénomènes à prendre en compte sont primordiaux de façon à garantir une précision énergétique tout en limitant le temps de simulation.

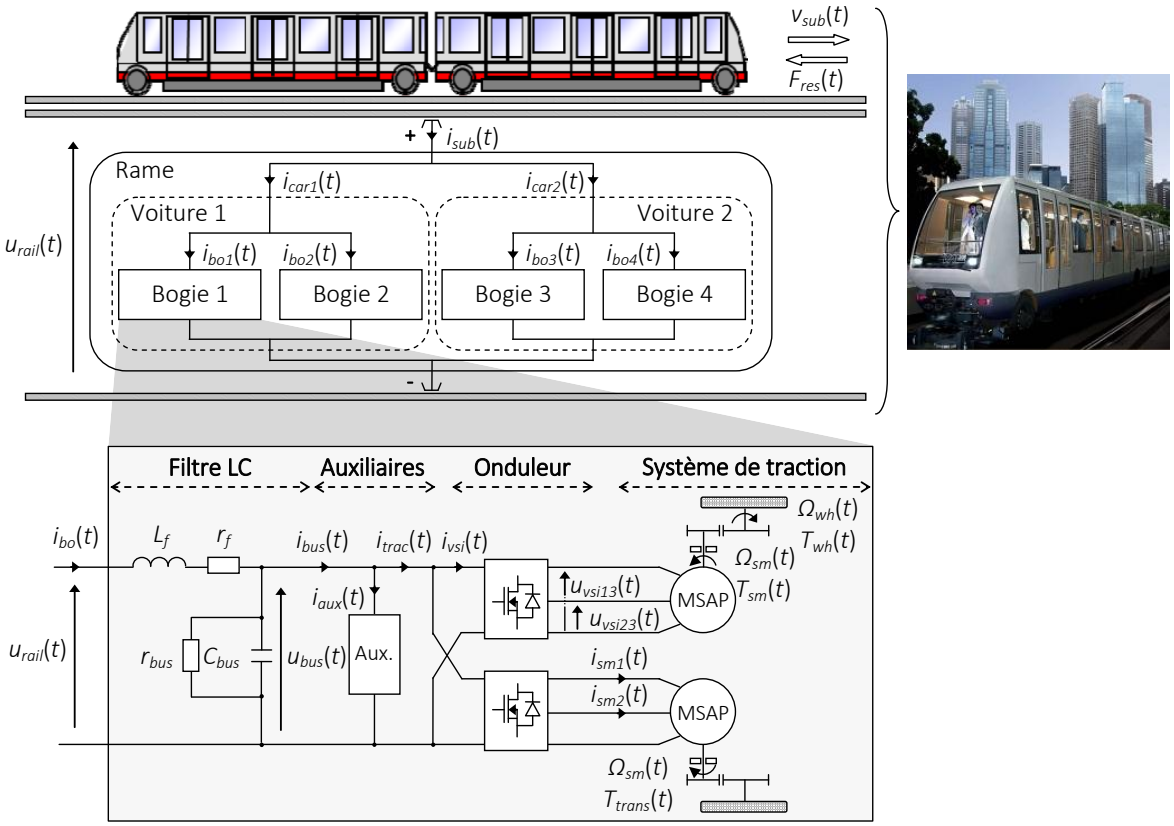


Figure II.12 : Structure de traction du métro automatique Val 208.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

 Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

La loi de contact entre les roues et la piste de roulement ou encore les jeux dans les engrenages mécaniques sont habituellement négligés. Ces phénomènes ont par ailleurs déjà été étudiés au sein du L2EP et de Siemens en utilisant la REM pour la commande de la traction [VER 07]. Ils ont confirmés un impact insignifiant sur la consommation d'énergie. D'autre part, pour la même raison, la traction (convertisseur statique et machine électrique) est généralement modélisée de manière statique, alors que les filtres d'entrée *LC* ne sont tout simplement pas pris en compte dans la plupart des travaux existants. Toutefois, ils seront abordés de manière dynamique dans ce mémoire, du moins dans une première phase de modélisation. Nous verrons dans le chapitre III que la modélisation dynamique partielle du filtre permet de mieux mettre en évidence certains phénomènes qui apparaissent, notamment lors des phases de freinage. De plus, afin de capitaliser les différents travaux du laboratoire sur la modélisation dynamique des sous-systèmes de traction (ex : Val 206 et NéoVal) [VER 07], [ALL 10b] et des différentes réductions de modèle possibles [LET 10], [HOR 11], la machine synchrone sera dans un premier temps modélisée dynamiquement. Enfin, une modélisation « mono-roue » équivalente sera considérée. Elle consiste à simuler un seul moteur-roue à la place des 8 de la rame (cf. Figure II.12). Cela implique un fonctionnement en ligne droite (courbes négligées) et une distribution équitable des puissances entres les différents bogies. Des études préliminaires ont montré que cette hypothèse n'impacte que très faiblement les résultats [MAY 13].

Une première sous-partie définit un modèle dynamique permettant d'estimer précisément le comportement du sous-système. Ce type de modèle permet d'établir les causalités afin de les mettre en exergue. Elles peuvent alors être plus facilement conservées au cours du processus de réduction. Dans une deuxième sous-partie le modèle dynamique est validé expérimentalement. Enfin, une troisième partie étudie différents modèles réduits de façon à limiter le temps de simulation tout en conservant une précision suffisante. Une comparaison des différents modèles déduit alors le modèle le plus approprié pour l'étude envisagée. L'objectif final de simuler une ligne de métro, constituée d'un nombre important de sous-systèmes, implique un temps de simulation le plus rapide possible tout en gardant une bonne précision.

II.2.a – Modélisation dynamique du sous-système matériel roulant

Le modèle dynamique du Val 208 est organisé en utilisant le formalisme REM (Figure II.13) [MAY 13], [MAY 14a]. Les limites du sous-système étudié sont les sources d'énergie électrique et mécanique que représentent respectivement les rails et la piste de circulation (environnement). La modélisation individuelle de chaque composant, ainsi que la décomposition du système suivant ses fonctions réalisées, correspond à l'approche cognitive requise par la REM.

Représentation Energétique Macroscopique

Le rail – La source que représente le rail est vue comme une source imposant la tension $u_{rail}(t)$ au sous-système. Celui-ci réagit par un courant $i_{sub}(t)$ correspondant à celui appelé par la rame.

L'environnement – Il est modélisé par une force de résistance $F_{res}(t)$ qui s'oppose au mouvement. Celle-ci dépend de la vitesse de la rame $v_{sub}(t)$, de sa masse statique M_{sub}, de sa composition (nombre de voiture $N_{car/rame}$), de la pente α, de la vitesse du vent $v_{wind}(t)$, de l'accélération de la pesanteur g, et des coefficients aérodynamiques du véhicule (F_0, A_{r1}, A_{r2}, et B_r) [SAB 98].

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

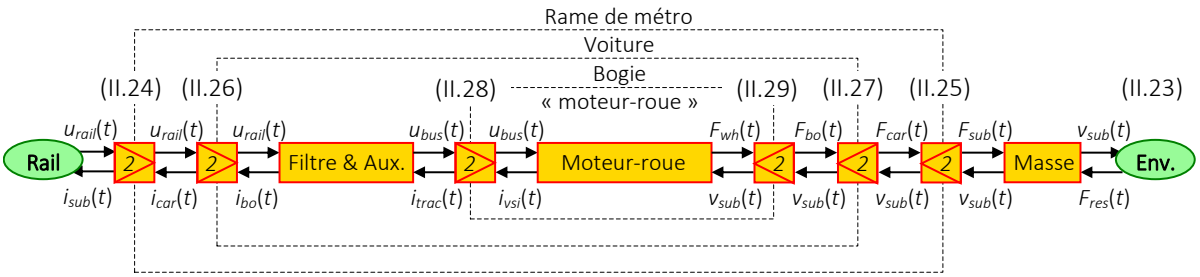


Figure II.13 : Prise en compte et représentation des couplages du Val 208.

$$F_{res}(t) = N_{car/rame} F_0 + A_{r1} M_{sub} + N_{car/rame} A_{r2} v_{sub}(t) + B_r sign\{v_{sub}(t) - v_{wind}(t)\}[v_{sub}(t) - v_{wind}(t)]^2 + M_{sub} g \sin(\alpha) \quad \text{(II.23)}$$

La roue équivalente – La modélisation mono-roue équivalente est représentée de façon particulière en utilisant des éléments d'adaptation (carré orange avec un triangle imbriqué). Cet élément a été introduit récemment [BOU 06], [ALL 10a], [HOR 11]. Le couplage électrique considère la même tension $u_{rail}(t)$ aux bornes des différentes voitures. Le couplage mécanique fait de même en considérant une vitesse linéaire $v_{sub}(t)$ identique pour toutes les voitures. Ainsi, les équations (II.24) et (II.25) sont considérées avec $i_{car}(t)$ le courant d'une voiture, $F_{car}(t)$ la force linéaire d'une voiture, et $F_{sub}(t)$ la force linéaire totale de la rame. Pour une rame composée de 2 voitures $N_{car/rame}$ vaut 2.

$$i_{sub}(t) = N_{car/rame}\, i_{car}(t) \quad \text{avec} \quad i_{car1}(t) = i_{car2}(t) \quad \text{(II.24)}$$

$$F_{sub}(t) = N_{car/rame}\, F_{car}(t) \quad \text{avec} \quad F_{car1}(t) = F_{car2}(t) \quad \text{(II.25)}$$

De la même façon, les couplages des bogies d'une voiture sont représentés par des éléments d'adaptation (II.26) et (II.27), avec $N_{bo/car}$ le nombre de bogie par voiture (2 pour un Val 208), $i_{bo}(t)$ le courant absorbé par un bogie, et $F_{bo}(t)$ le force linéaire d'un bogie. Les variables parallèles $u_{rail}(t)$ et $v_{sub}(t)$ sont également considérés identiques sur chaque bogie.

$$i_{car}(t) = N_{bo/car}\, i_{bo}(t) \quad \text{avec} \quad i_{bo1}(t) = i_{bo2}(t) \quad \text{(II.26)}$$

$$F_{car}(t) = N_{bo/car}\, F_{bo}(t) \quad \text{avec} \quad F_{bo1}(t) = F_{bo2}(t) \quad \text{(II.27)}$$

Enfin, les couplages des moteurs-roues sur les filtres sont également représentés par des éléments d'adaptation. L'hypothèse du roulage en ligne droite implique que les machines des roues droite et gauche possèdent strictement les mêmes fonctionnements. Ainsi, la tension de sortie du filtre $u_{bus}(t)$ est supposée identique aux bornes des différents moteurs-roues, tout comme la vitesse linéaire $v_{sub}(t)$ de chaque roue. Les équations (II.28) et (II.29) régissent les couplages électriques et mécaniques avec $N_{mr/bo}$ le nombre de moteurs-roues par bogie (2 pour un Val 208), $i_{trac}(t)$ le courant de traction absorbé sur le filtre, et $i_{vsi}(t)$ le courant absorbé par un convertisseur statique.

$$i_{trac}(t) = N_{mr/bo}\, i_{vsi}(t) \quad \text{avec} \quad i_{vsi1}(t) = i_{vsi2}(t) \quad \text{(II.28)}$$

$$F_{bo}(t) = N_{mr/bo}\, F_{wh}(t) \quad \text{avec} \quad F_{wh1}(t) = F_{wh2}(t) \quad \text{(II.29)}$$

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Ces différents couplages permettent d'obtenir une première représentation simplifiée (cf. Figure II.13). Dès qu'un élément d'adaptation est franchi, l'échelle de puissance est modifiée (zoom sur une partie du sous-système). Par exemple, au niveau des sources, la représentation correspond à une rame complète. En revanche, après le premier élément d'adaptation elle est zoomée sur une seule voiture, après le second élément, sur un seul bogie, et ainsi de suite.

Tout en conservant ce principe de représentation, une première simplification est effectuée en fusionnant les éléments d'adaptation voisins[4] (Figure II.14). Ainsi, un premier élément d'adaptation permet de lier directement les courants $i_{bo}(t)$ et $i_{sub}(t)$ (II.30) . De la même façon, un seul élément d'adaptation lie les forces $F_{wh}(t)$ et $F_{sub}(t)$ (II.31).

$$i_{sub}(t) = N_{car/rame}\, N_{bo/car}\, i_{bo}(t) \tag{II.30}$$

$$F_{sub}(t) = N_{car/rame}\, N_{bo/car} N_{mr/bo}\, F_{wh}(t) \tag{II.31}$$

Par la suite, les représentations du filtre *LC* et des auxiliaires (Filtre & Aux.), d'une chaine de traction (moteur-roue), et de la masse dynamique du sous-système (Masse) vont être intégrées dans la représentation ci-dessous (Figure II.14).

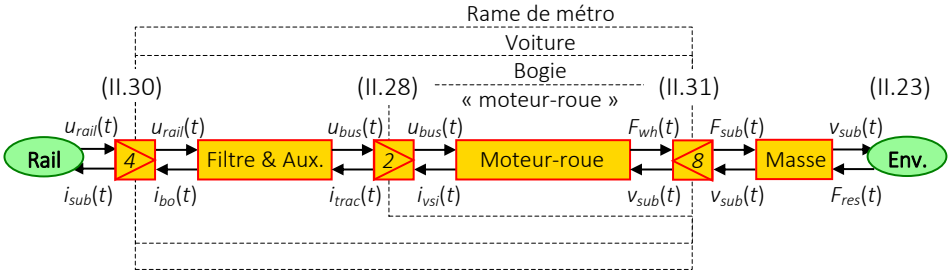


Figure II.14 : Représentation simplifiée des couplages du Val 208.

Le filtre d'entrée – Le filtre est composé d'une bobine et d'un condensateur (Figure II.15.a). Ces composants sont représentés par 2 éléments d'accumulation correspondant à l'inductance de filtrage (II.32) et au bus continu (II.33) (Figure II.15.b). Les variables énergétiques associées sont le courant de la bobine $i_{bo}(t)$ et la tension du bus continu $u_{bus}(t)$. Un filtre délivre alors une tension qui alimente en parallèle les auxiliaires et la traction de la rame. Cette connexion est représentée par un élément de couplage qui impose, en réaction de la tension $u_{bus}(t)$, un courant i_{bus}(t) absorbé sur le bus continu (II.34). Ce courant est la résultante des courants $i_{trac}(t)$ et $i_{aux}(t)$ absorbés par la traction et les auxiliaires. Ces derniers sont supposés répartis équitablement entre les différents bogies et consomment une puissance moyenne $P_{aux/bo}(t)$ sur chaque bogie (II.35).

$$L_f \frac{d}{dt} i_{bo}(t) = u_{rail}(t) - u_{bus}(t) - r_f\, i_{bo}(t) \tag{II.32}$$

$$C_{bus} \frac{d}{dt} u_{bus}(t) = i_{bo}(t) - i_{bus}(t) - \frac{u_{bus}(t)}{r_{bus}} \tag{II.33}$$

[4] Les valeurs de $N_{bo/car}$ et $N_{mr/bo}$ peuvent être moyennées sur l'ensemble de la rame. Ainsi, le modèle devient très général en permettant de représenter une très grande gamme de type de matériel roulant. Par exemple, si la 1ère voiture possède 2 bogies de traction alors que la 2nd n'en possède qu'un, alors $N_{bo/car}$ = 1,5.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

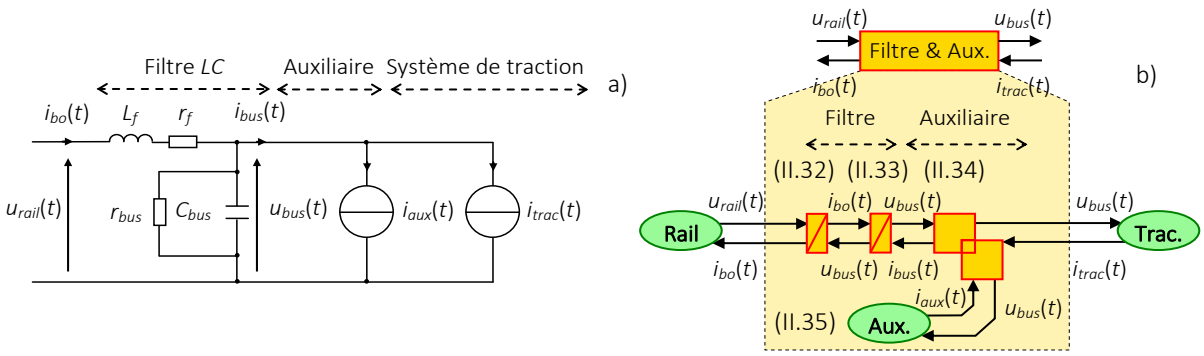


Figure II.15 : Filtre d'entrée et auxiliaires du Val 208 : a) représentation structurelle, b) REM.

$$i_{bus}(t) = i_{trac}(t) + i_{aux}(t) \tag{II.34}$$

$$i_{aux}(t) = \frac{u_{bus}(t)}{P_{aux/bo}(t)} \tag{II.35}$$

Le moteur-roue – Un onduleur, une MSAP et une transmission le composent (Figure II.16).

Le convertisseur statique – L'onduleur est représenté par un élément de conversion mono-domaine (Figure II.17). Il est commandé par un rapport de modulation $\underline{m}_{vsi}(t)$ [DEL 03b] qui lie le courant $i_{vsi}(t)$ et la tension continue $u_{bus}(t)$ aux variables de la MSAP : les courants $\underline{i}_{sm}(t)$ et les tensions composées $\underline{u}_{vsi}(t)$. Le modèle est défini par l'équation (II.36), avec η_{vsi} le rendement moyen de l'onduleur. Cette équation correspond à une modélisation linéaire aux valeurs moyennes. Ce choix est lié aux contraintes de l'étude énergétique visée et n'affecte pas le bilan énergétique. Les pertes par commutation et conduction sont prise en compte de façon moyenne dans η_{vsi}.

$$\begin{cases} \underline{u}_{vsi}(t) = \begin{bmatrix} u_{vsi13}(t) \\ u_{vsi23}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{vsi1}(t) \\ m_{vsi2}(t) \end{bmatrix} u_{bus}(t) = \underline{m}_{vsi}(t)\, u_{bus}(t) \\ i_{vsi}(t) = \eta_{vsi}^{k} \begin{bmatrix} m_{vsi1}(t) & m_{vsi2}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sm1}(t) \\ i_{sm2}(t) \end{bmatrix} = \eta_{vsi}^{k}\, \underline{m}_{vsi}^{t}\, \underline{i}_{sm}(t) \end{cases} \quad \text{avec} \quad k = \begin{cases} -1 & \text{quand } i_{vsi}(t)\, u_{bus}(t) > 0 \\ 1 & \text{quand } i_{vsi}(t)\, u_{bus}(t) \leq 0 \end{cases} \tag{II.36}$$

La machine de traction – Les MSAP sont d'une puissance de 65 kW chacune pour un Val 208. Afin de simplifier les équations, le modèle est décrit dans le repère de Park [CHA 83], [CAR 95]. La REM de la machine se constitue de 3 éléments (Figure II.17) [DEL 03a]. Un élément de conversion mono-domaine change de repère à l'aide d'une transformation mathématique $P(\Theta)$ qui dépend de la position angulaire du rotor $\Theta(t)$. Les grandeurs triphasées alternatives définies dans un repère fixe (tensions composées $\underline{u}_{vsi}(t)$ et courant $\underline{i}_{sm}(t)$ de la MSAP) sont transformées en grandeurs biphasées continues (tensions $\underline{v}_{dq}(t)$ et courants $\underline{i}_{dq}(t)$) définies dans un repère tournant à la vitesse de synchronisme (II.37).

$$\begin{cases} \underline{v}_{dq}(t) = \begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \end{bmatrix} = [P(\theta)]\, \underline{u}_{vsi}(t) \\ \underline{i}_{dq}(t) = \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} = [P(\theta)]\, \underline{i}_{sm}(t) \end{cases} \quad \text{avec} \quad P(\theta) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}}\cos(\theta) & -\frac{\cos(\theta)}{\sqrt{6}} + \frac{\sin(\theta)}{\sqrt{2}} \\ -\sqrt{\frac{2}{3}}\sin(\theta) & \frac{\sin(\theta)}{\sqrt{6}} + \frac{\cos(\theta)}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.37}$$

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

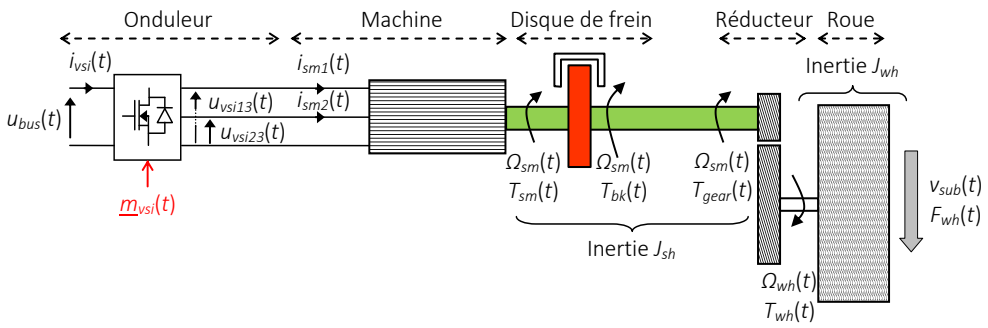


Figure II.16 : Structure électrique et mécanique d'un moteur-roue du Val 208.

Un élément d'accumulation représente les enroulements statoriques de la machine avec pour variables énergétiques les courants $i_d(t)$ et $i_q(t)$. Elles sont déterminées de façon causale en fonction de la résistance des enroulements statoriques r_{sm}, des inductances directe L_d et quadratique L_q, et des forces électromotrices (f.e.m) $e_d(t)$ et $e_q(t)$ (II.38).

$$\begin{cases} L_d \dfrac{d}{dt} i_d(t) = v_d(t) - e_d(t) - r_{sm} i_d(t) \\ L_q \dfrac{d}{dt} i_q(t) = v_q(t) - e_q(t) - r_{sm} i_q(t) \end{cases} \tag{II.38}$$

Enfin, un élément de conversion représente la conversion électromécanique. Il détermine le couple de la MSAP $T_{sm}(t)$ et ses f.e.m, avec η_{sm} le rendement moyen (hors pertes joules), p le nombre de paire de pôles, Φ_f le flux moyen des aimants permanents dans l'entrefer, et $\Omega_{sm}(t)$ la vitesse angulaire de l'arbre de la MSAP.

$$\begin{cases} T_{sm}(t) = p\left[\left(L_d - L_q\right) i_d(t) + \sqrt{\dfrac{3}{2}}\Phi_f\right]\eta_{sm}^{k} i_q(t) \text{ avec } k = \begin{cases} -1 \text{ quand } T_{sm}(t)\,\Omega_{sm}(t) < 0 \\ 1 \text{ quand } T_{sm}(t)\,\Omega_{sm}(t) \geq 0 \end{cases} \\ \underline{e}_{dq}(t) = \begin{bmatrix} e_d(t) \\ e_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -pL_d i_q(t)\,\Omega_{sm}(t) \\ p\Omega_{sm}(t)\left[L_d i_d(t) + \sqrt{\dfrac{3}{2}}\Phi_f\right] \end{bmatrix} \end{cases} \tag{II.39}$$

La transmission mécanique – La modélisation simplifiée de la transmission mécanique néglige l'élasticité des arbres mécaniques ainsi que la loi de contact entre la roue et le sol [VER 07]. La transmission considérée est donc composée d'un arbre en sortie de la machine sur lequel est couplé un disque de frein. On trouve une addition des couples de la MSAP $T_{sm}(t)$ et du frein mécanique $T_{bk}(t)$ (II.40). Ce dernier est supposé identique à sa référence $T_{bk\text{-}ref}(t)$ selon un modèle statique du frein (II.41). L'association des couples est représentée par un élément de couplage. Le frein mécanique l'est par une source de couple (Figure II.17).

$$T_{trans}(t) = T_{sm}(t) + T_{bk}(t) \tag{II.40}$$

$$T_{bk}(t) = T_{bk-ref}(t) \tag{II.41}$$

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

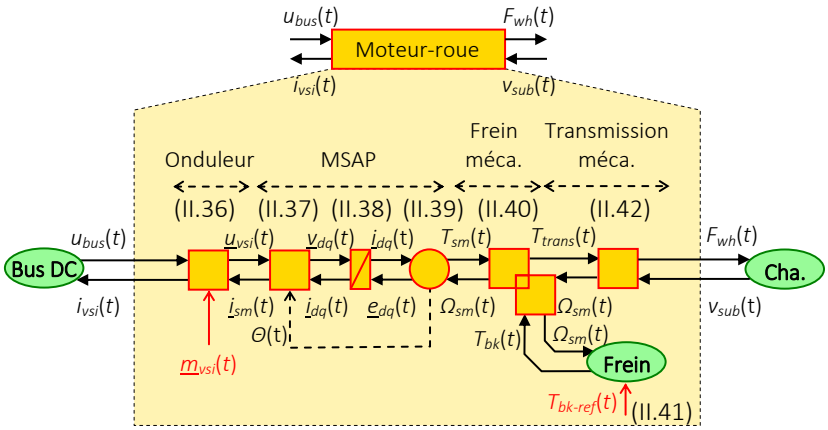


Figure II.17 : REM d'un moteur-roue du Val 208.

De plus, un réducteur mécanique et une roue sont en sortie d'arbre. Ils forment la conversion mécanique qui lie les variables angulaires de l'arbre mécanique ($T_{trans}(t)$ et $\Omega_{sm}(t)$) aux variables linéaires appliquées à la roue (vitesse $v_{sub}(t)$ et force $F_{wh}(t)$). Elle est représentée par un élément de conversion régi par la relation (II.42), avec K_{gear} le rapport du réducteur, R_{wh} le rayon de la roue, et η_{trans} le rendement global de la transmission.

$$\begin{cases} F_{wh}(t) = \eta_{trans}^{k} K_{trans} T_{trans}(t) \\ \Omega_{sm}(t) = K_{trans} v_{sub}(t) \end{cases} \quad \text{avec} \quad K_{trans} = \frac{K_{gear}}{R_{wh}} \quad \text{et} \quad k = \begin{cases} 1 & \text{quand } F_{wh}(t) v_{sub}(t) > 0 \\ -1 & \text{quand } F_{wh}(t) v_{sub}(t) \leq 0 \end{cases} \tag{II.42}$$

La REM complète d'un moteur-roue est représentée sur la Figure II.17. Bien que les inerties tournantes n'y apparaissent pas, elles sont prises en compte par la suite en définissant une masse statique équivalente. Leurs apparitions directes feraient apparaitre des conflits d'associations dans la REM [Annexe 4]. Cette dernière est donc obtenue après l'application des règles de permutation et de concaténation résolvant ces conflits [BOU 12]. Les inerties ne sont ici pas négligeables car elles représentent 15 % de l'énergie stockée sous forme mécanique.

La masse dynamique équivalente – $M_{sub\text{-}eq}$ concatène la masse statique du véhicule M_{sub} (incluant les passagers) avec les inerties tournantes ramenées au niveau du châssis [MAY 14a]. Cette masse dynamique équivalente est définie de façon à conserver la même quantité d'énergie stockée dans les parties mécaniques [Annexe 4]. L'expression de l'équation fondamentale de la dynamique permet d'exprimer de manière causale la vitesse linéaire $v_{sub}(t)$ en fonction de la force de traction totale de la rame $F_{sub}(t)$ et de la force de résistance à l'avancement $F_{res}(t)$. La masse dynamique est représentée par un élément d'accumulation (Figure II.18).

$$M_{sub-eq} \frac{d}{dt} v_{sub}(t) = F_{sub}(t) - F_{res}(t) \tag{II.43}$$

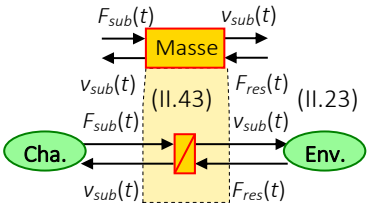


Figure II.18 : REM du châssis de la rame.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

La REM globale du modèle dynamique du Val 208 est construite par association des différentes REM (Figure II.19). Une organisation fonctionnelle causale est obtenue. Par ailleurs, la REM conduit à une approche de simulation « forward » qui nécessite de simuler la commande du sous-système. Celle-ci fait apparaitre les variables de réglage (fonctions de modulation $\underline{m}_{vsi}(t)$ et couple de freinage de référence $T_{bk\text{-}ref}(t)$) qui restent à déterminer. Une commande est déduite afin d'imposer la vitesse de référence $v_{sub\text{-}ref}(t)$ et faire le lien entre cet objectif et les variables de réglage.

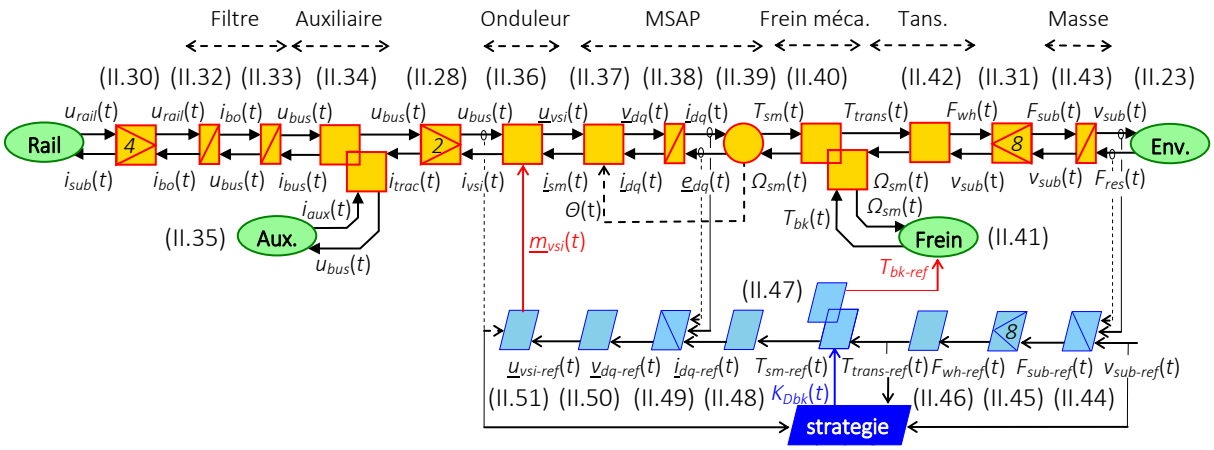


Figure II.19 : REM, SMC, et stratégie du modèle dynamique du Val 208.

Structure Maximale de Commande

La Structure Maximale de Commande (SMC) permet l'articulation entre commande locale (asservissements, etc.) et commande globale du système (gestion énergétique du système global) [BOU 12]. Elle est déduite de la REM par un processus systématique d'inversion (cf. Figure II.19) [BOU 03b], [LHO 14]. Elle met notamment en exergue les asservissements, les mesures, et les différents degrés de liberté. Ces derniers sont principalement liés aux nœuds énergétiques des éléments de couplage. Ils sont utilisés afin d'appliquer diverses stratégies de gestion énergétique, en fonction des objectifs et des contraintes du système. Ils sont donc le lien entre les commandes locales et globales (stratégies). Par ailleurs, la SMC considère que toutes les variables sont mesurables. Elle possède généralement un nombre important de capteurs. Certaines variables peuvent alors être estimées. De plus, la structure de commande peut également être simplifiée a postériori [BOU 02]. Néanmoins, le but étant ici de définir un programme de simulation, ces simplifications et estimations ne sont pas effectuées.

Pour le sous-système étudié, l'objectif de la commande est d'imposer la vitesse $v_{sub\text{-}ref}(t)$. Une chaine de réglage lie les variables de réglage avec l'objectif (Figure II.20). La commande est obtenue par inversion des éléments REM présents sur cette chaine [MAY 14a].

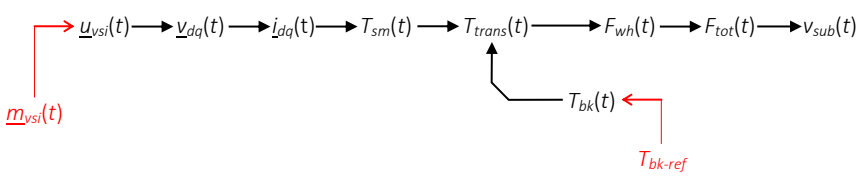


Figure II.20 : Chaine de réglage du Val 208.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Les éléments d'accumulation sont inversés par des asservissements (ici de courant $C_i(t)$ (II.49) et de vitesse $C_v(t)$ (II.44)). Ces asservissements nécessitent des mesures utilisées par les correcteurs, mais aussi permettant le rejet explicite des perturbations [BOU 12]. Des inversions directes sont effectuées pour les éléments de conversion (roues (II.45), transmission mécanique (II.46), conversion électromécanique (II.48), transformation de Park (II.50), et onduleur (II.51)). De plus, l'inversion du couplage des freins nécessite d'introduire un coefficient de distribution $K_{Dbk}(t)$ afin de répartir l'énergie lors du freinage (II.47). Une stratégie est définie ci-après dans cette optique. Les équations de la commande sont données ci-dessous.

$$F_{sub-ref}(t) = F_{res-mes}(t) + C_v(t)\left[v_{sub-ref}(t) - v_{sub-mes}(t)\right] \tag{II.44}$$

$$F_{wh-ref}(t) = \frac{F_{sub-ref}(t)}{N_{car/rame} N_{bo/car} N_{mr/bo}} \tag{II.45}$$

$$T_{trans-ref}(t) = \frac{F_{wh-ref}(t)}{K_{trans}} \tag{II.46}$$

$$\begin{cases} T_{sm-ref}(t) = K_{Dbk}(t) T_{trans-ref}(t) \\ T_{bk-ref}(t) = \left[1 - K_{Dbk}(t)\right] T_{trans-ref}(t) \end{cases} \quad \text{avec} \quad K_{Dbk}(t) \in [0,1] \tag{II.47}$$

$$\begin{cases} i_{d-ref}(t) = 0 \\ i_{q-ref}(t) = \dfrac{T_{sm-ref}(t)}{p\left[\left(L_d - L_q\right) i_{d-ref}(t) + \sqrt{\dfrac{3}{2}}\Phi_f\right]} \end{cases} \tag{II.48}$$

$$\begin{cases} v_{d-ref}(t) = e_{d-mes}(t) + C_i(t)\left[i_{d-ref}(t) - i_{d-mes}(t)\right] \\ v_{q-ref}(t) = e_{q-mes}(t) + C_i(t)\left[i_{q-ref}(t) - i_{q-mes}(t)\right] \end{cases} \tag{II.49}$$

$$\underline{u}_{vsi-ref}(t) = \left[P(\theta)\right]^{-1} \underline{v}_{dq-ref}(t) \tag{II.50}$$

$$\underline{m}_{vsi}(t) = \frac{\underline{u}_{vsi-ref}(t)}{u_{bus-mes}(t)} \tag{II.51}$$

Stratégie de gestion énergétique

Les stratégies de gestion de l'énergie sont également appelées commande globale. Elle s'applique au niveau des nœuds d'énergie (couplages) en agissant sur les coefficients de distribution ou de pondération, mais aussi sur la génération des références [BOU 03a]. Dans le cas étudié, en raison des hypothèses, seule la distribution entre freinage électrique et mécanique nécessite une stratégie. Le freinage peut effectivement être assuré de différentes manières : électrique (freinage récupératif), mécanique (freinage dissipatif), ou une combinaison des deux (freinage hybride)[5].

[5] Dans le cas du Val 208 des freins mécaniques sont utilisés pour effectuer le freinage dissipatif. Néanmoins, dans d'autres applications, ce rôle est assuré par des rhéostats de freinage situés sur le bus continu.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

La récupération d'énergie au freinage est un point clef de l'efficacité énergétique. Elle permet de réutiliser l'énergie stockée dans la masse équivalente du véhicule (aux pertes près), ce qui peut représenter 40 % de l'énergie de traction. Le freinage récupératif est donc fortement privilégié [ADI 98], [BAR 08a], [DOM 12], [IAN 12]. Les stratégies de récupération doivent donc être performantes et permettre un renvoi maximal de l'énergie sur les rails. Néanmoins, les contraintes du sous-système (couple limite des machines et tension maximale aux bornes du bus DC) doivent être respectées. Par ailleurs, ce dernier point est également exploité pour quantifier la réceptivité de la ligne. Ces aspects doivent donc être pris en compte lors de l'établissement de la stratégie de freinage.

Premièrement, lors du freinage électrique, le couple limite des machines $T_{sm\text{-}lim}(t)$ doit être respecté (Figure II.21.a). Le frein mécanique est donc uniquement activé en compensation du freinage électrique. Si un couple de freinage $T_{trans\text{-}ref}(t)$ est requis, le freinage électrique participe autant qu'il le peut en imposant un couple de freinage sur la MSAP $T_{sm\text{-}ref}(t)$. Si le couple $T_{trans\text{-}ref}(t)$ est inférieur à la limite $T_{sm\text{-}lim}(t)$, alors le freinage est uniquement récupératif. Dans le cas contraire la MSAP fonctionne à son couple limite, et le complément est fourni par un couple de freinage dissipatif $T_{bk\text{-}ref}(t)$. Un coefficient de distribution $K_{Dbk\text{-}1}(t)$ traduit cette stratégie (II.52).

$$K_{Dbk-1}(t)=\frac{\min\left\{\left|T_{trans-ref}(t)\right|,\left|T_{sm-\lim}(t)\right|\right\}}{\left|T_{trans-ref}(t)\right|} \tag{II.52}$$

Deuxièmement, la tension maximale du bus DC est respectée en imposant une loi de régression dynamique du freinage récupératif en fonction de la tension du bus continu $u_{bus\text{-}mes}(t)$ (Figure II.21.b). Cette loi exprime un critère de distribution $K_{Dbk\text{-}2}(t)$ et décroit linéairement à partir d'une valeur de tension $U_{bus\text{-}brk}$ (900 V), où le freinage est uniquement régénératif, jusqu'à la tension maximale admissible $U_{bus\text{-}MAX}$ (950 V), où le freinage devient totalement dissipatif. Elle garantit le non-dépassement de la tension maximale du bus, ce qui dans le cas contraire peut être préjudiciable aux équipements connectés sur celui-ci. Lorsque la tension maximale est atteinte, toute l'énergie de freinage est dissipée dans les freins mécaniques, ce qui stabilise la tension à sa valeur limite. La tension diminue à nouveau lorsque le train redevient consommateur d'énergie.

Le coefficient de distribution final $K_{Dbk}(t)$, qui s'applique à l'équation (II.47), est une composante des 2 coefficients $K_{Dbk\text{-}1}(t)$ et $K_{Dbk\text{-}2}(t)$ exprimant le cas le plus contraignant d'un point de vue énergétique. Il vaut 1 lors de la traction (II.53).

$$K_{Dbk}(t)=\begin{cases}1 & \text{en phase de traction } (P\geq 0)\\ \min\left\{K_{Dbk-1}(t),K_{Dbk-2}(t)\right\} & \text{en phase de freinage } (P<0)\end{cases} \tag{II.53}$$

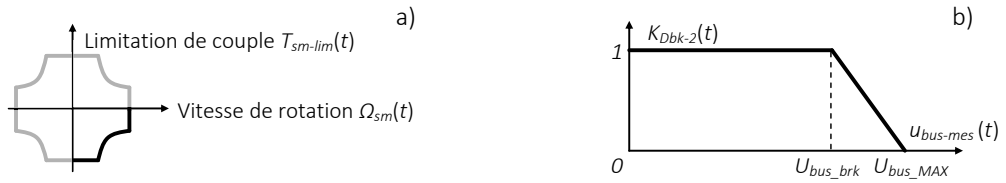


Figure II.21 : Contrainte du sous-système matériel roulant : a) limites de couple de la MSAP, b) Loi de régression dynamique du freinage électrique en fonction de la tension du bus DC.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

II.2.b – Validation du modèle dynamique du sous-système matériel roulant

Afin de valider la REM, la SMC, et la stratégie établies, une comparaison entre les résultats de simulation avec des relevés expérimentaux effectués sur un Val 208 est réalisée [MAY 14a]. Les relevés sont obtenus pour une rame circulant à vide (masse constante et connue) sur la ligne 2 du métro lillois, entre les stations C.H. Dron et Les Près (Figure II.22). Ce trajet correspond à une distance de 15 km avec 21 stations. A chaque station, le véhicule s'arrête pendant 14s. La vitesse, la tension des rails, ainsi que le courant absorbé ont été mesurés. La puissance et l'énergie en sont déduites.

La simulation est effectuée sous Matlab-Simulink© avec les paramètres du Val 208 (Tableau II.5). La vitesse mesurée est imposée comme vitesse de référence $v_{sub\text{-}ref}(t)$ en entrée de la SMC. De plus, afin d'être dans les mêmes conditions de réceptivité que la ligne, la tension des rails mesurée est imposée dans la source de tension $u_{rail}(t)$. Le courant $i_{sub}(t)$ et l'énergie absorbée sont comparés aux relevés expérimentaux (Figure II.23).

Tableau II.5 : Paramètres du métro automatique Val 208 (pour 2 voitures).

Vitesse maximale	80 km/h	Tension nominale des rails	750 V
Puissance de traction	8x65 kW	Rayon de la roue	0,495 m
Puissance totale des aux.	15 kW	Rapport du réducteur	4,889
Masse statique à vide	28,6 t	Condensateur du filtre	3 mF
Masse dynamique à vide	32,7 t	Inductance du filtre	1,4 mH

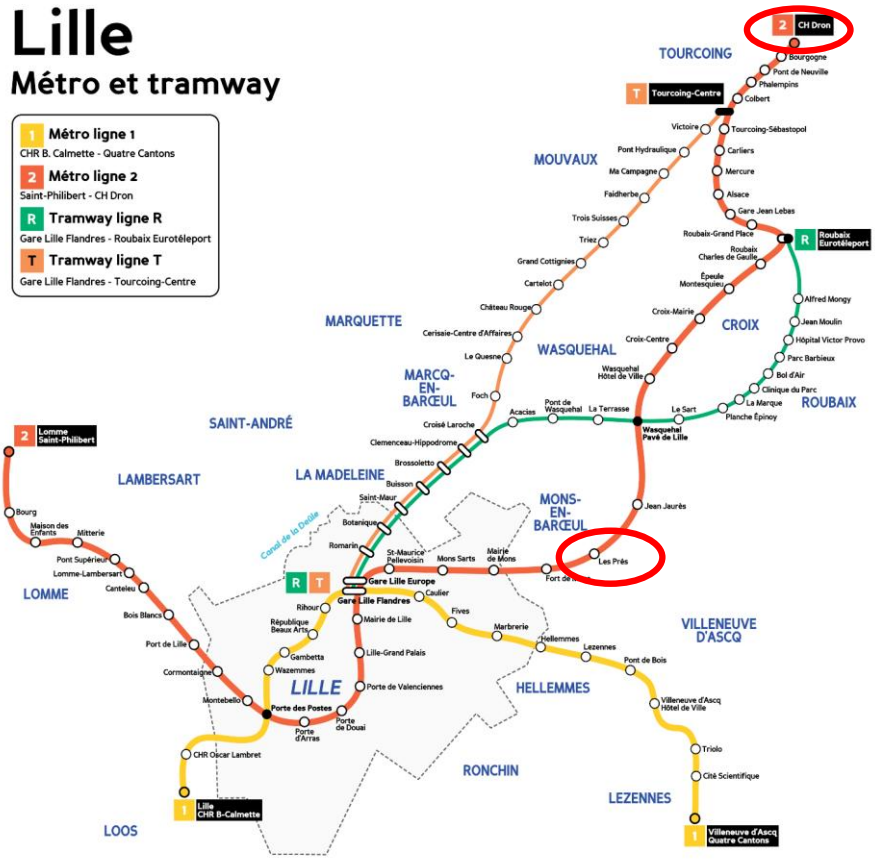


Figure II.22 : Plan du réseau de métros et tramways de Lille [TRA 15].

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Ces résultats valident expérimentalement le modèle dynamique du Val 208 avec une précision énergétique moyenne supérieure à 96,5 % (Tableau II.6). Cependant, le temps de simulation reste prohibitif par rapport à l'étude envisagée (185s sur le cycle complet).

Tableau II.6 : Validation du modèle dynamique du sous-système matériel roulant.

	Energie consommée	Erreur moyenne	Ecart type
Expérimentation	33,80 kWh	0 % (référence)	0
Simulation	34,15 kWh	3,48 %	2,36

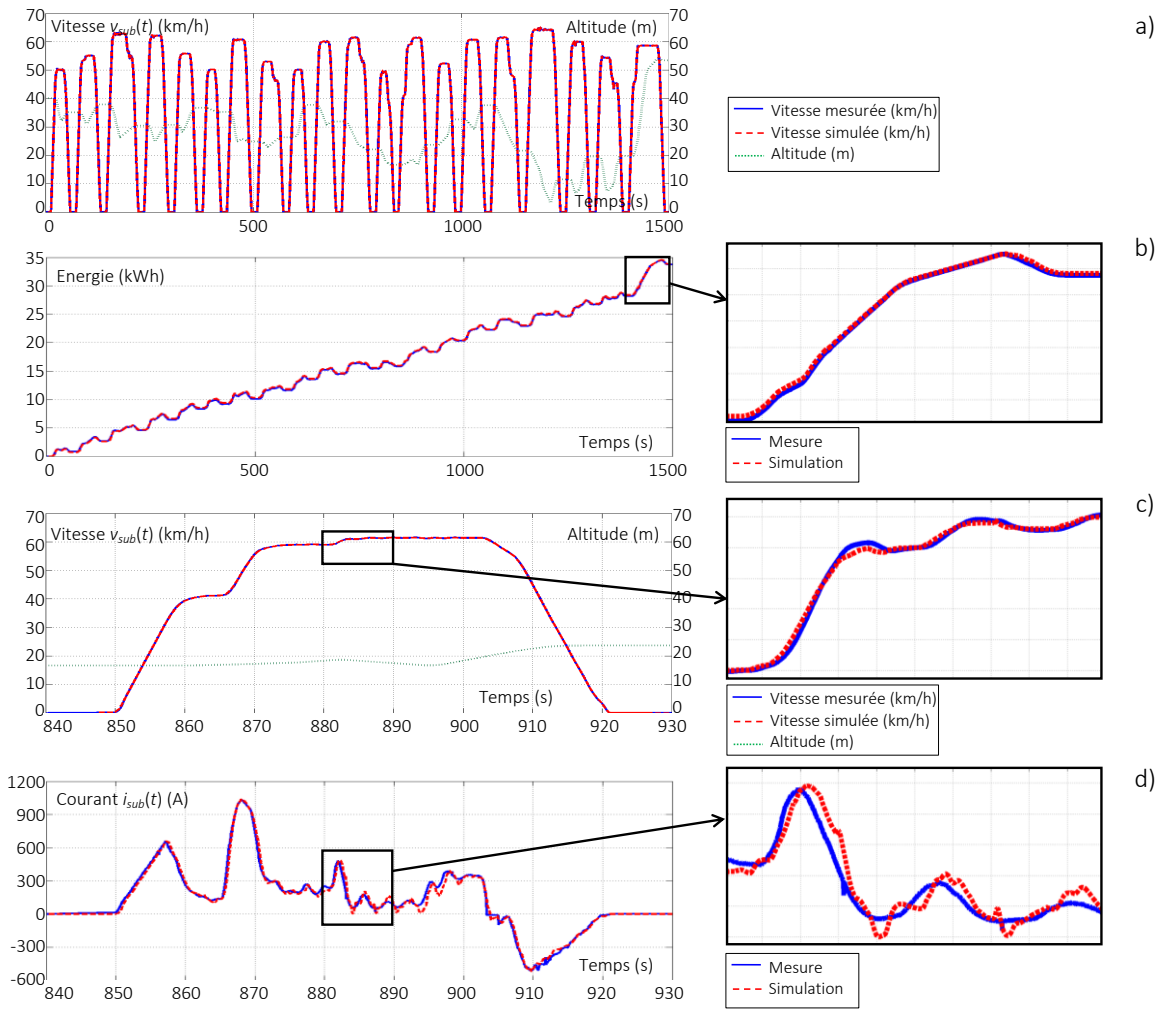


Figure II.23 : Validation expérimentale du modèle dynamique du sous-système matériel roulant : a) cycle de vitesse, et b) consommation d'énergie sur l'ensemble du trajet, c) vitesse et d) courant absorbé sur une inter-station.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

II.2.c – Réduction du modèle dynamique du sous-système matériel roulant

Le modèle dynamique permet une estimation précise des courants et énergies absorbés par une rame. Néanmoins, ce niveau de détails n'est possible qu'avec une discrétisation importante du temps de simulation. Cela se traduit par un faible pas de temps et donc une durée de la simulation importante. Par exemple, dans ce cas, 185s sont nécessaire pour simuler un cycle de 1 500s. Au vu de simuler une multitude de rames et autres sous-systèmes simultanément, ce temps doit être réduit si possible, tout en conservant une précision correcte. Un des paramètres les plus influents sur la durée de la simulation est le pas de calcul. Or ce dernier doit être choisi en accord avec la plus faible constante de temps du système. Cependant, d'un point de vue énergétique, les constantes de temps rapides n'interviennent que très peu sur la consommation d'énergie [GUZ 99], [GAO 07], [MAY 14a]. Elles peuvent être réduites en conservant la causalité du modèle suivant la philosophie de la REM.

Modèle quasi-statique du sous-système matériel roulant

Un modèle quasi-statique conserve la dynamique principale d'un système (ici la masse dynamique) et néglige les dynamiques plus rapides (électriques par exemple).

La machine de traction – La dynamique électrique des MSAP constitue la première simplification. Le modèle dynamique est remplacé par un modèle statique (Figure II.24) qui considère la commande en couple parfaite, sans retard entre la sortie et la référence ($T_{sm}(t) = T_{sm\text{-}ref}(t)$). Un tel modèle prend en compte le système (machine et convertisseur), sa commande, et également ses stratégies (défluxage par exemple) [HOR 11], [MAY 14a]. Afin de garder les causalités du modèle, les sorties du modèle dynamique sont conservées (couple $T_{sm}(t)$ et courant continu $i_{vsi}(t)$), ce qui est mis en exergue par la REM [LET 10]. Ces sorties sont calculées par une conversion de puissance électromécanique (II.54) en prenant en compte un rendement moyen équivalent $\eta_{sm\text{-}eq}$[6].

$$\begin{cases} i_{vsi}(t) = \dfrac{T_{sm}(t)\,\Omega_{sm}(t)}{\eta_{sm-eq}^{k}\; u_{bus}(t)} \\ T_{sm}(t) = T_{sm-ref}(t) \end{cases} \quad \text{avec} \quad k = \begin{cases} 1 & \text{quand } T_{sm}(t)\Omega_{sm}(t) > 0 \\ -1 & \text{quand } T_{sm}(t)\Omega_{sm}(t) \le 0 \end{cases} \tag{II.54}$$

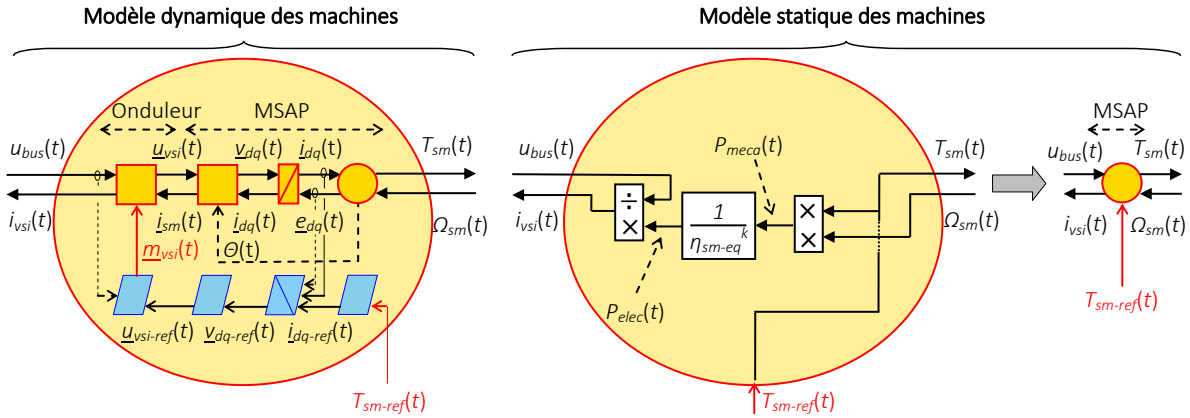


Figure II.24 : Déduction du modèle statique causale des machines dans le cas d'utilisation de rendement constant.

[6] Le rendement peut être une constante ou une cartographie issue d'essais expérimentaux qui dépendent du couple, de la vitesse de rotation, mais aussi de la tension d'alimentation [LET 10].

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

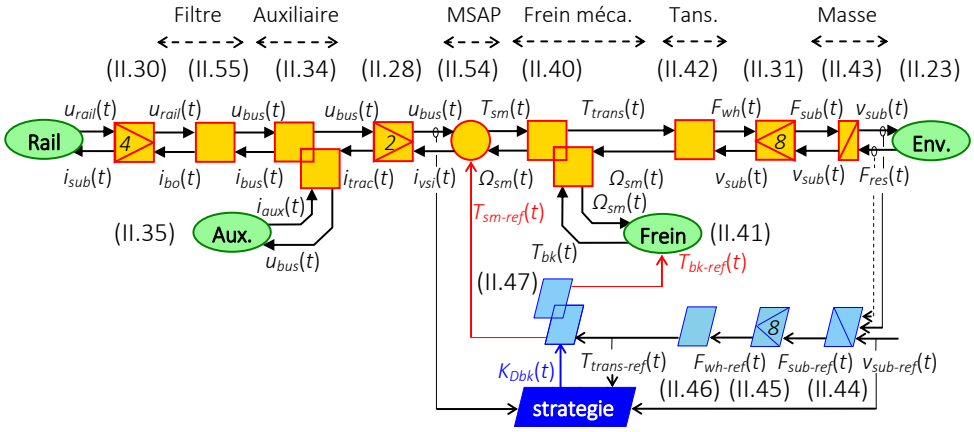


Figure II.25 : REM, SMC et stratégie du modèle quasi-statique du Val 208.

Le filtre d'entrée – Le filtre est également un élément à dynamique rapide. De plus, son rôle étant de filtrer les composantes HF dues aux convertisseurs de puissance, sa modélisation peut être simplifiée pour une étude énergétique. Un modèle statique est donc proposé en conservant ses pertes internes (II.55). Une expression matricielle est définie pour conserver les causalités en passant outre les problèmes de boucles algébriques [MAY 14a].

$$\begin{bmatrix} i_{bo}(t) \\ u_{bus}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{r_{bus}+r_f}\begin{bmatrix} r_{bus} & 1 \\ -r_{bus}r_f & r_{bus} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{bus}(t) \\ u_{rail}(t) \end{bmatrix} \qquad \text{(II.55)}$$

La REM globale du modèle quasi-statique du véhicule Val 208 néglige alors les dynamiques électriques du filtre et de la machine électrique (cf. Figure II.25 ci-dessus).

Modèle statique du sous-système matériel roulant

L'ensemble du train est maintenant modélisé de façon statique (Figure II.26.a). La simplification est étendue aux dynamiques plus lentes. Il est donné à titre indicatif mais de nombreux autres modèles statiques peuvent exister. Aucune dynamique n'est donc prise en compte et la commande du véhicule est supposée parfaite ; la vitesse $v_{sub}(t)$ est identique à sa référence $v_{sub\text{-}ref}(t)$. Une conversion de puissance détermine le courant absorbé par la rame avec un rendement de l'ensemble du train $\eta_{sub\text{-}eq}$ (II.56) (cartographie ou constante). Notons qu'un tel modèle est incapable de tenir compte des énergies cinétiques ni des freins mécaniques. Des erreurs relativement importantes devraient alors être commises.

$$\begin{cases} i_{sub}(t) = \dfrac{v_{sub}(t)F_{res}(t)}{\eta_{sub-eq}^{k}\, u_{rail}(t)} \\ v_{sub}(t) = v_{sub-ref}(t) \end{cases} \quad \text{avec} \quad k = \begin{cases} 1 & \text{quand } v_{sub}(t)F_{res}(t) > 0 \\ -1 & \text{quand } v_{sub}(t)F_{res}(t) \le 0 \end{cases} \qquad \text{(II.56)}$$

Modèle à vitesse constante

D'autres simplifications existent dans la littérature. Par exemple, la vitesse de référence appliquée au modèle statique est parfois approximée par sa valeur moyenne, négligeant ainsi les accélérations et décélérations (Figure II.26.b) [ALL 08], [VIA 12].

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

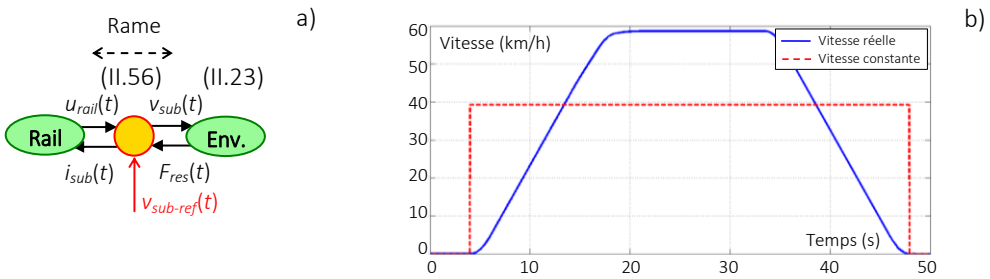


Figure II.26 : Modèles du Val 208 : a) modèle statique, b) modèle à vitesse constante.

Comparaison des modèles

Une comparaison des modèles en termes de précision sur l'estimation énergétique et de temps de calcul permet de déterminer le modèle le plus approprié. Le modèle dynamique validé expérimentalement est pris pour référence. Un cycle de vitesse identique est appliqué à chaque modèle simulé. De plus, suite à la simplification de certaines dynamiques, les pas de temps de simulation diffèrent entre modèles. Ils sont adaptés pour correspondre aux différentes dynamiques considérées dans chaque modèle. Les temps de simulation sont déterminés sur le même programme et le même ordinateur (cf. § II.1.c) (Tableau II.7)[7]. L'énergie consommée sur l'ensemble du parcours et un zoom sur le courant absorbé sur une inter-station sont présentés (Figure II.27).

Tableau II.7 : Comparaisons des différents modèles du sous-système matériel roulant.

Modèles	Pas de calcul	Temps de simulation	Erreur moyenne	Ecart type
Dynamique	1ms	185s	0 % (référence)	0
Quasi-statique	50ms	1,92s	0,77 %	0,85
Statique	100ms	0,25s	14,16 %	13,60
Vitesse cte.	100ms	0,23s	20,54 %	26,42

Le modèle quasi-statique donne des résultats très similaires à ceux du modèle dynamique avec une erreur sur la consommation inférieure à 1 %. Par ailleurs, il divise le temps de simulation par 100. De plus, l'erreur moyenne sur le courant est inférieure à 2 %. A l'inverse, les modèles statique et à vitesse constante génèrent des erreurs nettement supérieures, aussi bien sur la consommation d'énergie que sur le courant absorbé. Elles atteignent 14 % sur l'énergie en moyenne pour le modèle statique et 20 % pour celui à vitesse constante.

L'inconvénient majeur des modèles statique et à vitesse constante est qu'ils ne prennent pas en compte les appels de puissances produits lors des phases transitoires. C'est pourtant durant ces périodes que les pertes sont les plus importantes en raison de la valeur élevée du courant. Même si ils peuvent s'avérer utiles dans certains cas, ils ne sont pas adaptés une étude énergétique. Le modèle quasi-statique s'impose naturellement comme le plus approprié et est choisi pour la suite de l'étude.

[7] Il faut bien noter que les erreurs proviennent de la modélisation plus simpliste pour certains modèles et non de l'augmentation du pas de calcul pour ces mêmes modèles. Le choix des pas de temps a été effectué de manière à avoir une erreur de résolution numérique suffisamment faible.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

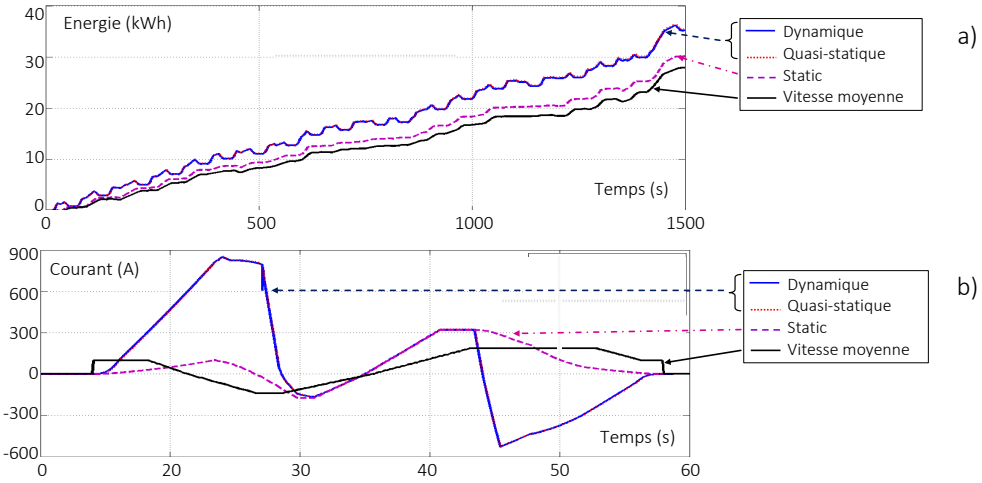


Figure II.27 : Comparaisons des modèles du Val 208 : a) consommation d'énergie, b) courant absorbé sur une inter-station.

II.2.d – Intérêts pour une simulation flexible

Le modèle quasi-statique retenu conduit à une flexibilité importante de la simulation. Il permet de faire varier la composition de la rame (nombre de voitures, de bogies, et de machines). Par exemple, cette partie traitait de la modélisation du Val 208, motorisé à 100 %. C'est-à-dire que tous les essieux de la rame sont motorisés. Une rame est alors composée de 2 voitures ($N_{car/rame}$ = 2), 2 bogies par voiture ($N_{bo/car}$ = 2) et 2 moteurs-roues par bogie ($N_{mr/bo}$ = 2). La rame possède donc 8 machines de traction ($N_{car/rame}$x$N_{bo/car}$x$N_{mr/bo}$ = 8). En cas de motorisation à 75 %, comme cela est fait sur le NéoVal, une voiture possède 2 essieux motorisé alors que la seconde n'en possède qu'un. Dans ce cas, le modèle est facilement adaptable en modifiant les coefficients de la rame avec $N_{car/rame}$ = 2, $N_{bo/car}$ = 1,5 et $N_{mr/bo}$ = 2. Ainsi, le modèle considère 6 machines de traction.

Par ailleurs, les puissances des auxiliaires, tout comme celles des machines peuvent également être modifiées pour investiguer différents types de motorisation. L'utilisation d'un modèle statique des machines permet aussi de considérer différents types de machine (DC, asynchrone, synchrone, etc.) puisque seul un rendement équivalent est nécessaire. L'ensemble des paramètres des autres composants sont également paramétrable (filtre *LC*, convertisseur statique, réducteur mécanique, roue, effort à l'avancement, etc.). Les paramètres de l'effort à l'avancement permettent notamment de considérer différentes pentes et coefficients aérodynamiques. Ces derniers dépendent en particulier de l'emplacement de la piste de roulement du métro (viaduc ou tunnel). Ainsi, n'importe quelles topologies géographiques peuvent être testées en appliquant les bons paramètres.

De plus, l'utilisation de la REM permet l'adaptation du modèle pour considérer par exemple des rhéostats de freinages, ou encore des SSE embarqués (batteries, supercondensateurs, etc.). L'ajout d'un élément de couplage sur le bus DC du véhicule permet de les considérer [ALL 10d]. Par ailleurs, les approches causales et « forward » utilisées permettent de prendre correctement en compte les limitations du système (cf. § II.3 suivante) et les commandes nécessaires. Le modèle obtenu présente donc un fort intérêt pour être utilisé dans une simulation flexible en permettant l'étude de différentes topologies d'alimentation, lignes de métros, ou encore différents matériels roulants.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

II.3 – Modélisation du sous-système de pilotage

Tout comme la modélisation des sous-systèmes physiques (alimentation et matériel roulant), le modèle du sous-système de pilotage des rames doit être adapté à l'étude énergétique. Ce sous-système a pour rôle de générer la vitesse de référence que doit suivre la rame afin d'atteindre la prochaine station. Or cette vitesse impacte fortement la consommation d'énergie. Il existe d'ailleurs différentes marches types plus ou moins économes en énergie [LUK 01]. Ces marches dépendent en particulier des limitations et contraintes du système qui doivent être respectées sous peine d'endommager les composants du système. Cependant, la modélisation du pilotage est très rarement prise en compte au cours d'une simulation énergétique. Pour la grande majorité des logiciels, la vitesse est considérée comme prédéterminée et parfaitement connue à l'avance. Les études cinématiques (détermination des marches types) et énergétiques (détermination des puissances) sont alors découplées. Or les résultats des 2 études ne sont pas forcement décorrélés. La justification de ce découplage s'explique par le surdimensionnement du système de puissance souvent effectué en raison des marges prises lors du dimensionnement ; les marches types sont donc garanties lors du fonctionnement des rames. Néanmoins, avec la volonté d'optimisation globalisée du système, certaines limitations énergétiques peuvent entrer en conflit et fausser l'étude cinématique précédemment menée puisque le surdimensionnement n'est plus avéré.

Les principes de simulation suivants, avec ou sans sous-système de pilotage, sont considérés (Figure II.28). Le rame est soumise à une vitesse de référence $v_{sub\text{-}ref}(t)$ à laquelle elle est sensée rouler pour atteindre la position de référence $x_{sub\text{-}ref}(t)$ (prochaine station à rejoindre). Néanmoins, les limites du matériel roulant peuvent l'empêcher de suivre cette référence. Si aucun pilotage n'est considéré (Figure II.28.a), alors l'effet du sous-système peut différer de son objectif. Ainsi, la vitesse peut ne pas correspondre à $v_{sub\text{-}ref}(t)$ et la position finale effective de la rame $x_{sub}(t)$ peut être différente de celle attendue. L'objectif du pilotage est donc d'adapter automatiquement la référence de vitesse du métro en fonction de sa position (Figure II.28.b). Il peut être vu comme un asservissement de position de la rame. Cela permet d'atteindre, dans tous les cas, la référence $x_{sub\text{-}ref}(t)$ en respectant des limitations. De plus, ce principe adapte systématiquement les profils de vitesse simulés aux cas et systèmes étudiés. Pour les mêmes raisons il offre une forte flexibilité à la simulation.

Trois simulations montrent l'intérêt de modéliser le sous-système de pilotage dans une étude énergétique. Elles mettent en évidence les différences et erreurs sur l'estimation énergétique que peuvent causer un découplage des études cinématique et énergétique (Tableau II.8).

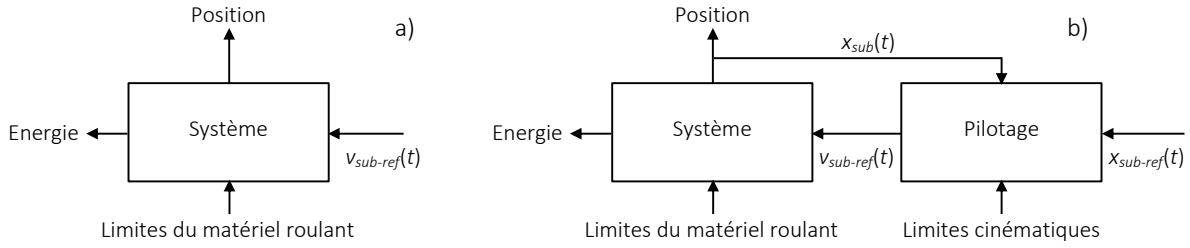


Figure II.28 : Principe du sous-système de pilotage : simulation a) sans et b) avec adaptation du profil de vitesse.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

 Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Tableau II.8 : Conditions des différentes simulations du sous-système de pilotage.

	Tension	Adaptation du profil de vitesse
Simulation 1	750 V	Oui
Simulation 2	550 V	Non
Simulation 3	550 V	Oui

La première simulation considère une tension d'alimentation « normale » de 750 V (pas d'effet limitant). Dans ce cas, le profil de vitesse connu correspond au cas d'étude et est directement appliqué en référence de vitesse sur le système. Il consiste à parcourir 480 m en 51,5s. Les simulations 2 et 3 considèrent une tension réduite valant 550 V (effet limitant). Cela peut se produire, par exemple, en cas de circulation d'un grand nombre de véhicules simultanément sur la ligne. Dans ce cas, la tension des rails peut s'écrouler puisque la demande de puissance est importante. En réalité, les performances du véhicule seraient réduites afin d'endiguer cet écroulement. La vitesse s'adapterait alors automatiquement pour rejoindre la prochaine station. Néanmoins, ce comportement n'est pas reproduit dans la simulation 2 qui considère la marche type « normale » sans adapter sa vitesse à cette nouvelle situation. A l'inverse, la dernière simulation, prend en compte cette tension de 550 V. La vitesse de référence est donc cette fois-ci bien adaptée.

Les résultats (Tableau II.9) (Figure II.29) de la simulation 1 sont corrects puisque la vitesse correspond bien au cas étudié et aux limitations considérées. Ils intègrent un profil réel composé de pentes qui impactent les consommations d'énergie en permettant une récupération au freinage lors des déclivités. Le parcours dure 51,5s et l'énergie consommée est 0,79 kWh. A l'inverse, la simulation 2 n'adapte pas sa vitesse au cas étudié. Ainsi, la vitesse réelle du véhicule ne peut pas suivre physiquement sa référence en raison des limitations. En conséquence, la rame n'atteint pas la prochaine station (443 m au lieu de 480 m) et le temps de parcours (-4,5 %) et l'énergie (-14,5 %) sont sous-estimées. La simulation 3 adapte en revanche bien sa vitesse, comme dans la réalité. Les limites du véhicule, qui le contraignent à dégrader ses performances, sont prises en compte. Dans ce cas, le temps de parcours est allongé (+4,7 %) pour atteindre la prochaine station (480 m).

Ces résultats montrent l'importance d'adapter en conséquence le profil de vitesse simulé. Dans le cas contraire les résultats obtenus peuvent fortement différer de la réalité. La difficulté majeure réside alors en la détermination de la vitesse de référence en fonction des limitations et contraintes, mécaniques ou électriques, qui influent sur la rame. On distingue 2 types de limitations :

- *Les limites cinématiques* – Les limitations d'accélération et de jerk (dérivée de l'accélération) assurent aux passagers un confort de conduite en limitant les à-coups brusques[8]. De plus, les limitations de vitesses correspondent aux règles de conduite qui régissent la piste de roulement. Comme sur la route, le ferroviaire nécessite des règles assurant la sécurité des passagers. La vitesse est donc limitée en fonction de la topologie de la ligne. Cette limitation dépend de la position sur la piste, ou des modes de marches.

[8] Ces limites dépendent du projet considéré. Par exemple, sur le Val, l'accélération maximale vaut 1,3 m/s² à Lille et 1 m/s² à Roissy. Le jerk maximal est dans ce cas commun aux 2 projets avec une limitation de 0,65 m/s³.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Tableau II.9 : Comparaisons des résultats des différentes simulations.

	Temps de parcours	Distance parcourue	Energie consommée
Simulation 1	51,5s	480 m	0,79 kWh
Simulation 2	51,5s	443 m	0,65 kWh
Simulation 3	53,9s	480 m	0,76 kWh

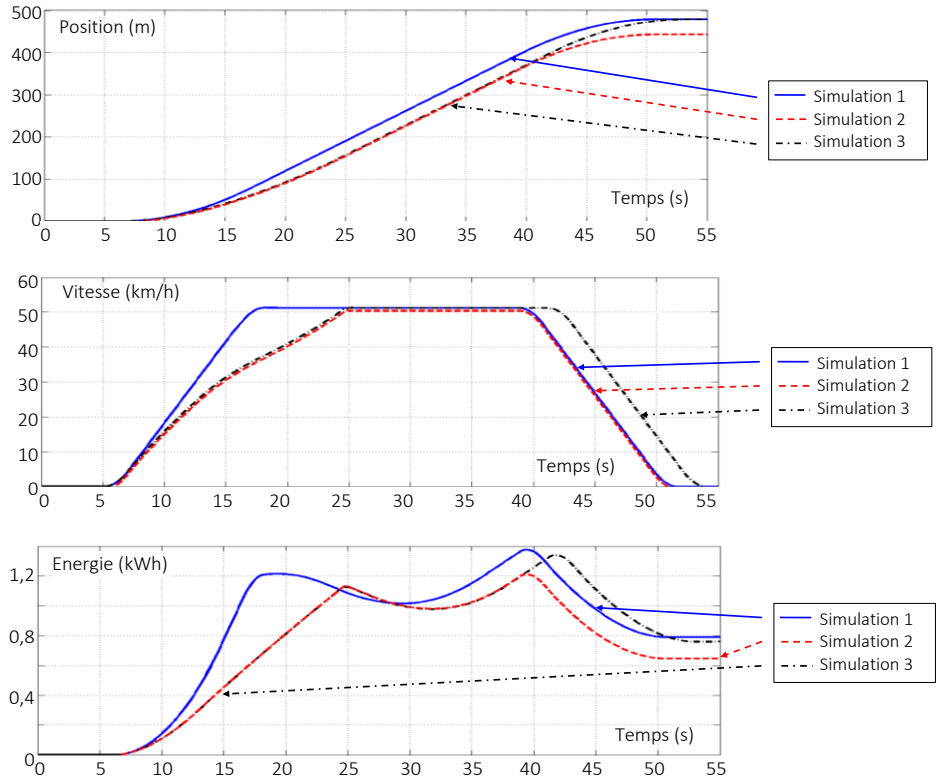


Figure II.29 : Comparaisons des différentes simulations avec ou sans adaptation du profil de vitesse.

- *Les limites du matériel roulant* – Elles contraignent la rame à réduire ses performances au travers, en particulier, des limitations de couple des MSAP. Ces dernières limitent l'accélération du véhicule en fonction de différents paramètres tels que la tension d'alimentation, la vitesse, la force de résistance à l'avancement (pente, vent, etc.), la masse du véhicule (fonction du nombre de passagers), ou encore sa composition (nombre de voitures, de machines, etc.).

Le modèle du sous-système de pilotage doit intégrer toutes ces composantes. Plusieurs technologies existent dans la réalité.

Le tapis de voie – Historiquement, un tapis réglait le pilotage automatique [VER 07]. Encore en fonctionnement sur de nombreuses lignes, la vitesse de référence est implantée dans ce tapis, tout au long de la voie, dans une bande de caoutchouc sur laquelle sont fixés 2 câbles qui se croisent à intervalle régulier. Cela induit une inversion de champ électrique qui est captée par la rame. La distance entre croisements est interprétée comme vitesse de référence. Ses limitations sont directement intégrées dans le tapis. Les limites de couple, d'accélération, et de jerk sont implantées dans un algorithme embarqué [VER 10]. Ce système est d'une très grande fiabilité et robustesse mais est très peu flexible puisque pour modifier la vitesse de consigne il faut repositionner les câbles.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

 Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Le CBTC (Communication-Based Train Control) – La norme CBTC s'impose aujourd'hui comme référence [CBTC 04], [ZHU 14]. Elle permet de s'affranchir de la technologie du tapis pour passer à un système plus souple de communication radio entre les trains et le PCC (Poste de Commande Centralisée). Des calculateurs assurent la distance de sécurité entre les rames et intègrent directement les limitations dans la vitesse de référence.

Par ailleurs, quelque-soit la technologie de pilotage, le principe reste le même. Il s'agit de continuellement déterminer la position des différents trains afin de superviser leurs vitesses. Cette position s'exprime théoriquement en intégrant la vitesse (II.57). Une attention particulière est portée sur la génération des profils de freinage afin d'assurer la sécurité du système et des passagers.

$$\frac{d}{dt}x_{sub}(t)=v_{sub}(t) \tag{II.57}$$

Afin d'obtenir des simulations réalistes, en adéquation systématique avec le cas étudié et les limitations associées, ce type de pilotage est reproduit en effectuant une co-simulation cinématique/énergétique. Le principe (Figure II.30) est d'interconnecter un modèle de pilotage avec celui du véhicule (cf. Figure II.25). Ainsi, la vitesse de référence $v_{sub\text{-}ref}(t)$ est automatiquement adaptée en fonction des limitations. Le rôle du modèle de pilotage est de générer une vitesse de référence à la rame à partir d'une position de référence $x_{sub\text{-}ref}(t)$, des diverses limitations, et de la topologie du système. Les positions de référence sont des échelons de position générés en fonction des conditions d'exploitation de la ligne (intervalles, temps d'arrêt en station, etc.).

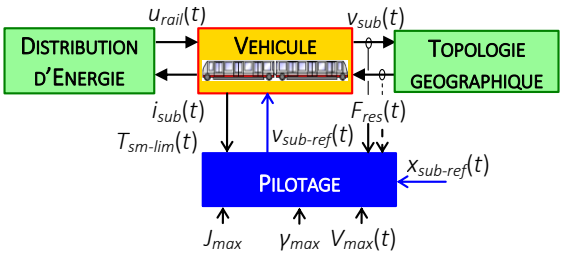


Figure II.30 : Principe de la co-simulation cinématique/énergétique.

II.3.a – Modélisation générique du sous-système de pilotage

Cette sous-partie propose un modèle de pilotage. Des travaux antérieurs sur le principe du tapis sont ainsi étendus [VER 07], [VER 10]. Celui-ci est actuellement en fonctionnement sur des systèmes réels et suit les principes de causalité ; il est choisi comme base pour développer le modèle du sous-système de pilotage. Le principe de pilotage existant est tout d'abord rappelé.

Une vitesse de référence $v_{ref1}(t)$ est intégrée dans le tapis et comprend l'ensemble des données importantes de la ligne considérée : vitesse de croisière, vitesse maximale, et courbe de décélération (Figure II.31). Le tapis joue le rôle d'asservissement de position en générant $v_{ref1}(t)$. Néanmoins, cette vitesse de référence est composée d'échelons qui induisent des discontinuités que le métro ne peut pas suivre sans atteindre des valeurs excessives de jerk, d'accélération, et de couple. Pour les limiter, des estimateurs d'accélération et de jerk sont implantés à bord du véhicule. Leurs valeurs de sorties sont limitées de manière à obtenir un profil de vitesse de référence $v_{sub\text{-}ref}(t)$ « doux ».

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

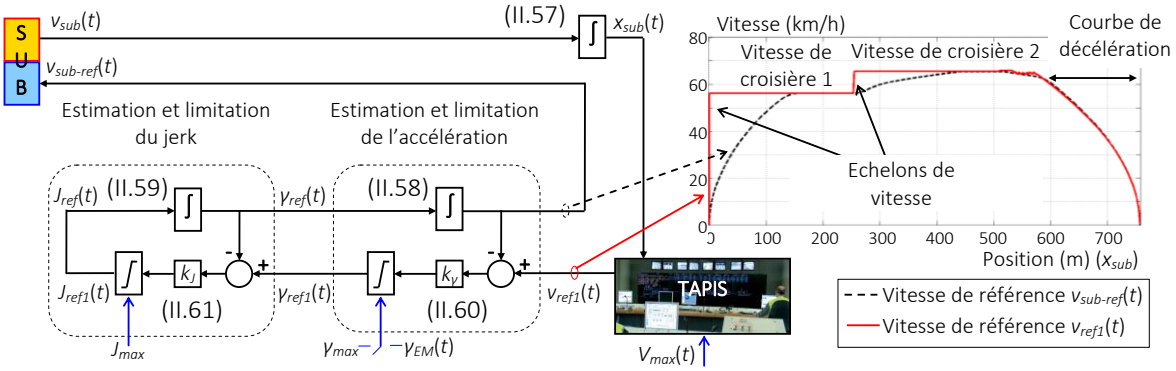


Figure II.31 : Description du sous-système de pilotage par tapis.

Algorithme de pilotage existant – Le pilotage existant comprend les relations causales suivantes liant la vitesse $v_{sub\text{-}ref}(t)$, l'accélération $\gamma_{ref}(t)$, et le jerk $J_{ref}(t)$, références de la rame.

$$\frac{d}{dt}v_{sub-ref}(t)=\gamma_{ref}(t) \tag{II.58}$$

$$\frac{d}{dt}\gamma_{ref}(t)=J_{ref}(t) \tag{II.59}$$

Une première fonction estime l'accélération de référence $\gamma_{ref1}(t)$ à partir de $v_{ref1}(t)$ et de la vitesse de référence $v_{sub\text{-}ref}(t)$ (II.60). Cette accélération est limitée par l'accélération maximale γ_{max}. Une autre fonction semblable est intégrée pour estimer le jerk de référence $J_{ref1}(t)$ (II.61) en fonction de $\gamma_{ref1}(t)$ et de $\gamma_{ref}(t)$. Ce jerk est également limité $J_{ref}(t)$ par les limitations de jerk J_{max}. En raison des simples intégrateurs (II.58) et (II.59), les estimateurs sont basés sur des gains proportionnels k_J et k_γ.

$$\gamma_{ref\,1}(t)=k_\gamma\left[v_{ref\,1}(t)-v_{sub-ref}(t)\right] \tag{II.60}$$

$$J_{ref\,1}(t)=k_J\left[\gamma_{ref\,1}(t)-\gamma_{ref}(t)\right] \tag{II.61}$$

Une des difficultés de cet algorithme provient de la synthèse des gains k_J et k_γ en raison de la présence des limitations. Une méthodologie est donnée à partir d'un profil de vitesse pseudo–trapézoïdal (Figure II.32) optimale en temps de parcours tout en respectant les limitations de vitesse, d'accélération, et de jerk [VER 10]. Les gains des estimateurs d'accélération et de jerk sont déterminés par une analyse des différentes parties des phases d'accélération et de décélération du cycle de vitesse. Pour des raisons de symétrie, seule la phase d'accélération est étudiée.

Première partie – Durant l'accélération linéaire de pente J_{max}, la condition (II.62) est respectée, de telle manière que l'accélération de référence $\gamma_{ref1}(t)$ atteigne la valeur maximale γ_{max}. Dans ce cas, tant que la condition de saturation du jerk est vérifiée (II.63), l'accélération de référence $\gamma_{ref}(t)$ est déterminée par l'intégration du jerk maximal J_{max} (II.64), ce qui donne à l'accélération une évolution linéaire de pente positive de valeur le jerk maximal (cf. Figure II.32).

$$k_\gamma\left[v_{ref\,1}(t)-v_{sub-ref}(t)\right]>\gamma_{\max} \quad \text{d'où} \quad \gamma_{ref\,1}(t)=\gamma_{\max} \tag{II.62}$$

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

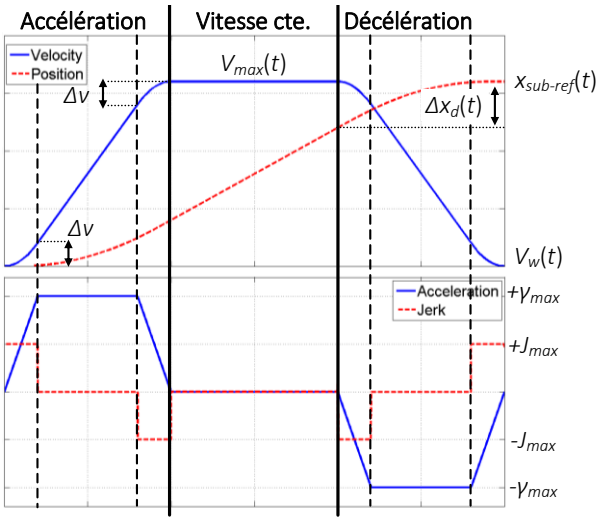


Figure II.32 : Profil de vitesse type pseudo-trapézoïdal.

$$k_J\left[\gamma_{ref\,1}(t)-\gamma_{ref}(t)\right] > J_{\max} \qquad \text{d'où} \qquad J_{ref\,1}(t)=J_{\max} \tag{II.63}$$

$$\text{soit} \quad \gamma_{ref}(t)=\int J_{\max}dt \tag{II.64}$$

Lorsque la condition de saturation du jerk (II.63) n'est plus respectée, l'accélération de référence $\gamma_{ref}(t)$ est déterminée avec l'opérateur Laplacien (II.65). La première partie de la phase d'accélération peut donc être considérée comme parfaitement linéaire si la valeur de k_J est grande. Dans ce cas, la relation (II.65) n'est vraie que pendant une durée faible, ce qui permet de la négliger.

$$\gamma_{ref}(s)=\frac{1}{1+\dfrac{s}{k_J}}\gamma_{\max} \tag{II.65}$$

Deuxième partie – Cette partie de la phase d'accélération possède une accélération constante de valeur γ_{max}. La condition (II.62) est toujours vérifiée.

Troisième partie – La dernière partie à accélération négative linéaire débute dès que l'accélération de consigne n'est plus saturée, soit dès que la condition (II.62) n'est plus assurée. Dans ce cas, l'accélération $\gamma_{ref1}(t)$ évolue suivant la relation (II.66).

$$\gamma_{ref\,1}(t)=k_\gamma\left[v_{ref\,1}(t)-v_{sub\text{-}ref}(t)\right] \tag{II.66}$$

k_γ est donc déterminé pour que cette dernière partie de la phase d'accélération soit linéaire de pente négative $-J_{max}$. Pour cela $\gamma_{ref1}(t)$ doit évoluer linéairement de sa valeur initiale γ_{max} jusqu'à zéro avec une variation de vitesse Δv (cf. Figure II.32). Cette variation de vitesse correspond à l'optimalité temporelle recherchée. Le gain k_γ est donc déterminé par (II.67) [VER 10].

$$\gamma_{\max}=k_\gamma\Delta v \quad \text{avec} \quad \Delta v=\frac{1}{2}\frac{\gamma_{\max}^{\;2}}{J_{\max}} \quad \text{soit} \quad k_\gamma=2\frac{J_{\max}}{\gamma_{\max}} \tag{II.67}$$

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Cette méthodologie définit les gains des correcteurs de vitesse et d'accélération à partir d'un profil théorique pseudo-trapézoïdal (cf. Figure II.32)[9]. Néanmoins, celui-ci n'est pas forcement réalisable, en particulier lorsque les machines de traction entrent en limitation de couple [MIE 04]. La limitation d'accélération peut alors être indexée sur ces limitations qui dépendent de la vitesse de rotation $\Omega_{sm}(t)$ et de la tension du bus $u_{bus}(t)$. Une limitation d'accélération équivalente $\gamma_{EM}(t)$ est définie. Elle correspond à l'accélération réellement réalisable par la traction (II.68) et nécessite de connaitre la masse dynamique du véhicule $M_{sub\text{-}eq}$, la force maximale de traction $F_{max}(t)$ (fonction du système et des limites de couple), et la force de résistance à l'avancement $F_{res}(t)$. Ces variables sont toutes estimables dans une application réelle.

$$\gamma_{EM}(t)=\frac{F_{\max}(t)-F_{res}(t)}{M_{sub-eq}} \quad \text{avec} \quad F_{\max}(t)=N_{car/rame}N_{bo/car}N_{mr/bo}K_{trans}T_{sm-\lim}(t) \tag{II.68}$$

La limite considérée est donc la plus faible entre la limite cinématique d'accélération γ_{max} et la limite physique d'accélération $\gamma_{EM}(t)$. Lors de la décélération, les effets limitant ne sont pas considérés puisque les freins mécaniques sont supposés surdimensionnés. Ils sont effectivement prévus pour effectuer des freinages d'urgence. L'algorithme développé obtient finalement une vitesse de référence réalisable par le véhicule. La seule condition est de définir précisément le gain k_γ (II.67) en fonction des limitations J_{max}, γ_{max} et $\gamma_{EM}(t)$. Néanmoins, cet algorithme nécessite une vitesse de consigne délivrée par le tapis. Or celui-ci induit un manque de flexibilité pour la simulation car il est défini pour une ligne et un cas particulier. Il rend alors impossible l'investigation de nouvelles limitations ou topologies. Le modèle de pilotage est étendu afin d'améliorer sa flexibilité.

Extension de l'algorithme de pilotage – L'extension proposée fait abstraction du tapis en intégrant un asservissement particulier de position. Seules les positions des stations et les limitations de vitesse nécessitent d'être connues. Un correcteur spécifique à structure variable [CAR 88], [YU 12] est introduit pour asservir ces positions et déterminer la vitesse de référence $v_{ref1}(t)$. Cette vitesse est égale à la vitesse maximale $V_{max}(t)$ autorisée pendant les phases d'accélération et de vitesse constante. En revanche, lorsque la phase de décélération intervient, le correcteur de position génère une nouvelle vitesse cible à atteindre $V_w(t)$ (égale à zéro lors d'un arrêt en station, ou bien une valeur quelconque lors d'un simple ralentissement). La surface de commutation $\sigma_x(t)$ du contrôleur correspond au moment de l'entrée en phase de décélération, décrite par (II.69).

$$x_{sub-ref}(t)-x_{sub}(t)\leq \Delta x_d(t) \tag{II.69}$$

avec $\Delta x_d(t)$ la distance nécessaire au ralentissement de la rame pour passer de sa vitesse instantanée $v_{sub}(t)$ à une vitesse cible $V_w(t)$ (cf. Figure II.32). Cette distance est calculée à chaque instant t en fonction de la vitesse instantanée $v_{sub}(t)$, de l'accélération instantanée $\gamma_{sub}(t)$, de l'accélération maximale γ_{max}, et du jerk maximal J_{max} (II.70) [Annexe 5] [KE 09].

[9] Ce profil de base correspond à une vitesse optimale temporellement fonctionnant aux limites cinématiques (jerk, accélération et vitesse). Par ailleurs, ces limitations peuvent être variables. Dans ce cas, elles deviennent des paramètres correspondant à des variables de réglages. D'autres profils peuvent alors être obtenus en jouant sur ces paramètres au cours du temps.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

$$\Delta x_d(t)=\frac{1}{3}\frac{\gamma_{sub}(t)^3}{J_{\max}^{\ 2}}+\frac{\gamma_{sub}(t)}{J_{\max}}v_{sub}(t)+\frac{1}{2\gamma_{\max}}\left[v_{sub}(t)^2+\frac{\gamma_{sub}(t)^4}{4J_{\max}^{\ 2}}+\frac{\gamma_{sub}(t)^2}{J_{\max}}v_{sub}(t)-V_w^{\ 2}\right]$$
$$+\frac{\gamma_{\max}}{2J_{\max}}\left[v_{sub}(t)+\frac{1}{2}\frac{\gamma_{sub}(t)^2}{J_{\max}}+V_w\right] \qquad \text{(II.70)}$$

Le correcteur possède la structure suivante et impose, en vitesse de consigne, les vitesses maximales autorisées tant que la distance de décélération $\Delta x_d(t)$ est inférieure à la distance du parcours restante. En revanche, elle impose la vitesse cible $V_w(t)$ dès que la distance à parcourir $\sigma_x(t)$ est inférieure ou égale à la distance de décélération.

$$v_{ref\,1}(t)=\begin{cases} V_{\max}(t) & \text{quand} \quad \sigma_x(t)>\Delta x_d(t) \\ V_w(t) & \text{quand} \quad \sigma_x(t)\le\Delta x_d(t) \end{cases} \quad \text{avec} \quad \sigma_x(t)=x_{sub-ref}(t)-x_{sub}(t) \qquad \text{(II.71)}$$

Le modèle final du pilotage est constitué d'une boucle externe d'asservissement de position qui remplace le tapis (Figure II.33). Celle-ci génère une vitesse de référence $v_{ref1}(t)$ respectant les limites de vitesse et permettant d'atteindre, quelque soit la situation, la position de référence. Cette vitesse contient cependant des discontinuités. Les estimateurs d'accélération et de jerk sont donc conservés afin de limiter le couple, l'accélération, et le jerk. Ce modèle détermine donc une vitesse optimale temporellement qui vise à parcourir le trajet en un temps minimum tout en respectant les limitations du système. Par ailleurs, les limites prises en compte peuvent être variables. Ainsi, d'autres marches types sont possibles en agissant sur ces limites comme par exemple la marche sur l'erre, où les machines de traction sont temporairement inhibées (couple maximale nul) afin de ralentir naturellement le véhicule. Le modèle de pilotage est donc bien flexible.

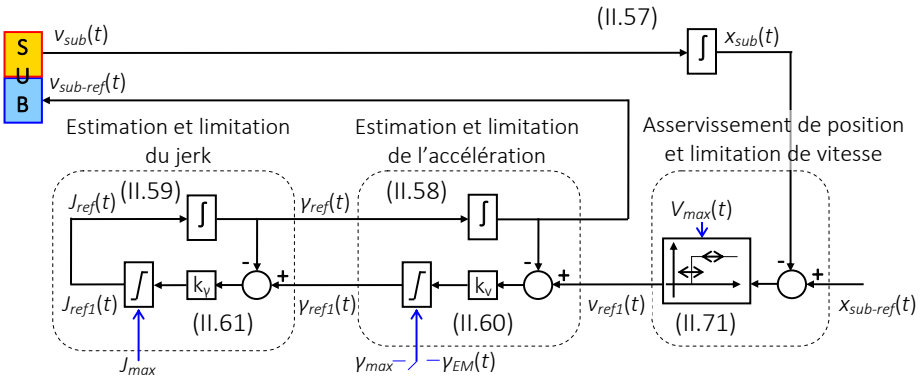


Figure II.33 : Description du modèle final et flexible de pilotage.

II.3.b – Validation du modèle du sous-système de pilotage

Le modèle de pilotage est validé à partir de relevés expérimentaux effectués sur la ligne 2 du métro de Lille (cf. § II.1.b). Durant l'expérimentation, la vitesse a été mesurée. L'accélération $\gamma_{sub}(t)$ et la position $x_{sub}(t)$ sont déduites de cette mesure. Pendant la simulation, les positions des stations sont imposées successivement comme échelon de référence $x_{sub-ref}(t)$ en entrée du modèle de pilotage. Les temps d'arrêts à chaque station et les paramètres de la rame sont connus (cf. Tableau II.5). D'autre part, Les limitations valent 1,3 m/s^2 pour l'accélération et 0,65 m/s^3 pour le jerk.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

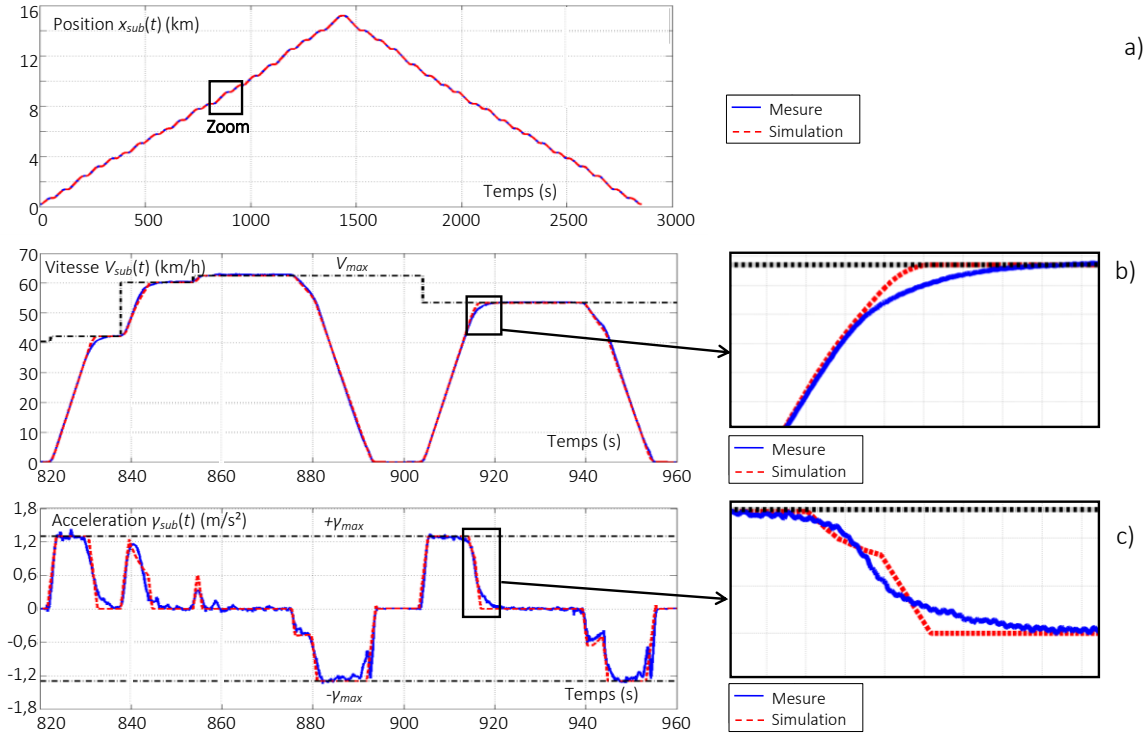


Figure II.34 : Validation expérimentale du modèle de pilotage : a) position sur l'ensemble du trajet, b) vitesse sur 2 inter-stations, c) accélération sur 2 inter-stations.

Lorsque le véhicule est en station, et que le temps d'arrêt s'est écoulé, un nouvel échelon de position est imposé comme position de référence pour définir la prochaine station à rejoindre. Un nouveau cycle de vitesse débute alors et est automatiquement généré par le modèle de pilotage. L'évolution de la position simulée est comparée avec les relevés expérimentaux (cf. Figure II.34.a ci-dessus). Un zoom sur 2 inter-stations permet de visualiser les résultats concernant la vitesse et l'accélération (cf. Figure II.34.b.c). Le jerk n'est pas considéré car son estimation est trop bruitée et non exploitable. Les résultats valident le modèle du sous-système de pilotage avec une erreur moyenne sur l'ensemble du trajet de 1,5 % sur la vitesse. L'erreur est négligeable sur la position.

II.3.c – Réduction du modèle du sous-système de pilotage

L'association des modèles des sous-systèmes matériel roulant et pilotage (cf. Figure II.30) permet d'étudier l'impact des différentes limitations sur la consommation d'énergie et sur le temps de parcours [ALL 10c], [MAY 14c]. Une optimisation énergétique de ces paramètres est donc envisageable au travers du programme développé. D'autre part, certaines réductions de modèle du sous-système de pilotage sont investiguées. Elles consistent à négliger certaines limitations afin de diminuer la durée de la simulation. Les erreurs commises sur l'énergie et le temps de parcours sont estimées en fonction des limitations (A : accélération, J : jerk, et C : Couple) (Tableau II.10) [MAY 14c]. La référence prise pour les comparaisons prend en compte l'ensemble des limitations (A-J-C).

La seconde simulation (A-J) considère les limitations d'accélération et de jerk mais néglige celles de couple. Dans ce cas, une erreur relativement importante est commise sur l'énergie (6,5 %). Cette erreur augmente (8,6 %) lorsque seule la limite d'accélération est prise en compte (A).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

 Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Tableau II.10 : Impacts de la prise en comte des limitations du sous-système de pilotage.

Limitations	Temps de simulation	Energie consommée	Temps de parcours
	Différences moyennes		
A-J-C	0 % (ref)	0 % (ref)	0 % (ref)
A-J	-28,0 %	+6,5 %	-2,4 %
A-C	-20,4 %	+1,4 %	-2,5 %
A	-28,8 %	+8,6 %	-5,2 %
C	-35,2 %	+44,3 %	-9,8 %

De même, l'erreur sur l'estimation énergétique devient très importante (45 %) si l'on considère uniquement la limitation de couple (C). En revanche, la simplification du jerk (A-C) n'a que peu d'impact sur le résultat énergétique (1,4 %). Cela signifie que cette limitation peut être négligée sans influence majeure sur la consommation d'énergie. Cependant, la réduction du temps de simulation reste limitée (-20 % environ). De plus, l'erreur sur le temps de parcours, bien qu'elle semble minime (2,5 %), peut conduire à des durées relativement importantes au cours d'un tour de carrousel de métro. Cela peut représenter plusieurs dizaines de secondes, soit une inter-station complète qui serait potentiellement négligée au cours de la simulation. Le choix est donc fait de conserver l'ensemble des limitations. Aucune réduction du modèle de pilotage n'est considérée pour la suite de l'étude. Ainsi, la vitesse de référence est générée de manière précise et permettra de bien estimer les temps de parcours tout en évitant de commettre des erreurs sur les résultats énergétiques.

II.3.d – Intérêt pour une simulation flexible

Afin de prouver la capacité d'adaptation du modèle de pilotage, différents cas peuvent être testés. L'intérêt est de démontrer sa flexibilité quelque soit les limitations, paramètres et topologies étudiés. Pour cela, 2 cas tests sont simulés et comparés avec le modèle validé.

Cas 1 – Le premier cas considère une forte augmentation de la masse du véhicule (46,8 t à la place de 28,6 t). Dans ce cas, les limitations de couple sont atteintes plus rapidement qu'à vide, ce qui limite l'accélération du véhicule (Figure II.35). Le cycle de vitesse dure donc plus longtemps (+1,7 %) et l'énergie consommée est plus importante (+63 %) (Tableau II.11) par rapport au cas de référence (rame à vide). Le modèle prend donc bien en compte cette augmentation de masse en limitant l'accélération de la rame et en allongeant la durée du parcours.

Tableau II.11 : Comparaison de différents cas d'étude considérant différentes limitations.

	Temps de parcours	Energie consommée	Courant max.
Référence	130,7s	5,5 kWh	1053 A
Cas 1	132,9s	9,0 kWh	1179 A
Cas 2	118,1s	6,3 kWh	1056 A

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

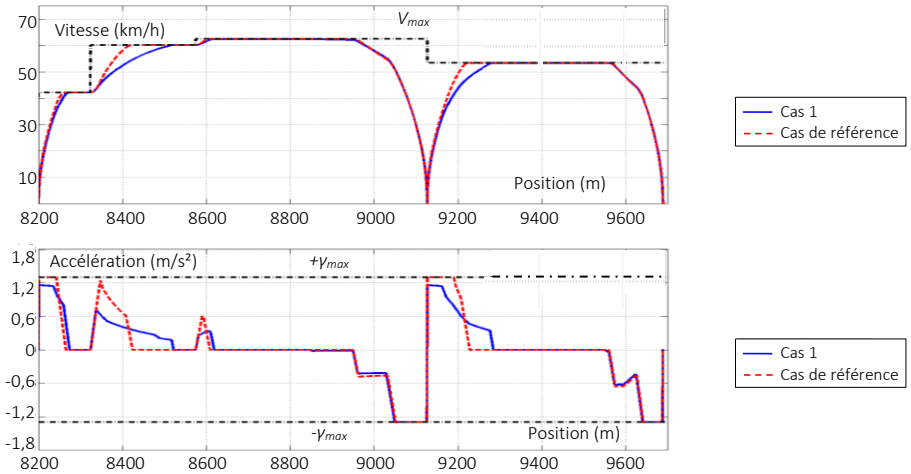


Figure II.35 : Comparaisons du cycle de vitesse généré en cas de modification de la masse du véhicule.

Cas 2 – Le second cas considère une vitesse maximale supérieure au cas de référence (+15 km/h sur l'ensemble du cycle) (Figure II.36). Le métro rejoint alors plus rapidement les stations suivantes. Le temps de parcours est réduit de 9,6 % alors que l'énergie consommée est augmentée de 14,5 % par rapport au cas de référence (Tableau II.11).

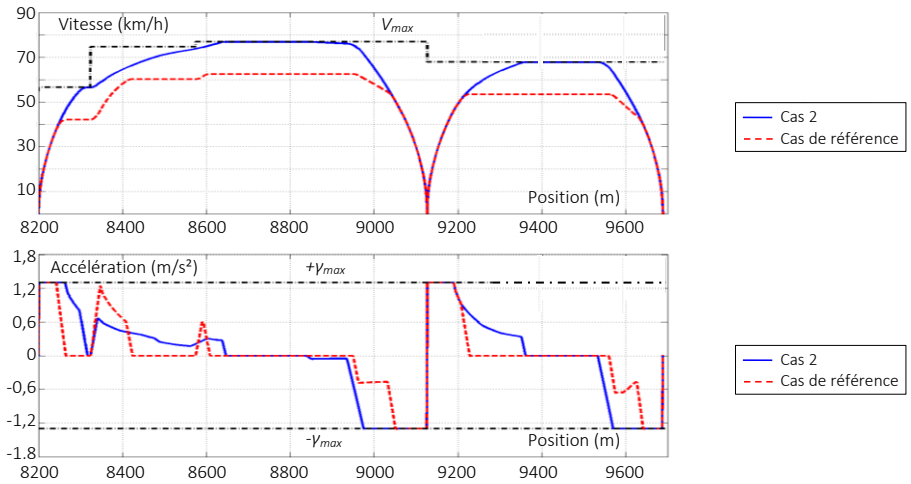


Figure II.36 : Comparaisons du cycle de vitesse généré en cas de modification de la vitesse maximale.

Ces différents cas valident la capacité d'adaptation du modèle de pilotage. Il adapte systématiquement, et automatiquement, le profil de vitesse en fonction du cas étudié et des différentes limitations considérées. Il permet entre autre une flexibilité importante de la simulation. L'association de cet algorithme, en plus de l'approche « forward » considérée dans la commande du véhicule, permet un fonctionnement du modèle global similaire à la réalité. Ainsi, le modèle donne la possibilité de changer les limitations de vitesse, d'accélération, de jerk, et de couple, mais également de modifier la tension d'alimentation[10], la topologie de la ligne (pente), etc.

[10] Une variation de la tension d'alimentation a d'ailleurs été étudiée pour illustrer l'intérêt de l'adaptation du profil de vitesse (cf. Figure II.29).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

 Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

II.4 – Conclusion du chapitre

Au cours de ce chapitre les différents sous-systèmes constitutifs d'une ligne de métros ont été étudiés et modélisés indépendamment. Ces modèles ont été organisés de manière systémique, fonctionnelle, et causale en utilisant le formalisme REM.

Un modèle dynamique a été défini pour reproduire de façon précise le comportement du sous-système d'alimentation composé d'une sous-station non-réversible associée à une distribution par rails. La prise en compte des non-linéarités de ce sous-système a été effectuée par un découpage en plusieurs comportements linéaires du comportement global. Ainsi, une représentation multi-modèle-commuté a été mise en œuvre. Cette modélisation a été validée expérimentalement (erreur de 1,5 %). Différentes réductions de modèle ont ensuite été étudiées afin d'obtenir un modèle ayant un bon compromis entre précision énergétique et temps de simulation. Finalement, un modèle statique moyen a été retenu. Bien qu'on puisse les trouver dans certains travaux, les autres modèles réduits ont été écartés en raison des erreurs énergétiques qu'ils peuvent générer.

Un modèle dynamique, incluant la gestion d'énergie, du matériel roulant a ensuite été développé. Il reproduit de manière efficace les dynamiques du sous-système, et estime l'évolution de ses variables énergétiques. Ce modèle a été confronté à des mesures expérimentales effectuées sur un métro automatique Val 208. Les comparaisons entre simulation et mesures ont permis la validation du modèle (environ 3,5 % d'erreur). Par la suite, plusieurs réductions de modèle ont été proposées. Un modèle quasi-statique a finalement été retenu. Bien que les autres modèles soient parfois utilisés dans d'autres travaux, les comparaisons menées ont montré qu'ils génèrent des résultats pouvant parfois fortement différer avec le système physique réel.

Enfin, tout comme les modèles des sous-systèmes physiques, le modèle de pilotage des rames peut impacter fortement les résultats énergétiques. Un mauvais modèle de pilotage peut conduire à des résultats non physiques, qui induisent un dépassement des contraintes et limites du système. La simulation se baserait alors sur des profils faux, générant des erreurs importantes sur l'estimation de l'énergie. La solution proposée dans ce chapitre réside en l'élaboration d'une co-simulation cinématique/énergétique. Un modèle du sous-système de pilotage a alors été établi et couplé avec le modèle du matériel roulant. Il permet de définir systématiquement, au cours de la simulation, le profil de vitesse adapté au cas d'étude et aux limites du système. Les résultats de simulation ont pu être comparés avec des relevés expérimentaux sur site qui ont permis la validation du modèle.

Au terme de ce chapitre sont donc obtenus des modèles flexibles et adaptés à l'étude énergétique de chaque sous-système. Cette flexibilité est importante, en particulier pour pouvoir traiter une augmentation du nombre de sous-systèmes dans le carrousel. L'association des différents sous-systèmes permettra de simuler un carrousel de métros complet. Cette association sera traitée dans le chapitre suivant.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Chapitre III - Modélisation énergétique d'un carrousel de métros

Ce chapitre a pour objectif de construire un modèle énergétique de carrousel de métros à partir des modèles des différents sous-systèmes développés dans le chapitre II.

Une première partie modélise un carrousel « mono-train ». Ce modèle met en évidence les interactions physiques sur un cas simple et résout les conflits d'association entre les différentes sources. Une validation expérimentalement du modèle est effectuée sur une ligne d'essai réelle.

La deuxième partie étend cette modélisation à un carrousel « multi-train ». Différentes méthodes de formulation et de résolution sont établies afin de résoudre les problèmes de couplage des différentes sources sur les rails d'alimentation. Une méthode est finalement retenue pour sa flexibilité face à l'ajout de sources de différentes natures.

Enfin, la modélisation finale du carrousel est validée expérimentalement. Une plate-forme d'émulation est développée à cet effet. Une simulation « Hardware-In-the-Loop (HIL) » de carrousel de métros à échelle réduite est ainsi réalisée. La comparaison des simulations avec l'expérimentation valide le programme de simulation.

Sommaire du chapitre

III.1 – Modélisation d'un carrousel « mono-train » ..... - 80 -
III.1.a – Problématique d'association des sous-systèmes ..... - 80 -
III.1.b – Modélisation « multi-dynamique » d'un carrousel « mono-train » ..... - 83 -
III.1.c – Validation expérimentale du modèle du carrousel « mono-train » ..... - 84 -
III.2 – Modélisation d'un carrousel « multi-train » ..... - 87 -
III.2.a – Problématiques du couplage multi-source ..... - 87 -
III.2.b – Méthodes de formulation et de résolution d'un couplage multi-source ..... - 88 -
III.2.c – Choix d'une méthode ..... - 96 -
III.3 – Validation expérimentale au travers d'une simulation HIL ..... - 98 -
III.3.a – Simulation HIL d'un carrousel de métros « multi-train » ..... - 99 -
III.3.b – Validation expérimentale du modèle « multi-train » ..... - 106 -
III.4 – Conclusion du chapitre ..... - 108 -

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

III.1 – Modélisation d'un carrousel « mono-train »

La modélisation d'un carrousel « mono-train » vise à mettre en exergue les interactions énergétiques entre sous-systèmes. Une première sous-partie s'attache donc à résoudre la problématique d'association des sous-systèmes. Une deuxième modélise le carrousel via la REM. Enfin, une troisième valide expérimentalement les interactions présentes dans le système.

III.1.a – Problématique d'association des sous-systèmes

Le carrousel « mono-train » étudié est composé d'une rame alimentée par une sous-station non-réversible via une portion de rails. La représentation structurelle du système (Figure III.1) met en évidence la séparation initiale des sous-systèmes. Ces derniers sont associés au niveau de la connexion des frotteurs de la rame et des rails. Dans ce cas particulier, le courant absorbé par la rame $i_{sub}(t)$ est identique à celui débité par la sous-station $i_{ss}(t)$, puisqu'un seul train est présent sur la ligne. Par ailleurs, un seul bogie est représenté sur la Figure III.1, cependant les 4 sont biens considérés.

La REM du système complet est obtenue par association des REM des différents sous-systèmes (Figure III.2). Ainsi, les REM du modèle statique moyen du sous-système d'alimentation (cf. Figure II.8) et du modèle quasi-statique de la rame (cf. Figure II.25) sont considérées. Le modèle du sous-système de pilotage (cf. Figure II.33) est quant-à-lui représenté sous forme d'une stratégie générant automatique la vitesse de référence du véhicule. Elle est regroupée dans le même élément que la stratégie de freinage (Stratégie & Pilotage). Par ailleurs, les paramètres des rails sont variables en raison du déplacement de la rame. Cette variabilité est prise en compte au travers de l'information sur la position du véhicule $x(t)$. Ainsi, la résistance $R_{r\text{-}eq}(x)$ et l'inductance $L_{r\text{-}eq}(x)$ des rails (cf. relation II.2) sont continuellement mises à jour au cours de la simulation.

La REM globale montre cependant un problème d'association entre les sous-systèmes d'alimentation et du matériel roulant (Figure III.2). En effet, ces sous-systèmes imposent chacun le courant les traversant : le courant $i_{ss}(t)$ débité par la sous-station et circulant dans les rails, et le courant $i_{sub}(t)$ absorbé par la rame. Or, dans ce cas, ces 2 courants sont identiques. Ce conflit d'association provient de la mise en série de l'inductance de filtrage de la rame avec celles des rails et du transformateur. Bien que des modèles statiques de ces inductances aient été choisis, l'étude des causalités dynamiques du système doit être effectuée pour résoudre ce conflit. Dans le cas contraire, de mauvaises interprétations des interactions physiques du système et des erreurs de simulation peuvent être engendrées.

La résolution de ce conflit d'association passe par l'étude dynamique du système, notamment au niveau de l'association de la sous-station, des rails, et du filtre de la rame. Ainsi, une représentation structurelle simplifiée limite l'étude à la problématique d'association des sous-systèmes (Figure III.3).

La station d'alimentation – La sous-station est vue comme une source de tension redressée à vide $e_{ss0}(t)$ (définie par (II.20) en modèle statique moyen) en série avec une diode (non-réversibilité) et une bobine équivalente (III.1) correspondant aux enroulements du secondaire du transformateur.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

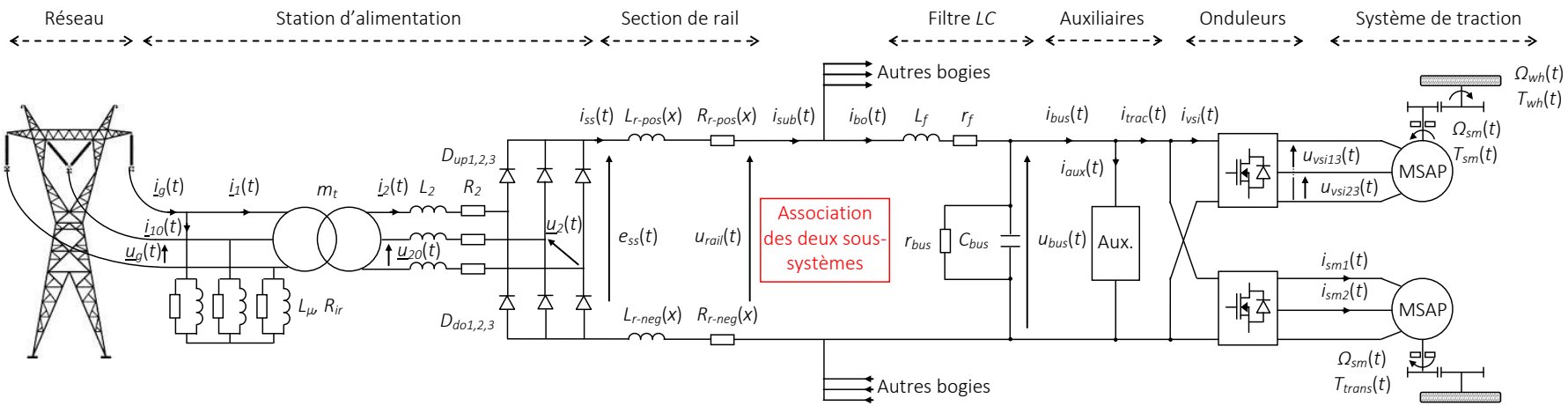


Figure III.1 : Représentation structurelle détaillée du système de carrousel « mono-train ».

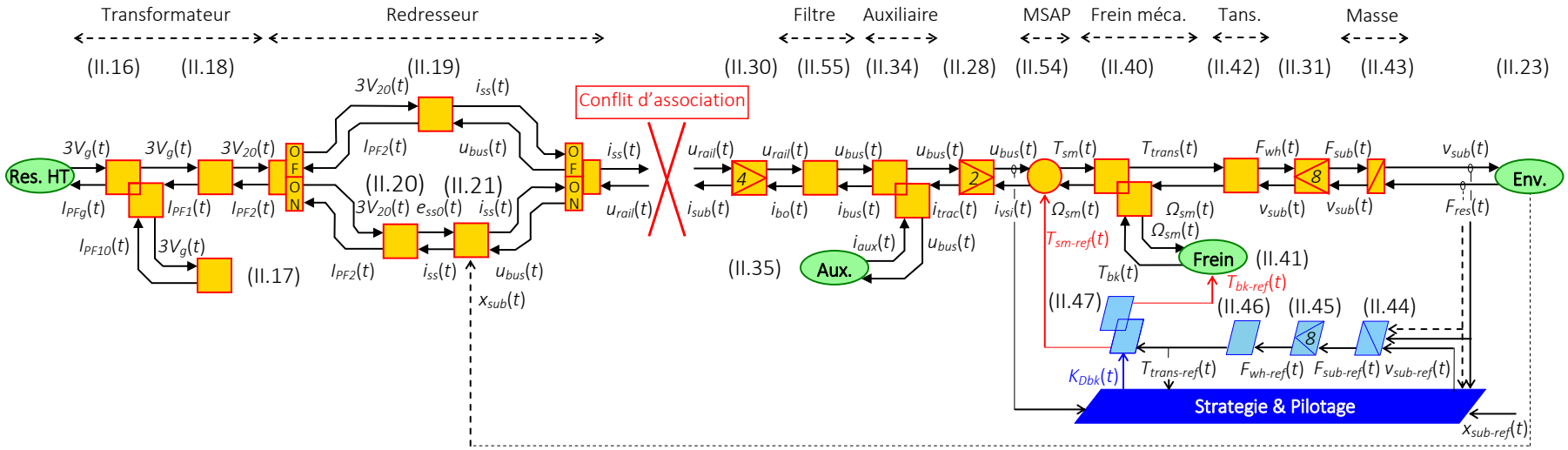


Figure III.2 : REM du carrousel « mono-train » conduisant à un conflit d'association.

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

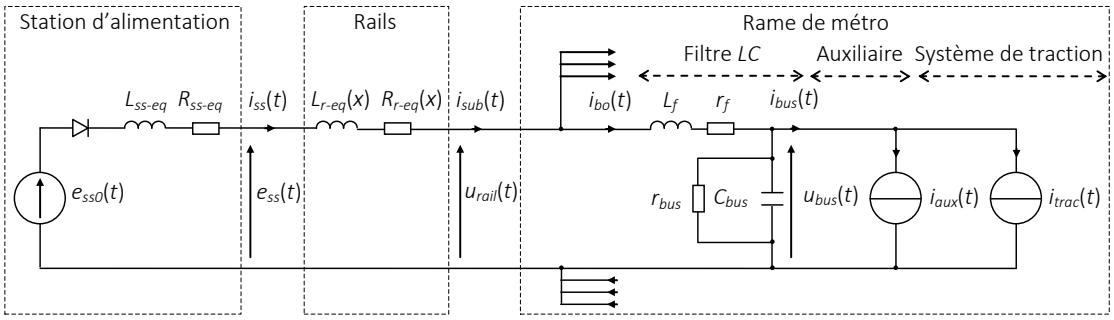


Figure III.3 : Représentation structurelle simplifiée du carrousel « mono-train ».

$$\begin{cases} L_{ss-eq} = 2L_2 \\ R_{ss-eq} = 2R_2 \end{cases} \tag{III.1}$$

La distribution continue – Les rails sont modélisés par une inductance variable dont les paramètres dépendent des positions des sous-systèmes (position fixe de la sous-station x_{ss} et position variable de la rame $x_{sub}(t)$) et des inductances l_{lin} et résistances r_{lin} linéiques des rails. Ces paramètres (rails positifs $L_{r\text{-}pos}(x)$ et $R_{r\text{-}pos}(x)$ et négatifs $L_{r\text{-}pos}(x)$ et $R_{r\text{-}pos}(x)$) sont regroupés sous une résistance et une inductance équivalentes (III.2).

$$\begin{cases} L_{r-eq}(x) = L_{r-pos}(x) + L_{r-neg}(x) \\ R_{r-eq}(x) = R_{r-pos}(x) + R_{r-neg}(x) \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} L_{r-pos}(x) = |x_{ss} - x_{sub}(t)| l_{lin-pos} \\ R_{r-pos}(x) = |x_{ss} - x_{sub}(t)| r_{lin-pos} \\ L_{r-neg}(x) = |x_{ss} - x_{sub}(t)| l_{lin-neg} \\ R_{r-neg}(x) = |x_{ss} - x_{sub}(t)| r_{lin-neg} \end{cases} \tag{III.2}$$

Le matériel roulant – La rame est vue comme un ensemble dont le comportement énergétique dépend de sa composition (cf. relation II.30). Un bogie élémentaire est composé d'un filtre *LC* sur lequel sont connectées en parallèle 2 sources de courants représentants les auxiliaires et la traction.

La bobine et le condensateur de filtrage, contrairement au modèle du filtre réduit (cf. Chapitre II – équation II.5), sont modélisés séparément lors de l'étude des interactions dans ce nouveau système global. La résolution du conflit d'association est effectuée en permutant l'inductance de filtrage avec l'élément d'adaptation, puis en concaténant l'ensemble des inductances et résistances en séries. Ainsi, une inductance équivalente globale est obtenue (III.3).

$$\begin{cases} L_{eq-glo}(x) = L_{ss-eq} + L_{r-eq}(x) + L_{f-eq} \quad \text{avec} \quad L_{f-eq} = \dfrac{L_f}{N_{car/rame}\, N_{bo/car}} \\ R_{eq-glo}(x) = R_{ss-eq} + R_{r-eq}(x) + R_{f-eq} \quad \text{avec} \quad R_{f-eq} = \dfrac{r_f}{N_{car/rame}\, N_{bo/car}} \end{cases} \tag{III.3}$$

La permutation entre l'inductance de filtrage et l'élément d'adaptation induit un nouvel élément d'adaptation dans la REM finale, où la tension du bus est commune.

$$i_{bo}(t) = \frac{i_{sub}(t)}{N_{car/rame}\, N_{bo/car}} \tag{III.4}$$

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

D'autre part, un modèle statique de l'inductance équivalente est considéré. Il a été prouvé dans le chapitre II que sa partie inductive n'a que peu d'impact sur les résultats énergétiques (III.5).

$$i_{ss}(t) = i_{sub}(t) = \frac{e_{ss0}(t) - u_{bus}(t)}{R_{eq-glo}(x)} \tag{III.5}$$

Plusieurs parties du modèle du carrousel « mono-train » nécessitent néanmoins de connaitre la tension $u_{bus}(t)$ de la rame. Cette tension intervient entre autres sur les échanges d'énergie entre sous-systèmes, sur les commutations de la station d'alimentation, sur les déterminations des courants des auxiliaires et du système de traction, mais aussi sur les stratégies de freinage, ou encore de génération de la vitesse de référence. Son estimation correcte est donc primordiale pour obtenir une évaluation de la consommation énergétique fiable. Par ailleurs, une source de tension est requise afin de modéliser le bus continu. Plusieurs modèles sont possibles. Contrairement au modèle statique défini précédemment, la modélisation dynamique du bus DC conserve une estimation convenable de la tension et de sa dynamique, notamment lorsque la ligne est peu ou pas réceptive. Le modèle statique prendrait difficilement en compte le chargement du bus lors du freinage par exemple. Le modèle dynamique est donc conservé dans la modélisation. Ce choix permet une association simple des sous-systèmes et un respect du principe de causalité.

III.1.b – Modélisation « multi-dynamique » d'un carrousel « mono-train »

La REM finale correspond strictement aux approches causales et systémiques recherchées (Figure III.4). Par ailleurs, le modèle contient différentes granularités et dynamiques. Le sous-système d'alimentation est modélisé de façon statique et non-linéaire. Le véhicule est modélisé de manière quasi-statique pour prendre en compte sa dynamique principale : l'inertie représentée par sa masse dynamique. Le bus DC est quant à lui modélisé dynamiquement.

Cette modélisation correspond à une des particularités du modèle. En effet, le bus DC est généralement simplifié en considérant la rame comme une source de courant. Des méthodes supplémentaires sont donc généralement introduites pour prendre en compte les cas où la ligne est peu réceptive (cf. § 1.3.b – résolution itératives). Dans ce cas, la tension d'alimentation devient trop importante, ce qui provoque l'activation du freinage dissipatif. Une commutation de modèle est donc introduite avec ces méthodes pour traduire l'activation de ce freinage. Néanmoins, l'évolution de la tension est dans ce cas simplifiée, ce qui peut impacter certains phénomènes tels que le blocage des stations d'alimentation par exemple. Les résultats énergétiques s'en trouvent alors affectés.

D'autre part, la modélisation dynamique du bus DC garantit un respect des causalités et des interactions physiques du système. Elle permet effectivement de bien prendre en compte les commutations de modèles de la sous-station, tout comme l'activation du freinage dissipatif. Ces avantages laissent à penser que la consommation d'énergie, mais aussi les différentes variables énergétiques, seront bien estimées. Une validation expérimentale doit cependant confirmer ce choix. En revanche le temps de simulation augmente puisque la faible valeur de la capacité du bus DC conduit à imposer un pas de temps petit.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

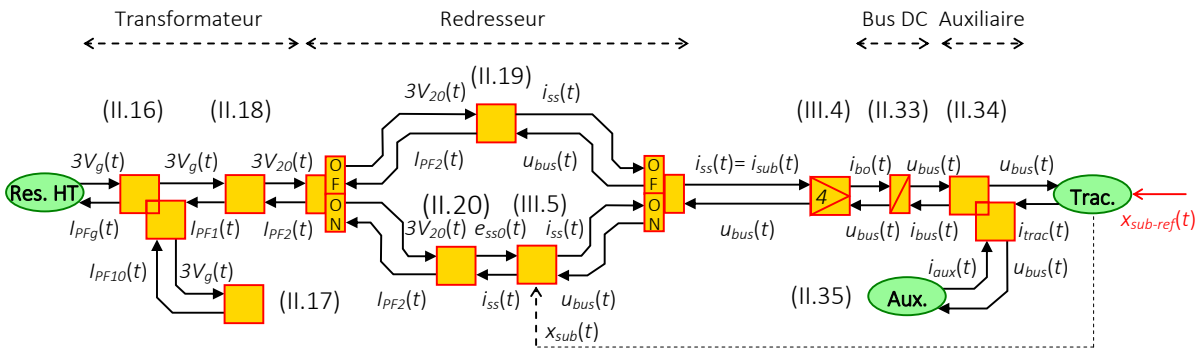


Figure III.4 : REM du carrousel « mono-train » après résolution du conflit d'association.

III.1.c – Validation expérimentale du modèle du carrousel « mono-train »

Afin de valider le modèle « mono-train », des tests ont été effectués sur la ligne d'essai de 4 Cantons, Villeneuve d'Ascq (France) (Figure III.5) [MAY 16]. Cette ligne appartient à la société de gestion du métro lillois Transpole [TRA 15]. Elle possède sa propre sous-station et 2 stations « passagers ». Les tests ont consisté à établir un carrousel « mono-train » en faisant circuler une rame Val 208 entre les 2 stations « passagers ». Ainsi, l'expérimentation correspond parfaitement au cas étudié (une rame alimentée par une station d'alimentation via une portion de rail).

L'instrumentation de la rame a permis la mesure de la vitesse $v_{sub}(t)$, de la tension du bus $u_{bus}(t)$ et du courant de la traction $i_{trac}(t)$[11]. L'énergie consommée est déduite des courants et tensions mesurés au niveau de la traction. Ces essais permettent en outre de visualiser les échanges d'énergie et de mettre en exergue les phases de traction, où la sous-station fournit l'énergie, et de freinage, où la rame régénère de l'énergie. Ces dernières sont à l'origine du blocage de la sous-station.

La simulation est effectuée sous Matlab-Simulink©. Les paramètres de la ligne et de sa sous-station sont donnés (Tableau III.1). Ceux du Val 208 sont les mêmes que précédemment. La vitesse mesurée est imposée comme vitesse de référence en entrée de la SMC du véhicule[12]. La tension efficace du réseau HT est imposée dans la source correspondante. Le modèle statique moyen de la sous-station détermine la tension à vide redressée à l'aide des relations (II.18) et (II.20).

Tableau III.1 : Paramètres de la ligne d'essai de 4 Cantons.

Distance entre les 2 stations	472 m	Rapport du transformateur	0,0316
Vitesse maximale	58 km/h	Tension redressée à vide	850 V
Tension simple RMS du réseau	11 547 V	Résistance éq. de la station	23 mΩ
Fréquence du réseau	50 Hz	Résistance linéique des rails	22 µΩ/m

[11] D'autres variables seraient plus appropriées telles que le courant de la rame $i_{sub}(t)$, de la sous-station $i_{ss}(t)$, ou encore du réseau HT $\underline{i}_g(t)$. Cependant, cette instrumentation n'a pas été possible en raison de la disponibilité de la ligne d'essai ou des personnels habilités pour intervenir sur le réseau HT en amont de la sous-station.

[12] Le modèle de pilotage n'a pas été utilisé pour cette validation. Ainsi, seuls les modèles énergétiques sont validés en prenant en compte la vitesse mesurée comme référence.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

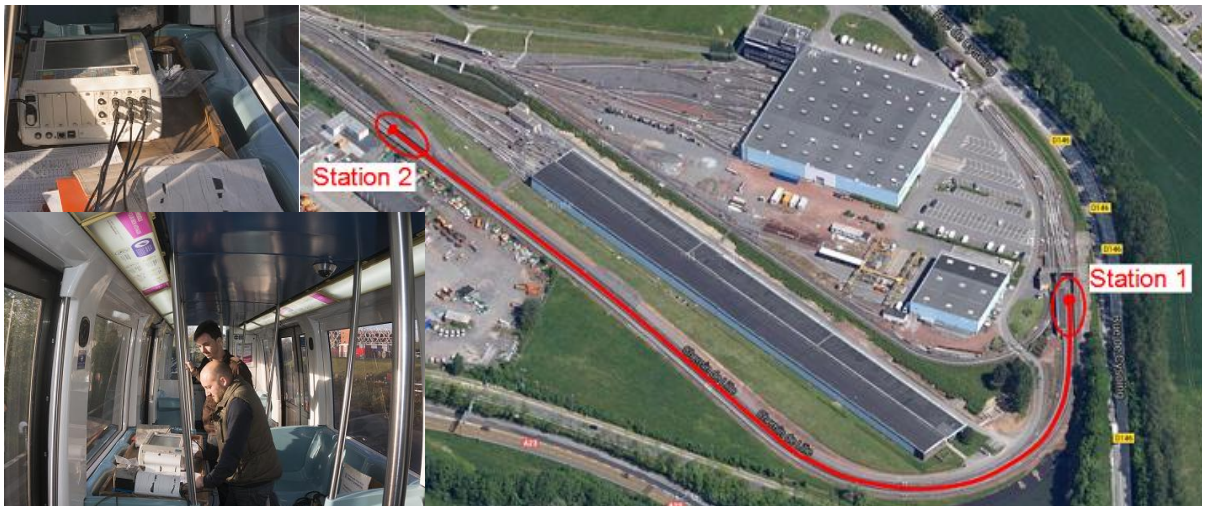


Figure III.5 : Test de validation expérimentale sur la ligne d'essai de 4 Cantons, Villeneuve d'Ascq (France).

L'énergie et le courant $i_{trac}(t)$ de la traction et la tension $u_{bus}(t)$ simulés sont comparés aux relevés expérimentaux (Figure III.6). Un zoom est effectué pour mettre en exergue les différentes phases (traction ① et freinage ②). Les résultats énergétiques montrent une bonne concordance entre le modèle et les relevés expérimentaux (Tableau III.2), ce qui valide la méthode et les modèles utilisés. De plus, le courant absorbé par la traction et la tension du bus sont également bien estimés grâce à la modélisation dynamique du bus continu. Une modélisation statique, à l'inverse, n'aurait pas apporté d'aussi bons résultats. L'élévation brusque de la tension lors du freinage par exemple n'aurait pas pu être reproduite sans ajout de méthodes supplémentaires.

Tableau III.2 : Validation du modèle de carrousel « mono-train ».

	Energie consommée	Erreur moyenne	Ecart type
Expérimentation	3,1 kWh	0 % (référence)	0
Simulation	3,0 kWh	1,9 %	2,1

Certaines différences persistent cependant entre la simulation et les mesures, notamment lors de la commutation traction/freinage. En effet, on observe de brefs pics de courant négatif lors du début des phases de freinage non reproduits par le modèle. En fait, la commutation traction/freinage n'est pas instantanée sur le système réel, comme supposé dans le modèle. Ainsi, ces pics apparaissent lorsque le freinage devient effectif. Néanmoins, l'influence sur la consommation d'énergie est négligeable. Cela conforte de ne pas prendre en compte ce phénomène. Ce dernier est, pour les mêmes raisons, également responsable de certains écarts entre la tension simulée et mesurée.

Par ailleurs, le modèle est capable de reproduire précisément le comportement physique du système et ses interactions énergétiques. Ainsi, lors de la traction (phase ①), un couple positif est demandé. Celui-ci induit un appel de courant sur le bus DC. Ce courant est fourni par la sous-station (modèle passant) et circule dans les rails, ce qui génère une chute de tension aux bornes du véhicule. Lors du freinage (phase ②) un couple négatif est demandé. Dans un premier temps celui-ci est appliqué par les machines de traction pour récupérer l'énergie. Un courant est alors renvoyé sur le bus dont une partie est consommée directement par les auxiliaires. L'autre partie est stockée dans le

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

condensateur de filtrage car le blocage de la sous-station (modèle bloqué) empêche son évacuation sur les rails. L'accumulation d'énergie dans le bus DC est à l'origine d'une élévation brusque de la tension. Lorsque celle-ci devient trop élevée, le freinage régénératif est progressivement réduit jusqu'à atteindre une stabilisation de la tension. Le complément du freinage est fourni par les freins mécaniques. La majeure partie de l'énergie est donc dissipée sous forme de chaleur. Lors d'une nouvelle phase de traction, la tension diminue de nouveau avec l'absorption d'énergie sur le bus DC. Ce fonctionnement garantit la tension limite tout en maximisant la récupération d'énergie. Il est réalisé de la même manière dans le modèle que sur le système réel (cf. Figure II.21).

Par ailleurs, il faut préciser que cette prise en compte du comportement dynamique de la tension, notamment lors du freinage, est peu réalisée dans la bibliographie. En effet, les rames sont, la grande majorité du temps, modélisées comme des sources de courant sans considérer le bus DC en parallèle. Le modèle proposé se rapproche alors du fonctionnement réel du système et l'étudie selon une approche fonctionnelle et causale, respectant strictement ses interactions et limites physiques. Cela permet de faire abstraction des méthodes itératives classiquement utilisées. En effet, le modèle du matériel roulant ne nécessite plus de commutation car sa causalité et sa nature sont préservées et respectées (source de courant en parallèle avec une source de tension).

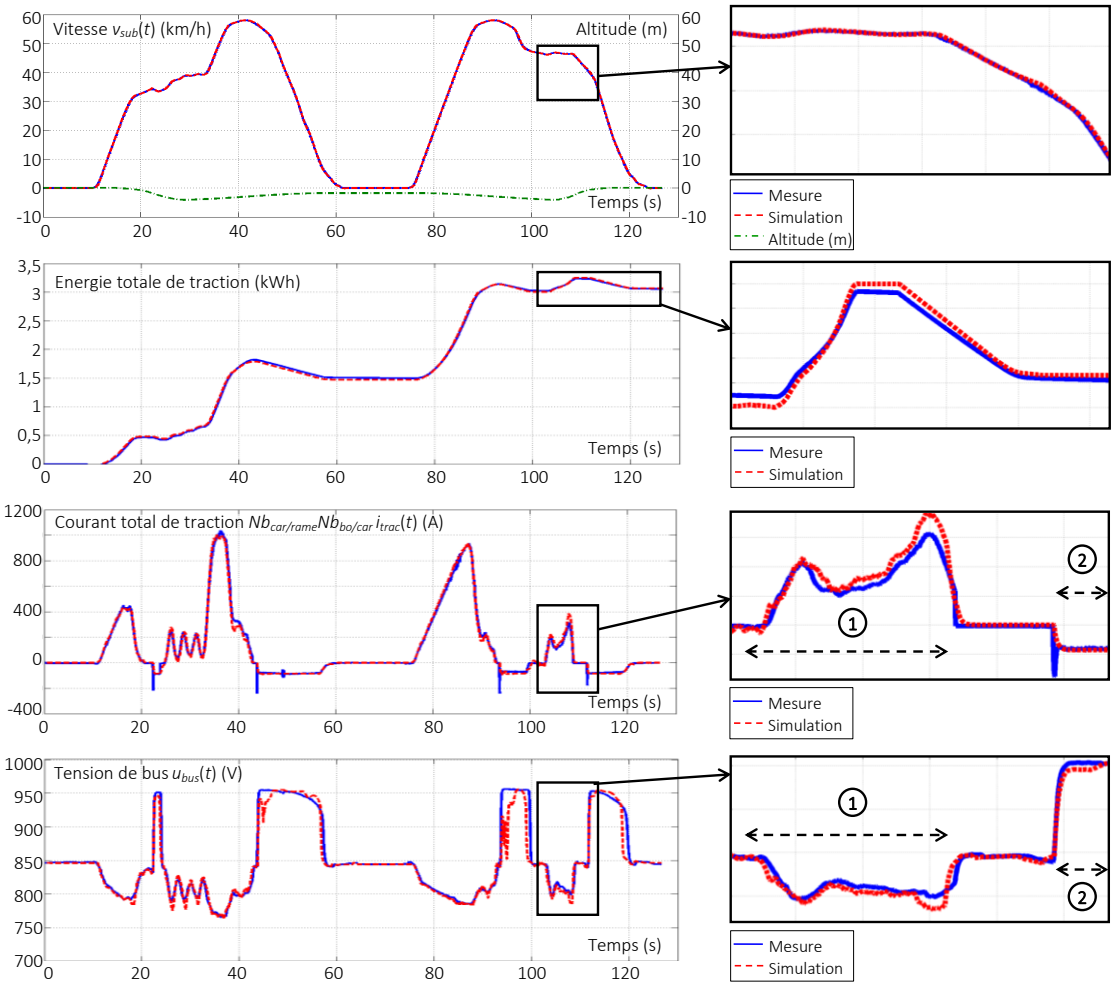


Figure III.6 : Validation expérimentale du modèle de carrousel « mono-train ».

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

III.2 – Modélisation d'un carrousel « multi-train »

La modélisation « mono-train » est étendue pour l'étude d'un carrousel composé de plusieurs rames (« multi-train »). Cette extension doit formuler le couplage de différentes sources sur la distribution commune d'énergie. Un exemple composé de 2 rames alimentées par une sous-station non-réversible au travers de rails de distribution est considéré. Dans une première sous-partie, la problématique du couplage est présentée. Différentes méthodes de formulation sont proposées dans une seconde sous-partie. L'une d'elles est finalement choisie en fonction de sa précision, de sa simplicité de mise en œuvre, et de sa flexibilité par rapport à l'ajout de sources supplémentaires.

III.2.a – Problématiques du couplage multi-source

Le couplage d'un tel système pose des difficultés dans la formulation du modèle et sa résolution en raison des multiples interactions qui existent. Celles-ci sont d'autant plus importantes que le nombre de sources connectées sur la distribution commune est élevé. Cependant, afin d'aborder le problème progressivement, seules 3 sources sont considérées. La première difficulté provient de la variabilité du système. La succession des sous-systèmes sur la ligne conduit effectivement à plusieurs systèmes équivalents (Figure III.7). Par ailleurs, l'état de la sous-station (passante ou bloquée) conduit également à des systèmes équivalents différents, ce qui mène à d'avantage de complexité. Cette non-stationnarité se traduit aussi par la prise en compte de certains paramètres qui varient au cours du temps. Par exemple, les résistances des diverses sections de rails dépendent des positions variables des rames. Ce dernier point a déjà été introduit dans le modèle de carrousel « mono-train ». La méthode de formulation et de résolution du système doit donc être capable de considérer aisément cette variabilité, en étant générique et flexible.

Par la suite, les cas équivalents 1 et 3 (Figure III.7) sont volontairement écartés. Ils seront pris en compte lors de l'extension de la méthode retenue. Le schéma électrique considéré (Figure III.8) intègre les auxiliaires dans les sources de courant $i_{busj}(t)$. Tout en veillant à la flexibilité du modèle face à l'ajout de sources supplémentaires (ce point sera traité principalement dans le Chapitre IV) l'objectif est d'investiguer sur différentes méthodes de formulation et de résolution du couplage.

Par ailleurs, une autre difficulté est liée à l'apparition d'un nœud inductif, plus ou moins complexe, en fonction du nombre de sources connectées sur la distribution commune. Ce nœud inductif est créé par la connexion des différentes inductances de la sous-station, des rails, et des rames. Les modèles statiques de ces composants sont décrits dans les relations (III.6), (III.7), et (III.8).

$$e_{ss0}(t) - e_{ss}(t) = R_{ss-eq} i_{ss}(t) \tag{III.6}$$

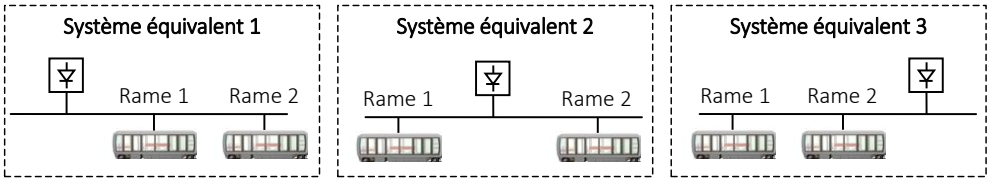


Figure III.7 : Exemples de systèmes équivalents causés par la variabilité du système de carrousel « multi-train ».

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

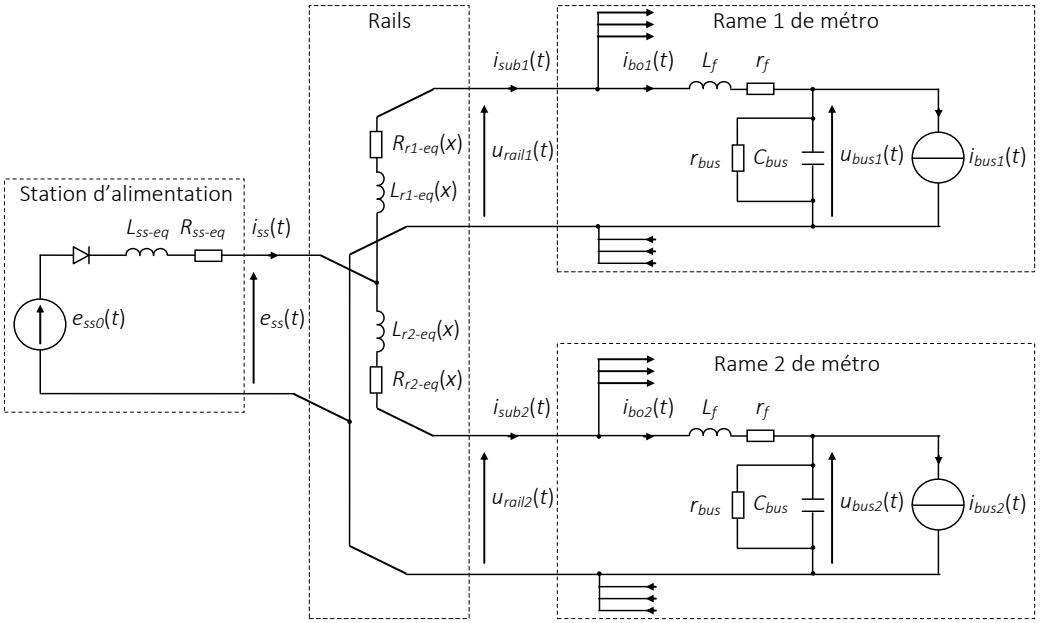


Figure III.8 : Représentation structurelle simplifiée du carrousel « multi-train » considéré.

$$e_{ss}(t)-u_{bus1}(t)=R_{1-eq}(x)i_{sub1}(t) \quad \text{avec} \quad R_{1-eq}(x)=R_{r1-eq}(x)+R_{f-eq} \tag{III.7}$$

$$e_{ss}(t)-u_{bus2}(t)=R_{2-eq}(x)i_{sub2}(t) \quad \text{avec} \quad R_{2-eq}(x)=R_{r2-eq}(x)+R_{f-eq} \tag{III.8}$$

Un nœud de courant intervient donc (III.9). La résolution du système devient rapidement complexe en raison du couplage fort de l'ensemble des sous-systèmes. Chaque courant circulant dans le système dépend alors de l'ensemble des tensions imposées par les sous-systèmes (lorsque la sous-station est passante). Le problème est tout aussi complexe si la station d'alimentation se bloque.

$$i_{ss}(t)=i_{sub1}(t)+i_{sub2}(t) \tag{III.9}$$

III.2.b – Méthodes de formulation et de résolution d'un couplage multi-source

Comme observé dans la modélisation du carrousel « mono-train », puis exprimé dans la sous-partie précédente, la prise en compte des différentes inductances et résistances du système (station d'alimentation, rails, filtre des rames) et l'aspect non-réversible de la sous-station ne sont pas dissociables. Dans le cas contraire, des problèmes de causalités apparaissent. Une formulation globale du sous-système de distribution est donc requise pour prendre en compte le couplage des différentes sources. Une première REM montre où doit s'appliquer la méthode recherchée (Figure III.9). Ainsi, elle doit considérer différentes sources de tension (tensions des bus DC) et une source de nature variable et commutable. Cette dernière impose la tension redressée à vide de la sous-station lorsqu'elle est passante, ou un courant nul lorsqu'elle est bloquée. De plus, les positions variables des véhicules nécessitent une mise à jour continuelle des valeurs des résistances des rails.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

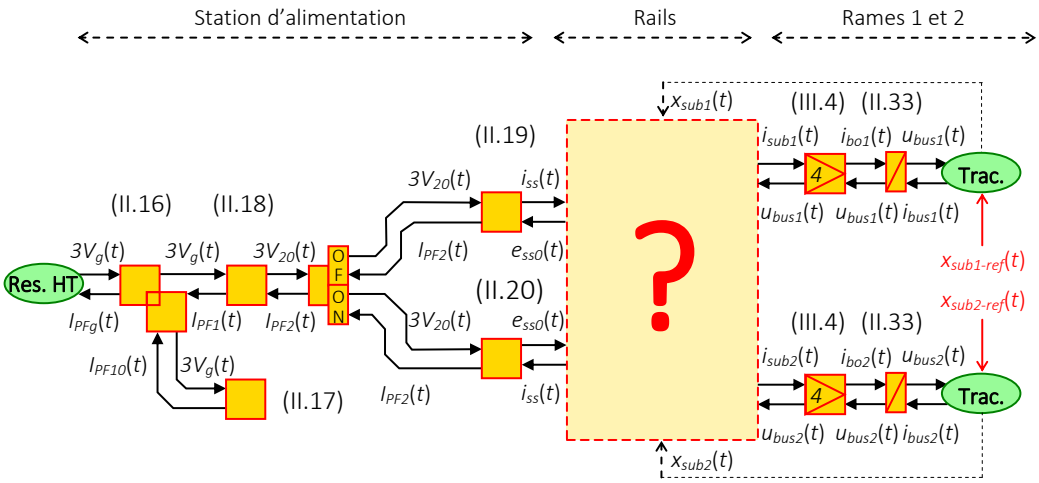


Figure III.9 : REM du carrousel « multi-train » avec la problématique de couplage des différentes sources.

Méthode « classique » matricielle (MCM)

La méthode « classique » matricielle (MCM) est habituellement mise en œuvre avec la REM. Elle consiste à écrire les équations d'états du système couplé sous forme matricielle, exprimant ainsi les variables indépendantes. Dans l'exemple, cela revient à résoudre la problématique d'un nœud inductif [VER 07], [MAY 16].

Lorsque la sous-station est passante, il est possible d'écrire les modèles statiques (parties résistives uniquement) des différentes inductances[13] (cf. relations III.6, III.7 et III.8). Cependant, leur caractère couplé ne permet pas de résoudre ces équations indépendamment sans générer de problème de résolution (boucle algébrique). Leur réécriture sous forme matricielle permet de modéliser le système en accord avec sa causalité, et de déterminer les courants indépendants $i_{sub1}(t)$ et $i_{sub2}(t)$ (III.10) et (III.11). Le troisième courant $i_{ss}(t)$ est une combinaison de ces 2 courants (III.12).

$$R_{M-on-eq}(x)\underline{i}_{sub}(t)=\begin{bmatrix}R_{2-eq}(x)\\R_{1-eq}(x)\end{bmatrix}e_{ss0}(t)-\begin{bmatrix}R_{ss-eq}+R_{2-eq}(x) & -R_{ss-eq}\\-R_{ss-eq} & R_{ss-eq}+R_{1-eq}(x)\end{bmatrix}\underline{u}_{bus}(t) \quad \text{(III.10)}$$

avec $R_{M-on-eq}(x)=R_{1-eq}(x)R_{ss-eq}+R_{2-eq}(x)R_{ss-eq}+R_{1-eq}(x)R_{2-eq}(x)$

et $\underline{i}_{sub}(t)=\begin{bmatrix}i_{sub1}(t)\\i_{sub2}(t)\end{bmatrix}$ et $\underline{u}_{bus}(t)=\begin{bmatrix}u_{bus1}(t)\\u_{bus2}(t)\end{bmatrix}$ (III.11)

d'où $i_{ss}(t)=\begin{bmatrix}1 & 1\end{bmatrix}\underline{i}_{sub}(t)$ (III.12)

Par ailleurs, lorsque la sous-station est bloquée, un second système équivalent est résolu. La relation (III.13) est considérée où $i_{ss}(t)$ est maintenant imposé (zéro pour une station non-réversible bloquée). La tension $e_{ss0}(t)$ induite est également déterminée (III.14).

[13] La méthode de formulation est également applicable en dynamique tel que cela été fait, avec la REM, dans [VER 07] et [MAY 16]. Néanmoins, le modèle recherché étant d'ordre énergétique, la modélisation se limite ici aux parties résistives des composants. Le chapitre II a effectivement prouvé qu'un tel modèle suffit.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

$$R_{M-off-eq}(x)\underline{i}_{sub}(t)=\begin{bmatrix} R_{2-eq}(x) \\ R_{1-eq}(x) \end{bmatrix} i_{ss}(t)-\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}\underline{u}_{bus}(t) \tag{III.13}$$

avec $R_{M-off-eq}(x)=R_{1-eq}(x)+R_{2-eq}(x)$

d'où $$e_{ss0}(t)=\begin{bmatrix} R_{ss-eq}+\dfrac{R_{1-eq}(x)}{2} & R_{ss-eq}+\dfrac{R_{2-eq}(x)}{2} \end{bmatrix}\underline{i}_{sub}(t)+\begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}\underline{u}_{bus}(t) \tag{III.14}$$

La partie de la REM relative au couplage des différentes sources du système est composée de 4 éléments avec la méthode « classique » matricielle (Figure III.10). Un élément de couplage converti les variables scalaires de chaque rame en 2 vecteurs, l'un composé des tensions de bus $\underline{u}_{bus}(t)$, l'autres des courants $\underline{i}_{sub}(t)$ (III.11). Un élément de commutation active ensuite les modèles des systèmes équivalents respectifs aux états bloqués et passants de la sous-station. Les conditions de commutation dépendent des variables courant/tension de la sous-station (cf. Figure II.8.b). Enfin, 2 éléments de conversion d'énergie sont utilisés en fonction de l'état actif de la station d'alimentation. Lorsqu'elle est passante, l'un détermine les courants absorbés et débités par les rames (III.10) et la sous-station (III.12). Lorsqu'elle est bloquée, l'autre définit les courants des rames (III.13) ainsi que la tension aux bornes de la sous-station (III.14).

La MCM formule le couplage suivant des équations matricielles exprimant les variables indépendantes du système. La résolution mathématique est directe puisque les inconnues du système sont exprimées en fonction d'une ou plusieurs relation(s) matricielle(s). Cependant, la REM obtenue (Figure III.10) reste limitée et difficilement généralisable. Elle est effectivement vraie pour le système considéré seulement (cf. Figure III.8). Plusieurs autres modèles équivalents (relations matricielles) devraient alors être ajoutés et activés par le biais d'éléments de commutation supplémentaires pour prendre en compte les autre cas de figures possibles. Or, ces relations matricielles sont complexes à obtenir quand le nombre de sources augmente. Cette méthode est donc limitée à un nombre de sources restreint. En effet, autant de modèles doivent être définis qu'il y a de systèmes équivalents possibles. Une méthode plus générique est donc préférable.

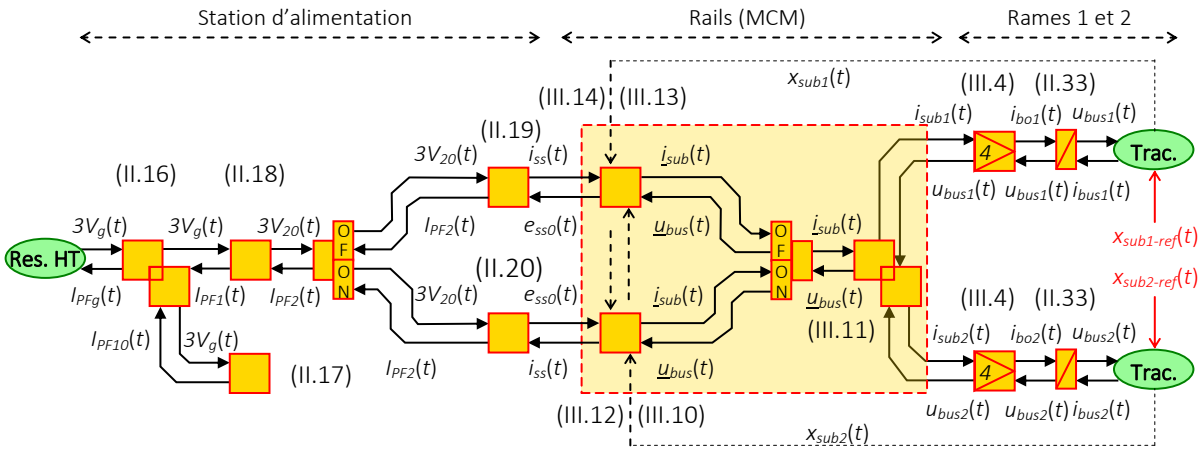


Figure III.10 : REM du carrousel « multi-train » : méthode « classique » matricielle (MCM).

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Méthode nodale modifiée causale (C-MNA)

Les méthodes nodales ont été présentées dans le chapitre I. Cependant, elles sont la majorité du temps appliquées dans des approches structurelles et non-causales. Elles sont ici adaptées afin de correspondre à l'approche fonctionnelle et causale de la REM. Par ailleurs, parmi les 2 méthodes nodales présentées dans le chapitre I, seule la MNA est utilisée. Ses avantages sont qu'elle conduit à des matrices de dimensions plus petites que la seconde méthode. De plus, elle exprime directement les variables absorbées par les sources (ex : courant de la sous-station) contrairement à la seconde qui définie celles liées aux sections de rails séparant les différentes sources (ex : courant dans une section de rail). La résolution du système nécessite donc un nombre d'opérations réduit avec la MNA, ce qui diminue théoriquement le temps de simulation. Sa formulation globale est rappelée ci-dessous avec $\underline{G}$ la matrice conductance, $\underline{R}$ la matrice des résistances internes des sources de tension, $\underline{B}$ la matrice d'incidence des sources, $\underline{V}$ le vecteur des tensions nodales inconnues, $\underline{I}$ le vecteur des courants inconnus, $\underline{J}$ le vecteur des courants connus, et $\underline{E}$ le vecteur des tensions connues.

$$\begin{bmatrix} \underline{G} & -\underline{B} \\ \underline{B}^t & \underline{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V} \\ \underline{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{J} \\ \underline{E} \end{bmatrix} \tag{III.15}$$

L'objectif de la méthode est de définir les variables inconnues du couplage en fonction d'une matrice impédance (conductance en statique) [14] et des variables imposées par les différentes sources. Contrairement à la MNA non-causale habituelle, l'application de la MNA causale (C-MNA) dans la REM (Figure III.11) permet de déterminer, en accord avec les interactions physiques du système, ses variables d'entrées et de sorties. Ainsi, les variables (d'entrées) imposées par les rames sont leurs tensions de bus $\underline{u}_{bus}(t)$. A l'inverse, les courants des rames $\underline{i}_{sub}(t)$ sont inconnus et doivent être déterminés par la C-MNA. Par ailleurs, les variables connues et inconnues de la station d'alimentation dépendent de son état. Lorsqu'elle est passante, la sous-station impose sa tension à vide redressée $e_{ss0}(t)$. Il faut alors calculer le courant dual inconnu $i_{ss}(t)$. Lorsque la sous-station est bloquée, elle impose à l'inverse un courant nul $i_{ss}(t)$. L'inconnue duale est donc cette fois-ci la tension $e_{ss0}(t)$.

Dans l'exemple, lorsque la sous-station est passante, les vecteurs et matrices de la C-MNA sont définis par (III.16) et (III.17). Par ailleurs, il ne faut pas confondre les inconnues liées à la C-MNA (les vecteurs $\underline{V}$ et $\underline{I}$) avec les inconnues propres au couplage ($i_{sub1}(t)$, $i_{sub2}(t)$, et $i_{ss}(t)$). En effet, certaines inconnues de la C-MNA sont des inconnues supplémentaires liées à la méthode de formulation. Néanmoins, seules celles surlignées de jaune sont réellement utiles (III.17) (Figure III.11). De même, seules les variables d'entrées surlignées en vert ($u_{bus1}(t)$, $u_{bus2}(t)$, et $e_{ss}(t)$) proviennent de la REM.

$$\text{avec} \quad \underline{G} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{r1-eq}(x)} & -\frac{1}{R_{r1-eq}(x)} & 0 \\ -\frac{1}{R_{r1-eq}(x)} & \frac{1}{R_{r1-eq}(x)} + \frac{1}{R_{r2-eq}(x)} & -\frac{1}{R_{r2-eq}(x)} \\ 0 & -\frac{1}{R_{r2-eq}(x)} & \frac{1}{R_{r2-eq}(x)} \end{bmatrix}, \underline{V} = \begin{bmatrix} u_{rail1}(t) \\ e_{ss}(t) \\ u_{rail2}(t) \end{bmatrix} \tag{III.16}$$

[14] La C-MNA, tirée de la MNA, peut également prendre en compte les différentes inductances du couplage et ainsi considérer leurs dynamiques [ACA 10].

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

$$\text{et} \quad \underline{I}=\begin{bmatrix}-i_{sub1}(t)\\ i_{ss}(t)\\ -i_{sub2}(t)\end{bmatrix},\ \underline{J}=\begin{bmatrix}0\\0\\0\end{bmatrix},\ \underline{E}=\begin{bmatrix}u_{bus1}(t)\\ e_{ss0}(t)\\ u_{bus2}(t)\end{bmatrix},\ \underline{B}=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix},\ \underline{R}=\begin{bmatrix}R_{f-eq}&0&0\\0&R_{ss-eq}&0\\0&0&R_{f-eq}\end{bmatrix} \tag{III.17}$$

Lorsque la station d'alimentation est bloquée la C-MNA détermine d'autres vecteurs et matrices (III.18). Cependant, la matrice $\underline{G}$ et le vecteur $\underline{V}$ ne changent pas (III.16) car ils ne dépendent pas de la nature des sources mais uniquement de leurs emplacements sur la ligne. D'autre part, la tension redressée inconnue $e_{ss0}(t)$ n'est pas directement déterminée par la C-MNA mais peut facilement être déduite d'autres variables comme présenté ci-dessous.

$$\text{avec} \quad \underline{I}=\begin{bmatrix}-i_{sub1}(t)\\ -i_{sub2}(t)\end{bmatrix},\ \underline{J}=\begin{bmatrix}0\\ i_{ss}(t)\\ 0\end{bmatrix},\ \underline{E}=\begin{bmatrix}u_{bus1}(t)\\ u_{bus2}(t)\end{bmatrix},\ \underline{B}=\begin{bmatrix}1&0\\0&0\\0&1\end{bmatrix},\ \underline{R}=\begin{bmatrix}R_{f-eq}&0\\0&R_{f-eq}\end{bmatrix} \tag{III.18}$$

$$\text{et} \quad e_{ss0}(t)=e_{ss}(t)+R_{ss-eq}i_{ss}(t)$$

La résolution de la C-MNA s'effectue ensuite par l'inversion de la relation matricielle (III.19). L'ajout de variables intermédiaires dans la C-MNA garantit en fait l'inversibilité de l'équation matricielle. En outre, elles déterminent également plus de variables que nécessaire en calculant par exemple les tensions nodales $u_{rail1}(t)$, $u_{rail2}(t)$ ou encore $e_{ss}(t)$.

$$\begin{bmatrix}\underline{V}\\ \underline{I}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\underline{G}&-\underline{B}\\ \underline{B}^t&\underline{R}\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\underline{J}\\ \underline{E}\end{bmatrix} \tag{III.19}$$

La C-MNA formule le couplage suivant une méthodologie définie par (III.15). Elle conduit à des relations matricielles qui dépendent de l'état du système et des positions de ses sous-systèmes. La résolution s'effectue par inversion de ces relations. Toutefois, la REM fait apparaitre les mêmes problèmes d'extension que la MCM ; elle nécessite autant d'élément de conversion que de système équivalents (cf. Figure III.11). De plus, ces derniers doivent être activés par des éléments de commutation. Notons que cette REM initiale est identique à celle de la MCM. Seules les équations internes à ses éléments diffèrent. Néanmoins, la méthodologie de formulation de la C-MNA permet

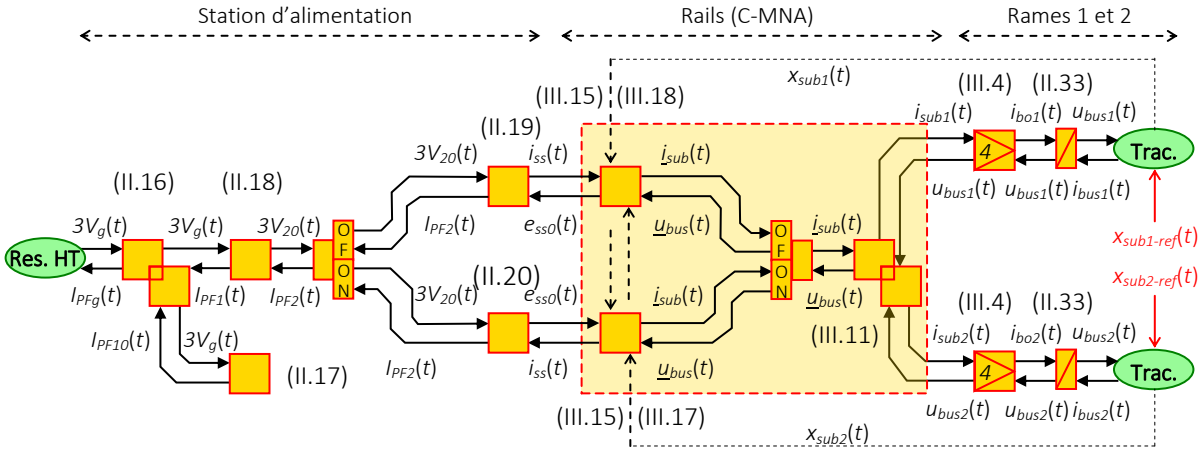


Figure III.11 : REM initiale du carrousel « multi-train » : méthode nodale modifiée causale (C-MNA).

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

d'aboutir à une seconde REM plus flexible (Figure III.12). Celle-ci est obtenue après une permutation, rendue possible grâce à la généralisation de la formulation de la C-MNA, des éléments de conversion de la C-MNA avec l'élément de commutation.

La nouvelle REM contient dorénavant : un élément de conversion qui représente la C-MNA (cf. relation III.15), un élément de commutation qui impose la bonne variable à la C-MNA en fonction de l'état de la sous-station (passante ou bloquée) (III.20), et un élément de couplage qui regroupe les tensions et courants des rames sous forme vectorielle (cf. relation III.11). Ainsi, l'élément de commutation détermine les variables (entrée et sortie) correspondantes à la station d'alimentation. Les variables sélectionnées sont ensuite appliquées à la C-MNA. Cette dernière utilise uniquement l'une des 2 variables possibles en fonction de l'état actif de la station et détermine l'inconnue duale.

$$\begin{cases} y_{MNA-ss}(t) = \begin{cases} i_{ss}(t) & \text{si la station est bloquée} \\ e_{ss0}(t) & \text{si la station est passante} \end{cases} \\ z_{MNA-ss}(t) = \begin{cases} e_{ss0}(t) & \text{si la station est bloquée} \\ i_{ss}(t) & \text{si la station est passante} \end{cases} \end{cases} \qquad \text{(III.20)}$$

La difficulté majeure consiste à définir les matrices et vecteurs de la C-MNA à chaque pas de temps en raison de la variabilité des positions des rames et des changements de natures des sources (non-réversibilité des sous-stations). Contrairement à la MCM, ce processus de formulation peut être automatisé par des scripts Matlab© ou des « S-functions » dans Matlab-Simulink©. Il s'agit de classer les différents sous-systèmes selon leurs positions sur la ligne, de déterminer les résistances des sections de rails $R_{rj\text{-}eq}(x)$ en fonction des positions et des résistances linéiques des conducteurs, et enfin de construire et résoudre par inversion la relation générale (III.15) en fonction de l'état actif de la station. Précisons que, contrairement à la MCM, cette généralisation n'est possible qu'en raison de l'introduction (ou plutôt la conservation) de variables intermédiaires dans la C-MNA. La relation matricielle aboutirait exactement sur les mêmes expressions que la MCM si ces variables intermédiaires étaient supprimées, rendant alors impossible la généralisation. La REM obtenue devient donc suffisamment générale pour traiter des cas « multi-source ».

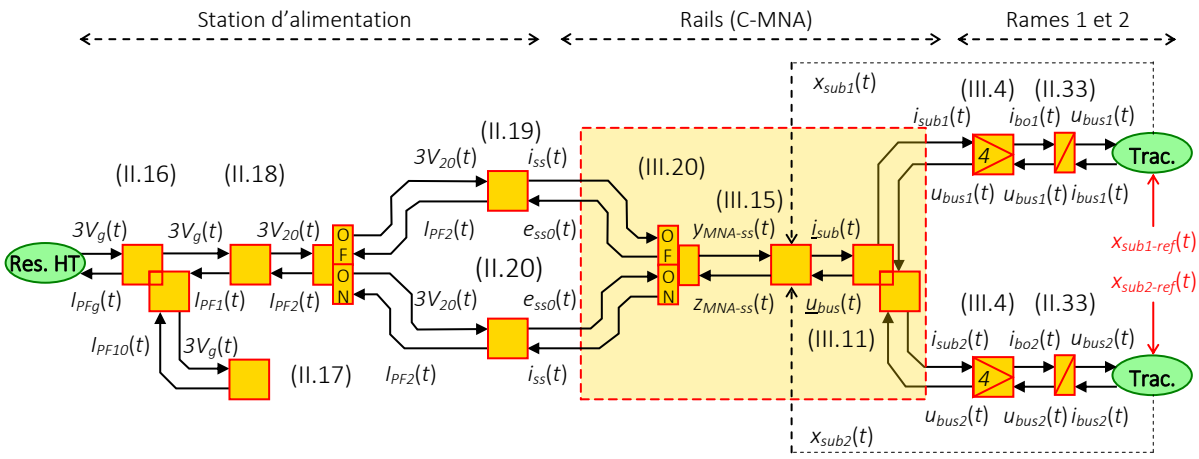


Figure III.12 : REM modifiée du carrousel « multi-train » : méthode nodale modifiée causale (C-MNA).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Méthode des résistances équivalentes (MREQ)

La MREQ consiste à découpler les relations matricielles précédentes en définissant un système équivalent composé d'un ensemble de sources, connectées les unes aux autres par des résistances équivalentes (Figure III.13). Il est donc simple, connaissant ces résistances, de déterminer les courants échangés entre sources. Finalement, le courant total d'une source est la somme de tous ses courants échangés avec les autres. Cette méthode se rapproche ainsi du principe de superposition. La difficulté provient de la déduction des différentes résistances équivalentes dont le nombre $N_{R\text{-}eq}$ est décrit par (III.21). Ainsi, dans le cas de l'exemple, la relation (III.10) est réécrite différemment (III.22). Les résistances équivalentes sont donc définies par l'équation (III.23).

$$N_{R-eq} = \sum_{j=1}^{N_{sous-système}-1} N_{sous-système} - j \tag{III.21}$$

$$\begin{cases} i_{sub1}(t) = \dfrac{e_{ss0}(t) - u_{bus1}(t)}{R_{es1-eq}(x)} - \dfrac{u_{bus1}(t) - u_{bus2}(t)}{R_{s1s2-eq}(x)} \\ i_{sub2}(t) = \dfrac{e_{ss0}(t) - u_{bus2}(t)}{R_{es2-eq}(x)} + \dfrac{u_{bus1}(t) - u_{bus2}(t)}{R_{s1s2-eq}(x)} \\ i_{ss}(t) = \dfrac{e_{ss0}(t) - u_{bus1}(t)}{R_{es1-eq}(x)} + \dfrac{e_{ss0}(t) - u_{bus2}(t)}{R_{es2-eq}(x)} \end{cases} \tag{III.22}$$

$$\text{avec} \begin{cases} R_{es1-eq}(x) = R_{1-eq}(x) + R_{ss-eq} + \dfrac{R_{1-eq}(x) R_{ss-eq}}{R_{2-eq}(x)} \\ R_{es2-eq}(x) = R_{2-eq}(x) + R_{ss-eq} + \dfrac{R_{2-eq}(x) R_{ss-eq}}{R_{1-eq}(x)} \\ R_{s1s2-eq}(x) = R_{1-eq}(x) + R_{2-eq}(x) + \dfrac{R_{1-eq}(x) R_{2-eq}(x)}{R_{ss-eq}} \end{cases} \tag{III.23}$$

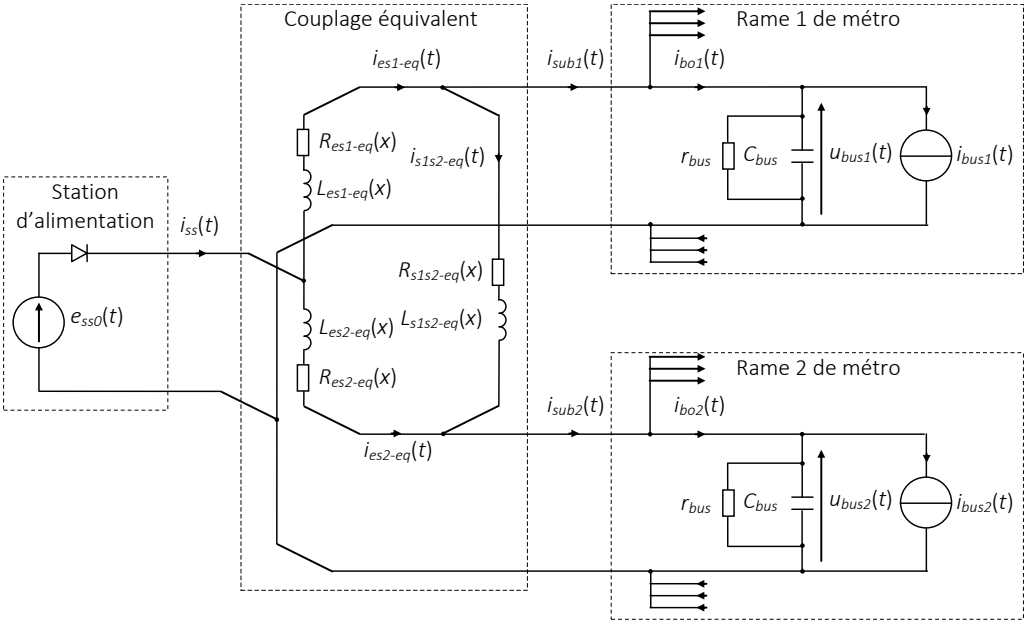


Figure III.13 : Représentation structurelle de la méthode des résistances équivalente (MREQ).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Une nouvelle REM du système est obtenue (Figure III.14). Les courants de chaque source sont une simple somme ou soustraction des courants échangés avec les autres. Ainsi, le courant de la rame 1, de la rame 2, et de la sous-station sont donnés respectivement par (III.24), (III.25) et (III.26).

$$i_{sub1}(t)=i_{es1-eq}(t)-i_{s1s2-eq}(t) \tag{III.24}$$

$$i_{sub2}(t)=i_{es2-eq}(t)+i_{s1s2-eq}(t) \tag{III.25}$$

$$i_{ss}(t)=i_{es1-eq}(t)-i_{es2-eq}(t) \tag{III.26}$$

Par ailleurs, des éléments de commutation sont déportés au niveau de la connexion de chaque source sur la distribution continue. Lors de l'état passant, les courants échangés entre sources sont déterminés par l'application de la loi d'Ohm[15].

$$i_{es1-eq}(t)=\frac{e_{ss0}(t)-u_{bus1}(t)}{R_{es1-eq}(x)} \quad \textit{(courant échangé entre la station et la rame 1)} \tag{III.27}$$

$$i_{es2-eq}(t)=\frac{e_{ss0}(t)-u_{bus2}(t)}{R_{es2-eq}(x)} \quad \textit{(courant échangé entre la station et la rame 2)} \tag{III.28}$$

$$i_{s1s2-eq}(t)=\frac{u_{bus1}(t)-u_{bus2}(t)}{R_{s1s2-eq}(x)} \quad \textit{(courant échangé entre la rame 1 et la rame 2)} \tag{III.29}$$

En revanche, lors de l'introduction d'une source de courant (exemple : sous-station bloquée), une partie de la formulation du couplage nécessite tout de même une relation matricielle (III.30).

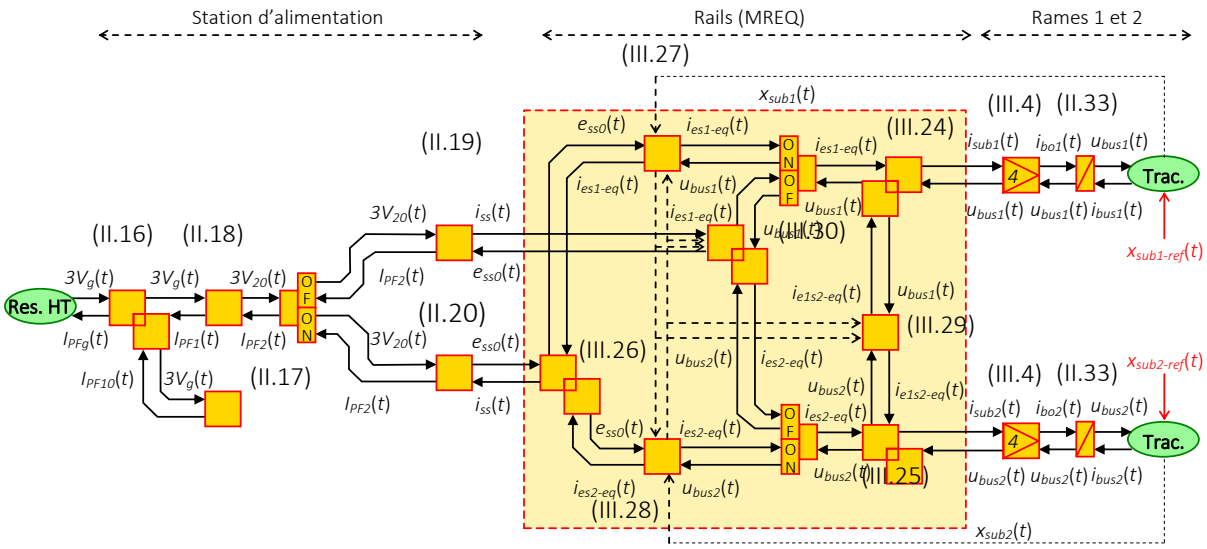


Figure III.14 : REM du carrousel « multi-train » : méthode des résistances équivalentes (MREQ).

[15] Tout comme les 2 autres méthodes, la MREQ permet de prendre en compte les inductances du système en identifiant ces inductances équivalentes de la même manière que cela est fait pour les résistances.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

 Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

$$\begin{bmatrix} i_{es1-eq}(t) \\ e_{ss0}(t) \\ i_{es2-eq}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{R_{es1-eq}(x)+R_{es2-eq}(x)} \begin{bmatrix} -1 & R_{es2-eq}(x) & 1 \\ R_{es2-eq}(x) & R_{es1-eq}(x)R_{es2-eq}(x) & R_{es1-eq}(x) \\ 1 & R_{es1-eq}(x) & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{bus1}(t) \\ i_{ss}(t) \\ u_{bus2}(t) \end{bmatrix} \quad \text{(III.30)}$$

La MREQ formule donc le couplage de ces 3 sources en définissant un système équivalent. Sa résolution est simplifiée par l'introduction, à la place de la distribution réelle, de résistances équivalentes entre chaque source. Ainsi, les énergies échangées par chaque sous-système sont déterminées simplement. Cependant, la définition de ces résistances est une difficulté majeure lorsque le nombre de sources augmente, tout comme la représentation (REM) du système équivalent. Cette méthode semble donc peu adaptée pour nombre de sources important.

III.2.c – Choix d'une méthode

Afin de choisir une méthode suffisamment précise, simple à mettre en œuvre, et flexible, les méthodes sont comparées sur l'exemple considéré. Il concerne une ligne de métro de 5 km composée de 8 stations « passagers » sur les 2 directions et d'une station d'alimentation située à 2 500 m (Figure III.15). Les simulations sont effectuées avec Matlab-Simulink©. Les résultats sont donnés pour une seule méthode puisqu'elles donnent toutes strictement les mêmes résultats. Ils montrent des phases où les 2 rames sont consommatrices d'énergie (phase ①). Dans ce cas, tous les courants sont positifs, ce qui induit des chutes de tension dans les sections de rails. Dans d'autres phases, les 2 rames sont en freinage (phase ②). Cela conduit à un blocage de la station d'alimentation et provoque une augmentation des tensions de bus en raison de l'énergie de freinage envoyée sur les condensateurs. Enfin, contrairement à la simulation « mono-train », il existe des phases d'échange énergétique entre les 2 rames (phase ③). Dans ce cas, une rame régénère un courant négatif qui alimente directement la seconde rame. La sous-station peut également fournir en énergie la rame en traction pendant cette période. Ainsi, l'énergie consommée est réduite puisque l'énergie de freinage est réutilisée au lieu d'être dissipée.

Les temps de simulation de chaque méthode sont répertoriés (Tableau III.3). La MCM et la MREQ sont relativement plus rapides que la C-MNA (50 % environ). La raison est que leurs formulations sont directement implantées dans le programme. De plus, leurs résolutions sont simples puisque les inconnues recherchées sont directement exprimées. A l'inverse, la formulation de la C-MNA est automatisée par une « S-functions » dans Matlab-Simulink©. La matrice est donc construite automatiquement par une analyse des différents nœuds (couplage énergétique des sous-systèmes). De plus, sa résolution nécessite l'inversion d'une relation matricielle. Ces étapes supplémentaires conduisent à augmenter le temps de simulation. Néanmoins, la flexibilité de la C-MNA est largement prédominante comparée aux 2 autres méthodes. En effet, ces dernières sont difficilement extensibles pour prendre en compte un nombre quelconque de sources. D'un côté, la MCM nécessite d'introduire autant de matrices (modèles) que de systèmes équivalents, d'un autre la MREQ est simplifiée lorsque des sources de tension sont présentes sur la ligne mais se complexifie avec des sources de courants. Finalement, la C-MNA est suffisamment simple à mettre en œuvre une fois le processus de formulation développé (« S-functions »). Elle requiert des vecteurs de variables d'entrées et de sorties définis par les éléments de la REM. La formulation est ensuite automatisée. Celle-ci est, de plus, facilement généralisable (cf. Chapitre IV).

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Après une comparaison sur différents critères des méthodes de formulation et de résolution (Tableau III.4), le choix se porte sur la méthode nodale modifiée causale (C-MNA). Une validation expérimentale doit cependant confirmer ce choix en termes de précision dans la partie suivante.

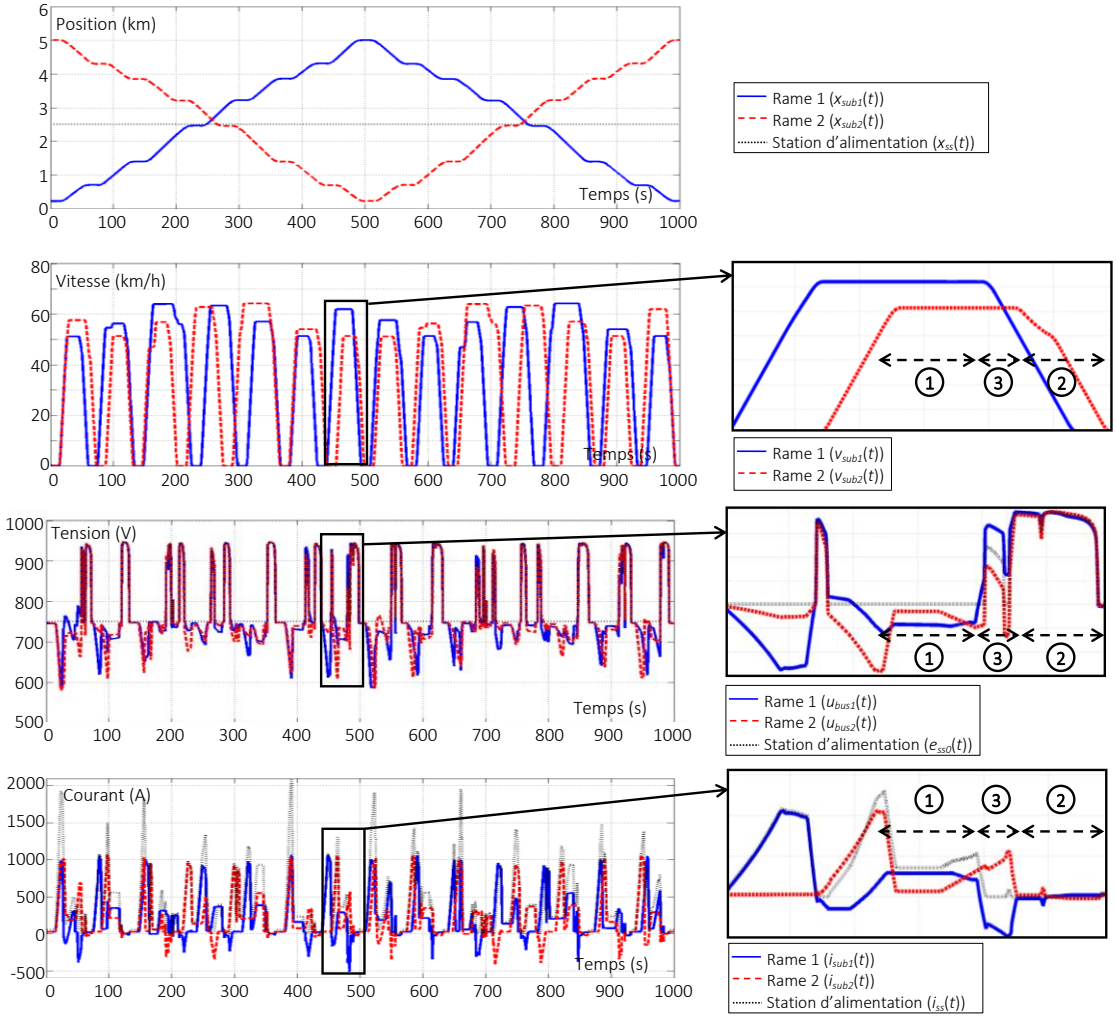


Figure III.15 : Résultats de simulation « multi-train » de l'exemple.

Tableau III.3 : Temps de simulation des méthodes de formulation et de résolution d'un couplage multi-source.

	MCM	C-MNA	MREQ
Temps de simulation (s)	387	694	393

Tableau III.4 : Comparaisons des méthodes de formulation et résolution d'un couplage multi-source.

	MCM	C-MNA	MREQ
Temps de simulation	++	--	++
Simplicité de mise en œuvre	--	++	+
Généralisation	--	++	--

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

III.3 – Validation expérimentale au travers d'une simulation HIL

La validation d'un outil de simulation « multi-train » est une tâche complexe en raison du nombre de sous-systèmes important qui intervient. Pour valider l'outil il faudrait alors rejouer un scénario existant en simulation et comparer les variables simulées et mesurées. Cela nécessiterait d'instrumenter tous les sous-systèmes réels simultanément pour effectuer les mesures. Un nombre de capteurs et une mémoire de stockage de données importants seraient alors nécessaires.

Pour contourner ce problème, l'utilisation d'une simulation « Harware-In-the-Loop (HIL) » de type puissance [BOU 10b] est proposée [MAY 15b]. Elle correspond à un espace d'expérimentation, sur la plate-forme eV du L2EP [Annexe 3], plus ouvert en permettant un contrôle de l'ensemble des variables. Divers scénarios peuvent ainsi être testés. Le cas d'étude considéré est similaire à celui modélisé précédemment (cf. Figure III.8), mais où un condensateur équivalent est considéré, avec *j* le numéro de la rame (III.31) (Figure III.16).

$$C_{bus-eq}\frac{d}{dt}u_{busj}(t)=i_{subj}(t)-i_{eqj}(t)-\frac{u_{busj}(t)}{r_{bus-eq}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} C_{bus-eq}=N_{car/rame}N_{bo/car}C_{bus} \\ r_{bus-eq}=\dfrac{r_{bus}}{N_{car/rame}N_{bo/car}} \end{cases} \tag{III.31}$$

$$\text{et} \quad i_{eqj}(t)=N_{car/rame}\,N_{bo/car}i_{busj}(t) \tag{III.32}$$

Une première sous-partie présente la simulation HIL appliquée sur le cas étudié. Une seconde sous-partie utilise ensuite cette simulation HIL pour valider la simulation « multi-train ».

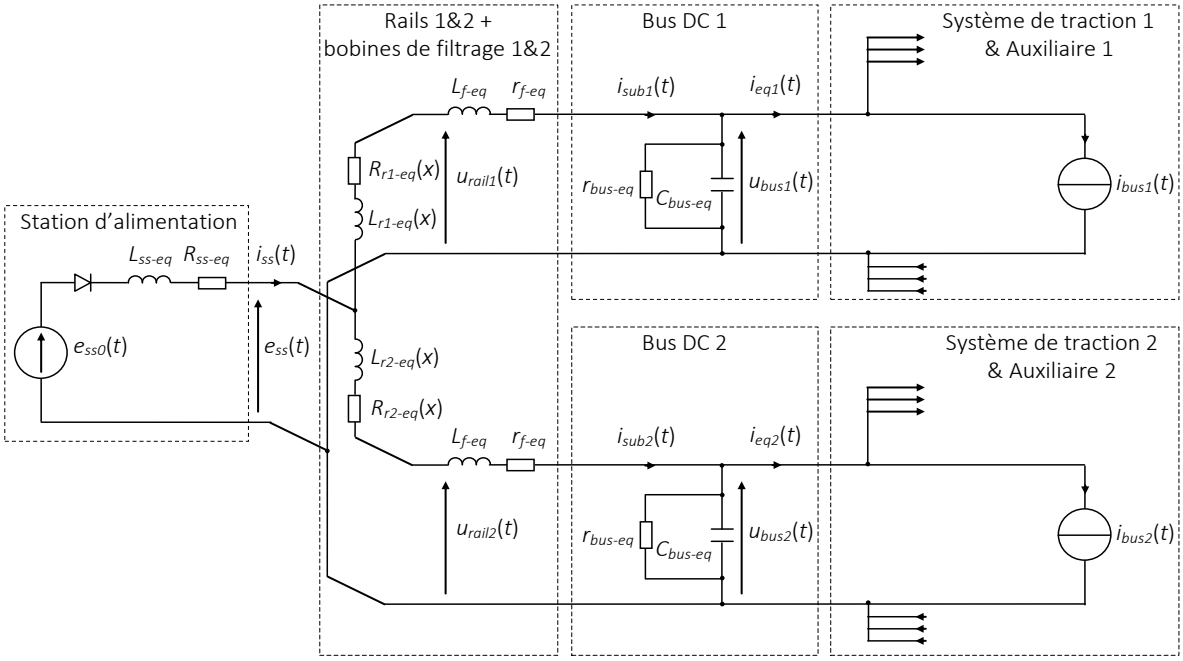


Figure III.16 : Représentation structurelle du système « multi-train » émulé.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

III.3.a – Simulation HIL d'un carrousel de métros « multi-train »

L'objectif de l'expérimentation est de reproduire physiquement les échanges d'énergie entre les sous-systèmes (Figure III.17). La comparaison de ces échanges avec la simulation permettrait de valider l'outil. Cependant, pour des raisons évidentes, certaines parties du système réel (carrousel « multi-train ») ne peuvent pas être inclues directement dans la plate-forme expérimentale (ex : les rames). Une simulation HIL est donc développée afin de les émuler. Les autres patries sont en revanche conservées physiquement dans la plate-forme, telles que la station d'alimentation, les rails, et les bus DC des rames. Ces derniers auraient pu également être émulés mais ils semblent être un point sensible de la modélisation. Nous avons donc choisi de les conserver physiquement.

Une simulation HIL de type puissance consiste à introduire certaines parties physiques dans la simulation. Ainsi, certaines parties du modèle sont remplacées par des composants réels. Les hypothèses de simulation associées sont donc supprimées. Cependant, pour interagir avec ces composants, d'autres parties doivent être émulées en utilisant des interfaces adaptées entre puissance et émulation [TIM 07], [BOU 10b], [LET 13b]. L'émulation d'un système consiste à reproduire son comportement à l'aide d'un système d'interface adapté. Ainsi, une simulation HIL de type puissance comprend des sous-systèmes physiques réels, et des sous-systèmes fictifs émulés. De plus, selon certains cas, plusieurs échelles peuvent être considérées [ALL 10a]. Pour une raison évidente, l'échelle appliquée ici est réduite (quelques kW) comparée à l'échelle réelle (quelques MW). La plate-forme expérimentale est dimensionnée en considérant une échelle de tension ($K_{scale\text{-}i}$) de 1/10 et une échelle de courant ($K_{scle\text{-}v}$) de 1/100 (soit 1/1000 en puissance) au niveau du domaine DC.

Une plate-forme d'expérimentation a été spécialement conçue pour l'émulation d'un carrousel « multi-train » (Figure III.18). Elle est composée d'une station d'alimentation réelle à échelle réduite, de 2 rhéostats motorisés, de 2 bus continus $C_{bus\text{-}eq}$, de 2 inductances L_{ind}, de 2 hacheurs réversibles, et d'une source de tension continue $U_{DC}(t)$ [Annexe 3]. Les parties réelles testées sont la sous-station, les bus DC des rames, et les rails. La résistivité de ces derniers est considérée au travers de rhéostats motorisés sur lesquels sont imposées les valeurs des résistances $R_{j\text{-}eq\text{-}red}(t)$. Ils sont l'image de sections de rails, enroulées sous forme de spires, au lieu d'être disposées le long de la ligne. Ainsi, un contrôle de ces valeurs de résistances est effectué en fonction du déplacement des rames [Annexe 3]. Ces dernières sont finalement émulées via des systèmes d'interface de façon à imposer les courants $i_{eqj\text{-}red}(t)$ sur les bus DC. Cela est fait au travers d'un contrôle des courants circulant dans les bobines L_{ind} via la commande du rapport de modulation des hacheurs $m_{ch1j}(t)$.

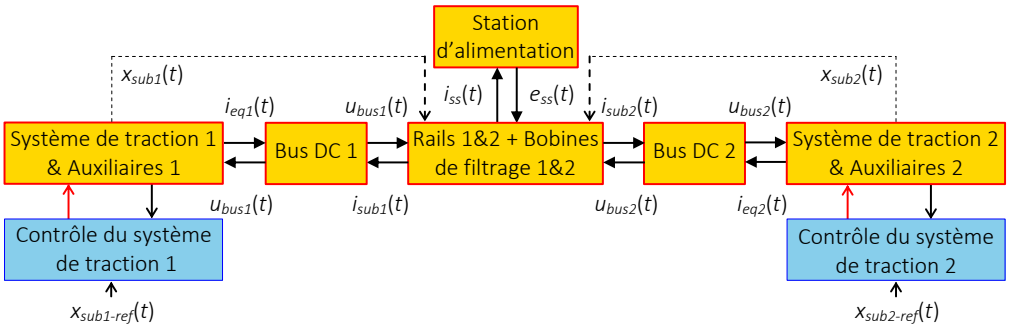


Figure III.17 : Schéma de principe du système « multi-train » à pleine échelle.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

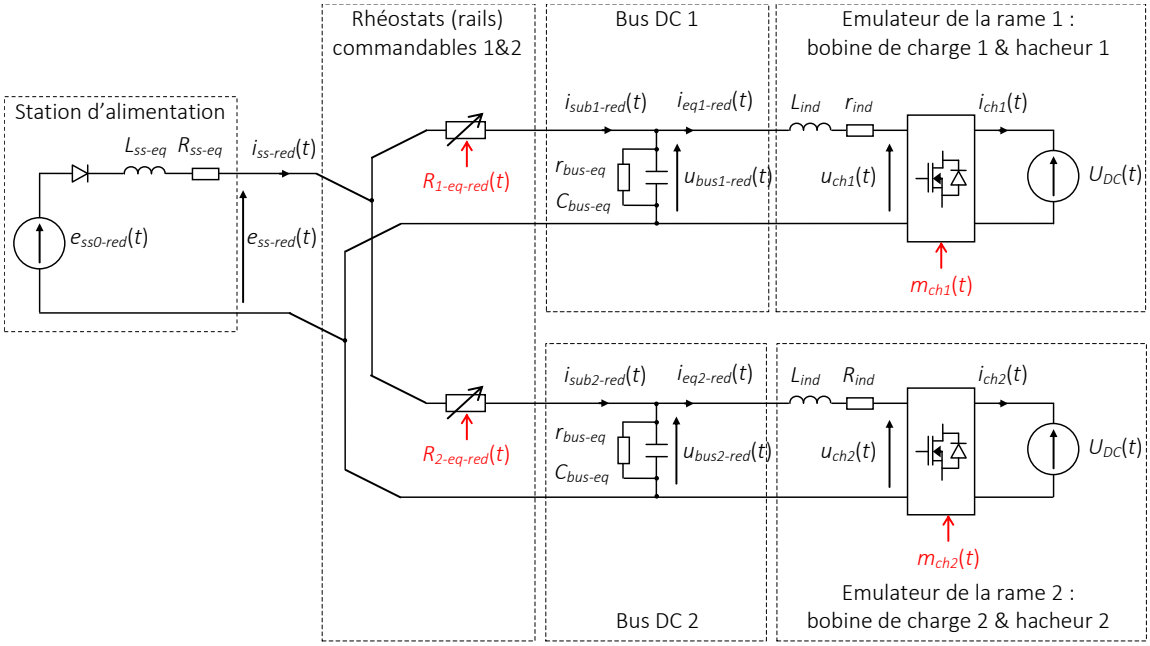


Figure III.18 : Représentation structurelle de la plate-forme d'émulation.

Principe de la simulation HIL de type puissance à échelle réduite

La simulation HIL à échelle réduite consiste à contrôler la plate-forme expérimentale de façon à reproduire le comportement énergétique d'un carrousel réel (Figure III.19). Le système à échelle réduite est donc contrôlé de manière à imposer les courants de traction. Les rhéostats sont supposés parfaitement commandés en reproduisant à l'identique la résistivité des rails. Les références de courants $i_{eqj-red-ref}(t)$ appliquées au contrôle de la plate-forme sont définies par les modèles des rames (traction & auxiliaires) (éléments violets). Ils sont déterminés en réaction aux tensions mesurées sur les bus DC réels $u_{busj-red}(t)$. Le modèle du matériel roulant (et du pilotage) est celui validé dans le chapitre II. Cependant, les rapports d'échelles entre le modèle et la plate-forme impliquent d'utiliser des éléments d'adaptation de puissance [BOU 06], [ALL 10a]. Les courants $i_{eqj-ref}(t)$ à pleine échelle du modèle sont donc mis à l'échelle via le rapport $K_{scale-i}$ avant d'être imposés sur la plate-forme (III.33). De même, les tensions des bus, utilisées en entrées des modèles des rames $u_{busj}(t)$, sont adaptées à partir des tensions mesurées à échelle réduite $u_{busj-red}(t)$ via le rapport $K_{scale-v}$. La conservation de l'échelle de puissance réelle du modèle permet de garder à l'identique les parties mécaniques non-linéaires, ce qui garantit de bien prendre en compte les limitations (couple, jerk, etc.) [ALL 10a].

$$\begin{cases} i_{eqj-red-ref}(t) = K_{scale-i}\, i_{eqj-ref}(t) \\ u_{busj}(t) = \dfrac{u_{busj-red}(t)}{K_{scale-v}} \end{cases} \qquad \text{(III.33)}$$

Les modèles des rames sont soumis au contrôle de la traction. Ce contrôle impose une vitesse de référence de façon à rejoindre une référence de position $x_{subj-ref}(t)$. La vitesse imposée au matériel roulant implique une consommation d'énergie nécessaire à mouvoir la rame. Ce principe de simulation reproduit le comportement énergétique d'une rame en consommant réellement l'énergie fictive du modèle via l'interface plate-forme/modèle et les coefficients d'adaptation de puissance.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

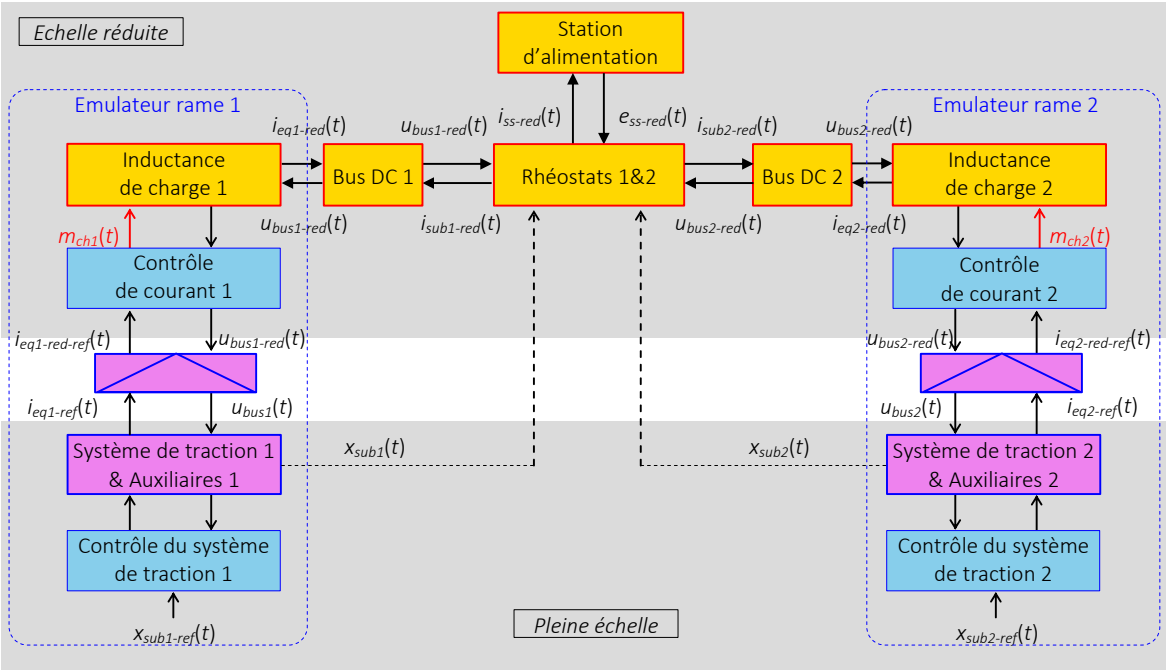


Figure III.19 : Schéma de principe de la simulation HIL du système « multi-train » à échelle réduite.

Développement de la simulation HIL de type puissance à échelle réduite

La REM de la plate-forme est réalisée (Figure III.20) afin de définir sa commande. La REM de la station d'alimentation est identique à celle développée dans le Chapitre II. De même, la partie concernant les rails (rhéostats) est celle construite à l'aide de la C-MNA. Les bus DC équivalents de la plate-forme sont représentés par 2 éléments d'accumulation dont les variables énergétiques sont les tensions $u_{busj\text{-}red}(t)$ (III.34). Ils ont été dimensionnés pour conserver une dynamique comparable au système réel. Les bobines sont représentées par 2 éléments d'accumulation avec pour sorties les variables énergétiques $i_{eqj\text{-}red}(t)$ (III.35). Enfin, les hacheurs sont représentés par des éléments de conversion commandables dont les variables de réglage sont les rapports de modulation $m_{chj}(t)$ (III.36). Un rendement équivalent η_{ch} peut être considéré.

$$C_{bus-eq}\frac{d}{dt}u_{busj-red}(t)=i_{subj-red}(t)-i_{eqj-red}(t)-\frac{u_{busj-red}(t)}{r_{bus-eq}} \qquad \text{(III.34)}$$

$$L_{ind}\frac{d}{dt}i_{eqj-red}(t)=u_{busj-red}(t)-u_{chj}(t)-r_{ind}i_{eqj-red} \qquad \text{(III.35)}$$

$$\begin{cases} i_{chj}(t)=m_{chi}(t)i_{eqj-red}(t)\eta_{ch}^{k} \\ u_{chj}(t)=m_{chj}(t)U_{DC}(t) \end{cases} \quad \text{avec} \quad k=\begin{cases} 1 \text{ quand } U_{DC}(t)i_{chj}(t)>0 \\ -1 \text{ quand } U_{DC}(t)i_{chj}(t)\leq 0 \end{cases} \qquad \text{(III.36)}$$

Le contrôle de la plate-forme est effectué afin d'imposer les courants $i_{eqj\text{-}red}(t)$ absorbés sur les bus DC réel. Ces courants correspondent, à l'échelle de puissance près, à ceux des rames. Leurs références sont définies par les modèles du matériel roulant en réaction aux tensions d'alimentation $u_{busj\text{-}red}(t)$ mesurées. Un asservissement des courants circulant dans les bobines est réalisé. Les chaines de réglages de la plate-forme sont déduites de la REM (Figure III.21). Elles lient les variables de réglages $m_{chj}(t)$ avec les objectifs $i_{eqj\text{-}red}(t)$.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

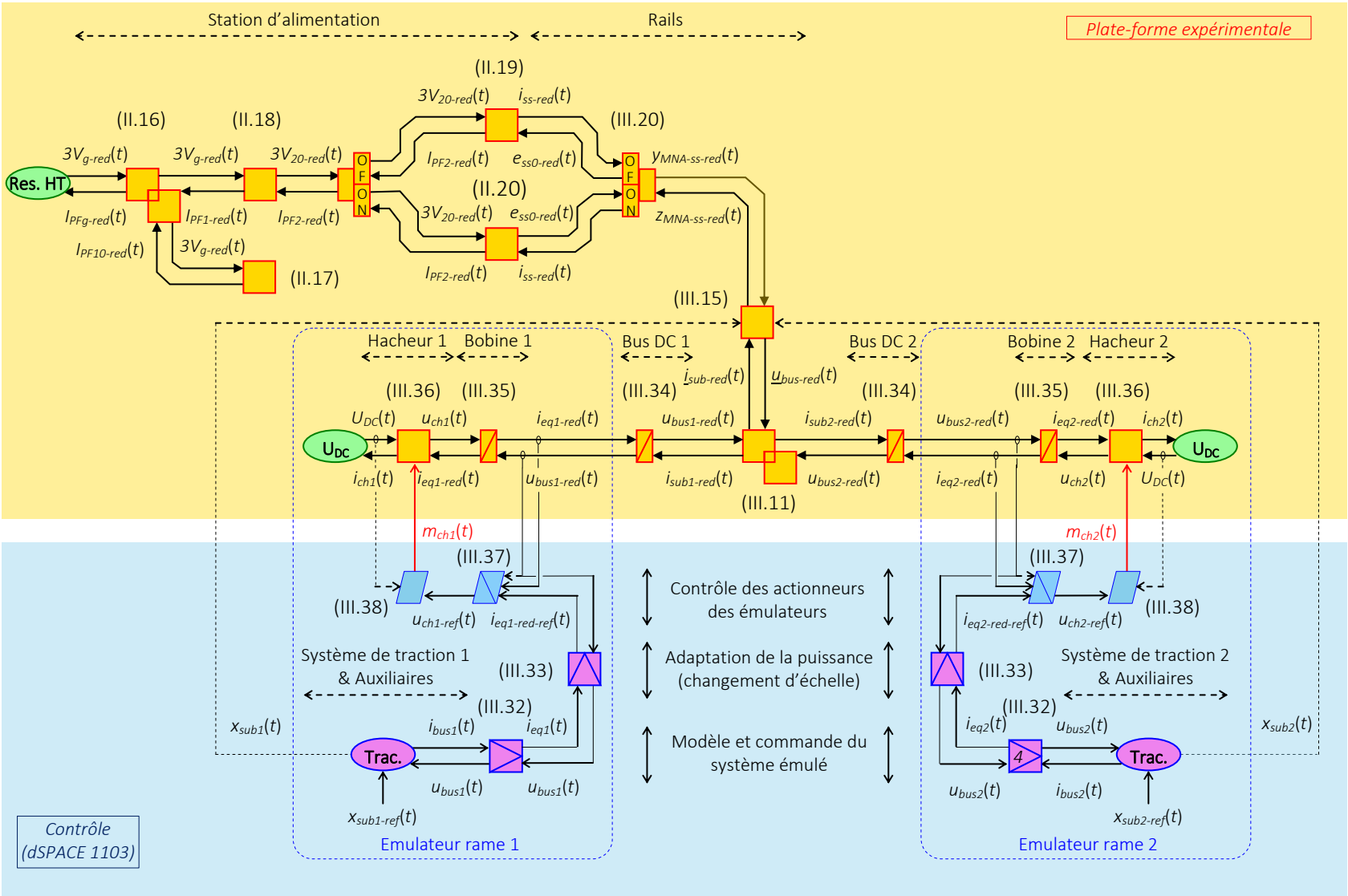


Figure III.20 : REM de la simulation HIL du système « multi-train » à échelle réduite.

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Figure III.21 : Chaines de réglages des courants de la plate-forme expérimentale.

La SMC (éléments bleus clairs de la Figure III.20) est déterminée en inversant les éléments REM présents sur ces chaines de réglages. Ainsi, les éléments d'accumulation (bobines) sont inversés par des correcteurs $C_i(t)$ (III.37). Les éléments de conversion (hacheurs) sont directement inversés pour déterminer les rapports de modulation (III.38).

$$u_{chj-ref}(t) = u_{busj-red-mes}(t) + C_i(t)\left[i_{eqj-red-ref}(t) - i_{eqj-red-mes}(t)\right] \quad \text{(III.37)}$$

$$m_{chj}(t) = \frac{u_{chj-ref}(t)}{U_{DC-mes}(t)} \quad \text{(III.38)}$$

Implémentation temps réel de la simulation HIL du carrousel « multi-train »

La partie de la REM relative à la plate-forme est remplacée par les composants réels (sous-station, rhéostats, bus DC, bobines, hacheurs) (Figure III.22). Les parties « hardware » sont donc insérées dans la boucle de simulation. Une carte dSPACE 1103 contrôle, en temps réel, la plate-forme et simule les modèles des rames en prenant en compte les adaptations de puissance. La plate-forme est composée d'une sous-station de 5 kVA de tension moyenne redressée 75 V au lieu de 750 V. Les rhéostats commandables ont une plage de résistance de 0-4 Ω avec une variation maximale de ±2 Ω/min. La résistance maximale correspond à la distance qu'il est possible d'émuler entre la sous-station et les rames. La variation de résistance maximale correspond à la vitesse possible de la rame. Au vu des échelles considérées, la vitesse maximale est donc de 270 km/h pour une distance maximale de 8,5 km[16], ce qui est largement supérieur aux valeurs de ces études.

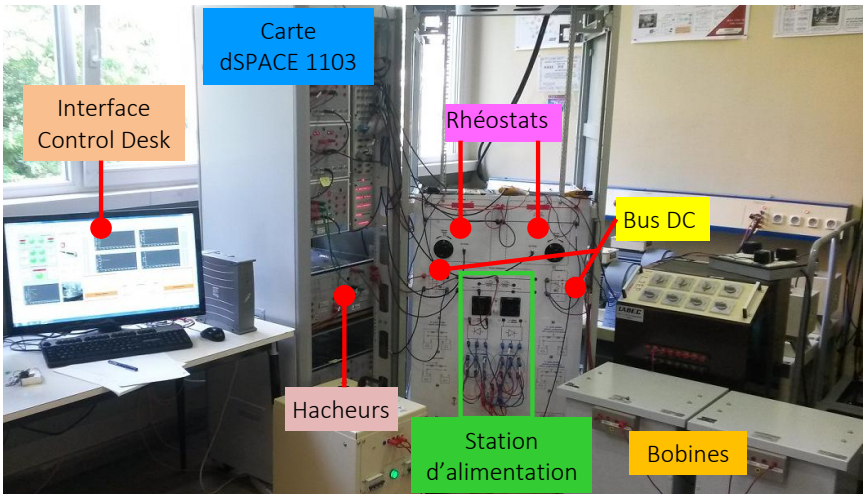


Figure III.22 : Plate-forme d'émulation du carrousel « multi-train ».

[16] Attention, ces valeurs dépendent des coefficients d'adaptation de puissance, des paramètres des rails, et de la bobine de filtrage de la rame réelle. Cela ne veut pas dire qu'ils seront atteints au cours de la simulation. Cependant, ces valeurs ne peuvent pas être dépassées (limites des composants de la plate-forme).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

La fréquence de modulation des hacheurs est 5 kHz. La période d'échantillonnage de la carte dSCPACE 1103 est 0,2 ms. Ce pas de temps est suffisant pour le calcul des différents éléments de contrôle et des modèles en temps réel. Par ailleurs, le programme de simulation implanté dans la carte dSPACE a été développé avec Matlab-Simulink© et la REM. Les différents éléments sont ensuite directement compilés. De plus, une interface de contrôle temps réel a été créée sous Control Desk (Figure III.23). Celle-ci permet par exemple de lancer les cycles de vitesse des rames. Certains paramètres de la plate forme expérimentale sont donnés (Tableau III.5). Ceux de la sous-station et de la rame sont les mêmes que précédemment. Par ailleurs, l'asservissement de courant est suffisamment rapide pour imposer les dynamiques de la rame, notamment lors du blocage de la sous-station. Dans le cas contraire, les tensions maximales lors du freinage pourraient être dépassées.

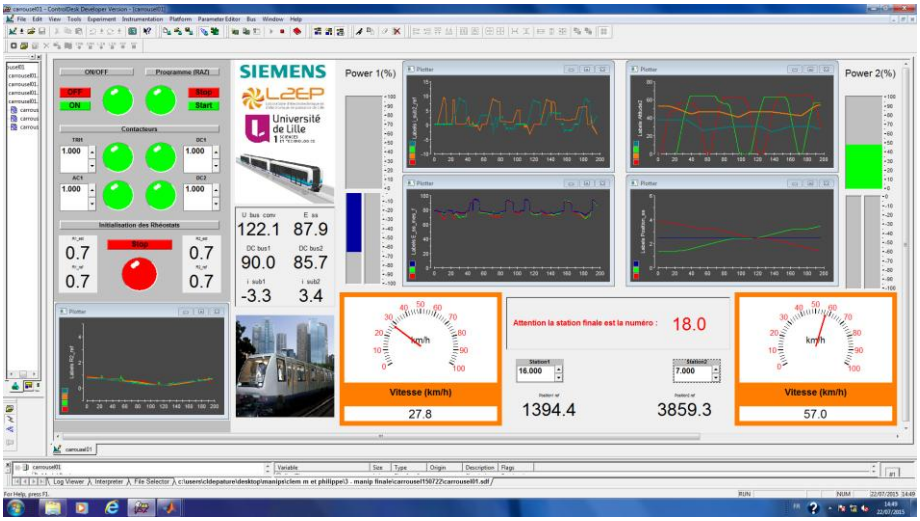


Figure III.23 : Interface de contrôle temps réel de la simulation HIL (Control Desk).

Tableau III.5 : Paramètres de la plate-forme expérimentale.

Tension à vide redressée	75 V	Inductance des bobines	200 mH
Plage de variation des rhéostats	0-4 Ω	Résistance des bobines	922 mΩ
Bus DC	2 mF	Temps de réponse des asservissements de courant	10 ms
Fréq. de modulation des hacheurs	5 kHz		

Résultats expérimentaux de la simulation HIL du carrousel « multi-train »

Pour valider la simulation HIL, des tests sont effectués en « mono-train ». Les profils sont analysés pour vérifier qu'ils correspondent au comportement d'un tel carrousel, dont l'étude a été réalisée dans la partie III.1. Une vitesse est définie par le modèle de pilotage en imposant les positions de référence sur l'interface de contrôle (Control Desk). L'énergie nécessaire à la traction ou au freinage est ensuite déterminée par le modèle de la rame. Cette énergie est reproduite sous forme d'un profil de courant sur la plate-forme en réaction à la tension de bus mesurée. Un exemple considère une ligne de 5 km avec une sous-station en début de ligne. Les positions simulées des sous-systèmes (rame et sous-station) sont représentées (Figure III.24). Des zooms sur une inter-station visualisent la vitesse simulée déduite par le pilotage, le courant de la rame (identique à celui de la sous-station) mesuré, ainsi que les tensions mesurées aux bornes de chaque sous-système.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

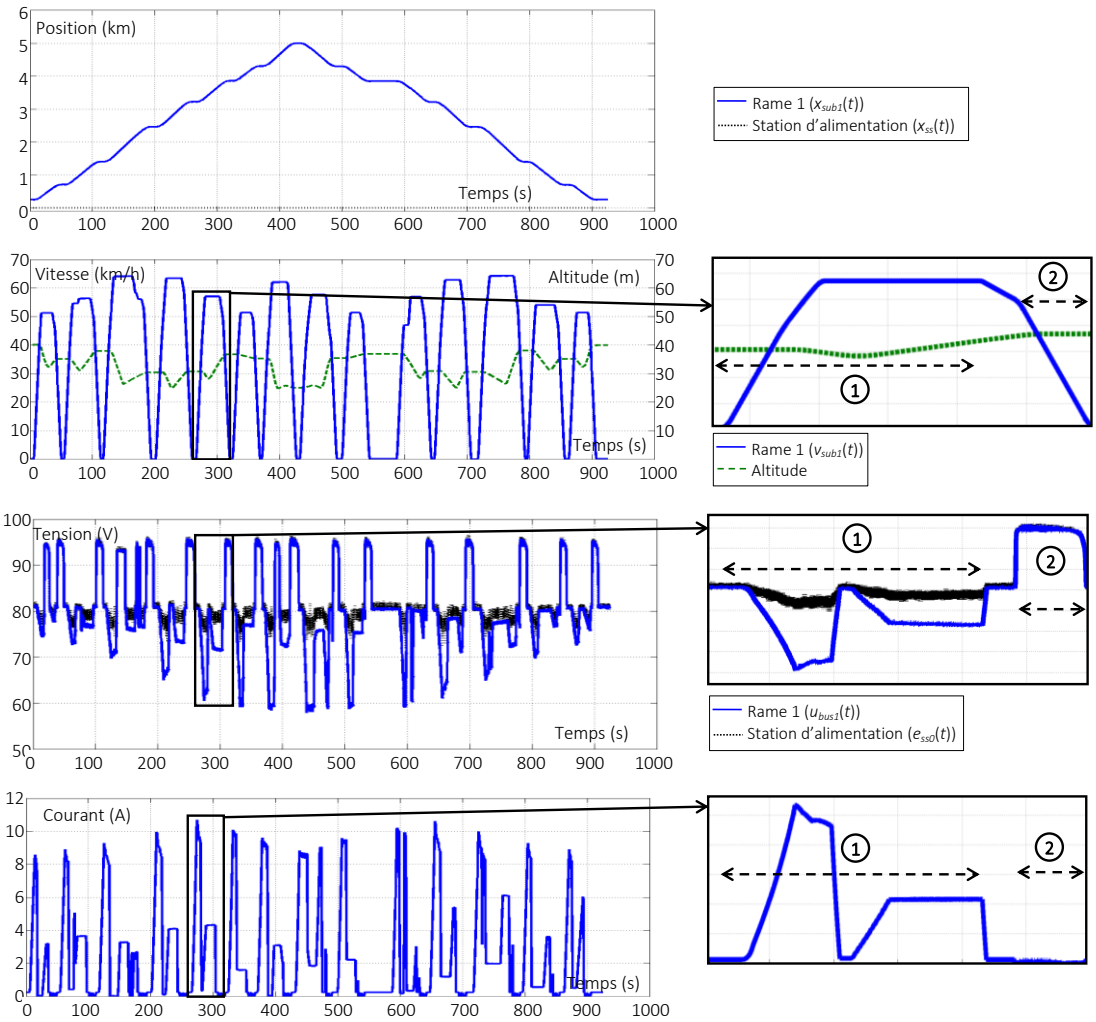


Figure III.24 : Résultats de la simulation HIL « mono-train ».

La simulation HIL reproduit physiquement, au facteur d'échelle près, le comportement d'un carrousel « mono-train ». Les phases de freinages et de tractions sont biens retranscrites en expérimentation, tout comme les échanges d'énergie entre sous-systèmes. Lors de la traction (phase ①), le modèle du matériel roulant génère un courant de référence positif qui est imposé dans la bobine par l'asservissement de courant. Des chutes de tensions apparaissent en raison de la circulation du courant dans le rhéostat. A l'inverse, lors du freinage (phase ②), un courant négatif est imposé. Néanmoins, le blocage de la sous-station empêche son établissement, ce qui provoque une augmentation brusque de la tension. La simulation inhibe alors Le freinage électrique au profit du freinage mécanique en diminuant le courant renvoyé sur le bus DC (les freins mécaniques sont activés en simulation). La tension se stabilise donc à sa valeur maximale (95 V avec le facteur d'échelle) (phase ②), jusqu'à ce que la rame redevienne consommatrice d'énergie. Certains phénomènes sont cependant simplifiés dans la simulation HIL. Par exemple, les courants générés par les modèles des rames négligent les ondulations dues aux convertisseurs de puissance (modèle quasi-statique). De plus, les inductances linéiques des rails ne sont pas considérées car des rhéostats sont utilisés en privilégiant l'aspect résistif de ces composants (modèle statique). Cependant, ces hypothèses sont justifiables pour une étude énergétique (cf. Chapitre II). Les échanges d'énergie sont finalement considérés comme suffisamment biens reproduits.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

III.3.b – Validation expérimentale du modèle « multi-train »

La simulation HIL est utilisée pour valider le modèle « multi-trains ». La même ligne de 5 km est considérée avec cette fois-ci une sous-station centrale. Les échelons de références $x_{subj\text{-}ref}(t)$ imposés dans l'émulation sont reproduits en simulation. Les positions et vitesses des sous-systèmes sont les mêmes pour la simulation et l'expérimentation (Figure III.25). La tension du réseau d'alimentation est également imposée dans la REM pour la simulation. De plus, les paramètres des parties réelles de la plate-forme (sous-station et bus DC) sont adaptés à l'échelle pleine puissance pour la simulation. Une comparaison simulation/expérimentation est ensuite effectuée. La puissance et l'énergie mesurées sont mises à l'échelle pleine puissance pour la comparaison (Figure III.26) (Tableau III.6). De plus, les courants (Figure III.27) et tensions (Figure III.28) des sous-systèmes sont mis en regard aux facteurs d'échelle près. Ils mettent en exergue les phases de traction simultanée, de freinage simultané, et d'échange d'énergie entre les rames (respectivement les phases ①, ②, et ③).

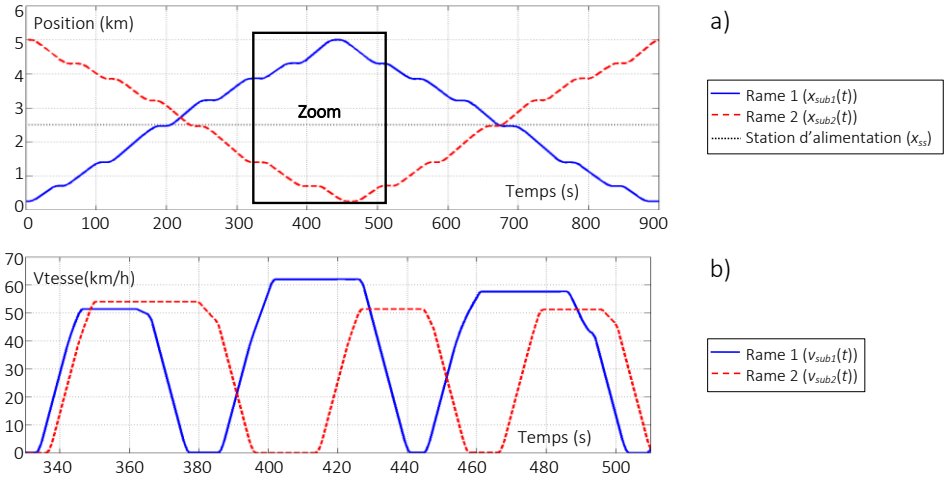


Figure III.25 : Validation du modèle « multi-train » : a) positions sur l'ensemble du cycle, b) zoom sur les vitesses.

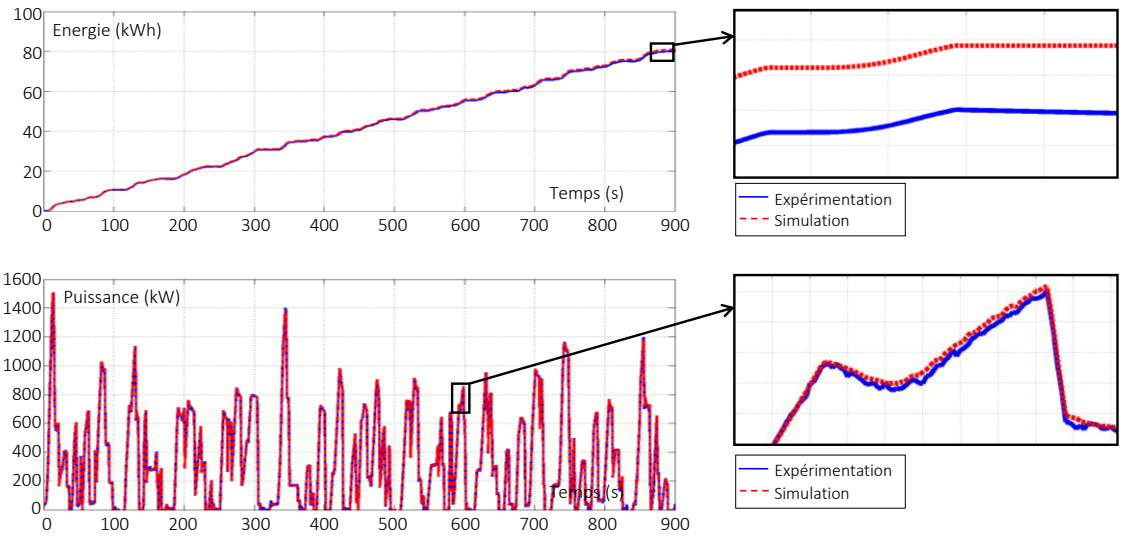


Figure III.26 : Validation expérimentale du modèle de carrousel « multi-train ».

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Tableau III.6 : Validation du modèle de carrousel « multi-train ».

	Energie consommée	Erreur moyenne	Ecart type
Expérimentation	79,9 kWh	0 % (référence)	0
Simulation	80,9 kWh	1,1 %	0,27

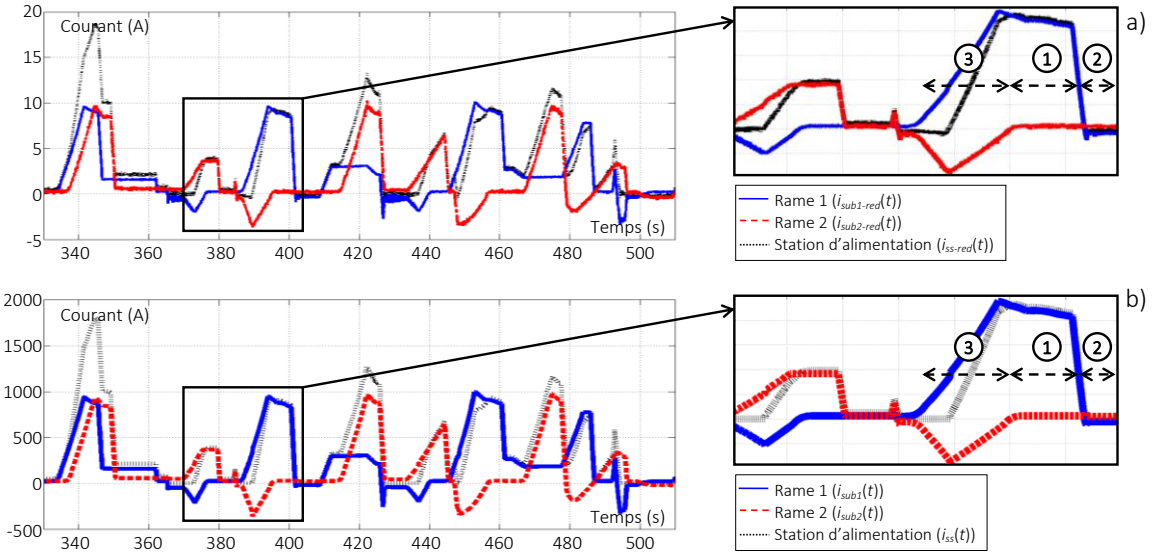


Figure III.27 : Courants du carrousel « multi-train » : a) émulation, b) simulation.

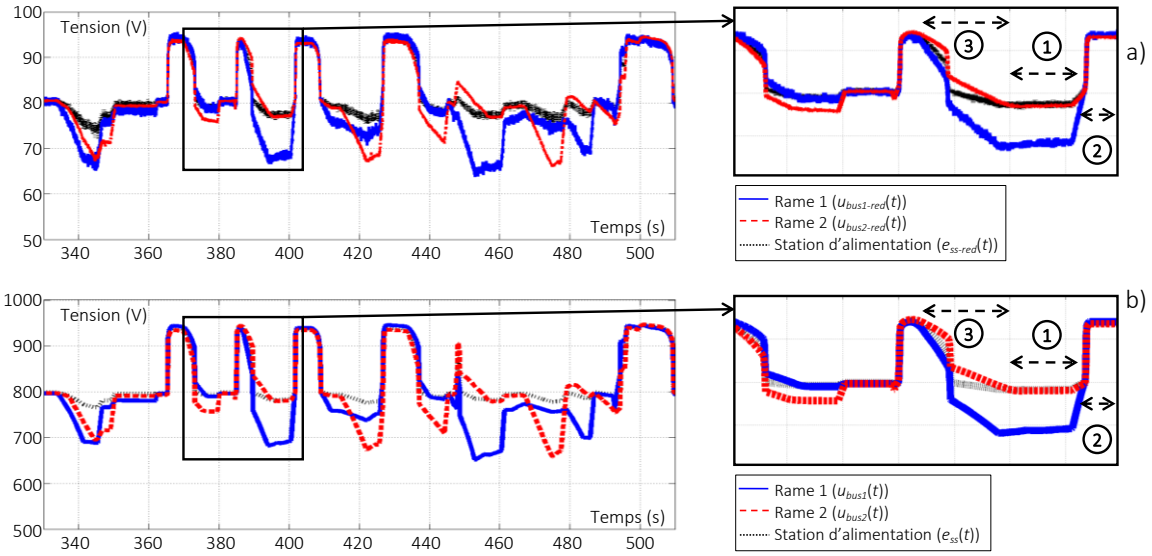


Figure III.28 : Tensions du carrousel « multi-train » : a) émulation, b) simulation.

Les comparaisons valident la partie du modèle liée au couplage multi-source avec une erreur moyenne sur l'énergie de seulement 1,1 %. Cette erreur comprend les imprécisions du modèle de la sous-station puisque celle-ci est remplacée par une sous-station réelle dans l'expérimentation. En revanche, elle ne comprend pas celles liées à la modélisation statique des rails (car des rhéostats ont été utilisés). Les imprécisions des modèles du matériel roulant et du pilotage ne sont également pas prises en compte dans cette erreur puisqu'ils définissent les vitesses et courants de références à appliquer sur la plate-forme. Cependant, ils ont été validés indépendamment dans le Chapitre II. Ainsi, au terme de ce chapitre, le modèle global d'un carrousel complet est validé expérimentalement.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

III.4 – Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de modéliser un carrousel « multi-train » en connectant les différents sous-systèmes sur la distribution commune d'énergie. Cette association a été effectuée de façon systémique, fonctionnelle et causale grâce à la REM. La REM complète du carrousel « multi-train » est rappelé sur la Figure III.29 dans laquelle sont détaillés les auxiliaires et la traction des rames. Elle est tirée de la Figure III.12 en remplaçant les 2 sources de courants $i_{busj}(t)$ par leurs REM détaillées.

Dans un premier temps un carrousel « mono-train », composé d'une rame et d'une station d'alimentation, a été considéré. Sa REM a montré l'importance de conserver la modélisation dynamique des bus DC des métros, notamment pour bien prendre en compte les phases où la ligne n'est pas réceptive (sous-station bloquée). Contrairement à la majorité de la littérature, qui identifie les rames comme des sources de courant, la conservation du bus DC mène à les considérer comme des sources de tension. Par cette approche, la résolution du modèle est simplifiée et ne nécessite plus les méthodes itératives qui sont généralement utilisées. Une validation expérimentale sur ligne d'essai a montré une précision moyenne d'environ 98 % comparée aux relevés expérimentaux.

L'extension de la modélisation « multi-train » a été développée dans un second temps. Plusieurs méthodes de formulation et de résolutions ont été testées. La méthode nodale (MNA), généralement utilisée dans les approches structurelles et non-causales, a été adaptée à l'approche fonctionnelle et causale de la REM. Ainsi, une MNA causale (C-MNA), qui diffère de la MNA classique par sa formulation, a été définie. Elle a été préférée aux autres méthodes pour sa flexibilité.

Enfin, le modèle de carrousel « multi-train » a été validé expérimentalement au travers d'une émulation de type puissance. Une plate-forme expérimentale a été développée pour reproduire le comportement énergétique d'un carrousel de métros composé de 2 rames, d'une station d'alimentation non-réversible, et de 2 portions de rails. Les échanges d'énergie entre les différentes sources ont été comparés entre les mesures expérimentales et les résultats de simulation. Cette comparaison a permis de valider la partie du modèle relative au couplage des sous-systèmes sur le rail de distribution (précision de l'ordre de 99 %).

Le modèle obtenu est donc valide, précis et flexible. Cette flexibilité est garantie par les approches causales et « forward » utilisées. Par ailleurs, le modèle sera étendu dans le prochain chapitre et quelques applications seront étudiées.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

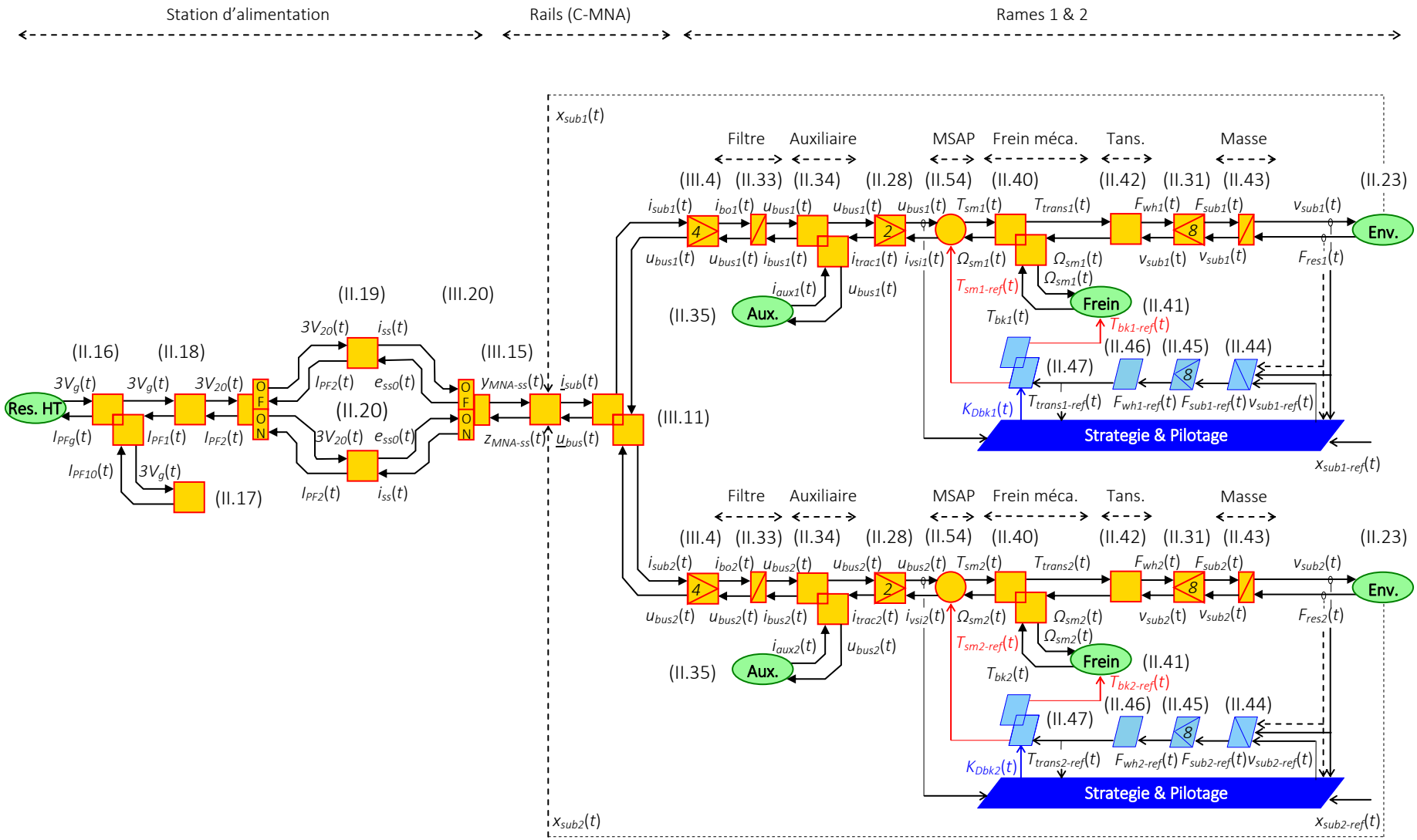


Figure III.29 : REM détaillée complète du système de carrousel « multi-train » étudié : 2 rames alimentées par une station d'alimentation.

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Chapitre IV – Extensions et applications pour une simulation flexible d'un carrousel de métros

Ce chapitre a pour objectif d'étendre le modèle énergétique afin de permettre l'intégration d'un nombre indéfini de sous-systèmes (stations d'alimentation, rames, SSE, etc.).

Une première partie étend le modèle développé et validé dans le Chapitre III. Celle-ci prévoit d'intégrer un nombre quelconque de rames, de sous-stations, et des SSE. De plus, les connexions parallèles entre les rails des 2 directions, jusqu'à présent peu abordées, sont introduites dans la méthode utilisée (C-MNA).

Finalement, diverses applications sur le projet de « Rennes B » sont présentées. Elles servent à prouver la flexibilité de l'outil au travers d'exemples d'exploitation du programme de simulation. Divers scénarios sont donc étudiés.

Sommaire du chapitre

IV.1 – Extension du modèle d'un carrousel de métros ..... - 112 -
IV.1.a – Extension pour prendre en compte un nombre de sources indéfini ..... - 112 -
IV.1.b – Extension pour prendre en compte les mises en parallèle des rails ..... - 114 -
IV.1.c – Extension pour prendre en compte des SSE stationnaires ..... - 119 -
IV.1.d – Flexibilité du modèle étendu ..... - 121 -
IV.2 – Applications de simulations flexibles d'un carrousel ..... - 122 -
IV.2.a – Exploitation de la simulation flexible d'un carrousel de métros ..... - 123 -
IV.2.b – Exemples de simulations flexibles d'un carrousel de métros ..... - 124 -
IV.3 – Conclusion du chapitre ..... - 133 -

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

IV.1 – Extension du modèle d'un carrousel de métros

La modélisation du carrousel « multi-train » développé dans le Chapitre III est étendue. L'objectif est de simuler un carrousel de métros composé d'une multitude de rames et de stations d'alimentation, avec une distribution d'énergie plus ou moins complexe.

IV.1.a – Extension pour prendre en compte un nombre de sources indéfini

La prise en compte d'une multitude de sous-systèmes s'effectue via des couplages des sources correspondantes avant d'être imposées dans la méthode (C-MNA).

Couplage des rames – Une transformation scalaire/vecteur réunit, sous forme vectorielle, l'ensemble des tensions de bus des rames $\underline{u}_{bus}(t)$ (IV.1), avec N_{rame} le nombre de rames. Le vecteur obtenu contient les variables connues délivrées par les modèles du matériel roulant. Ce vecteur constitue une des entrées de la C-MNA. La sortie duale, calculée par la C-MNA, est le vecteur des courants absorbés par les rames $\underline{i}_{sub}(t)$. Une transformation vecteur/scalaire détermine ensuite les courants absorbés par chaque rame $i_{subj}(t)$ qui sont donc répartis sur les modèles des rames correspondants. Un élément de couplage est utilisé en REM (Figure IV.3).

$$\underline{u}_{bus}(t)=\begin{bmatrix} u_{bus1}(t) \\ u_{bus2}(t) \\ \vdots \\ u_{busN_{rame}}(t) \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \underline{i}_{sub}(t)=\begin{bmatrix} i_{bus1}(t) \\ i_{bus2}(t) \\ \vdots \\ i_{busN_{rame}}(t) \end{bmatrix} \tag{IV.1}$$

Couplage des sous-stations – Une transformation scalaire/vecteur regroupe également les variables imposées par chaque sous-station $y_{MNA\text{-}ssj}(t)$, en un vecteur $\underline{y}_{MNA\text{-}in}(t)$, où N_{ss} est le nombre de stations d'alimentation sur la ligne (IV.2). Ce vecteur constitue la variable d'entrée de la C-MNA concernant les stations d'alimentation. La C-MNA détermine alors le vecteur dual $\underline{z}_{MNA\text{-}out}(t)$ des variables de réaction de la sous-station. Ce vecteur est ensuite décomposé pour être réparti sur chaque station d'alimentation.

$$\underline{y}_{MNA-in}(t)=\begin{bmatrix} y_{MNA-ss1}(t) \\ y_{MNA-ss2}(t) \\ \vdots \\ y_{MNA-ssN_{ss}}(t) \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \underline{z}_{MNA-in}(t)=\begin{bmatrix} z_{MNA-ss1}(t) \\ z_{MNA-ss2}(t) \\ \vdots \\ z_{MNA-ssN_{ss}}(t) \end{bmatrix} \tag{IV.2}$$

A partir de ces vecteurs, la C-MNA définit une formulation appropriée. Sa résolution détermine alors les inconnus. D'un point de vue de la REM des sous-systèmes sont ajoutés au niveau des éléments de couplage situés de part et d'autre de l'élément de conversion représentant les rails (C-MNA). Un exemple composé de 3 sous-stations et de 3 rames alimentées par un rail équivalent est considéré (Figure IV.1). Seules les résistances des diverses bobines sont considérées. Une représentation structurelle plus habituelle, et plus simplifiée, est aussi donnée (Figure IV.2). La dissociation des rails des 2 directions sera effectuée dans la partie suivante.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

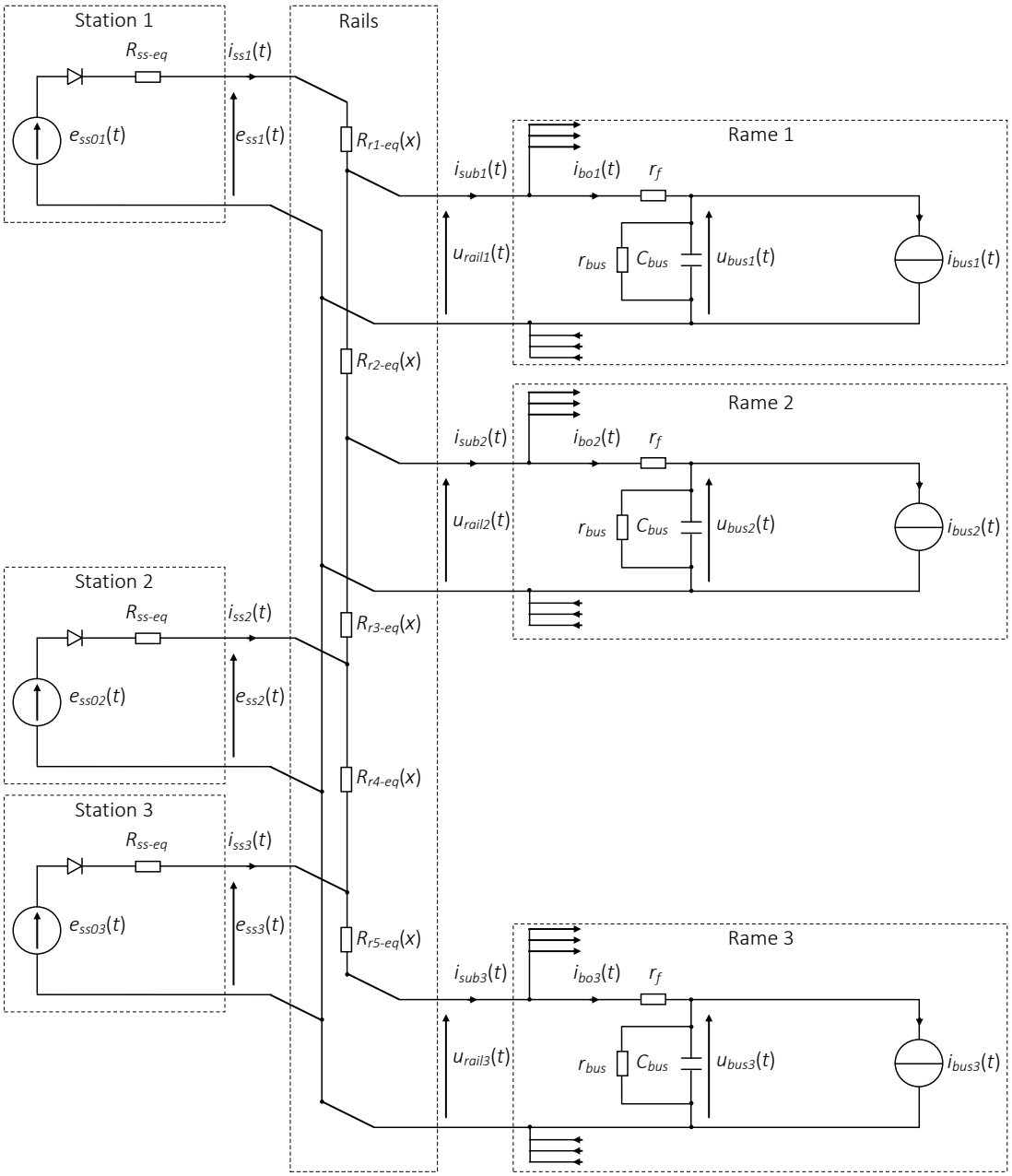


Figure IV.1 : Représentation structurelle du carrousel « multi-train » étendue à plusieurs sources.

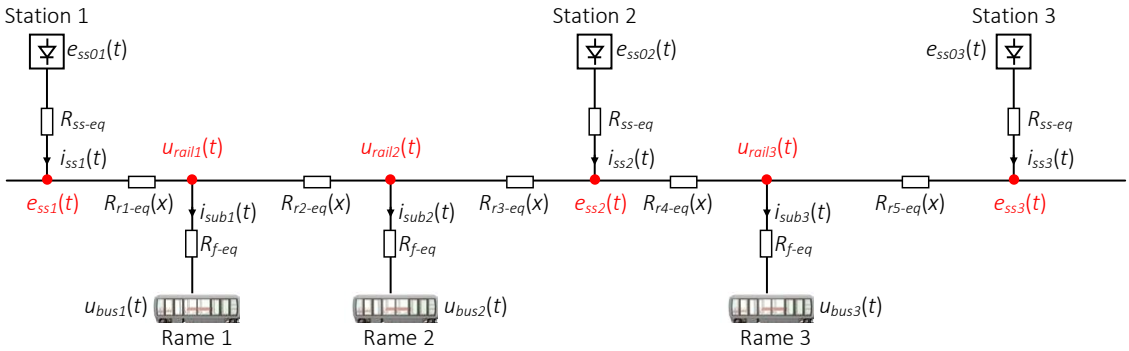


Figure IV.2 : Représentation structurelle simplifiée du carrousel « multi-train » étendue à plusieurs sources.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

La REM de l'exemple comprend donc un couplage de 3 stations d'alimentation et un couplage de 3 rames sur les rails (Figure IV.3). Ces derniers sont représentés par un élément de conversion d'énergie régi par la C-MNA (III.15). Lorsque toutes les sous-stations sont passantes, la formulation de la C-MNA donne la relation (IV.4), avec (IV.3). Les courants inconnus (vecteur $\underline{I}$) sont exprimés en fonction des tensions connues des rames et des sous-stations (vecteur $\underline{E}$) et de la topologie du sous-système d'alimentation. Cette formulation devient celle de l'équation (IV.5) si, par exemple, les stations 2 et 3 se bloquent. Par ailleurs, dans ce cas, la matrice $\underline{G}$ et le vecteur $\underline{V}$ restent ceux de la relation (IV.4). Nous avons vu qu'ils ne dépendent pas de la nature de la source mais uniquement de la topologie d'alimentation du carrousel. D'autre part, on peut remarquer que lorsque le nombre de sources de tension diminue, laissant place à des sources de courant (ex : blocage des stations d'alimentation), les dimensions de la relation matricielle sont réduites.

$$G_{rj}(x) = \frac{1}{R_{rj-eq}(x)} \tag{IV.3}$$

De cette façon, le modèle du carrousel de métros peut facilement intégrer plusieurs stations d'alimentation et rames en modifiant la taille des vecteurs d'entrées de la C-MNA. L'automatisation de sa formulation (« S-function » Matlab©) reconnait, à chaque pas de calcul, la taille des vecteurs d'entrées, classe ensuite les différents sous-systèmes selon leurs positions, détermine les résistances des sections de rails $R_{rj\text{-}eq}(x)$ en fonction des positions des sous-systèmes et des résistances linéiques des rails, pour enfin construire et résoudre par inversion la relation générale (III.15) (dont des exemples particuliers sont donnés en (IV.4) et (IV.5)). Dans ce cas, lorsque les rames changent de positions, induisant un nouveau système équivalent, la méthode de formulation obtient systématiquement les relations adaptées. De même, lorsque des rames sont injectées dans le carrousel, la taille des vecteurs des métros augmente. La C-MNA s'adapte alors automatiquement en modifiant la taille du système matricielle et en redéfinissant une nouvelle expression matricielle. Le modèle est donc bien général et permet de simuler un carrousel « multi-source » variable, quelques soient les sous-systèmes considérés. Des exemples seront traités dans les parties suivantes.

IV.1.b – Extension pour prendre en compte les mises en parallèle des rails

Le sous-système de distribution est souvent bien plus complexe qu'un simple rail d'alimentation par direction [MOR 05], [LAD 15]. Régulièrement, des mises en parallèle sont réalisées entres les rails des 2 directions (cf. Figure I.10)[17]. Ces mises en parallèle peuvent être prises en compte dans la C-MNA. Néanmoins, dans ce cas, les dimensions de l'expression matricielle à résoudre augmentent, ce qui peut accroitre considérablement le temps de simulation. Par ailleurs, en cas de récurrences élevées des mises en parallèles, une façon simplifiée de les modéliser peut être de considérer un rail équivalent pour les 2 directions sur lequel tous les sous-systèmes sont connectés. Cette modélisation revient à faire l'hypothèse d'une mise en parallèle parfaite des 2 rails (comme dans la partie précédente), où la résistance linéique équivalente $r_{lin\text{-}eq}$ est exprimée par (IV.6), avec r_{lin} la résistance linéique d'un rail réel (en considérant 2 directions comme c'est le cas habituellement).

[17] Les feeders ne sont pas considérés dans la modélisation de cette partie. Ils peuvent être pris en compte en considérant une résistance linéique équivalente à leurs mises en parallèle sur les rails.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

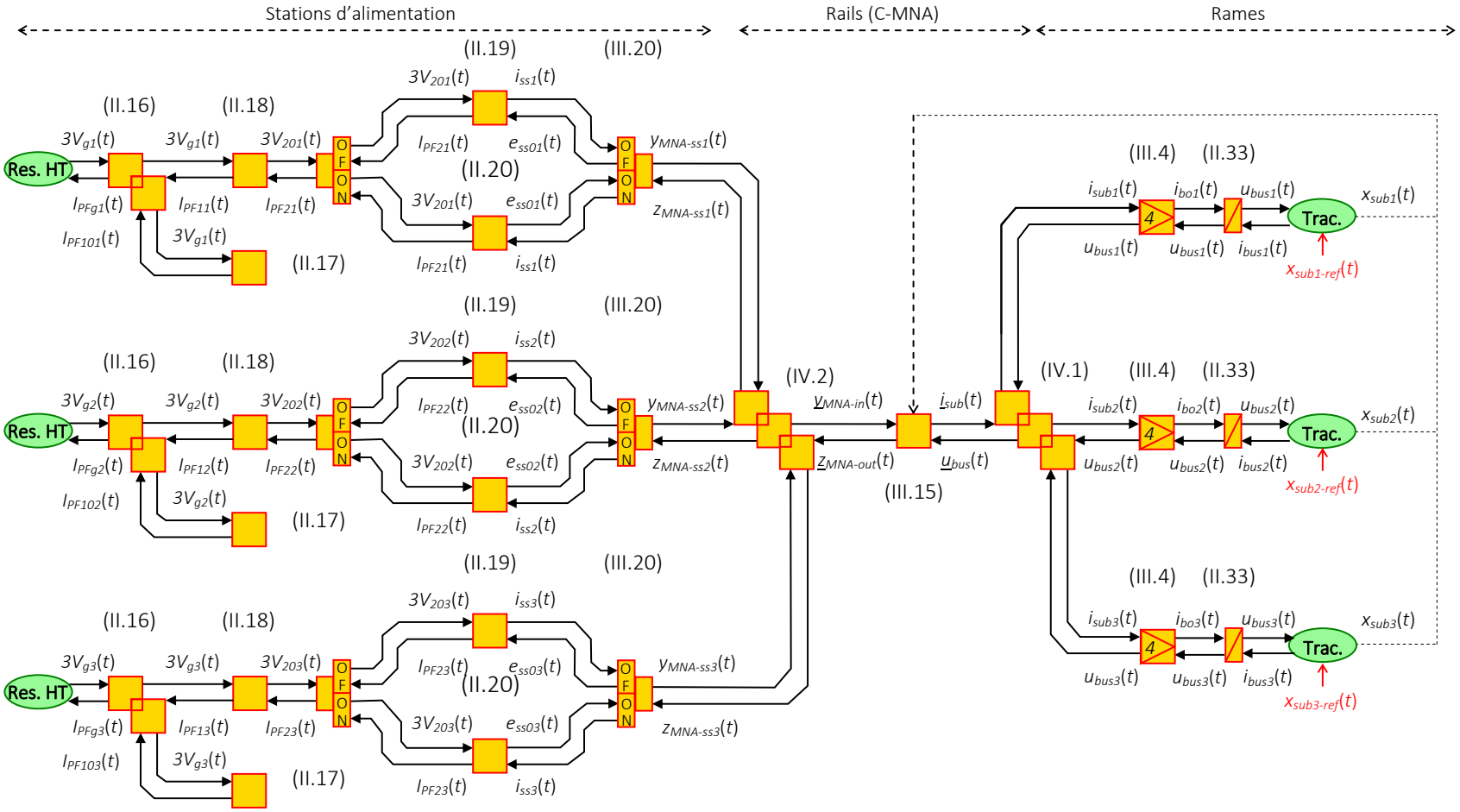


Figure IV.3 : REM du carrousel « multi-train » composé de 3 sous-stations et de 3 rames.

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Cas où toutes les stations d'alimentation sont passantes :

$$\text{avec } \underline{G}=\begin{bmatrix} G_{r1}(x) & -G_{r1}(x) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -G_{r1}(x) & G_{r1}(x)+G_{r2}(x) & -G_{r2}(x) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -G_{r2}(x) & G_{r2}(x)+G_{r3}(x) & -G_{r3}(x) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -G_{r3}(x) & G_{r3}(x)+G_{r4}(x) & -G_{r4}(x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -G_{r4}(x) & G_{r4}(x)+G_{r5}(x) & -G_{r5}(x) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{r5}(x) & G_{r5}(x) \end{bmatrix} \text{ et } \underline{V}=\begin{bmatrix} e_{ss1}(t) \\ u_{rail1}(t) \\ u_{rail2}(t) \\ e_{ss2}(t) \\ u_{rail3}(t) \\ e_{ss3}(t) \end{bmatrix}$$

$$\text{et } \underline{J}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \underline{E}=\begin{bmatrix} e_{ss01}(t) \\ u_{bus1}(t) \\ u_{bus2}(t) \\ e_{ss02}(t) \\ u_{bus3}(t) \\ e_{ss03}(t) \end{bmatrix}, \underline{I}=\begin{bmatrix} i_{ss1}(t) \\ -i_{sub1}(t) \\ -i_{sub2}(t) \\ i_{ss2}(t) \\ -i_{sub3}(t) \\ i_{ss3}(t) \end{bmatrix}, \underline{B}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ et } \underline{R}=\begin{bmatrix} R_{ss-eq} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{f-eq} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{f-eq} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{ss-eq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{f-eq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{ss-eq} \end{bmatrix} \quad \text{(IV.4)}$$

Cas où les stations d'alimentation 2 et 3 sont bloquées (station 1 passante) :

$$\text{avec } \underline{J}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ i_{ss2}(t) \\ 0 \\ i_{ss3}(t) \end{bmatrix}, \underline{E}=\begin{bmatrix} e_{ss01}(t) \\ u_{bus1}(t) \\ u_{bus2}(t) \\ u_{bus3}(t) \end{bmatrix}, \underline{I}=\begin{bmatrix} i_{ss1}(t) \\ -i_{sub1}(t) \\ -i_{sub2}(t) \\ -i_{sub3}(t) \end{bmatrix}, \underline{B}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } \underline{R}=\begin{bmatrix} R_{ss-eq} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{f-eq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{f-eq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{f-eq} \end{bmatrix} \quad \text{(IV.5)}$$

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

$$r_{lin-eq} = \frac{r_{lin}}{2} \tag{IV.6}$$

Cependant, ce modèle simplifié peut engendrer des erreurs de simulation si la récurrence des mises en parallèle n'est pas suffisamment importante[18]. Les échanges d'énergie entre sous-systèmes des 2 directions seraient alors simplifiés tout comme l'estimation des pertes dans les rails. La C-MNA est donc étendue afin d'intégrer ces mises en parallèle dans la formulation. Du point de vue de la méthode de formulation, ces mises en parallèle introduisent des nœuds supplémentaires qui augmentent la taille de l'expression matricielle. Une interconnexion peut effectivement être considérée comme une nouvelle source de courant nul ($i_{str}(t) = 0$) (idem à une sous-station bloquée). Par ailleurs, les sous-stations présentes dans le carrousel sont donc systématiquement considérées comme associées à une mise en parallèle afin de limiter cette augmentation de dimensions des matrices mises en jeu. Ainsi, un unique nœud est nécessaire pour exprimer cette association.

Un exemple composé de 3 sous-stations et 3 rames est étudié (Figure IV.4). Les rails des 2 directions sont connectés en parallèle sur les stations d'alimentation. De plus, une interconnexion des rails des 2 directions est également considérée ailleurs qu'au niveau des sous-stations. Un nœud supplémentaire, dont la tension est $u_{str}(t)$, est inséré dans la C-MNA. La relation matricielle s'écrit par la relation (IV.7) lorsque toutes les stations sont passantes. Elle devient (IV.8) dans le cas d'un blocage des sous-stations 2 et 3. Par ailleurs, la matrice conductance $\underline{G}$ se complexifie lorsque les rails des 2 directions sont considérés. Cependant, son processus de formulation est toujours automatisable.

La REM du système considéré ne change pas lors de la complexification de la distribution d'énergie (cf. Figure IV.3). La source de courant n'a effectivement pas lieu d'être représentée dans ce cas puisque le problème n'évolue pas d'un point de vue énergétique. Il correspond toujours à des échanges multilatéraux d'énergie entre sous-systèmes au travers de rails qui induisent des pertes.

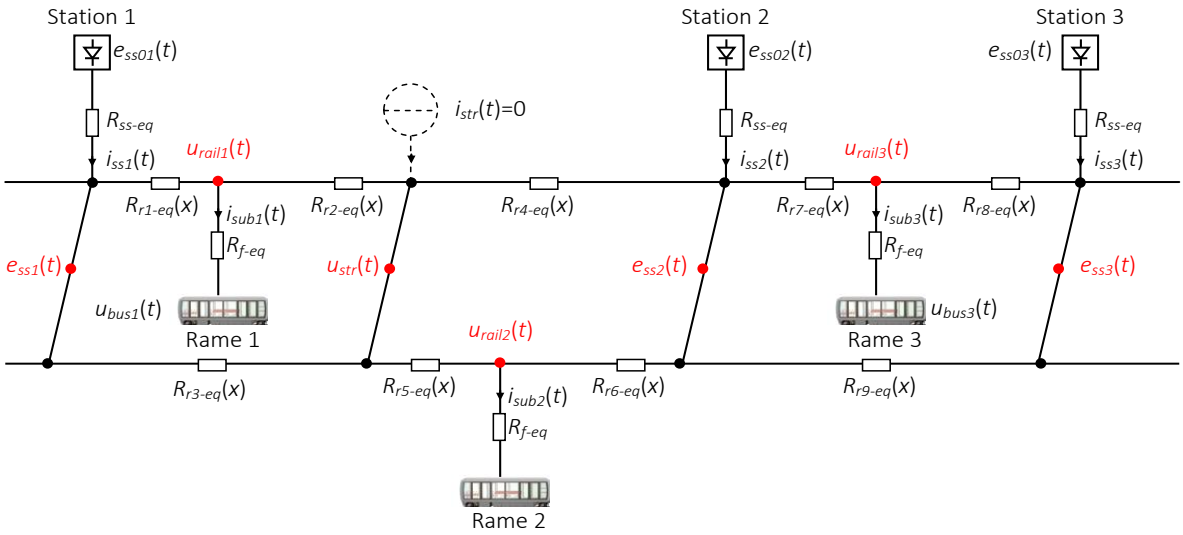


Figure IV.4 : Représentation structurelle simplifiée du carrousel « multi-train » avec distinction des rails des 2 directions.

[18] La récurrence justifiant ce modèle simplifié, et les erreurs commises, sont difficiles à estimer. Cependant, une étude pourrait être menée avec le programme de simulation développé.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Cas où toutes les stations d'alimentation sont passantes :

$$\underline{G}=\begin{bmatrix} G_{r1}(x)+G_{r3}(x) & -G_{r1}(x) & -G_{r3}(x) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -G_{r1}(x) & G_{r1}(x)+G_{r2}(x) & -G_{r2}(x) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -G_{r3}(x) & -G_{r2}(x) & G_{r2}(x)+G_{r3}(x)+G_{r4}(x)+G_{r5}(x) & -G_{r5}(x) & -G_{r4}(x) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -G_{r5}(x) & G_{r5}(x)+G_{r6}(x) & -G_{r6}(x) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -G_{r4}(x) & -G_{r6}(x) & G_{r4}(x)+G_{r6}(x)+G_{r7}(x)+G_{r9}(x) & -G_{r7}(x) & -G_{r9}(x) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{r7}(x) & G_{r7}(x)+G_{r8}(x) & -G_{r8}(x) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{r9}(x) & -G_{r8}(x) & G_{r8}(x)+G_{r9}(x) \end{bmatrix} \text{ et } \underline{V}=\begin{bmatrix} e_{ss1}(t) \\ u_{rail1}(t) \\ u_{str}(t) \\ u_{rail2}(t) \\ e_{ss2}(t) \\ u_{rail3}(t) \\ e_{ss3}(t) \end{bmatrix} \tag{IV.7}$$

$$\text{et } \underline{J}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{str}(t)=0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \underline{E}=\begin{bmatrix} e_{ss01}(t) \\ u_{bus1}(t) \\ u_{bus2}(t) \\ e_{ss02}(t) \\ u_{bus3}(t) \\ e_{ss03}(t) \end{bmatrix}, \underline{I}=\begin{bmatrix} i_{ss1}(t) \\ -i_{sub1}(t) \\ -i_{sub2}(t) \\ i_{ss2}(t) \\ -i_{sub3}(t) \\ i_{ss3}(t) \end{bmatrix}, \underline{B}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ et } \underline{R}=\begin{bmatrix} R_{ss-eq} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{f-eq} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{f-eq} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{ss-eq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{f-eq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{ss-eq} \end{bmatrix}$$

Cas où les stations d'alimentation 2 et 3 sont bloquées (station 1 passante) :

$$\text{avec } \underline{J}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{str}(t)=0 \\ 0 \\ i_{ss2}(t) \\ 0 \\ i_{ss3}(t) \end{bmatrix}, \underline{E}=\begin{bmatrix} e_{ss01}(t) \\ u_{bus1}(t) \\ u_{bus2}(t) \\ u_{bus3}(t) \end{bmatrix}, \underline{I}=\begin{bmatrix} i_{ss1}(t) \\ -i_{sub1}(t) \\ -i_{sub2}(t) \\ -i_{sub3}(t) \end{bmatrix}, \underline{B}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } \underline{R}=\begin{bmatrix} R_{ss-eq} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{f-eq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{f-eq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{f-eq} \end{bmatrix} \tag{IV.8}$$

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

IV.1.c – Extension pour prendre en compte des SSE stationnaires

L'intégration de SSE stationnaires (batteries, supercondensateurs, systèmes inertiels, etc.) s'effectue de la même manière que pour les autres sous-systèmes. Le SSE suivant est arbitrairement considéré (Figure IV.5) (il en existe de différentes structures). Sa modélisation et représentation ne sont pas développées ici mais peuvent se trouver dans [ALL 10b]. Dans ce mémoire le SSE est considéré comme une source commandable qui impose un courant $i_{ss\text{-}ess}(t)$ sur les rails en fonction d'une référence $i_{ss\text{-}ess\text{-}ref}(t)$. Cette dernière peut être définie suivant plusieurs stratégies de gestion énergétique [BAR 12], [CIC 14], [GEE 15] qui ne seront pas abordées. Ainsi, ce SSE stationnaire est arbitrairement intégré dans le carrousel au niveau de l'interconnexion des rails des 2 directions (Figure IV.6). L'objectif n'est effectivement pas d'optimiser énergétiquement le système, mais de montrer comment considérer ce sous-système dans la modélisation. Dans ce cas, les relations (IV.7) et (IV.8) sont toujours vraies. Seul le courant $i_{str}(t)$ dans $\underline{J}$ doit être remplacé par le courant $i_{ss\text{-}ess}(t)$ qui, cette fois-ci, n'est plus forcément nul. De même, la tension $u_{str}(t)$ est remplacée par $u_{rail\text{-}ess}(t)$.

La REM du carrousel considéré est toutefois modifiée après l'ajout du SSE stationnaire (Figure IV.7). Une source commandable de courant est ajoutée. Cette source contient un modèle plus détaillé du SSE [ALL 10b]. Le courant généré par le SSE est ensuite intégré au vecteur $\underline{y}_{MNA\text{-}in}(t)$ qui est utilisé par la C-MNA. La tension aux bornes du SSE $u_{rail\text{-}sse}(t)$ est déterminée par la C-MNA et est fournie dans le vecteur $\underline{z}_{MNA\text{-}out}(t)$. L'intégration de SSE stationnaire s'effectue donc simplement grâce à la méthode proposée. Elle permet d'étudier ces nouvelles structures d'alimentation.

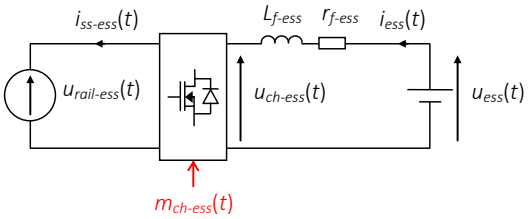


Figure IV.5 : Représentation structurelle du sous-système de stockage d'énergie stationnaire.

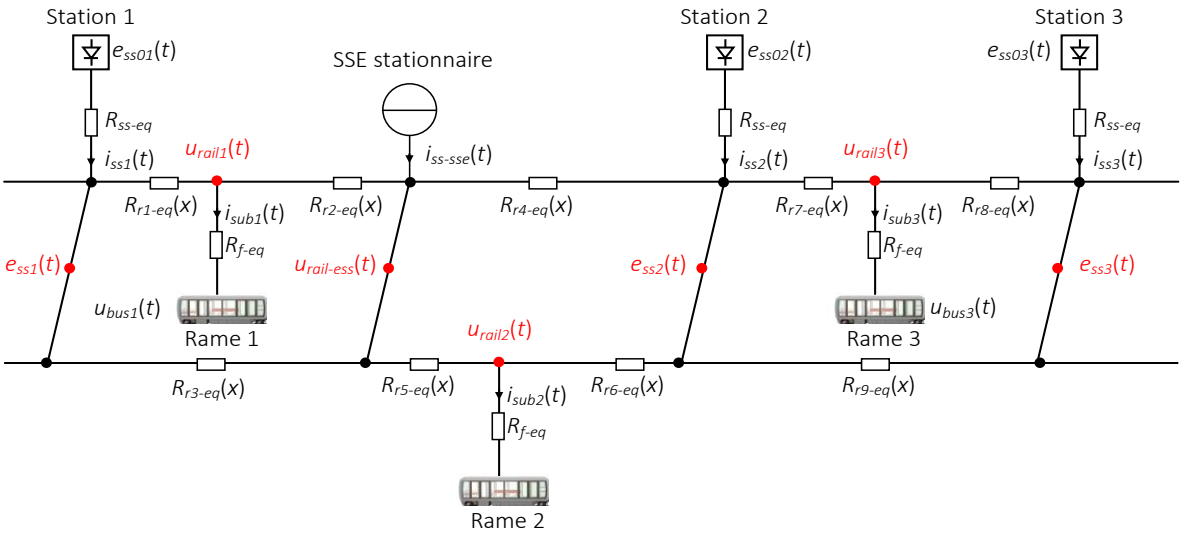


Figure IV.6 : Représentation structurelle simplifiée du carrousel « multi-train » avec SSE stationnaire.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

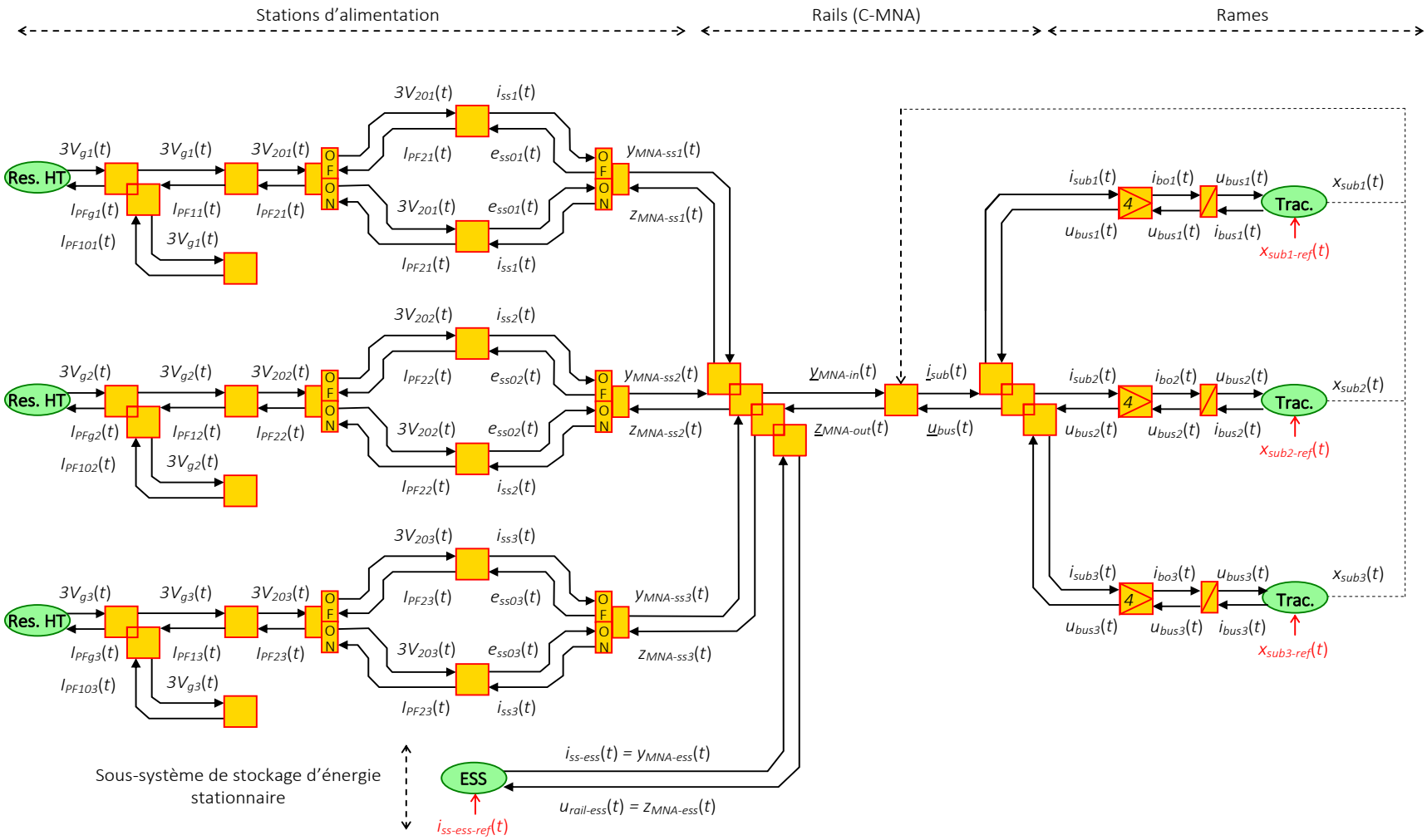


Figure IV.7 : REM du carrousel « multi-train » composé de 3 sous-stations, de 3 rames, et d'un SSE stationnaire.

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

IV.1.d – Flexibilité du modèle étendu

Le modèle obtenu permet une simulation flexible du carrousel complet. Premièrement, le nombre de sous-systèmes, notamment de rames, présents sur la ligne peut être variable comme cela arrive lors d'un changement d'intervalle d'exploitation. Ainsi, les paramètres d'exploitation imposés peuvent être variables au cours du temps. Cette adaptation est permise par l'approche « forward » retenue qui garantit un respect des contraintes du système, et donc une adaptabilité des profils de vitesse considérés. De plus, l'ajout de sous-systèmes sur le carrousel est facilité par l'approche causale utilisée qui considère les bus DC des rames. Cela garantit un respect des causalités physiques au sein du carrousel. Deuxièmement, le sous-système d'alimentation peut être plus ou moins complexe en prenant en compte les rails des 2 directions du carrousel et aussi éventuellement des différentes mises en parallèle des rails. De plus, plusieurs types de rails peuvent être testés en faisant varier leur résistance linéique. L'ajout de SSE (embarqués ou stationnaires) dans le carrousel est également facilité par l'approche causale utilisée en imposant les bonnes variables énergétiques dans le modèle. Enfin, l'adaptation pendant la simulation des résultats de chaque sous-système garantit des résultats de simulation physiques en accord avec les limites cinématiques et énergétiques du système. Cela est uniquement possible grâce à l'approche « forward » et au principe d'interaction de la REM qui adaptent automatiquement les effets en fonction des causes, et donc les profils simulés. Le modèle global obtenu du carrousel est donc considéré comme suffisamment précis et flexible. Des exemples d'applications sont donnés dans la partie suivante.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

IV.2 – Applications de simulations flexibles d'un carrousel

Les simulations réalisées ont pour but de clore ce mémoire en montrant comment exploiter l'outil de simulation. Plusieurs cas d'étude sont ainsi simulés sur le projet concret de la seconde ligne de métros de la ville de Rennes (Rennes B) (cf. Figure I.4). Cette ligne comprend 15 stations « passagers » plus un garage et atelier (Figure IV.8). Le carrousel s'établit entre les stations Saint-Jacque – Gaîté et Cesson – Viasilva. Sept stations d'alimentation non-réversibles (en rouge) alimentent en énergie le carrousel. Par ailleurs, différents environnements de roulement existent : tunnel, viaduc, et tranchée couverte. Ces environnements impactent notamment les efforts aérodynamiques qui s'opposent aux mouvements des trains : la résistance à l'avancement est plus importante en tunnel qu'en viaduc. Ainsi, les coefficients aérodynamiques dépendent de la position de la rame. Les pentes varient également en fonction de la position.

Le projet est défini en fonction d'une capacité de transport en passager par heure et par direction (pphpd) (Tableau IV.1 pour un NéoVal composé de 2 voitures). Cette capacité n'est pas la même en fonction des heures de pointes ou creuses. Ainsi, pour augmenter la capacité de transport, les conditions d'exploitation dépendent du moment de la journée. Cela induit un nombre de rames en circulation qui est fonction de l'intervalle imposé. Les conditions d'exploitation sont prises en compte dans l'outil de simulation en modifiant le nombre de rames en circulation N_{rame}. Les trains sont injectés, en fonction de l'intervalle, en générant les échelons de positions de références $x_{subj\text{-}ref}(t)$. Les vitesses de références sont définies par le modèle de pilotage à partir de ces échelons et des limites cinématiques et énergétique du système. L'exploitation des résultats permet ensuite d'analyser son fonctionnement et ses consommations énergétiques.

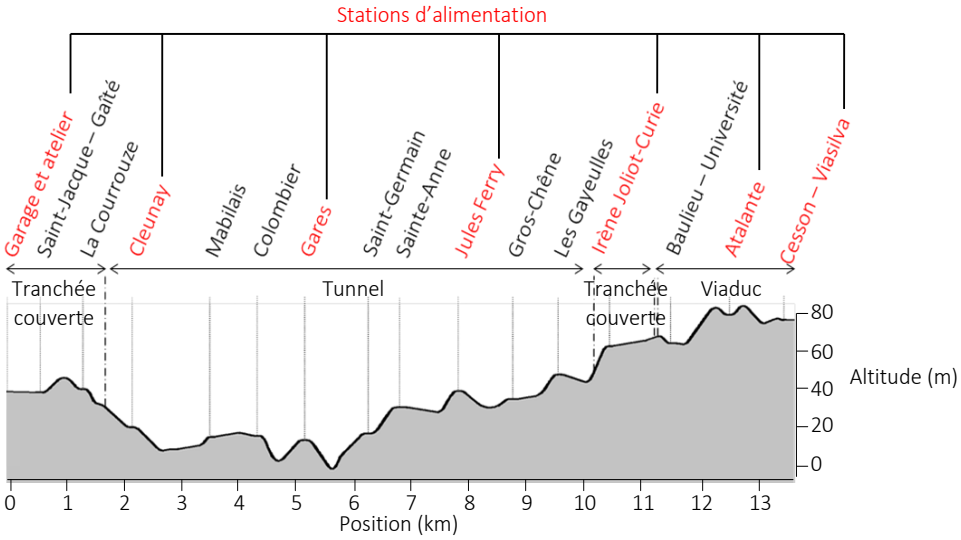


Figure IV.8 : Profil en long de la ligne de métros de Rennes B.

Tableau IV.1 : Conditions d'exploitation de Rennes B : capacités, intervalles et nombre de rames.

Capacité (pphpd)	9000	4012	2775	2467	2220	1850
Intervalle (s)	74	166	240	270	300	360
Nombre de rames	36	16	11	10	9	8

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

IV.2.a – Exploitation de la simulation flexible d'un carrousel de métros

Premièrement, l'énergie totale $W_{tot}(t)$, absorbée par la ligne de métros, est calculée à partir des puissances prélevées en amont des stations d'alimentation (IV.9), avec N_{ss} le nombre de sous-stations et j le numéro de la sous-station.

$$\frac{d}{dt}W_{tot}(t)=\sum_{j=1}^{N_{ss}}3V_{gj}(t)I_{PFgj}(t) \tag{IV.9}$$

Deuxièmement, diverses grandeurs peuvent être déduites de cette énergie totale consommée. Par exemple, l'énergie naturellement sauvée $W_{sauvée}(t)$ par la régénération de l'énergie de freinage, qui est réutilisée par d'autres rames en traction, est déterminée en effectuant 2 simulations. La première simule le système en forçant l'activation du frein mécanique afin qu'aucune énergie ne soit renvoyée sur la ligne (les auxiliaires peuvent toujours consommer une partie de l'énergie de freinage). L'énergie totale simulée $W_{tot\text{-}sans\text{-}récup}(t)$ est donc celle nécessaire au système si aucune récupération d'énergie n'est effectuée. La seconde autorise à l'inverse la récupération de l'énergie libérée lors des phases de freinage. La limite de cette récupération s'effectue naturellement par le respect de la tension maximale de la ligne lorsque celle-ci est peu ou pas réceptive (par le biais de l'activation du frein mécanique – cf. Figure II.21.b). L'énergie totale simulée $W_{tot\text{-}avec\text{-}récup}(t)$ est donc obtenue avec la récupération naturelle de l'énergie lors du freinage. La différence des 2 énergies détermine l'énergie sauvée naturellement par cette récupération au freinage.

$$W_{sauvée}(t)=W_{tot-sans-récup}(t)-W_{tot-avec-récup}(t) \tag{IV.10}$$

Troisièmement, les différentes pertes et consommations d'énergie au sein du système sont facilement identifiables grâce à la REM. Il suffit de calculer les puissances de part et d'autre d'un élément REM. L'intégration de la différence de leurs valeurs absolues conduit aux pertes énergétiques engendrées par l'élément. Par exemple, les pertes d'énergie totales $W_{perte\text{-}tot\text{-}bk}(t)$ dans les freins mécaniques sont exprimées ci-dessous, avec N_{rame} le nombre de rame et j je numéro de la rame.

$$\frac{d}{dt}W_{perte-tot-bk}(t)=\sum_{j=1}^{N_{rame}}\left|\left[T_{smj}(t)\Omega_{smj}(t)\right]-\left[T_{transj}(t)\Omega_{smj}(t)\right]\right| \tag{IV.11}$$

Les différentes énergies et pertes sont donc calculées de cette façon pour estimer les consommations nécessaires au fonctionnement des auxiliaires et à vaincre l'effort à l'avancement. Elles correspondent à la part de l'énergie totale réellement utilisée dans le système. L'autre part est perdue dans les différents composants tels que ceux présents dans les stations d'alimentation, les rails, les rames, où encore les freins mécaniques. L'estimation des pertes dans les freins mécaniques a un intérêt particulier puisqu'elles sont potentiellement récupérables en améliorant la réceptivité de la ligne. Ainsi, elle donne une estimation du gain potentiel d'énergie qu'offrirait le développement de nouvelles structures d'alimentation (stations réversibles, SSE, etc.) ou encore l'amélioration de la gestion du carrousel (optimisation des conditions d'exploitation) (cf. § I.2.b).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

IV.2.b – Exemples de simulations flexibles d'un carrousel de métros

Afin de mettre en application le programme de simulation, différents scénarios sont appliqués sur le cas de Rennes B. Les paramètres des sous-stations sont identiques aux précédents. Par ailleurs, seules les mises en parallèle des rails des 2 directions situées au niveau des sous-stations sont considérées. Une récurrence plus importante de ces mises en parallèle réduirait les pertes dans la distribution et améliorerait légèrement les échanges d'énergie entre les rames. Cependant, les tendances des différents scénarios simulés resteraient les mêmes.

La résistance linéique des rails du projet Rennes B est de 15 µΩ/m. D'autre part, le sous-système matériel roulant est de type NéoVal. Il est motorisé au ¾. C'est-à-dire que seuls 3 bogies sont motorisés. Le quatrième est en roues libres. Le reste de la structure de traction est identique au Val 208. Les nouveaux paramètres sont référencés dans le Tableau IV.2. Ce dernier répertorie notamment les coefficients de l'effort résistant. On remarque alors la forte variabilité du coefficient de pénétration dans l'air B_r, entre un environnement souterrain (tunnel) et aérien (viaduc). De plus, aux masses statiques et dynamiques, doit être ajouté la masse des passagers. Cette masse varie au cours du trajet en raison des montées et descentes des passagers aux différentes stations. Les paramètres du sous-système de pilotage ne changent pas (mêmes limites cinématiques). De plus, la vitesse maximale autorisée est considérée de 65 km/h.

Tableau IV.2 : Paramètres du modèle matériel roulant pour le NéoVal (pour 2 voitures).

Puissance de traction	6x100 kW	Condensateur du filtre	3 mF
Puissance totale des aux.	15 kW	Inductance du filtre	1,4 mH
Masse statique à vide	31,96 t	Coef. de frottement F_0	440 N
Masse dynamique à vide	35,29 t	Coef. de frottement A_{r1}	73 mN/kg
$N_{rame/car} - N_{bo/rame} - N_{mr/bo}$	2 – 1,5 – 2	Coef. de frottement A_{r2}	70,2 Ns/m
Rayon de la roue	0,495 m	Coef. aéro. en tunnel $B_{r\text{-}tun}$	5,28 Ns²/m²
Rapport du réducteur	5,58	Coef. aéro. en viaduc $B_{r\text{-}via}$	16,0 Ns²/m²

Scénario 1 : heures creuses en charge moyenne et alimenté « normalement »

Le premier scénario considère le carrousel en heures creuses avec un intervalle de 360s entre rames. Ainsi, 8 rames sont nécessaires pour effectuer ce carrousel. Elles sont alimentées par les 7 sous-stations via les rails. De plus, 100 passagers sont à bord de la rame (capacité maximale de 185 passagers pour le NéoVal étudié). La masse moyenne d'un passager est considérée de 75 kg. Pour cette étude, le nombre de passagers est identique pour toutes les rames et constant sur l'ensemble du trajet[19]. Les énergies et puissances absorbées sur le réseau d'alimentation au niveau de chaque sous-station sont estimées (Tableau IV.3). De plus, les positions des rames et les puissances et énergies des différentes sous-stations sont présentées (Figure IV.9).

[19] Ce nombre peut facilement être variable en fonction de la position pour chaque rame. Il suffit d'utiliser une table de type « lookup table » dans Matlab-Simulink©.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Tableau IV.3 : Résultats concernant les stations d'alimentation pour le scénario 1.

Nom de la station	Energie (kWh)	Puissance max. (kW)	Courant DC max. (A)
Garage et atelier	122,8	641,5	804,8
Cleunay	171,5	686,4	861,1
Gares	191,0	819,7	1029,3
Jules Ferry	188,5	631,8	792,2
Irène Joliot-Curie	159,9	576,7	722,8
Atalante	117,2	570,7	715,3
Cesson - Viasilva	97,6	587,6	736,5

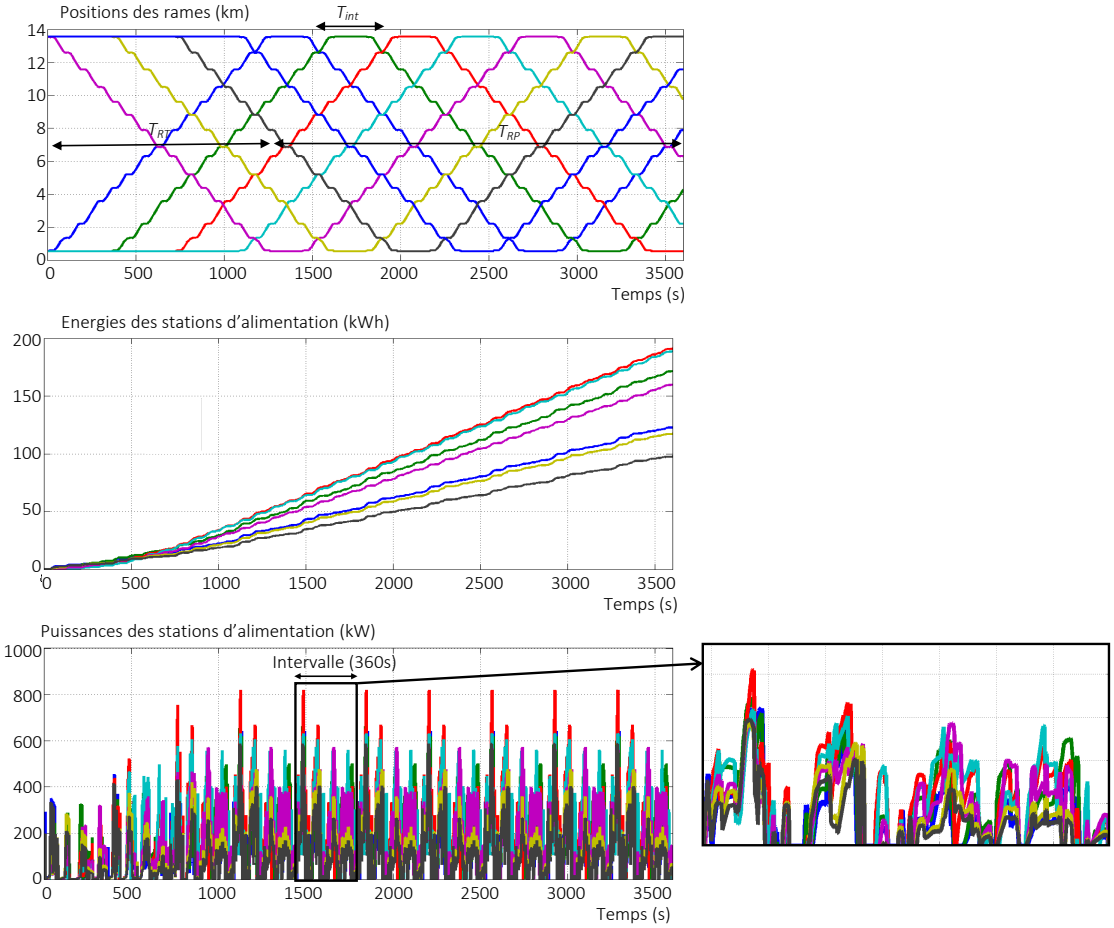


Figure IV.9 : Positions des rames et puissances et énergies des sous-stations pour le scénario 1.

On observe que certaines sous-stations sont plus sollicitées que d'autres. Par exemple, La station Gares (191 kWh – 820 kW) consomme 2 fois plus d'énergie que la station Cesson- -Viasilva (98 kWh – 590 kW). De plus, elle surmonte des appels de puissance plus importants. Par ailleurs, les rames sont injectées sur le carrousel aux extrémités de la ligne. Les simulations ont été effectuées avec un carrousel où aucune rame ne circulait initialement. Il s'établie donc au fur et à mesure de l'injection des rames (Cf. Figure IV.9). La répartition énergétique dans le système est ensuite déterminée (Figure IV.10) (Tableau IV.4). Elle prend pour référence l'énergie totale absorbée sur la ligne (1 048,5 kWh). Cette consommation est déjà réduite de 23 % comparée à celle sans

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

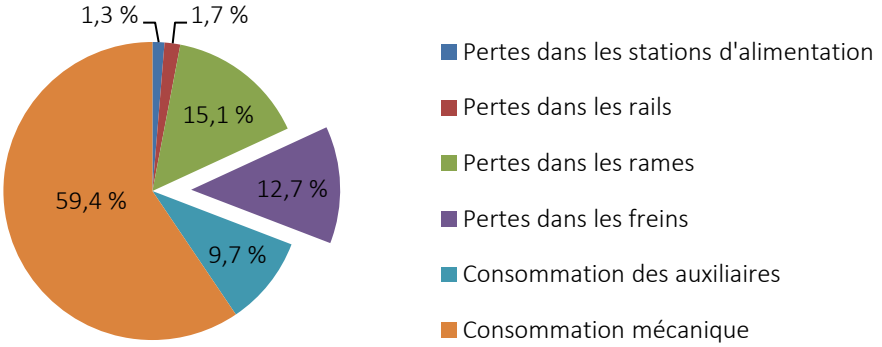


Figure IV.10 : Répartition des pertes et consommations d'énergie dans le carrousel du scénario 1.

récupération. C'est-à-dire que les échanges naturels d'énergie entre véhicules permettent déjà de réduire de 23 % la consommation, par rapport à un carrousel sans récupération au freinage. L'énergie utile au système représente 60 % de l'énergie consommée pour mettre en mouvement le véhicule, et 10 % pour alimenter les auxiliaires (cf. Figure IV.10). Les pertes dans les stations d'alimentation et les rails représentent une part relativement faible (3 %). Celles dans les composants de la rame sont plus significatives avec 15 % de l'énergie totale absorbée. Ces pertes sont difficiles à réduire puisqu'elles sont dues à l'efficacité énergétique des composants. Seul l'usage de composants plus performants pourrait les limiter. En revanche, l'énergie dissipée dans les freins pourrait être récupérée. Dans le cas de ce scénario, elle représente une perte énergétique de 13 % environ. Une partie de cette énergie pourrait être réutilisée en introduisant des SSE par exemple.

D'autre part, 227 km environ sont parcourus en une heure simulée (Tableau IV.4). La consommation ramenée par km vaut 4,63 kWh/km[20]. Par ailleurs, le temps de simulation est relativement important (2 237s soit environ 40 min). Il peut être réduit en utilisant un langage de programmation plus adapté. De plus, la répétitivité des variables énergétiques permettrait de réduire la durée simulée. Une fois le régime permanent atteint, une période T_{int} égale à l'intervalle d'exploitation se répète (cf. Figure IV.9). Il suffirait de simuler la durée de l'intervalle, puis d'étendre les résultats sur l'ensemble de la période simulée où l'intervalle est identique. Dans l'exemple, la durée simulée $T_{simul\text{-}tot}$ (3 600s soit 1 h) est composée d'un régime transitoire T_{RT} (d'environ 1 200s soit 20 min), pendant lequel s'établit le carrousel, et d'un régime permanent T_{RP} (d'environ 2 400s soit 40 min) au cours duquel se répète l'intervalle T_{int}. L'équation (IV.12) traduit cela avec K_{int} le coefficient qui correspond au nombre de fois où l'intervalle est répété. Le temps de simulation utile est exprimé par (IV.13). L'énergie totale W_{tot} consommée sur la période étudiée $T_{simul\text{-}tot}$ pourrait finalement être obtenue par l'expression (IV.14), avec W_{RT} et W_{int} les énergies consommées pendant le régime transitoire et un intervalle T_{int}. W_{int} n'aurait cependant besoin d'être évaluée qu'une seule fois.

[20] Une comparaison rapide par rapport à un véhicule particulier classique à essence peut être effectuée. En considérant qu'un litre d'essence équivaut à 9,68 kWh, la consommation exprimée pour 100 km et pour une seule personne vaut environ 0,5 L/100km pour un tel carrousel. Un facteur 10, favorable au transport au commun, est donc observé si l'on considère qu'une voiture, comprenant un seul passager, consomme environ 5 L/100km. Cet ordre de grandeur est comparable à celui calculé par l'ADEME (cf. Figure I.2).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Tableau IV.4 : Résultats énergétiques pour le scénario 1.

	Valeur	Pourcentage
Energie totale sans récupération (kWh)	1361,5	—
Energie totale avec récupération (kWh)	1048,5	100 %
Pertes dans les stations (kWh)	14,0	1,3 %
Pertes dans les rails (kWh)	18,3	1,7 %
Pertes dans les rames (kWh)	157,9	15,1 %
Pertes dans les freins (kWh)	133,2	12,7 %
Energie consommée par les aux. (kWh)	102,0	9,7 %
Energie consommée mécaniquement (kWh)	623,1	59,4 %
Distance totale parcourue (km)	226,7	—
Consommation/km (kWh/km)	4,63	—

$$T_{simul-tot} = T_{RT} + T_{RP} \quad \text{avec} \quad T_{RP} = K_{\text{int}} T_{\text{int}} \tag{IV.12}$$

$$T_{simul-utile} = T_{RT} + T_{\text{int}} \tag{IV.13}$$

$$W_{tot} = W_{RT} + K_{\text{int}} W_{\text{int}} \tag{IV.14}$$

Dans l'exemple, cette technique permettrait de diviser le temps de simulation par environ 2,3. L'intérêt est d'autant plus fort que l'intervalle est petit. En effet, un intervalle faible conduit à un grand nombre de rame, ce qui allonge naturellement le temps de simulation. La simulation sur un seul intervalle permettrait alors de réduire fortement ce temps de simulation.

Scénario 2 : heures de pointes à pleine charge et alimenté « normalement »

Le deuxième scénario considère un carrousel en heures de pointes avec un intervalle de 74s entre chaque rame. Ainsi, 36 rames en circulation sont nécessaires. Elles sont alimentées par le même sous-système d'alimentation que dans le scénario 1. Une charge maximale de 185 passagers par rame est maintenant considérée. Les consommations d'énergie et puissances absorbées au niveau de chaque station d'alimentation sont estimées (Tableau IV.5). Les positions des rames et les puissances et énergies des différentes sous-stations sont déterminées (Figure IV.11).

Tout comme le scénario 1, certaines sous-stations sont plus sollicitées. D'un point de vue des appels de puissance et des consommations énergétiques, ce scénario est le pire cas possible en raison de la charge maximale et de l'intervalle minimal considérés. Ainsi, ces résultats pourraient être utilisés afin de dimensionner en énergie et en puissance le système. La répartition énergétique du système est ensuite analysée (Tableau IV.6) (Figure IV.12). Les récupérations d'énergie au freinage dues aux échanges naturels entre rames permettent dans ce cas de réduire d'environ 30 % la consommation d'énergie, par rapport à un cas sans aucune récupération au freinage. Les pourcentages du Tableau IV.6 sont définis à partir de la consommation d'énergie calculée avec ces récupérations naturelles (4 497,5 kWh).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Tableau IV.5 : Résultats concernant les stations d'alimentation pour le scénario 2.

Nom de la station	Energie (kWh)	Puissance max. (kW)	Courant DC max. (A)
Garage et atelier	512,4	1212,2	1526,5
Cleunay	733,1	1536,2	1938,6
Gares	873,6	1665,1	2103,1
Jules Ferry	830,9	1572,1	1984,4
Irène Joliot-Curie	666,5	1436,7	1811,9
Atalante	478,1	1209,8	1523,4
Cesson - Viasilva	402,9	1017,4	1279,4

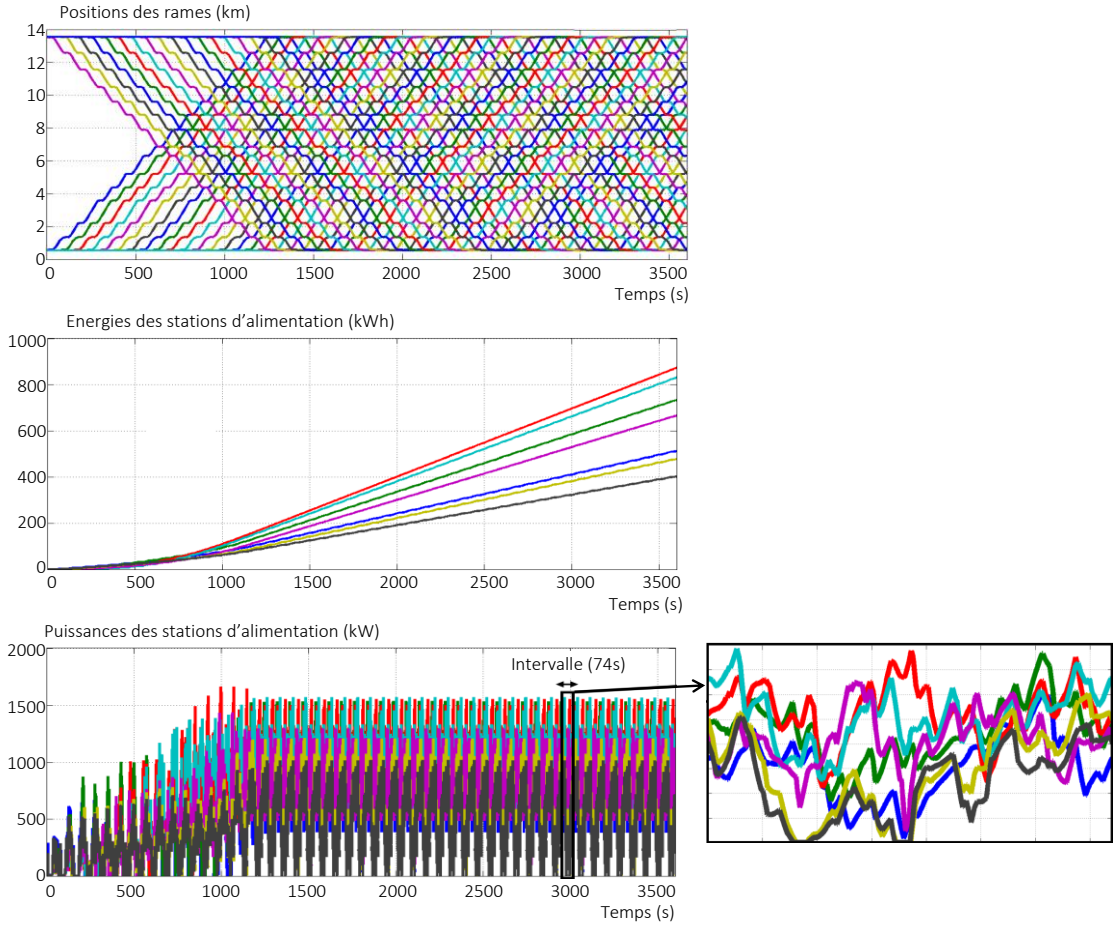


Figure IV.11 : Positions des rames et puissances et énergies des sous-stations pour le scénario 2.

L'énergie utile au système représente maintenant 65 % pour tracter les rames et 10 % pour alimenter les auxiliaires. Les pertes dans les stations d'alimentation et les rails restent assez faible avec 5 % de l'énergie totale absorbée. Les pertes dans les composants des rames sont de 19,5 %. Par ailleurs, les pertes dans les freins sont négligeables dans ce scénario (inférieure à 1 %). Cela est du aux heures de pointes considérées qui induisent un nombre de rames en circulation important. Ainsi, de nombreuses possibilités d'échanges d'énergie existent entre les rames.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Tableau IV.6 : Résultats énergétiques pour le scénario 2.

	Valeur	Pourcentage
Energie totale sans récupération (kWh)	6503,8	—
Energie totale avec récupération (kWh)	4497,5	100 %
Pertes dans les stations (kWh)	101,1	2,2 %
Pertes dans les rails (kWh)	128,5	2,9 %
Pertes dans les rames (kWh)	878,3	19,5 %
Pertes dans les freins (kWh)	32,3	0,8 %
Energie consommée par les aux. (kWh)	445,6	9,9 %
Energie consommée mécaniquement (kWh)	2911,7	64,7 %
Distance totale parcourue (km)	1055,0	—
Consommation/km (kWh/km)	4,26	—

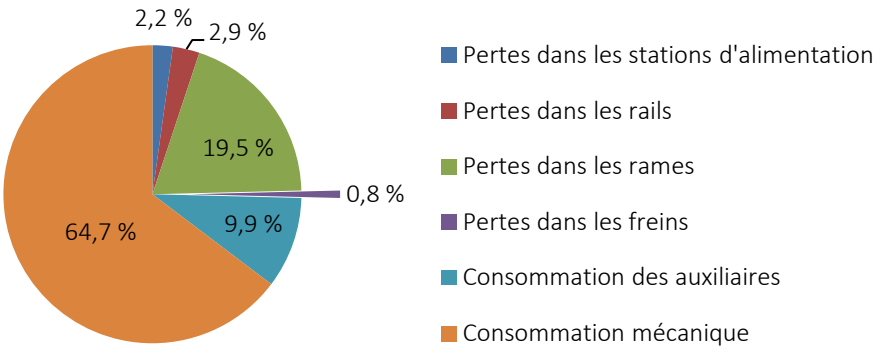


Figure IV.12 : Répartition des pertes et consommations d'énergie dans le carrousel du scénario 2.

L'intérêt des nouvelles structures d'alimentation n'est donc pas systématiquement avéré. D'un côté le gain potentiel semble intéressant pendant les heures creuses (environ 10 %). D'un autre, ce gain est faible pendant les heures pleines. Cependant, l'ajout de SSE réduirait certaines pertes telles que celles dans les rails par exemple. Les gains pourraient donc s'avérer supérieurs à ceux attendus. D'un autre côté, les SSE induirait de nouvelles pertes internes. Une étude plus approfondie sur une journée entière devrait donc être envisagée pour justifier le choix d'implanter ou non ces nouvelles solutions d'alimentation.

D'autre part, 1 055 km environ sont parcourus en une heure avec une consommation d'énergie de 4,26 kWh/km (cf. Tableau IV.6)[21]. Cette dernière est légèrement réduite comparé au scénario 1 en raison de la meilleure réutilisation de l'énergie de freinage. Par ailleurs, le temps de simulation (5 360s soit 90 min) est plus important en raison du plus grand nombre de rames à simuler. La simulation sur un intervalle permettrait de réduire d'un facteur d'environ 2,8 ce temps de simulation.

[21] Ce qui équivaut à une consommation de 0,24 L d'essence pour 100 km et par personne, soit 20 fois moins qu'un véhicule particulier.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Scénario 3 : heure de pointe à pleine charge et sous-alimenté

Le troisième scénario considère un carrousel en heures de pointes avec un intervalle de 74s entre chaque rame et 185 passagers à bord de chacune. Cependant, l'étude consiste à estimer le comportement énergétique du système dans le cas où celui-ci est alimenté avec un nombre réduit de stations d'alimentation. Ainsi, les stations Cleunay, Gares, Irène Joliot-Curie et Atalante sont supprimées. Trois stations seulement alimentent le système (Garage et atelier, Jules Ferry, et Cesson - Viasilva). Les consommations d'énergie et puissances absorbées au niveau de chaque sous-station sont estimées (Tableau IV.7). Les positions des rames et les puissances et énergies des sous-stations sont déterminées (Figure IV.13).

Tableau IV.7 : Résultats concernant les stations d'alimentation pour le scénario 3.

Nom de la station	Energie (kWh)	Puissance max. (kW)	Courant DC max. (A)
Garage et atelier	1605,6	3123,6	3982,7
Jules Ferry	2122,8	3633,0	4647,7
Cesson - Viasilva	1347,5	2717,2	3455,4

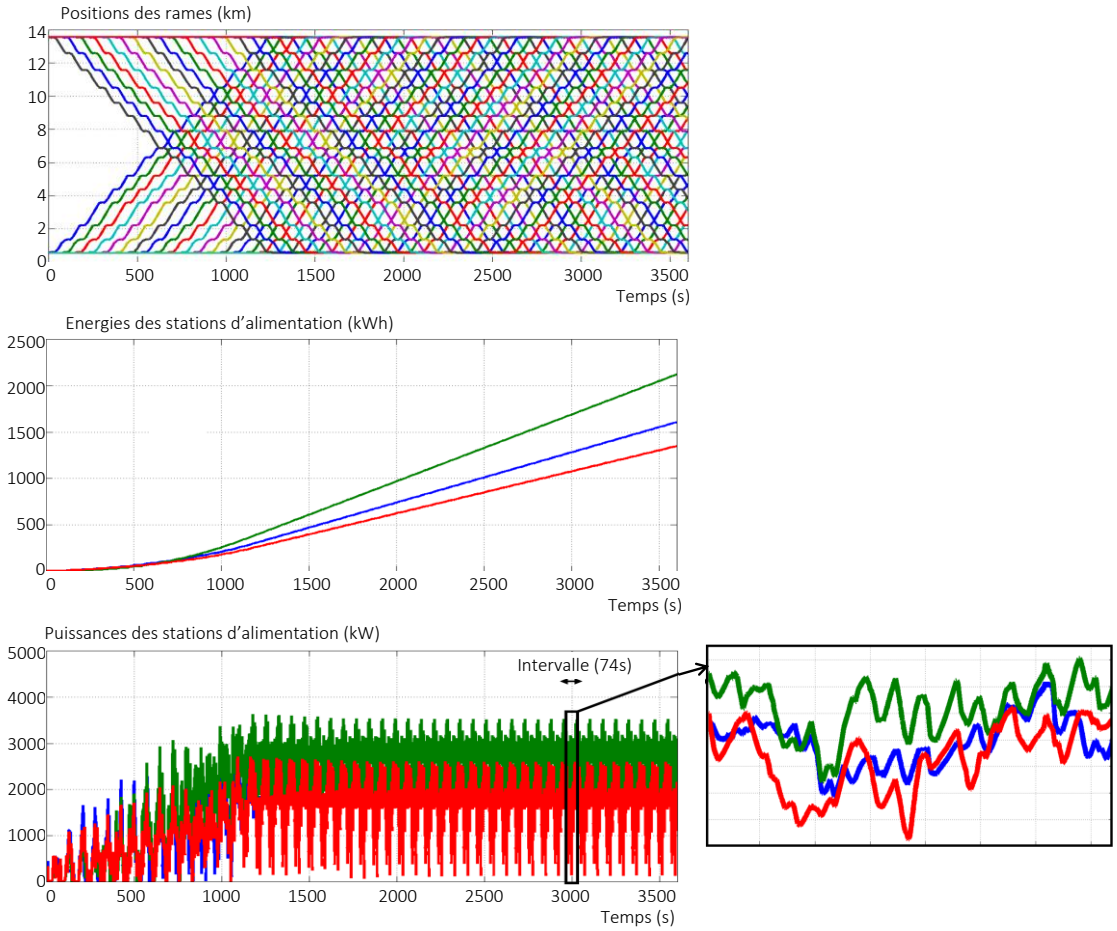


Figure IV.13 : Positions des rames et puissances et énergies des sous-stations pour le scénario 3.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Tout comme les autres scénarios, certaines sous-stations sont plus sollicitées que d'autres. Par ailleurs, en raison du sous-système d'alimentation considéré (3 stations à la place de 7), la tension d'alimentation au niveau des rails atteint souvent ses limites basses. Les performances des rames sont donc limitées. Plusieurs conséquences en découlent. En premier lieu, la vitesse moyenne des rames est plus faible que dans les scénarios précédents (les accélérations sont limitées en fonction des tensions des bus DC). Le temps nécessaire pour parcourir la ligne est donc plus important. Cet allongement du temps de parcours implique une légère diminution de la capacité de transport. Bien que dans ce cas cette dernière reste comparable à celle attendue, une dégradation supérieure des performances pourrait conduire à une capacité trop faible. Des solutions possibles seraient alors d'augmenter le nombre de rames, et/ou la vitesse maximale pour accroitre la vitesse moyenne.

La nouvelle répartition de l'énergie au sein du système est estimée (Tableau IV.8), (Figure IV.14). En raison de la tension d'alimentation réduite, les pertes dans les rails et les stations d'alimentation sont plus importantes que pour les autres scénarios (15 %). L'énergie utile au système représente maintenant 57 % pour tracter les rames et 9 % pour alimenter les auxiliaires. Les pertes dans les composants du matériel roulant sont de 18,3 %. Les pertes dans les freins sont toujours négligeables dans ce scénario (inférieures à 1 %) puisque des heures de pointes sont considérées.

Tableau IV.8 : Résultats énergétiques pour le scénario 3.

	Valeur	Pourcentage
Energie totale sans récupération (kWh)	7392,0	—
Energie totale avec récupération (kWh)	5075,8	100 %
Pertes dans les stations (kWh)	270,3	5,3 %
Pertes dans les rails (kWh)	489,9	9,6 %
Pertes dans les rames (kWh)	928,7	18,3 %
Pertes dans les freins (kWh)	32,4	0,7 %
Energie consommée par les aux. (kWh)	445,6	8,8 %
Energie consommée mécaniquement (kWh)	2909,0	57,3 %
Distance totale parcourue (km)	1054,8	—
Consommation/km (kWh/km)	4,81	—

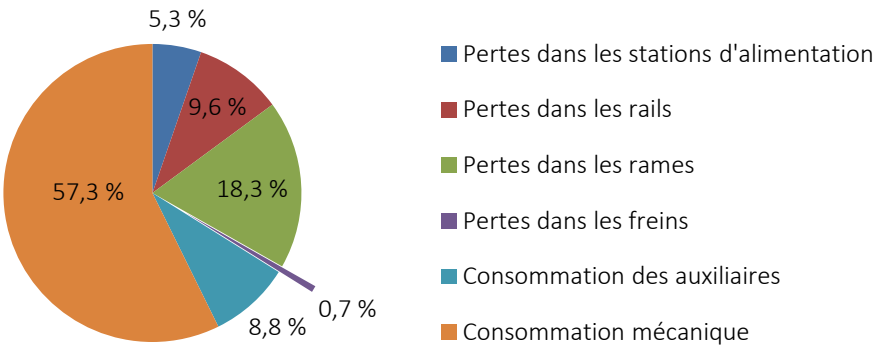


Figure IV.14 : Répartition des pertes et consommations d'énergie dans le carrousel du scénario 3.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

D'autre part, une consommation d'énergie de 4,81 kWh/km (cf. Tableau IV.8) est constatée. Cette dernière est supérieure à celle du scénario 2 puisque des pertes plus importantes sont causées dans le sous-système d'alimentation. Par ailleurs, le temps de simulation est légèrement réduit comparé au scénario 2 puisque moins de sous-stations sont considérés (4 975s soit 80 min).

Ce scénario montre la possibilité d'étudier un carrousel particulier où le plan de tension n'est pas systématiquement garanti. Cela est possible grâce à la flexibilité de l'outil développé et du principe d'interaction appliqué sur l'ensemble de la modélisation. En effet, l'approche « forward » adapte le comportement du système en fonction de ses différentes limites et contraintes. Une approche classique « backward » ne permettrait pas d'étudier avec précision ce scénario puisque les profils de vitesse ne pourraient pas être assurés. A l'inverse, l'approche « backward » conduirait dans ce cas en à des erreurs de simulation. Ainsi, l'outil de simulation développé peut être utilisé, de façon flexible, pour simuler et estimer les consommations énergétiques d'un carrousel avec des structures d'alimentation, des topologies, des limites, et des sous-systèmes différents.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

IV.3 – Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de généraliser la modélisation du carrousel « multi-train ». De plus, divers scénarios ont été simulés afin de tester l'outil développé sur des cas concrets.

Une première partie a étendu la simulation pour prendre en compte un nombre quelconque de sources. Ainsi, des couplages ont été définis afin d'obtenir des vecteurs correspondants aux variables délivrées et absorbées par les modèles des rames et des stations d'alimentation. La flexibilité de l'outil s'en trouve augmentée puisque l'ajout de sous-systèmes s'effectue alors très simplement, en les couplant sur ces éléments. Par ailleurs, le modèle de la distribution d'énergie par rail a également pu être amélioré. Il correspond d'avantage à la réalité en intégrant des connexions parallèles entre les rails des 2 directions. La formulation de la C-MNA permet alors de dissocier les rails des 2 directions avec des liaisons parallèles à différents emplacements. De plus, des SSE stationnaires ont également pu être introduits dans le carrousel grâce à l'automatisation du processus de formulation de la C-MNA. L'outil finalement obtenu permet une flexibilité importante de la simulation.

Différentes simulations ont ensuite été réalisées sur un des projets actuels de Siemens (ligne B de Rennes). Le modèle des rames a été adapté au matériel roulant NéoVal. De même, les topologies géographique (pentes, positions des stations, etc.) et électrique (emplacements des sous-stations, des interconnexions entre rails, etc.) de la ligne ont servies de paramètres d'entrées de la simulation. Premièrement, un scénario a considéré un carrousel établi en heures creuses avec un chargement intermédiaire des rames. Les consommations et pertes ont été estimées. Le deuxième scénario simulait un carrousel en heures pleines avec une charge maximale. Enfin, le troisième considérait un carrousel en heures pleines, mais avec un nombre moins important de stations d'alimentation. Ainsi, à certaines périodes, les performances des véhicules ont dues être réduites en raison des chutes excessives de la tension d'alimentation. Cependant, dans tous les cas, le programme de simulation a été capable de s'adapter et d'estimer de façon suffisamment précise la consommation d'énergie du système. La flexibilité de l'outil de simulation a donc été prouvée au travers de ces différentes simulations avec des conditions ou des structures d'alimentation différentes.

Par ailleurs, certaines tendances peuvent être formulées. Les gains potentiels d'énergie, que permettrait le développement de nouvelles structures d'alimentation (SSE, sous-stations réversibles, etc.), dépendent largement du cas étudié. Ils sont nettement supérieurs sur une ligne de faible dimension (peu de rames en circulation) comparée à une ligne plus étendue (où de nombreux échanges énergétiques peuvent déjà avoir lieu). Une alimentation innovante pourrait donc améliorer fortement l'efficacité énergétique d'un carrousel pour terminaux d'aéroport par exemple. De plus, les gains potentiels sont plus intéressants pendant les heures creuses que pleines. Des études complémentaires peuvent être effectuées avec l'outil développé afin de justifier le développement de ces systèmes en fonction du projet considéré.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse était de développer un programme de simulation flexible de carrousel de métros capable d'estimer les consommations énergétiques afin de tester différentes solutions innovantes d'alimentation. Pour cela, une approche particulière basée sur la REM (Représentation Energétique Macroscopique) a été mise en œuvre et a conduit à des approches de simulation systémique, cognitive, causale, et « forward ».

Le chapitre I a montré la nécessité de développer des systèmes de transport moins énergivores. Les transports en commun ont un rôle important à jouer en offrant une bonne qualité de transport, tout en limitant la consommation énergétique. Cependant, pour améliorer d'avantage leurs efficacités énergétiques, plusieurs solutions innovantes ont été développées ces dernières années. Ces solutions, présentées dans le chapitre I, consistent pour la plupart à récupérer l'énergie lors du freinage. Cette récupération potentielle représente entre 30 % et 40 % de l'énergie totale absorbée suivant le système étudié. Parmi les plus courantes, on trouve la synchronisation des phases de traction et de freinage des différentes rames, l'introduction de SSE (embarqués ou stationnaires), ou encore l'utilisation de stations d'alimentation réversibles. Néanmoins, le choix de ces solutions en fonction du système étudié n'est pas trivial et leurs intérêts ne sont pas systématiquement avérés. De ce fait, les outils de simulation sont de plus en plus sollicités afin d'évaluer les solutions possibles. L'objectif de la thèse est donc de développer un programme de simulation énergétique flexible de carrousel de métros capable d'estimer les consommations d'énergie et d'évaluer différentes topologies d'alimentation innovantes (SSE, stations d'alimentation réversibles, etc.).

Le chapitre II a développé des modèles de chaque sous-système d'un carrousel de métros. Contrairement, aux études et programmes de simulation existants, une approche « forward » et un usage exclusif de la causalité intégrale ont été retenus avec la REM. Les modèles offrent alors une forte adaptabilité en fonction des cas étudiés et un respect du fonctionnement physique du système et de ses interactions et contraintes énergétiques. D'autre part, une méthodologie de modélisation particulière a été scrupuleusement appliquée pour chaque sous-système. Celle-ci consiste à : premièrement, établir le modèle dynamique du sous-système pour mettre en exergue ses causalités ; deuxièmement, valider expérimentalement ce modèle dynamique ; troisièmement, réduire le modèle afin d'obtenir un compromis précision/temps de simulation ; et dernièrement, comparer les différents modèles pour déterminer le plus approprié. Des modèles causaux, validés expérimentalement, et réduits de chaque sous-système ont ainsi été obtenus.

Le chapitre III a ensuite associé les modèles des différents sous-systèmes afin de simuler un carrousel de métros. Tout d'abord, un carrousel « mono-train » a été considéré. Son étude a conduit à modéliser dynamiquement le bus DC des rames. De plus, une source de nature variable (courant, tension) a été considérée pour tenir compte de la non-réversibilité des sous-stations. Ces points clés constituent les particularités de la thèse et permettent de prendre en compte, de manière fine et causale, les différents phénomènes qui apparaissent lorsque la ligne devient peu ou pas réceptive

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

(blocage des sous-stations, élévation brusque de la tension d'alimentation, activation du frein dissipatif, etc.). Ces phénomènes constituent habituellement une difficulté majeure dans la modélisation qui nécessite d'introduire des méthodes de résolution itératives particulières. L'approche causale a permis de se passer de ces méthodes et d'améliorer la précision des résultats. Des essais expérimentaux sur une ligne de tests réelle ont validés cette approche. La modélisation a ensuite été étendue pour intégrer d'autres rames dans le carrousel. Une méthode existante, la méthode nodale modifiée (MNA), généralement appliquée dans des approches non-causales, a été adaptée à l'approche causale de la REM (C-MNA). Le modèle complet du carrousel « multi-train » a été validé expérimentalement. Une simulation HIL a été développée à cet effet afin de reproduire, en plate-forme expérimentale, le comportement énergétique d'une ligne de métros. Les comparaisons entre la simulation et les mesures expérimentales ont conduit à valider l'outil de simulation.

Le chapitre IV a finalement étendu le modèle de carrousel « multi-train » pour prendre en compte un nombre quelconque de sources (sous-stations, rames, etc.). Des SSE stationnaires ont également été introduits. Ces sous-systèmes ont ainsi pu être ajoutés simplement via la généralisation des éléments de couplage. De plus, la modélisation, par la C-MNA, a permis de considérer une distribution par rails plus complexe, se rapprochant d'avantage de la réalité. Enfin, plusieurs applications ont été réalisées. Elles ont permis de prouver la flexibilité de l'outil au travers de la simulation de la ligne B du métro de Rennes sous différents scénarios. L'outil a pu estimer les consommations énergétiques pour chaque scénario, en adaptant les résultats de simulation au cas simulé. De plus, la répartition des pertes dans le système a également pu être estimée. Des gains potentiels d'énergie allant de 1 à 10 % ont été observés. Dans certains cas, la récupération d'énergie s'effectue naturellement et suffisamment entre véhicules lors des phases de freinage. Dans d'autres, l'introduction de SSE permettrait une diminution importante de la consommation énergétique. Des études approfondies permettant de vérifier l'intérêt de développer des structures d'alimentation innovantes peuvent être réalisées avec l'outil développé.

L'outil de simulation estime les consommations et gains d'énergie quelque soit le cas étudié ; il est flexible. De plus, tout au long de ce mémoire, la REM a été l'élément fédérateur. Ce formalisme a été appliqué à des éléments jusqu'à présent non étudiés avec la REM tels que les sous-stations non-réversibles, des sources non-stationnaires (déplacement des rames), ou encore une distribution commune (rails). Les REM développées pourront ainsi être réutilisées dans les travaux futurs comprenant ce type de sous-systèmes. De plus, l'outil peut être utilisé à des fins de dimensionnement en estimant les puissances maximales aux divers emplacements de la ligne, tout comme l'ensemble des grandeurs électriques. Il peut également aider à déterminer le nombre et l'emplacement des stations d'alimentation, tout comme l'introduction de SSE ou de stations d'alimentation réversibles.

Les perspectives de ce travail sont multiples.

- A court terme, il serait intéressant d'effectuer des études plus approfondies intégrant des SSE de différents types (supercondensateurs, batteries, systèmes inertiels, etc.) à différents emplacements dans le carrousel (embarqués, stationnaires), ou encore de considérer des stations d'alimentation réversibles. La comparaison des résultats permettrait de mettre en évidence des tendances, en fonction des projets, permettant de proposer de nouvelles topologies d'alimentation plus économes

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

en énergie. De même, l'influence du dimensionnement des SSE sur les gains énergétiques pourrait être mise en exergue. D'autre part, pour affiner les résultats de simulation, il faudrait étudier l'impact sur les profils de consommation de la répartition des passagers sur la ligne (masse équivalente des rames variant en fonction de la position). L'utilisation de tables permettrait de prendre en compte cette répartition simplement. De plus, la simulation « par intervalle », présentée dans le chapitre IV, doit être automatisée afin de réduire les temps de calcul. D'autre part, la diffusion de l'outil en interne dans la société nécessiterait de développer une interface homme/machine afin de faciliter son utilisation par les ingénieurs. Enfin, d'un point de vue de la REM, la prise en compte de la distribution commune d'énergie doit être mieux formalisée, notamment pour représenter la C-MNA qui intègre des commutations de modèles implicites qui sont mal mises en exergue par la REM. D'un autre côté, la représentation du modèle moyen de la sous-station, en particulier du côté alternatif, doit être approfondie. En effet, l'utilisation de variables telles que le courant efficace, le facteur de puissance, le nombre de phases, et la tension efficace n'a jamais été effectuée avec la REM. L'intérêt de cette représentation doit donc être confirmé.

- A plus long terme, cet outil pourrait être couplé avec un logiciel d'optimisation afin de définir des structures d'alimentation optimales, aussi bien en termes de topologies que de dimensionnements. Il faudrait cependant vérifier que les temps de simulation soient compatibles avec un processus d'optimisation. L'outil développé permettrait également de proposer et de tester différentes stratégies de gestions énergétiques au niveau du carrousel de métros. Ces stratégies permettraient potentiellement de répondre aux multiples problématiques d'alimentation de ce type de système. En particulier, il serait possible d'étudier des « smart grid » locaux développé autour du carrousel de métros. D'ailleurs, Siemens est déjà détenteur d'un brevet sur ce sujet. Celui-ci vise à utiliser la distribution par rails du carrousel comme alimentation commune de parcs de recharge de véhicules électriques situés proches des stations de métro par exemple. D'un autre côté, la plate-forme développée en laboratoire pourrait être utilisée afin d'effectuer des tests expérimentaux sur l'ajout de SSE ou de stations d'alimentation réversibles dans le carrousel. Une validation des stratégies de gestion énergétique pourrait ainsi être menée. Ces stratégies pourraient être directement utilisées dans des applications concrètes.

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Annexes

Sommaire des annexes

Annexe 1 – REM et SMC ..... - 140 -
Annexe 2 – Modélisation dynamique de la station d'alimentation avec prise en compte de l'empiétement - 144 -
Annexe 3 – Plate-forme expérimentale : émulateur d'un carrousel de métros ..... - 147 -
Annexe 4 – Résolution du conflit d'association du matériel roulant ..... - 151 -
Annexe 5 – Calcul de la distance de décélération d'une rame ..... - 154 -

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Annexe 1 – REM et SMC

Cette annexe est tirée des thèses de W. Lhomme [LHO 07] et d'A.-L. Allègre [ALL 10b].

La Représentation Énergétique Macroscopique (REM) a été développée par le Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance (L2EP) de Lille dans les années 2000. Ce formalisme représente des systèmes complexes avec une description fonctionnelle [BOU 03b], [BOU 12].

Principe d'interaction

Le système se décompose en sous-systèmes en interactions (Figure A.1) :

- sources d'énergie (ovales verts)
- éléments d'accumulation (rectangles orange barrés)
- éléments de conversion sans accumulation d'énergie (carrés, ronds orange)
- éléments de couplage pour la distribution d'énergie (doubles carrés, ronds orange)
- aiguilleurs qui permettent de passer d'un modèle à un autre [LHO 07].
- éléments d'adaptation [HOR 11]

Tous ces éléments sont interconnectés suivant le principe d'action-réaction. Le produit des variables d'action-réaction entre 2 éléments donne la puissance instantanée échangée entre ces éléments (Figure A.1) [BOU 00].

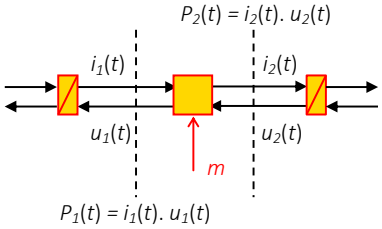


Figure A.1 : Calcul de la puissance instantanée.

Principe de causalité

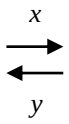
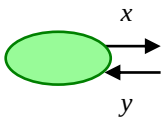
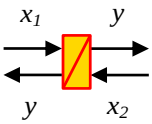
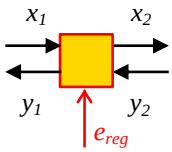
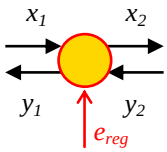
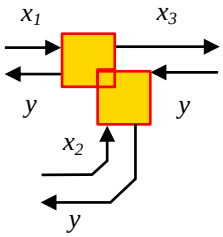
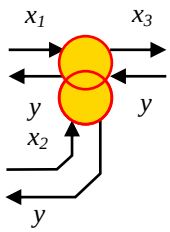
La causalité intégrale est la seule causalité considérée dans la REM, car c'est la seule causalité physique [IWA 94], [HAU 04]. Cette propriété amène à définir des éléments d'accumulation d'énergie. Les relations de ces éléments sont dépendantes du temps et sont caractérisées par une relation intégrale entre la sortie et les entrées. Par exemple, si on souhaite modéliser une inductance supposée parfaite, on aura la relation causale (A.1) (Figure A.2). Le courant $i_L(t)$ réagit avec un temps de réponse par rapport aux sollicitations d'entrée.

$$u_L(t) = u_2(t) - u_1(t) = L\frac{d}{dt}i_L(t) \xrightarrow{\text{causalité intégrale}} i_L(t) = \int \frac{u_2(t) - u_1(t)}{L}dt \qquad \text{(A.1)}$$

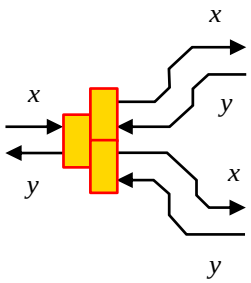
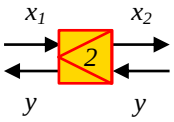
© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

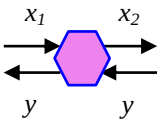
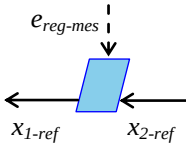
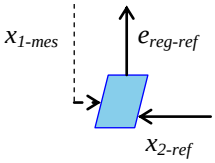
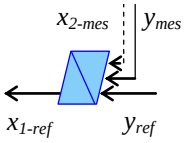
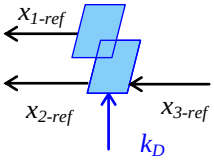
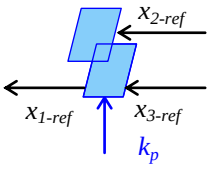
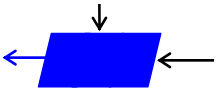
Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Tableau A.1 : Eléments constitutifs de la REM.

REM (Représentation Énergétique Macroscopique)			
Élément	Symbole	Description	Exemples
Variable		variables d'action et de réaction	
Capteur		capteur placé sur une variable	
Source		source d'énergie réceptrice et/ou génératrice	alimentation électrique (continue, alternative), environnement d'un véhicule
Accumulateur		élément d'accumulation d'énergie (causalité intégrale) avec ou sans pertes	inductance, condensateur, inertie, masse
Convertisseurs		convertisseur monophysique (sans accumulation d'énergie) avec ou sans entrée de réglage et avec ou sans pertes	transformateur électrique, hacheur
		convertisseur multiphysique (sans accumulation d'énergie) avec ou sans entrée de réglage et avec ou sans pertes	conversion électromécanique d'une machine à courant continu
Couplages		couplage monophysique	couplage série (équi-courant), parallèle (équi-tension)
		couplage multiphysique	machine électrique

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Aiguilleur		aiguilleur de modèles (aiguillage d'énergie quelconque)	système physique pouvant faire varier le nombre de grandeurs d'états (exemple d'un embrayage)
Adaptation		Adaptation de puissance (simplification d'un couplage)	Adaptation de courant, de tension, de force, ect.

Estimateur		modèle ou estimateur (quelle que soit la forme)	
Inversions		inversion d'un élément de conversion avec e_{reg} comme entrée de perturbation (sans asservissement)	
		inversion d'un élément de conversion avec x_1 comme entrée de perturbation (sans asservissement)	
Inversions		inversion d'un élément d'accumulation (avec asservissement)	
		inversion d'un couplage aval (répartition des énergies)	
		inversion d'un couplage amont (pondération des énergies)	
Stratégie		détermine les critères de répartition k_R, les critères de pondération k_P, et les références	

© 2016 Tous droits réservés.

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

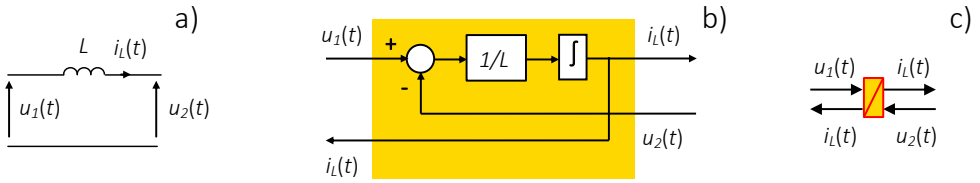


Figure A.2 : Représentation d'une inductance : a) par schéma électrique, b) par schéma blocs, c) par REM.

Principe d'inversion

La structure de commande est obtenue par inversion du modèle du système [HAU 04]. Pour cette méthode, les relations des éléments qui ne sont pas dépendantes du temps sont directement inversées (sans correcteur). Par contre, étant donné que la causalité dérivée est interdite, l'inversion des relations des éléments qui dépendent du temps ne peut pas être directe et nécessite l'utilisation d'un correcteur et de mesures. On a donc les règles d'inversion suivantes [BOU 12] :

- les éléments de conversion sont directement inversés (parallélogrammes bleus)
- les éléments d'accumulation sont inversés en utilisant un correcteur et des mesures (parallélogrammes bleus barrés)
- l'inversion des éléments de couplage nécessitent une entrée supplémentaire de distribution ou de pondération (doubles parallélogrammes bleus).

Par exemple, l'inversion d'une inductance nécessite un correcteur $C_{orr_L}(t)$, la mesure de la variable commandée, c'est-à-dire celle du courant $i_{L_mes}(t)$ et éventuellement la compensation de la tension $u_{1_mes}(t)$ qui agit comme une perturbation (Figure A.3).

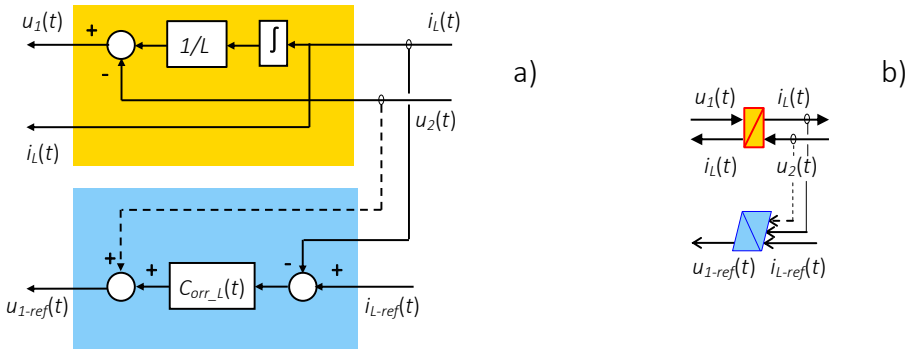


Figure A.3 : Représentation d'une inductance et de sa commande : a) par schéma blocs, b) par REM.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Annexe 2 – Modélisation dynamique de la station d'alimentation avec prise en compte de l'empiétement

La prise en compte de l'empiétement s'effectue par l'ajout d'un modèle commuté lorsque le redresseur est passant. Un premier élément de commutation distingue donc les modes bloqué (modèle 1) et passant du redresseur. Un second élément de commutation active successivement les modes de conduction (CO) (modèle 2) ou d'empiétement (OV) (modèle 3). Pendant le mode de conduction, une diode conduit sur chaque demi-pont. La diode du bras où la tension est la plus élevée est passante sur le demi-pont à anode commune alors que celle qui conduit sur le demi-pont à cathode commune est celle du bras où la tension est la plus négative. Le mode d'empiétement est une période particulière où 2 diodes conduisent simultanément sur le même demi-pont. Cela est du à la présence des inductances du secondaire du transformateur qui empêche l'annulation immédiate du courant dans la diode du bras correspondant (Figure A.4).

Les modes bloqué et en conduction on déjà été modélisés dans ce mémoire (cf. § II.1). Le mode empiétement est représenté par 3 éléments REM (Figure A.5). Un élément de conversion correspond à une transformation mathématique [$\underline{T}(\underline{m}_{rec}(t))$] qui impose les bonnes tensions $\underline{u}_{20}'(t)$ en entrée du modèle d'empiétement en fonction des tensions à vide en sortie du transformateur $\underline{u}_{20}(t)$ (A.2). Cette transformation dépend des fonctions de commutation (A.3). Un élément d'accumulation représente le modèle du mode empiétement. Une relation matricielle impose alors les courants $\underline{i}_2'(t)$ comme variables énergétiques en respectant la causalité (A.4). Ce modèle est analogue à celui résolvant le problème du nœud inductif [VER 07], [MAY 16]. Finalement, le courant imposé en sortie du redresseur du coté continu $i_{sub}(t)$ est obtenu en sommant les 2 courants d'états $\underline{i}_2'(t)$ (A.5).

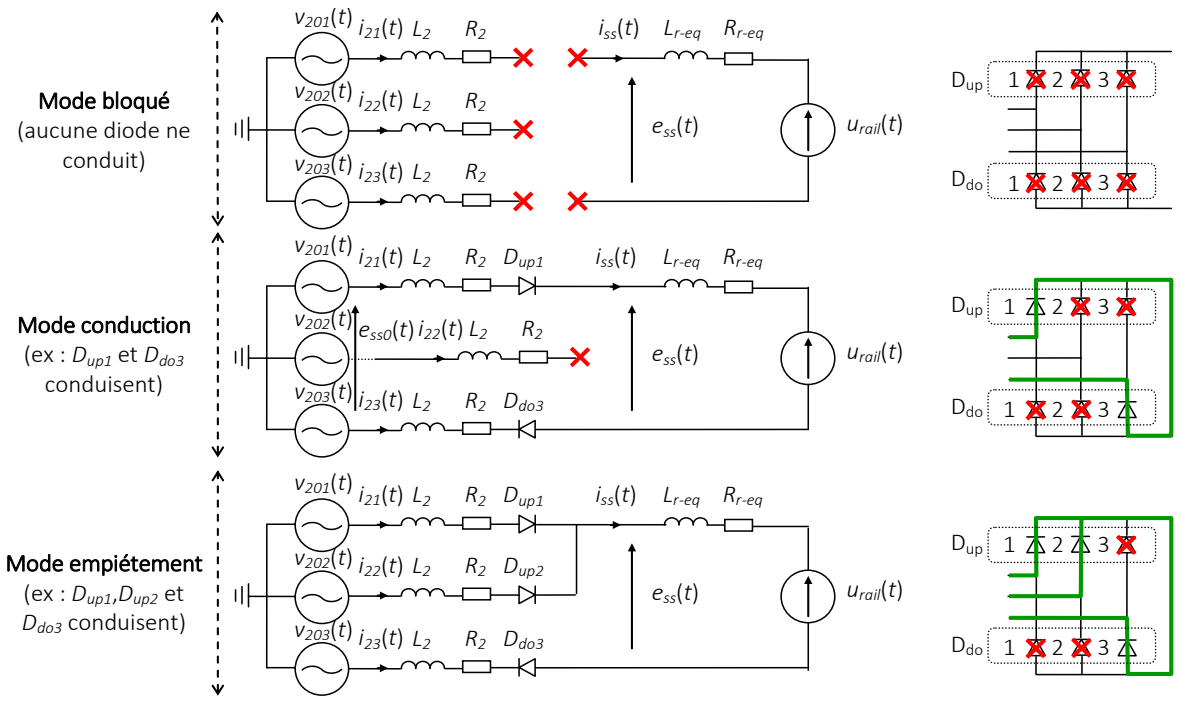


Figure A.4 : Représentation structurelle des différents modes du redresseur.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

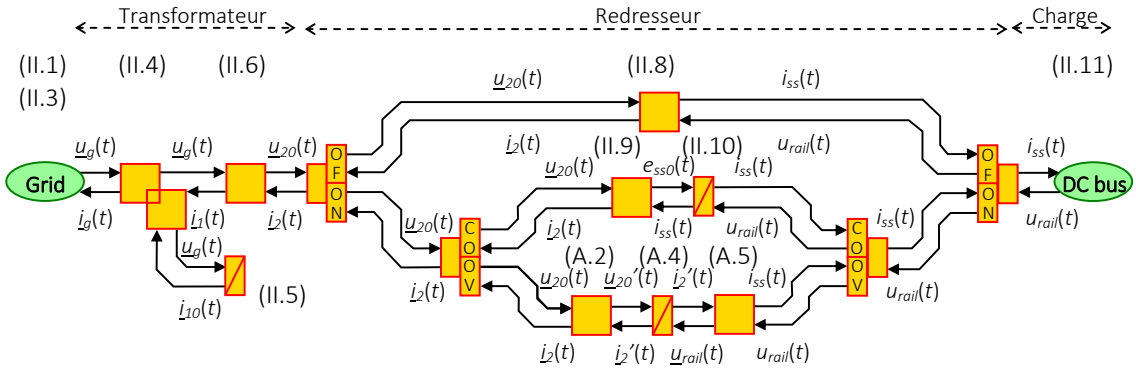


Figure A.5 : REM d'une station d'alimentation non-réversible prenant en compte le mode empiétement.

$$\begin{cases} \underline{u}_{20}'(t) = [\underline{T}(\underline{m}_{rec}(t))]\underline{u}_{20}(t) \\ \underline{i}_2(t) = [\underline{T}(\underline{m}_{rec}(t))]^t \underline{i}_2'(t) \end{cases} \tag{A.2}$$

$$[\underline{T}(\underline{m}_{rec}(t))] = \begin{bmatrix} m_{rec1}(t) & \dfrac{m_{rec2}(t) - m_{rec1}(t)}{2} \\ -\dfrac{m_{rec2}(t) - m_{rec3}(t)}{2} & \dfrac{m_{rec2}(t) - m_{rec3}(t)}{2} \end{bmatrix} \tag{A.3}$$

$$\underline{i}_2'(t) = \frac{1}{L_{eq}\sigma} \int \{[\underline{A}]\underline{u}_{rail}(t) - [\underline{B}]\underline{u}_{20}'(t) - [\underline{C}]\underline{i}_2'(t)\} dt$$

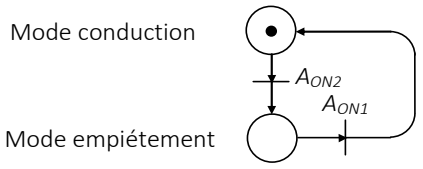
$$\text{avec} \begin{cases} [\underline{A}] = \begin{bmatrix} M-1 & 0 \\ 0 & M-1 \end{bmatrix} \\ [\underline{B}] = \begin{bmatrix} -1 & M \\ M & -1 \end{bmatrix} \\ [\underline{C}] = \begin{bmatrix} R_2 + R_{M-eq}(1-M) & R_{eq}(1-M) - R_2 \\ R_{eq}(1-M) - R_2 & R_2 + R_{M-eq}(1-M) \end{bmatrix} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} R_{M-eq} = R_2 + R_{r-eq} \\ L_{M-eq} = L_2 + L_{r-eq} \\ M = \dfrac{L_{M-eq}}{L_{eq}} \\ \sigma = 1 - M^2 \end{cases} \tag{A.4}$$

$$\begin{cases} \underline{u}_{rail}(t) = \begin{bmatrix} u_{rail}(t) \\ u_{rail}(t) \end{bmatrix} \\ i_{ss}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \underline{i}_2'(t) \end{cases} \tag{A.5}$$

Commutations de modèles

Les modèles obtenus permettent une modélisation précise et dynamique des valeurs instantanées d'une sous-station classique. Cependant, les modèles des différents modes doivent être activés en fonction de l'état du redresseur. Un premier réseau de Pétri [ZUR 94] a été défini dans ce mémoire pour distinguer les modes bloqué et passant (cf. Figure II.5). Un second réseau de Pétri est alors utilisé pour activer les modes de conduction ou d'empiétement quand le mode passant est choisi dans le premier réseau (Figure A.6) [MAY 16]. Des conditions sont définies pour activer les différents états du réseau de Pétri. Lorsque le redresseur est passant, les modes de conduction (CO) et empiétement (OV) sont donc activés en fonction des rapports de modulation $\underline{m}_{rec}(t)$ (A_{ON1} et A_{ON2}).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr



$$A_{ON1}: \sum_{i=1}^{3} m_{reci}(t) = 0$$

$$A_{ON2}: \sum_{i=1}^{3} m_{reci}(t) \neq 0$$

Figure A.6 : Conditions d'activation des modes conduction et empiétement lorsque le redresseur est passant.

La détermination de l'état (passant ou bloqué) des diodes s'effectue de la même façon que dans ce mémoire (cf. Figure II.5). Cependant, les tensions nécessaires $\underline{v}_2(t)$ doivent être déterminées également pendant le mode empiétement (elles le sont dans le mémoire pour les modes bloqué et en conduction). Elles sont donc déterminées par la relation (A.6) pour le mode empiétement.

$$\underline{v}_2(t) = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}\left\{\underline{u}_{20}(t) - R_2\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}\underline{i}_2(t) - L_2\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}\frac{d}{dt}\underline{i}_2(t)\right\} \quad \text{avec} \tag{A.6}$$

$$\frac{d}{dt}\underline{i}_2(t) = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{pour le mode bloqué} \\ \frac{1}{L_{eq}}\left[\left[\underline{Y}\right]\underline{m}_{rec}(t)\right]\left(e_{ss0}(t) - u_{rail}(t) - R_{eq} i_{ss}(t)\right) & \text{pour la conduction} \\ \left[\underline{T}\left(\underline{m}_{rec}(t)\right)\right]^t \left(\frac{\left[\underline{A}\right]\underline{u}_{rail}(t) - \left[\underline{B}\right]\underline{u}_{20}'(t) - \left[\underline{C}\right]\underline{i}_{20}'(t)}{L_{eq}\sigma}\right) & \text{pour l'empiétement} \end{cases}$$

Un exemple de succession des modes de conduction et d'empiétement est montré ci-après (Figure A.7).

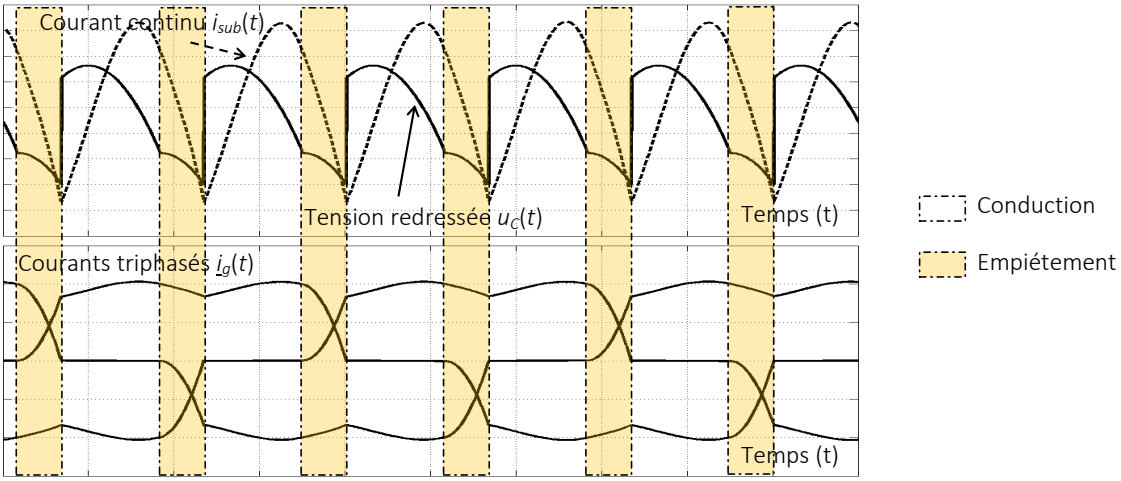


Figure A.7 : Exemple de fonctionnements successifs des modes conduction et empiétement.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Annexe 3 – Plate-forme expérimentale : émulateur d'un carrousel de métros

L'objectif de la plate-forme est de reproduire le comportement d'une ligne de métro composée de 2 rames et d'une station d'alimentation. Cette plate-forme est constituée d'une station d'alimentation réelle à échelle réduite, de 2 rhéostats commandables, de 2 bus continus, de 2 hacheurs simples, et d'une source de tension $U_{DC}(t)$ continue réversible (Figure A.8). Les échelles appliquées pour le développement de la plate-forme sont de 1/10 sur la tension (75 V au lieu de 750 V) et de 1/100 sur le courant. Ainsi, une échelle de 1/1000 en puissance est considérée.

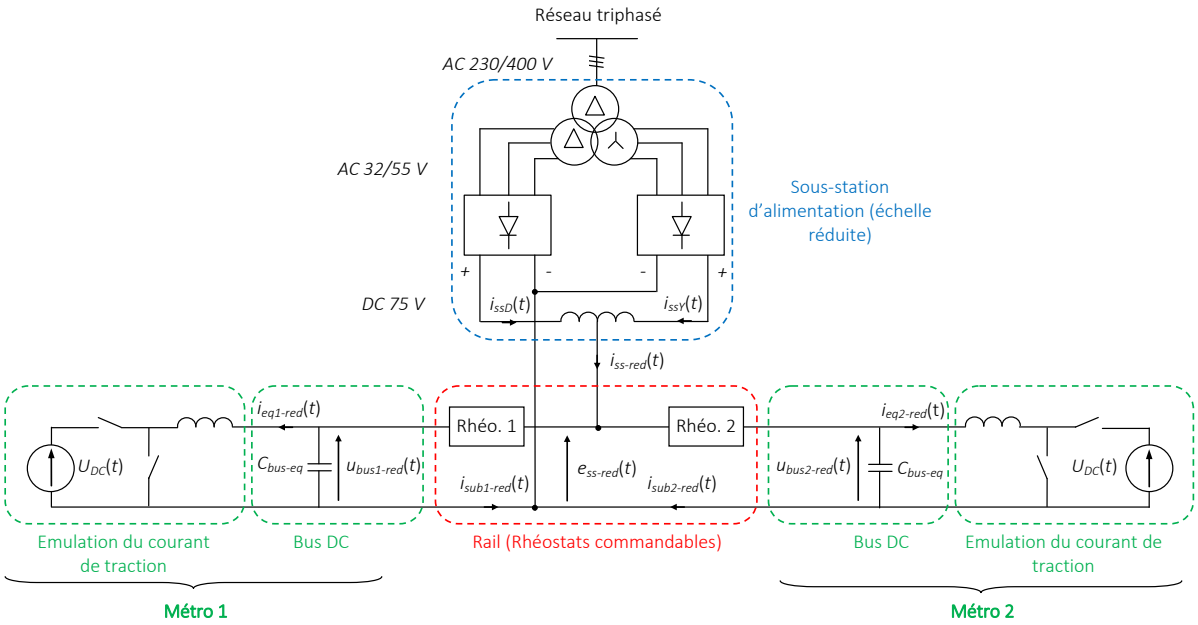


Figure A.8 : Structure de la plate-forme expérimentale.

La station d'alimentation – La sous-station délivre une tension redressée moyenne de 75 V. Elle est conçue de façon à étudier différents types de sous-station. Elle est constituée d'un transformateur à 2 secondaires (dodécaphasé), de 2 ponts redresseurs, et d'une inductance de couplage. Ces différents éléments peuvent être connectés ensemble de différentes façons afin de réaliser plusieurs types de station d'alimentation. La sous-station accepte une puissance apparente de 5 kVA et un courant continu de 20 A.

Les rhéostats motorisés – Les rhéostats reproduisent le comportement variable des paramètres du rail d'alimentation. Ils imposent une résistance allant de 0 à 4 Ω en absorbant un courant ($i_{sub\text{-}red}(t)$) de 15 A maximum sur toute la plage de la valeur ohmique.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Ces appareils sont équipés de moteurs à courant continu dont l'alimentation s'effectue par une alimentation DC de 48 V (Figure A.9). Ils évoluent suivant les 2 sens de rotation avec une vitesse réglable entre 0 et 0,41 tr/min, soit 0 à 2 Ω/min. Cette vitesse est proportionnelle à la vitesse de la rame et est réglée par une entrée analogique de tension 0-10 V. La vitesse est linéaire par rapport à cette tension (Figure A.10). La variation de résistance est réalisée par le déplacement d'un curseur en rotation sur les spires des résistances (le curseur représente donc la rame – sa position sur les spires de la résistance est l'image de la position du véhicule sur la ligne de métro). La tension de contrôle 0-10 V est imposée par une sortie numérique analogique de carte dSPACE 1103.

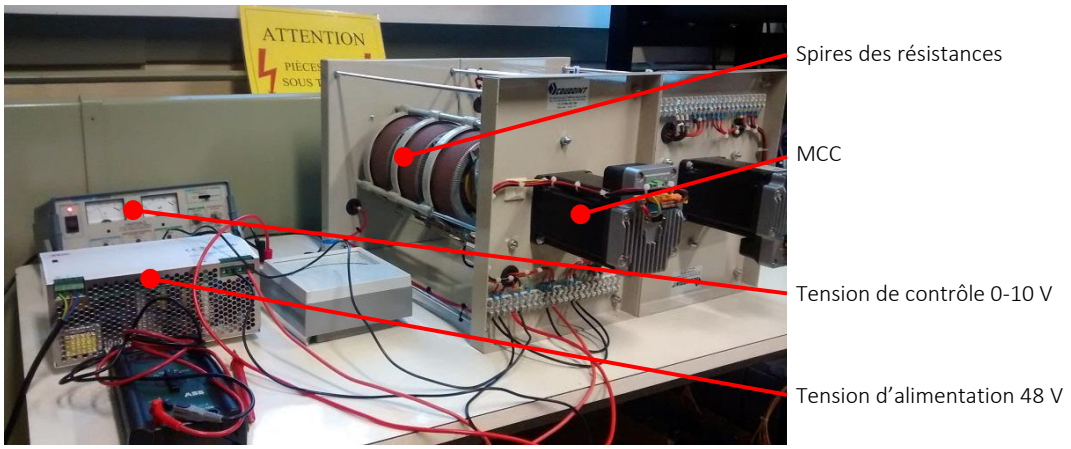


Figure A.9 : Rhéostats motorisés commandables.

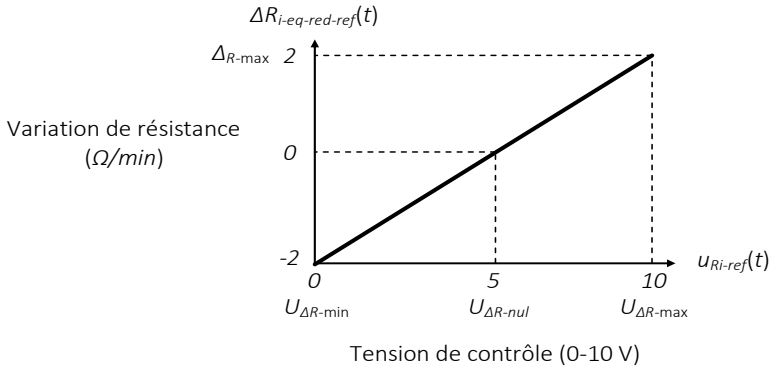


Figure A.10 : Loi de commande en vitesse (variation de résistance) des rhéostats motorisés.

Cependant, afin de reproduire le comportement des rails de façon suffisante il faut pouvoir garantir la valeur de résistance des rhéostats, et non uniquement leur variation comme le permet le contrôle 0-10 V implanté. Ainsi, un asservissement spécifique de résistance est développé.

Les rhéostats représentent les résistances des portions de rails mises en série avec les parties résistives des bobines de filtrage des rames (cf. Figure III.8). En effet, contrairement au bus DC intégrés dans la plate-forme, les bobines de filtrage ne sont effectivement pas considérées. Leurs parties résistives sont donc prises en compte via les rhéostats.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Les valeurs de résistances (pleine échelle) sont définies par la relation (A.7). La résistance équivalente des bobines des rames $R_{f\text{-}eq}$ est fonction de la résistance d'une bobine r_f et du nombre de bogies de traction d'une rame. La résistance équivalente des rails est donnée en fonction des positions simulées des rames sur la ligne $x_{subj}(t)$ et de la station d'alimentation x_{ss}, ainsi que des résistances linéiques des rails positifs et négatifs ($r_{lin\text{-}pos}$ et $r_{lin\text{-}neg}$) (cf. Figure III.8).

$$R_{j-eq-ref}(t) = R_{f-eq} + R_{rj-eq}(x) \quad \text{avec} \quad R_{f-eq} = \frac{r_f}{N_{car/rame} N_{bo/car}} \qquad \text{(A.7)}$$
$$\text{et} \quad R_{rj-eq}(x) = \left| x_{ss} - x_{subj}(t) \right| \left(r_{lin-pos} + r_{lin-neg} \right)$$

Cependant, au vu des facteurs d'échelles imposés, les résistances à reproduire par les 2 rhéostats sont également définies via un coefficient d'adaptation (A.8).

$$R_{j-eq-red-ref}(t) = K_{scale-z} R_{j-eq-ref}(t) \quad \text{avec} \quad K_{scale-z} = \frac{K_{scale-v}}{K_{scale-i}} \qquad \text{(A.8)}$$

Un asservissement de résistance est ensuite imposé sur chaque rhéostat pour contrôler les valeurs des résistances de références à imposer. Ainsi, un correcteur proportionnel $k_{p\text{-}R}$ est défini. Son temps de réponse correspond à la dynamique mécanique de la rame. Il peut donc être relativement faible (100 ms environ).

$$\Delta R_{j-eq-red-ref}(t) = k_{p-R} \left(R_{j-eq-red-ref}(t) - R_{j-eq-red-est}(t) \right) \qquad \text{(A.9)}$$

Il permet d'obtenir une variation de résistance de référence $\Delta R_{i\text{-}eq\text{-}red\text{-}ref}$ qui est convertie en tension de contrôle 0-10 V en accord avec la loi de commande en vitesse des rhéostats (A.10) (cf. Figure A.10). La conversion ci-après est retenue avec $U_{\Delta R\text{-}nul}$ la tension de contrôle où la variation de résistance est nulle, $U_{\Delta R\text{-max}}$ la tension de variation maximale de résistance, $U_{\Delta R\text{-min}}$ la tension de variation minimale de résistance, et $\Delta_{R\text{-max}}$ la variation de résistance maximale en Ω/s. Pour les rhéostats utilisés les différentes valeurs sont répertoriées dans le Tableau A.2.

$$u_{Rj-ref}(t) = U_{\Delta R-nul} + \frac{\Delta R_{j-eq-red-ref}(t)}{K_{\Delta R}} \quad \text{avec} \quad U_{\Delta R-nul} = \frac{U_{\Delta R-\max} + U_{\Delta R-\min}}{2} \qquad \text{(A.10)}$$
$$\text{et} \quad K_{\Delta R} = \frac{2\Delta_{R-\max}}{U_{\Delta R-\max} - U_{\Delta R-\min}}$$

Tableau A.2 : Paramètres d'un rhéostat motorisé.

	Symbole	Valeur
Tension de variation de résistance maximale	$U_{\Delta R\text{-min}}$	10 V
Tension de variation de résistance nulle	$U_{\Delta R\text{-nul}}$	5 V
Tension de variation de résistance minimale	$U_{\Delta R\text{-max}}$	0 V
Variation de résistance maximale	$\Delta_{R\text{-max}}$	0,0333 Ω/s
Gain entre tension et variation de résistance	$K_{\Delta R}$	0,047

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Cet asservissement de résistance reproduit un comportement résistif proche de celui des rails. Une des difficultés provient cependant de la mesure de la valeur de résistance nécessaire pour l'asservissement. Cette résistance est donc estimée au travers d'une mesure de courant et de tension aux bornes de chaque rhéostat. Deux mesures de courant et 3 mesures de tension sont donc nécessaires (A.11).

$$R_{j-eq-red-est}(t) = \frac{u_{busj-red-mes}(t) - e_{ss-red-mes}(t)}{i_{busj-red-mes}(t)} \tag{A.11}$$

Néanmoins, cette estimation n'est pas possible en cas de faible valeur du courant circulant dans les rhéostats (dans ces travaux cette valeur a été choisi à 0,6 A). Dans ce cas, le choix est fait d'uniquement contrôler la variation de résistance dans les rhéostats. Celle-ci est l'image de la vitesse de la rame est peut être simplement définie par l'équation suivante, où $Dir_{subj}(t)$ est la direction de la rame (1 pour la direction 1 et -1 pour la direction 2). Ainsi, dès lors que l'asservissement n'est plus réalisable en raison de l'impossibilité d'estimer la résistance des rhéostats, cette loi de commande plus simpliste prend le relai jusqu'à ce que le courant redevienne suffisant. Les erreurs commises restent donc très légères et sont rattrapées à chaque fois que l'estimation du courant est possible.

$$\Delta R_{j-eq-red-ref}(t) = Dir_{subj}(t) v_{subj}(t) K_{scale-z}\left(r_{lin-pos} + r_{lin-neg}\right) \tag{A.12}$$

Ainsi, la commande finale est représentée en schéma bloc sur la Figure A.11.

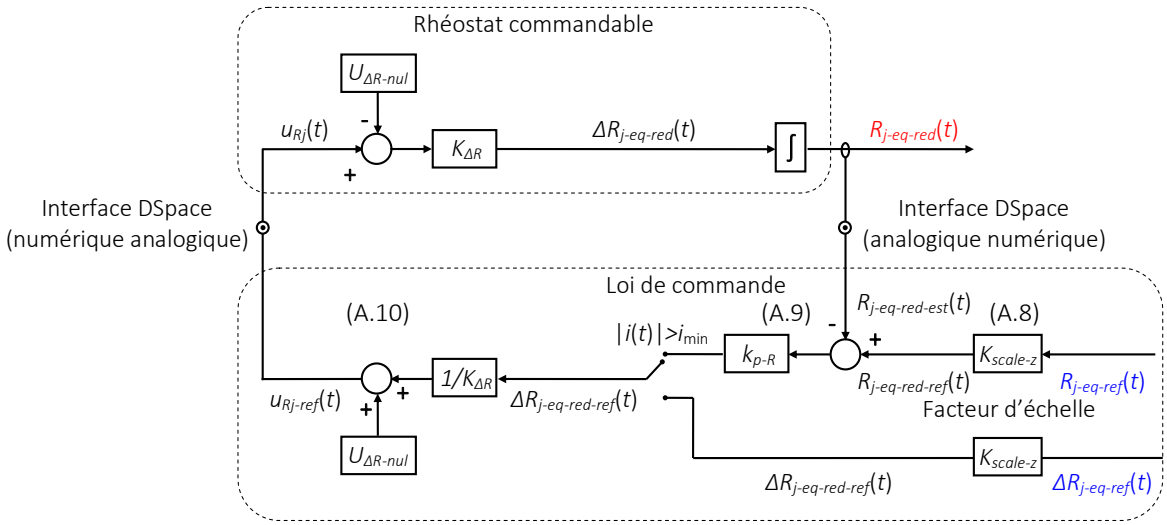


Figure A.11 : Loi de commande en résistance des rhéostats motorisés.

Enfin, les hacheurs et bobines émulent le comportement énergétique des rames comme présenté dans ce mémoire (cf. § III.3.a).

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Annexe 4 – Résolution du conflit d'association du matériel roulant

La transmission mécanique considérée est composée d'un arbre mécanique en sortie de la machine sur lequel est couplé un disque de frein (Figure A.12). On trouve dans le modèle une addition des couples des machines électriques $T_{sm}(t)$ et des freins mécaniques $T_{bk}(t)$ (A.13). Ces derniers sont supposés identiques aux couples de freinage mécanique de références $T_{bk\text{-}ref}(t)$ puisqu'un modèle statique est considéré (A.14). L'association des couples est représentée par un élément de couplage, alors que les freins mécaniques le sont par une source de couple (Figure A.13). De plus, l'inertie globale J_{sh} est considérée pour l'arbre et le disque de frein (A.15). Elle est représentée par un élément d'accumulation d'énergie mécanique.

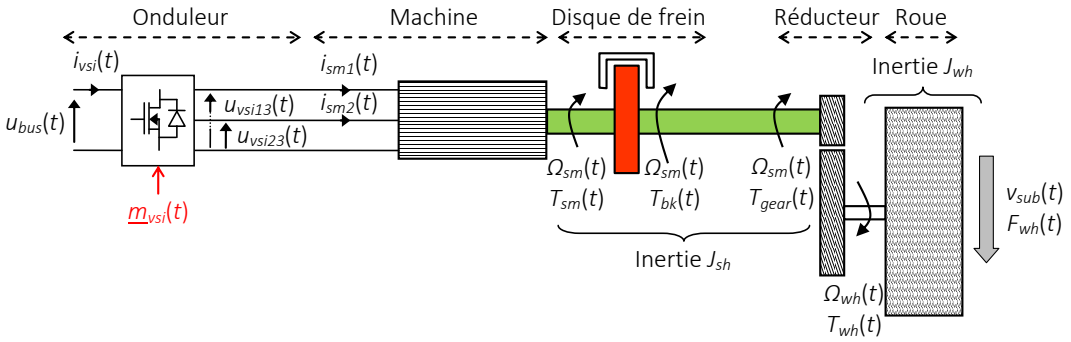


Figure A.12 : Représentation structurelle de la transmission mécanique.

$$T_{trans}(t) = T_{sm}(t) + T_{bk}(t) \tag{A.13}$$

$$\text{avec} \quad T_{bk}(t) = T_{bk-ref}(t) \tag{A.14}$$

$$J_{sh}\frac{d}{dt}\Omega_{sm}(t) = T_{trans}(t) - T_{gear}(t) \tag{A.15}$$

Un réducteur mécanique et une roue se trouvent en sortie d'arbre et lient les machines avec le châssis du véhicule. Le réducteur convertit les variables de rotation entre l'arbre mécanique (vitesse $\Omega_{sm}(t)$ et couple $T_{gear}(t)$ appliqués au réducteur) et la roue (vitesse $\Omega_{wh}(t)$ et couple $T_{wh}(t)$ appliqués à la roue) (A.16). La roue convertit quant à elle les grandeurs angulaires (vitesse $\Omega_{wh}(t)$ et couple $T_{wh}(t)$) en variables linéaires (vitesse $v_{sub}(t)$ et force $F_{wh}(t)$) (A.18). Les équations ci-après modélisent ces composants, avec K_{gear} le rapport de réduction du réducteur, R_{wh} le rayon de la roue, η_{gear} le rendement du réducteur, et J_{wh} l'inertie de la roue (A.17). La REM fait apparaitre 2 éléments de conversion représentant la conversion mécanique-mécanique de la transmission associés à un élément d'accumulation représentant le stockage d'énergie mécanique dans la roue.

$$\begin{cases} T_{wh}(t) = \eta_{gear}^{k} K_{gear} T_{gear}(t) \\ \Omega_{sm}(t) = K_{gear}\Omega_{wh}(t) \end{cases} \quad \text{avec} \quad k = \begin{cases} 1 & \text{quand} \quad T_{wh}(t)\Omega_{wh}(t) > 0 \\ -1 & \text{quand} \quad T_{wh}(t)\Omega_{wh}(t) \leq 0 \end{cases} \tag{A.16}$$

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

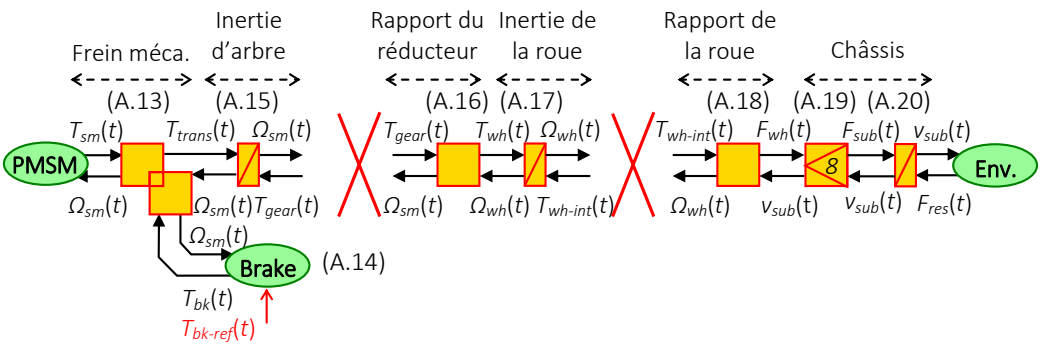


Figure A.13 : REM de la transmission mécanique générant des conflits d'association.

$$J_{wh}\frac{d}{dt}\Omega_{wh}(t)=T_{wh}(t)-T_{wh-\text{int}}(t) \tag{A.17}$$

$$\begin{cases} F_{wh}(t)=\dfrac{T_{wh-\text{int}}(t)}{R_{wh}} \\ \Omega_{wh}(t)=\dfrac{v_{sub}(t)}{R_{wh}} \end{cases} \tag{A.18}$$

Les différentes forces $F_{wh}(t)$ développées aux roues du véhicule sont liées par le châssis pour générer une force totale $F_{sub}(t)$ et ainsi mettre en mouvement la rame. En raison de l'hypothèse initiale, cette force est la résultante de la force imposée sur une roue multipliée par le nombre de roues motorisées (A.19) (cf. § II.2.a). Ce couplage est représenté par un élément d'adaptation. De plus, la masse statique de la rame M_{sub} (incluant les passagers) est prise en compte par l'équation fondamentale de la dynamique. Elle exprime la vitesse linéaire du véhicule $v_{sub}(t)$ en fonction de la force $F_{sub}(t)$ et de la force résistante $F_{res}(t)$ (A.20). Un élément d'accumulation représente le châssis.

$$F_{sub}(t)=N_{car/rame}N_{bo/car}N_{mr/bo}F_{wh}(t) \tag{A.19}$$

$$M_{sub}\frac{d}{dt}v_{sub}(t)=F_{sub}(t)-F_{res}(t) \tag{A.20}$$

Plusieurs conflits d'association apparaissent avec cette REM (cf. Figure A.13). Chaque inertie impose effectivement la même variable cinétique (vitesse de rotation ou linéaire), mais à des emplacements différents. Or, ces variables sont liées par des relations rigides. Il n'existe en réalité qu'une seule variable énergétique (ou variable d'état). Nous choisissons la vitesse $v_{sub}(t)$ car elle correspond à l'objectif de la commande. De plus, c'est cette masse qui stocke le plus d'énergie.

La résolution des conflits d'association est effectuée en appliquant les lois de permutation et de concaténation [BOU 12]. Les inerties sont ramenées au niveau de la masse statique. Une masse dynamique équivalente M_{sub-eq} est définie pour conserver la même quantité d'énergie cinétique $W_{méca-tot}(t)$ stockée dans les parties mécaniques. Cette énergie est la somme des énergies stockées dans le châssis, dans les roues et dans les arbres et freins mécaniques (A.21) avec $W_{mass}(t)$ l'énergie stockée dans la masse statique M_{sub}, $W_{sh}(t)$ l'énergie stockée dans une inertie J_{sh}, et $W_{wh}(t)$ l'énergie stockée dans une inertie J_{wh}. Cette énergie peut s'exprimer par la relation (A.22). La masse dynamique équivalente recherchée M_{sub-eq} doit stocker la même quantité d'énergie (A.23), soit (A.24).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

$$W_{méca-tot}(t) = W_{mass}(t) + N_{car/rame} N_{bo/car} N_{mr/bo} \left[W_{sh}(t) + W_{wh}(t) \right] \tag{A.21}$$

$$W_{méca-tot}(t) = \frac{1}{2} M_{sub} v_{sub}(t)^2 + N_{car/rame} N_{bo/car} N_{mr/bo} \left[\frac{1}{2} J_{sh} \Omega_{sm}(t)^2 + \frac{1}{2} J_{wh} \Omega_{wh}(t)^2 \right] \tag{A.22}$$

$$W_{méca-tot}(t) = \frac{1}{2} M_{sub-eq} v_{sub}(t)^2 \tag{A.23}$$

avec $$M_{sub-eq} = M_{sub} + N_{car/rame} N_{bo/car} N_{mr/bo} \left(\frac{J_{wh} + J_{sh} K_{gear}^2}{R_{wh}^2} \right) \tag{A.24}$$

La variable cinétique commune $v_{sub}(t)$ s'exprime donc par la seconde loi de Newton en prenant en compte cette masse dynamique équivalente (A.25).

$$M_{sub-eq} \frac{d}{dt} v_{sub}(t) = F_{sub}(t) - F_{res}(t) \tag{A.25}$$

La REM finale de la partie mécanique (Figure A.14) possède un élément de couplage afin de représenter l'association du disque de frein sur l'arbre de la machine (A.13). Un élément de conversion représente la conversion mécanique-mécanique de la transmission (cf. relation II.42, définie par A.16 et A.18). Un élément d'adaptation représente le couplage des différentes roues sur le châssis (A.19), et un unique élément d'accumulation représente la masse dynamique équivalente de l'ensemble de la rame (A.25) (masse statique + inerties + passagers) [MAY 14a].

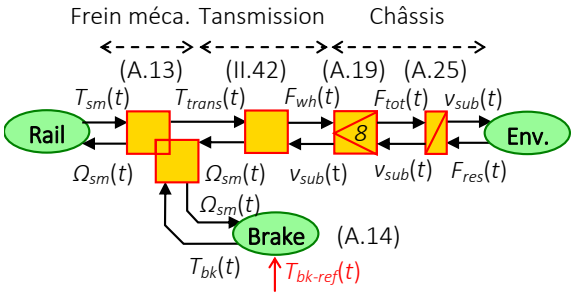


Figure A.14 : REM de la partie mécanique après résolution des conflits d'association.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Annexe 5 – Calcul de la distance de décélération d'une rame

Un cycle pseudo-trapézoïdal se décompose en 3 phases : une phase d'accélération, une phase à vitesse constante, et une phase de décélération (Figure A.15). De plus, la phase de décélération peut aussi être découpée en 3 parties : une partie à jerk négatif constant (J_{dec-}), une partie à décélération négative constante (J_{dec0}), et une partie à jerk positif contant (J_{dec+}). Les équations générales d'accélération, de vitesse et de position sont rappelées. Elles sont définies par les relations suivantes avec $J(t)$ le jerk (considéré constant par intervalles d'une valeur $\pm J_{max}$), $\gamma(t)$ l'accélération, $v(t)$ la vitesse, et $x(t)$ la position. Les indices 0 signifient que ce sont des conditions initiales.

$$\frac{d}{dt}\gamma(t) = J(t) \quad \text{soit} \quad \gamma(t) = \pm J_{max} t + \gamma_0 \tag{A.26}$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \gamma(t) \quad \text{soit} \quad v(t) = \pm\frac{1}{2}J_{max}t^2 + \gamma_0 t + v_0 \tag{A.27}$$

$$\frac{d}{dt}x(t) = v(t) \quad \text{soit} \quad x(t) = \pm\frac{1}{6}J_{max}t^3 + \frac{1}{2}\gamma_0 t^2 + v_0 t + x_0 \tag{A.28}$$

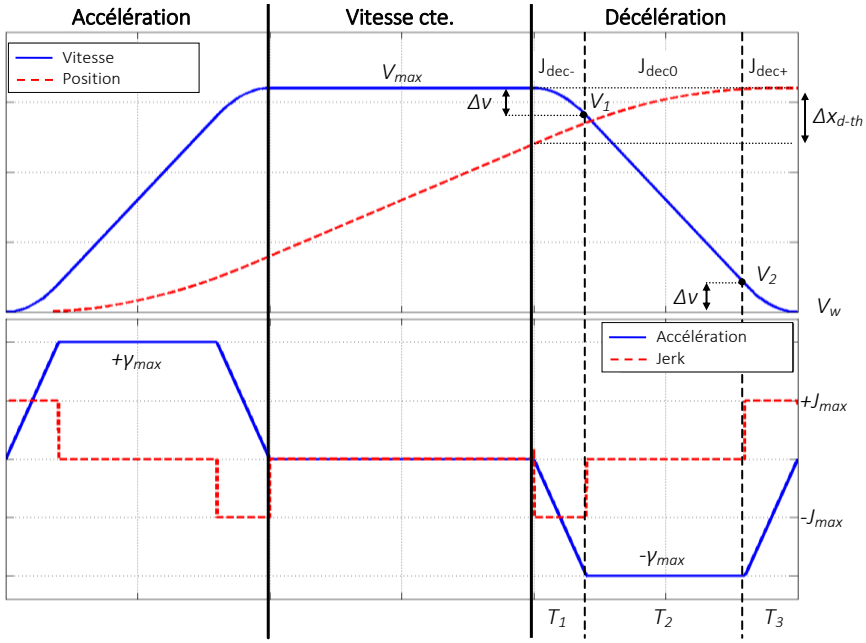


Figure A.15 : Profil de vitesse type pseudo-trapézoïdal.

La distance de décélération théorique Δx_{d-th} peut ainsi être calculée à partir du profil considéré et des équations (A.26), (A.27), et (A.28).

Etude de la partie J_{dec-} – La durée de cette partie est définie à partir de la relation (A.26). Pendant cette partie un jerk négatif constant $-J_{max}$ est imposé. T_1 s'exprime donc par la relation (A.29). La distance parcourue pendant cette partie Δx_{dec-}, calculée à partir de (A.28), s'exprime par l'expression (A.30). Par ailleurs, la relation exprimant la vitesse V_1 à la fin de J_{dec-} est définie par (A.31).

© 2016 Tous droits réservés.

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

$$-\gamma_{\max} = -J_{\max} T_1 \quad \text{soit} \quad T_1 = \frac{\gamma_{\max}}{J_{\max}} \tag{A.29}$$

$$\Delta x_{dec-} = -\frac{1}{6} J_{\max} T_1^{\,3} + V_{\max} T_1 \quad \text{soit} \quad \Delta x_{dec-} = V_{\max} \frac{\gamma_{\max}}{J_{\max}} - \frac{1}{6} \frac{\gamma_{\max}^{\,3}}{J_{\max}^{\,2}} \tag{A.30}$$

$$V_1 = -\frac{1}{2} J_{\max} T_1^{\,2} + V_{\max} \quad \text{soit} \quad V_1 = V_{\max} - \frac{1}{2} \frac{\gamma_{\max}^{\,2}}{J_{\max}} \tag{A.31}$$

Etude de la partie J_{dec+} – La durée de cette partie est définie à partir de (A.26). Pendant cette partie un jerk positif constant J_{max} est imposé. T_3 s'exprime donc par la relation (A.32). L'expression de la vitesse V_2, au début de J_{dec+}, est définie par (A.33). La distance Δx_{dec+}, parcourue pendant cette partie, s'exprime donc par la relation (A.34).

$$0 = J_{\max} T_3 - \gamma_{\max} \quad \text{soit} \quad T_3 = \frac{\gamma_{\max}}{J_{\max}} = T_1 \tag{A.32}$$

$$V_w = \frac{1}{2} J_{\max} T_1^{\,2} - \gamma_{\max} T_1 + V_2 \quad \text{soit} \quad V_2 = V_W + \frac{1}{2} \frac{\gamma_{\max}^{\,2}}{J_{\max}} \tag{A.33}$$

$$\Delta x_{dec+} = \frac{1}{6} J_{\max} T_3^{\,3} - \frac{1}{2} \gamma_{\max} T_3^{\,2} + V_2 T_3 \quad \text{soit} \quad \Delta x_{dec+} = \frac{1}{6} \frac{\gamma_{\max}^{\,3}}{J_{\max}^{\,2}} + \frac{\gamma_{\max}}{J_{\max}} V_W \tag{A.34}$$

Etude de la partie J_{dec0} – La durée de cette partie est définie à partir de la relation (A.27). Pendant cette partie un jerk nul est imposé, ce qui conduit à une accélération négative constante $-\gamma_{max}$. T_2 s'exprime alors par la relation (A.35). La distance parcourue pendant cette partie Δx_{dec0}, calculée à partir de (A.28), s'exprime donc par (A.36).

$$V_2 = -\gamma_{\max} T_2 + V_1 \quad \text{soit} \quad T_2 = \frac{V_1 - V_2}{\gamma_{\max}} = \frac{V_{\max} - V_W}{\gamma_{\max}} - \frac{\gamma_{\max}}{J_{\max}} \tag{A.35}$$

$$\Delta x_{dec0} = -\frac{1}{2} \gamma_{\max} T_2^{\,2} + V_1 T_2 \quad \text{soit} \quad \Delta x_{dec0} = \frac{1}{2\gamma_{\max}} \left(V_{\max}^{\,2} - V_w^{\,2} \right) - \frac{1}{2} \frac{\gamma_{\max}}{J_{\max}} \left(V_{\max} + V_w \right) \tag{A.36}$$

La distance théorique $\Delta x_{d\text{-}th}$ parcourue pendant toute la phase de décélération s'exprime par l'expression ci-dessous (A.37).

$$\Delta x_{d-th} = \Delta x_{dec-} + \Delta x_{dec0} + \Delta x_{dec+} \quad \text{soit} \quad \Delta x_{d-th} = \frac{1}{2\gamma_{\max}} \left(V_{\max}^{\,2} - V_w^{\,2} \right) + \frac{1}{2} \frac{\gamma_{\max}}{J_{\max}} \left(V_{\max} + V_w \right) \tag{A.37}$$

Cette distance provient d'un calcul théorique et détermine la distance parcourue pour ralentir d'une vitesse maximale connue V_{max}, à une vitesse cible connue V_W. Néanmoins, la vitesse maximale réelle $v_{sub\text{-}max}(t)$ peut ne pas correspondre à V_{max} (Figure A.16). La vitesse réellement atteinte peut différer de celle attendue en cas de limitation des couples des machines par exemple. La distance nécessaire au ralentissement de la rame $\Delta x_d(t)$ peut donc être calculée à partir de la vitesse $v_{sub}(t)$ et de l'accélération $\gamma_{sub}(t)$ instantanées de la rame. Les calculs suivants déterminent $\Delta x_d(t)$ en considérant la rame dans une phase quelconque (accélération, décélération, ou vitesse constante).

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

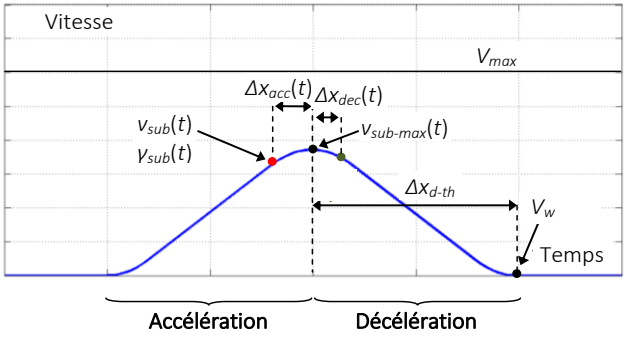


Figure A.16 : Profil de vitesse en fonction des grandeurs instantanées du système.

Rame en accélération – La distance parcourue $\Delta x_d(t)$ s'exprime par (A.38).

$$\Delta x_d(t) = \Delta x_{acc}(t) + \Delta x_{d-th} \tag{A.38}$$

La durée $T_{acc}(t)$ pendant laquelle la rame parcourt $\Delta x_{acc}(t)$ s'exprime à partir de l'accélération instantanée du véhicule (A.39). La vitesse maximale réelle $v_{sub\text{-}max}(t)$ atteinte à la fin de cette accélération s'exprime par la relation (A.40). Enfin, la distance $\Delta x_{acc}(t)$ est déterminée par (A.41).

$$0 = -J_{\max} T_{acc}(t) + \gamma_{sub}(t) \quad \text{soit} \quad T_{acc}(t) = \frac{\gamma_{sub}(t)}{J_{\max}} \tag{A.39}$$

$$v_{sub-\max}(t) = v_{sub}(t) - \frac{1}{2} J_{\max} T_{acc}(t)^2 + \gamma_{sub}(t) T_{acc}(t) \quad \text{soit} \quad v_{sub-\max}(t) = \frac{1}{2} \frac{\gamma_{sub}(t)^2}{J_{\max}} + v_{sub}(t) \tag{A.40}$$

$$\begin{aligned} &\Delta x_{acc}(t) = -\frac{1}{6} J_{\max} T_{acc}(t)^3 + \frac{1}{2} \gamma_{sub}(t) T_{acc}(t)^2 + v_{sub}(t) T_{acc}(t) \\ &\text{soit} \quad \Delta x_{acc}(t) = \frac{1}{3} \frac{\gamma_{sub}(t)^3}{J_{\max}^{\ 2}} + \frac{\gamma_{sub}(t)}{J_{\max}} v_{sub}(t) \end{aligned} \tag{A.41}$$

Finalement, la distance de décélération théorique $\Delta x_{d\text{-}th}$ calculée précédemment peut également être exprimée en fonction des valeurs instantanées de la vitesse et de l'accélération réelles de la rame. Il suffit pour cela d'injecter l'expression (A.40) dans (A.37).

$$\begin{aligned} &\Delta x_{d-th}(t) = \frac{1}{2\gamma_{\max}} \left[v_{sub-\max}(t)^2 - V_w^{\ 2} \right] + \frac{\gamma_{\max}}{2J_{\max}} \left[v_{sub-\max}(t) + V_w \right] \quad \text{soit} \\ &\Delta x_{d-th}(t) = \frac{1}{2\gamma_{\max}} \left[v_{sub}(t)^2 + \frac{\gamma_{sub}(t)^4}{4J_{\max}^{\ 2}} + \frac{\gamma_{sub}(t)^2}{J_{\max}} v_{sub}(t) - V_w^{\ 2} \right] + \frac{\gamma_{\max}}{2J_{\max}} \left[v_{sub}(t) + \frac{1}{2} \frac{\gamma_{sub}(t)^2}{J_{\max}} + V_w \right] \end{aligned} \tag{A.42}$$

La distance instantanée réellement nécessaire à la décélération du véhicule s'exprime donc par la relation suivante. Elle correspond à la distance que parcourra la rame pour ralentir de sa vitesse instantanée $v_{sub}(t)$ à une vitesse cible V_w.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

$$\Delta x_d(t) = \Delta x_{acc}(t) + \Delta x_{d-th}(t) \quad \text{soit}$$

$$\Delta x_d(t) = \frac{1}{3}\frac{\gamma_{sub}(t)^3}{J_{\max}^2} + \frac{\gamma_{sub}(t)}{J_{\max}} v_{sub}(t) + \frac{1}{2\gamma_{\max}}\left[v_{sub}(t)^2 + \frac{\gamma_{sub}(t)^4}{4J_{\max}^2} + \frac{\gamma_{sub}(t)^2}{J_{\max}} v_{sub}(t) - V_w^2 \right] \tag{A.43}$$
$$+ \frac{\gamma_{\max}}{2J_{\max}}\left[v_{sub}(t) + \frac{1}{2}\frac{\gamma_{sub}(t)^2}{J_{\max}} + V_w \right]$$

Rame en décélération – La distance parcourue $\Delta x_d(t)$ s'exprime par (A.44).

$$\Delta x_d(t) = -\Delta x_{dec}(t) + \Delta x_{d-th} \tag{A.44}$$

La durée $T_{dec}(t)$ pendant laquelle la rame parcourt $\Delta x_{dec}(t)$ s'exprime à partir de l'accélération instantanée du véhicule (A.45). La vitesse maximale théorique $v_{sub\text{-}max}(t)$ au début de cette décélération s'exprime par la relation (A.46). Enfin, la distance $\Delta x_{dec}(t)$ est déterminée par (A.47).

$$\gamma_{sub}(t) = -J_{\max} T_{dec}(t) \quad \text{soit} \quad T_{dec}(t) = -\frac{\gamma_{sub}(t)}{J_{\max}} \tag{A.45}$$

$$v_{sub}(t) = -\frac{1}{2} J_{\max} T_{dec}(t)^2 + v_{sub-\max}(t) \quad \text{soit} \quad v_{sub-\max}(t) = v_{sub}(t) + \frac{1}{2}\frac{\gamma_{sub}(t)^2}{J_{\max}} \tag{A.46}$$

$$\Delta x_{dec}(t) = -\frac{1}{6} J_{\max} T_{dec}(t)^3 + v_{sub-\max}(t) T_{dec}(t) \quad \text{soit} \quad \Delta x_{dec}(t) = -\frac{1}{3}\frac{\gamma_{sub}(t)^3}{J_{\max}^2} - \frac{\gamma_{sub}(t)}{J_{\max}} v_{sub}(t) \tag{A.47}$$

Finalement, la distance de décélération théorique $\Delta x_{d\text{-}th}$ calculée précédemment peut également être exprimée en fonction des valeurs instantanées de la vitesse et de l'accélération réelles de la rame. Il suffit pour cela d'injecter l'expression (A.46) dans (A.37).

$$\Delta x_{d-th}(t) = \frac{1}{2\gamma_{\max}}\left[v_{sub-\max}(t)^2 - V_w^2 \right] + \frac{\gamma_{\max}}{2J_{\max}}\left[v_{sub-\max}(t) + V_w \right] \quad \text{soit}$$
$$\Delta x_{d-th}(t) = \frac{1}{2\gamma_{\max}}\left[v_{sub}(t)^2 + \frac{\gamma_{sub}(t)^4}{4J_{\max}^2} + \frac{\gamma_{sub}(t)^2}{J_{\max}} v_{sub}(t) - V_w^2 \right] + \frac{\gamma_{\max}}{2J_{\max}}\left[v_{sub}(t) + \frac{1}{2}\frac{\gamma_{sub}(t)^2}{J_{\max}} + V_w \right] \tag{A.48}$$

La distance instantanée réellement nécessaire à la décélération du véhicule s'exprime donc par la relation suivante. Elle correspond à la distance que parcourra la rame pour ralentir de sa vitesse instantanée $v_{sub}(t)$ à une vitesse cible V_w. On remarque que cette expression est identique à celle calculée lorsque la rame est initialement en phase d'accélération (A.43), ce qui laisse supposer qu'elle est bien générale.

$$\Delta x_d(t) = -\Delta x_{dec}(t) + \Delta x_{d-th} \quad \text{soit}$$
$$\Delta x_d(t) = \frac{1}{3}\frac{\gamma_{sub}(t)^3}{J_{\max}^2} + \frac{\gamma_{sub}(t)}{J_{\max}} v_{sub}(t) + \frac{1}{2\gamma_{\max}}\left[v_{sub}(t)^2 + \frac{\gamma_{sub}(t)^4}{4J_{\max}^2} + \frac{\gamma_{sub}(t)^2}{J_{\max}} v_{sub}(t) - V_w^2 \right] \tag{A.49}$$
$$+ \frac{\gamma_{\max}}{2J_{\max}}\left[v_{sub}(t) + \frac{1}{2}\frac{\gamma_{sub}(t)^2}{J_{\max}} + V_w \right]$$

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

Rame en vitesse de croisière – Lorsque la rame est en vitesse constante, la distance parcourue $\Delta x_d(t)$ s'exprime directement par $\Delta x_{d\text{-}th}$ (A.50).

$$\Delta x_d(t) = \Delta x_{d-th} \; \Delta x_d(t) = \Delta x_{d-th} \tag{A.50}$$

Si l'on reprend l'expression générale (A.49), dans laquelle on remplace la valeur instantanée d'accélération par 0 (vitesse constante) et la vitesse instantanée par V_{max}, on devrait alors retrouver l'équation théorique (A.37).

$$\Delta x_d(t) = \frac{1}{3}\frac{0^3}{J_{\max}{}^2} + \frac{0}{J_{\max}}V_{\max} + \frac{1}{2\gamma_{\max}}\left[V_{\max}{}^2 + \frac{0^4}{4J_{\max}{}^2} + \frac{0^2}{J_{\max}}V_{\max} - V_w{}^2\right]$$

$$+\frac{\gamma_{\max}}{2J_{\max}}\left[V_{\max} + \frac{1}{2}\frac{0^2}{J_{\max}} + V_w\right] \qquad \text{soit} \tag{A.51}$$

$$\Delta x_d(t) = \frac{1}{2\gamma_{\max}}\left[V_{\max}{}^2 - V_w{}^2\right] + \frac{\gamma_{\max}}{2J_{\max}}\left[V_{\max} + V_w\right]$$

Ce dernier cas prouve bien que l'équation de ralentissement (A.49) est générale quelque soit la phase de fonctionnement dans laquelle se trouve la rame.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Bibliographie

A

ABR 11 L. Abrahamsson, and L. Söder, "Fast estimation of relations between aggregated train power system data and traffic performance", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, no. 1, pp. 16 – 29, January 2011.

ACA 10 V. Acary, O. Bonnefon, and B. Brogliato, "Nonsmooth modelling and simulation for switched circuits", *Springer Science & Business Media*, 2010.

ADE 14 ADEME, "Stratégie transports et mobilité – Période 2014-2017", *Orientations stratégiques de l'ADEME*, ADEME, Novembre 2014.

ADE 15 ADEME, "Climat, air et énergie – édition 2014", *Chiffres-clés*, ISBN 2273-4961, Mars 2015.

ADI 98 A. Adinolfi, R. Lamedica, C. Modesto, A. Prudenzi, and S. Vimercati, "Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified line", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, no. 4, pp. 1536 – 1542, October 1998.

AKL 08 C.-R. Akli, "Conception systémique d'une locomotive hybride autonome", *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Juin 2008.

ALL 08 J.-M. Allenbach, P. Chapas, M. Comte, and R. Kaller, "Traction électrique", *Tome 1, 2ème édition revue et augmentée*, Edition Broché, 2008.

ALL 10a A.-L. Allègre, A. Bouscayrol, J.-N. Verhille, P. Delarue, E. Chattot, and S. El-Fassi, "Reduced-scale-power Hardware-in-the-Loop simulation of an innovative subway", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, no. 4, pp. 1175 – 1185, April 2010.

ALL 10b A.-L. Allègre, "Méthodologie de modélisation et de gestion de l'énergie des systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides", *Thèse de doctorat*, Université Lille1, France, Septembre 2010.

ALL 10c A.-L. Allègre, P. Delarue, P. Barrade, A. Bouscayrol, E. Chattot, and S. El-Fassi, "Influence of the mechanical limitations of a traction system on energy storage design", *Mathematics and Computers in Simulation*, Elsevier, Vol. 81, no. 2, pp. 302 – 314, October 2010

ALL 10d A.-L. Allègre, A. Bouscayrol, P. Delarue, P. Barrade, E. Chattot, and S. El-Fassi, "Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, no. 12, pp. 4001 – 4012, December 2010.

ARB 16 P. Arboleya, B. Mohamed, C. Gonzalez-Moran, and I. El-Sayed, "BFS algorithm for voltage-constrained meshed DC traction networks with nonsmooth voltage-dependent loads and generator", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, no. 2, pp. 1526 – 1536, March 2016.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

B

BAE 13 J. Baert, S. Jemei, D. Chamagne, D. Hissel, S. Hibon, and D. Hegy, "EMR of a hybrid electric locomotive and experimental characterization of Nickel-Cadmium battery cells", *EPE-ECCE Europe*, Lille, France, September 2013.

BAG 04 A. Baghramian, and A.-J. Forsyth, "Averaged-value models of twelve-pulse rectifiers for aerospace applications", *IET Power Electronics, Machines and Drives*, Vol. 1, no. 498, pp. 220 – 225, March/April 2004.

BAR 08a R. Barrero, J. Van Mierlo, and X. Tackoen, "Energy saving in public transport", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol. 3, no. 3, pp. 26 – 36, September 2008.

BAR 08b R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, "Improving energy efficiency in public transport: stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro network", *IEEE-VPPC'08*, Harbin, China, September 2008.

BAR 12 R. Barrero, "Energy recovery technologies in public transport", *Ph.D Dissertation*, Vrije University of Brussels, Belgium, November 2012.

BIL 14 E. Bilbao, P. Barrade, I. Etxeberria-Otadui, A. Rufer, S. Luri, and I. Gil, "Optimal energy management strategy of an improved elevator with energy storage capacity based on dynamic programming", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 50, no. 2, pp. 1233 – 1244, March/April 2008.

BLA 15 https://blablacar.fr – Site internet officiel de Blablacar, 2015.

BOU 00 A. Bouscayrol, B. Davat, B. De Formel, B. François, J.-P. Hautier, F. Meibody-Tabar, and M. Pietrzak David, "Multi-Machine Multi-Converter systems for drives: analysis of coupling by a global modeling", *European Physical Journal*, Vol. 10, no. 2, pp. 131 – 147, May 2000.

BOU 02 A. Bouscayrol, and P. Delarue, "Simplification of the maximum control structure of a wind energy conversion system with an induction generator", *International Journal of Renewable Energy Engineering*, Vol. 4, no. 2, pp. 479 – 485, August 2002.

BOU 03a A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J.-P. Hautier, F. Meibody-Tabar, E. Monmasson, M. Pietrzak-David, H. Razik, E. Semail, and M.-F Benkhoris, "Control structures for multi-machine multi-converters systems with upstream coupling", *Mathemactics and Computers in Simulation*, Elsevier, Vol. 63, no. 3-5, pp. 261 – 270, November 2003.

BOU 03b A. Bouscayrol, "Formalismes de représentation et de commande appliqués aux systèmes électromécaniques multi-machines multi-convertisseurs", *Habilitation à diriger des recherches*, Université Lille1, France, Décembre 2003.

BOU 06 A. Bouscayrol, W. Lhomme, P. Delarue, B. Lemaire-Semail, and S. Aksas, "Hardware-in -the-loop simulation of electric vehicle traction systems using Energetic Macroscopic Representation", *IEEE-IECON'06*, Paris, France, November 2006.

BOU 09a L. Boulon, "Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approches systémique pour la gestion d'énergie" *Thèse de doctorat*, Université de Franche-Compté, Belfort, France, Juillet 2009.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

BOU 09b A. Bouscaryrol, X. Guillaud, P. Delarue, and B. Lemaire-Semail, "Energetic Macroscopic Representation and inversion-based control illustrated on a wind energy conversion systems using Hardware-In-the-Loop simulation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, no. 12, pp. 4826 – 4835, December 2009.

BOU 10a L. Boulon, D. Hissel, A. Bouscayrol, O. Pape, and M.-C. Péra, "Simulation Model of a military HEV with a highly redundant architecture", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 59, no. 6, pp. 2654 – 2663, July 2010.

BOU 10b A. Bouscayrol, "Hardware-In-the-Loop simulation", *Industrial Electronics Handbook*, second edition, tome 3, Chapter M35, Edition Taylor & Francis, Chicago, USA, ISBN. 9781848210967, December 2010.

BOU 12 A. Bouscayrol, J.-P. Hautier, and B. Lemaire-Semail, "Systemic design methodologies for electrical energy systems – Chapter 3: Graphic formalisms for the control of multi-physical energetic systems: COG and EMR", ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2012.

BOU 13 L. Boulon, A. Bouscayrol, D. Hissel, O. Pape, and M.-C. Péra, "Inversion-based control of a highly redundant military HEV", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 62, no. 2, pp. 500 – 510, February 2013.

BRU 09 A. Bruyère, "Modélisation et commande d'un alterno-démarreur heptaphasé pour application automobile micro-hybride", *Thèse de doctorat*, Université Lille1, France, Mai 2009.

C

CAI 95 Y. Cai, S.-H. Case, and M.-R. Irving, "Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking", *IEE Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 142, no. 5, pp. 445 – 452, September 1995.

CAR 88 R.-A. De Carlo, S.-H. Zak, and G.-P. Matthews, "Variable structure control of nonlinear multivariable systems: a tutorial", *Proc. of the IEEE*, Vol. 76, no. 3, pp. 212 – 232, March 1988.

CAR 95 J.-P. Caron, J.-P. Hautier, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", *Editions Technip*, Paris, France, 1995.

CAS 15 A. Castaings, W. Lhomme, R. Trigui, and A. Bouscayrol, "Practical control schemes of a battery/supercapacitor system for electric vehicle", *IET Electrical Systems in Transportation*, November 2015.

CAS 16 A. Castaings, W. Lhomme, R. Trigui, and A. Bouscayrol, "Comparison of energy management strategies of a battery/supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints", *Applied Energy*, Elsevier, Vol. 163, pp. 190 – 200, February 2016.

CBTC 04 CBTC, "Standard for Communication-Based Train Control (CBTC) performance and functional requirements", *IEEE Std. 1474.1-2004* (Revision of IEEE Std. 1474.1-1999), pp. 1 – 45, 2004.

CEM 07 CEMT, "Transports et émissions de CO_2 : Quels progrès ?", *Conférence Européenne des Ministres des Transports*, ISBN 92-821-2379-0, 2007.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

CGD 10 Commissariat Général au Développement Durable, “Les coûts et les avantages des vélos en libre service”, *Economie et évaluation*, no. 50, Mai 2010.

CGD 15 Commissariat Général au Développement Durable, “Chiffres clés du transport – Edition 2015”, *Repères*, Mars 2015.

CHA 83 J. Chatelain, “Machines électriques”, *Presses Polytechniques Romandes*, Lausanne, Suisse, 1983.

CHA 04 P. Chapas, et M. Debruyne, “Composants de l’électrotechnique en traction ferroviaire”, *Techniques de l’ingénieur*, d5530, Novembre 2004.

CHA 07 C.-C. Chan, “The state of the art of electric hybrid and fuel cell vehicle”, *Proc. of the IEEE*, Vol. 95, no. 4, pp. 704 – 718, April 2007.

CHA 10 C-C. Chan, A. Bouscayrol, and K. Chen, “Electric, hybrid and fuel cell vehicles: architectures and modeling”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 59, no. 2, pp. 589 – 598, February 2010.

CHE 06 S.-L. Chen, S.-C. Hsu, C.-T. Tseng, K.-H. Yan, H.-Y. Chou, and T.-M. Too, “Anaysis of rail potential and stray current for Taipei metro”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 55, no. 1, pp. 67 – 75, January 2006.

CHE 07 S. Chenh, M. Sautreuil, D. Riu, and N. Retière, “Quasi-static decoupled load flow modelling of a power supply network with AC-DC converters applied to light rail system”, *EPE’07-ECCE Europe*, Aalborg, Denmark, September 2007.

CHE 10 K. Chen, “Common Energetic Macroscopic Representation and unified control structure for different hybrid electric vehicle”, *Ph.D Dissertation*, Université Lille1, France, May 2010.

CHE 12 N. Cherix, M. Vasiladiotis, and A. Rufer, “Functional modeling and Energetic Macroscopic Representation of Modular Multilevel Converters”, *EPE’12-PEMC*, Novi Sad, Serbia, September 2012.

CHI 13 S. Chiniforoosh, H. Atighechi, A. Davoudi, J. Jatskevich, J.-A. Martinez, M. Saeedifard, D.-C. Aliprantis, and V.-K. Sood, “Steady-state and dynamic performance of front-end diode rectifier loads as predicted by dynamic average-value models”, *IEEE Transactions Power Delivery*, Vol. 28, no. 3, pp. 1533 – 1541, July 2013.

CHR 08 D. Chrenko, M.-C. Péra, and D. Hissel, “Inversion based control of a diesel fed low temperature fuel cell system”, *EPE’08-PEMC*, Poznan, Poland, September 2008.

CHY 10 M.-Z. Chymera, A.-C. Renfrew, M. Barnes, and J. Holden, “Modeling electrified transit systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 59, no. 6, pp. 2748 – 2756, July 2010.

CHY 12 M. Chymera, and C.-J. Goodamn, “Overview of electric railway systems and the calculation of train performance”, *IET Professional Development Course on Electric Traction Systems*, London, United-Kingdom, November 2012.

CIC 14 F. Ciccarelli, A. Del Pizzo, and D. Iannuzzi, “Improvement of energy efficiency in light railway vehicles based on power management control of wayside Lithium-Ion capacitor storage”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, no. 1, pp. 275 – 286, January 2014.

COR 10 D. Cornic, “Efficient recovery braking energy through a reversible DC substation”, *ESARS’10*, Bologna, Italy, October 2010.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

COU 09 C. Courtois, et J. Coumel, “Traction électrique ferroviaire – Dynamique ferroviaire et sous-stations” *Techniques de l’ingénieur*, d5501, Août 2009.

CRO 09 A. Cross, A. Baghramian, and A. Forsyth, “Approximate, average, dynamic models of uncontrolled rectifiers for aircraft applications”, *IET Power Electronics*, Vol. 2, no. 4, pp. 398 – 409, July 2009.

D

DAU 00 G. Dauphin-Tanguy, “Les Bond Graph”, *Traité IC2, série systèmes automatisés*, Edition Lavoisier Hermès Sciences, 2000.

DEB 10 M. Debruyne, “Apport de l’électronique de puissance pour la traction électrique”, *Techniques de l’ingénieur*, d3278, Août 2010.

DEL 03a P. Delarue, A. Bouscayrol, A. Tounzi, X. Guillaud, and G. Lancigu, “Control and simulation of an overall wind energy conversion system”, *Renewable Energy*, Elsevier, Vol. 28, no. 8, pp. 1159 – 1324, July 2003.

DEL 03b P. Delarue, A. Bouscayrol, and E. Semail, “Generic control method of multileg voltage-source-converters for fast practical implementation”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 18, no. 2, pp. 517 – 526, Mars 2003.

DEP 14 C. Depature, P. Sicard, A. Bouscayrol, W. Lhomme, and L. Boulon, “Comparison of backstepping control and inversion-based control of a range extender electric vehicle”, *IEEE-VPPC’14*, Coimbra, Portugal, October 2014.

DES 08 B. Destraz, “Assistance énergétique à base de supercondensateurs pour véhicules à propulsion électrique et hybride”, *Thèse de doctorat*, EPF Lausanne, Suisse, Mai 2008.

DOM 12 M. Dominguez, A. Fernandez-Cardador, A.-P. Cucala, and R.-R. Pecharroman, “Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ATO speed profiles”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 9, no. 3, pp. 496 – 504, July 2012.

DUG 07 T. Dugay, “Systèmes tramways de nouvelle génération – CITADIS, l’esprit de votre ville”, *ALSTOM*, Barcelone, Espagne, Décembre 2007.

E

EAS 03 T.-R. Eastham, “Running off the rail”, *IEEE Spectrum*, Vol. 40, no. 1, pp. 66 – 99, January 2003.

EEA 14 European Environment Agency, “Overview of the electricity production and use in Europe (ENER 038)”, *Assessment published*, December 2014.

EEA 15 Agence Européenne pour l’environnement, “L’environnement en Europe : état et perspectives 2015”, *Synthèse*, ISBN 978-92-9213-509-6, 2015.

EHS 05 M. Ehsani, Y. Gao, S.-E. Gay, and A. Emadi, “Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. Fundamentals, theory and design”, *CRC Press*, ISBN-10:0849331544, 2005.

EMR 15 http://www.emrwebsite.org/ - Site officiel de la Représentation Energétique Macroscopique, 2015.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

EU 13 European Commission, "Energy challenges and policy", *Commission contribution to the European Council of 22 May 2013*, May 2013.

F

FAB 15 J. Fabre, P. Ladoux, and M. Piton, "Characterization and implementation of dual-Sic MOSFET modules for future use in traction converters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, no. 8, pp. 4079 – 4090, August 2015.

FAR 14 N. Faria, J.-P. Trovão, A.-F. Ramos, and P.-G. Pereirinha, "Comparison of different battery technologies for electric minibuses using Energetic Macroscopic Representation", *IEEE-VPPC'14*, Coimbra, Portugal, October 2014.

FAY 08 P. Fayet, "Modélisation des réseaux électriques ferroviaires alimentés en courant alternatif", *Thèse de doctorat*, Ecole Centrale de Lyon, France, Février 2008.

FRE 90 G. Freixe, "Transports électriques urbains, conception du matériel roulant", *Techniques de l'Ingénieur*, d5551, Juin 1990.

G

GAO 07 D.-W. Gao, C. Mi, and A. Emadi, "Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles", *Proc. of IEEE*, Vol. 95, no. 4, pp. 729 – 745, April 2007.

GAU 11 L. Gauchia, A. Bouscayrol, J. Sanz, R. Trigui, and P. Barrade, "Fuel cell, battery and supercapacitor hybrid system for electric vehicle: modeling and control via Energetic Macroscopic Representation", *IEEE-VPPC'11*, Chicago, USA, September 2011.

GAW 07 P.-J. Gawthrop, and G.-P. Bevan, "Bond Graph modelling, a tutorial introduction for control engineers", *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 27, no. 2, pp. 24 – 45, April 2007.

GEE 15 A.-M. Gee, and R.-W. Dunn, "Analysis of trackside flywheel energy storage in light rail system", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 64, no. 9, pp. 3858 – 3869, September 2015.

GER 13 A. Di Gerlando, G.-M. Foglia, M.-F. Iacchetti, and R. Perini, "Comprehensive steady-state analytical model of a three-phase diode rectifier connected to a constant DC voltage source", *IET Power Electronics*, Vol. 6, no. 9, pp. 1927 – 1938, November 2013.

GOO 94 C.-J. Goodman, and L.-K. Siu, "DC railway power network solutions by Diakoptics", *Railroad Conference*, Chicago, USA, March 1994.

GRE 09 Le Grenelle de l'environnement, "La première loi du Grenelle : les 13 domaines d'action", *Le journal du ministère écologie,* énergie développement durable et mer, Septembre 2009.

GU 14 Q. Gu, T. Tang, F. Cao, and Y.-D. Song, "Energy-efficient train operation in urban rail transit using real-time traffic information", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, no. 3, pp. 1216 – 1233, June 2014.

GUN 05 W. Gunselmann, "Technologies for increased energy efficiency in railway system", *EPE'05-ECCE Europe*, Dresden, Germany, September 2005.

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

GUZ 99 L. Guzzella, and A. Amstutz, "CAE tools for quasi-static modelling and optimization of hybrid powertrain", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 48, no. 6, pp. 1762 – 1769, November 1999.

H

HAU 96 J.-P. Hautier, and J. Faucher, "Le graphe informationnel causal", *Bulletin de l'Union des Physiciens*, Vol. 90, pp. 167 – 189, Juin 1996.

HAU 04 J.-P. Hautier, and P.-J. Barre, "The causal ordering graph – A tool for modelling and control law synthesis", *Studies in Informatics and Control Journal*, Vol. 13, no. 4, pp. 265 – 283, December 2004.

HO 75 C.-W. Ho, A.-E. Ruehli, and P.-A. Brennan, "The Modified Nodal Approach to network analysis", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 22, no. 6, pp. 504 – 509, June 1975.

HOR 11 L. Horrein, V. Derache, A. Bouscayrol, J.-N. Verhille, and P. Delarue, "Different models of the traction system of an automatic subway", *ElectrIMACS'11*, Cergy Pontoise, France, June 2011.

HOR 12a L. Horrein, A. Bouscayrol, P. Delarue, J.-N. Verhille, and C. Mayet, "Forward and backward simulations of a power propulsion system", IFAC-*PPPSC'12*, Toulouse, France, September 2012.

HOR 12b L. Horrein, A. Bouscayrol, and M. El Fassi, "Thermal energetic model of an internal combustion engine for simulation of a thermal vehicle", *IEEE-VPPC'12*, Seoul, Korea, October 2012.

HOR 15a L. Horrein, A. Bouscayrol, Y. Cheng, and M. El Fassi, "Dynamical and quasi-static multi-physical models of a diesel internal combustion engine using EMR", *Energy Conversion and Management*, Elsevier, Vol. 91, pp. 280 – 291, February 2015.

HOR 15b L. Horrein, "Gestion d'énergie décomposée d'un véhicule hybride intégrant les aspects thermiques via la Représentation Energétique Macroscopique", *Thèse de doctorat*, Université Lille1, France, Septembre 2015.

I

IAN 12 D. Iannuzzi, and P. Tricoli, "Speed-based state-of-charge tracking control for metro trains with on-board supercapacitors", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, no. 4, pp. 2129 – 2140, April 2012.

IWA 94 I. Iwasaki, and H.-A. Simon, "Causality and model abstraction", *Artificial Intelligence*, Elsevier, Vol. 67, pp. 143 – 194, 1994.

J

JAA 13 A. Jaafar, B. Sareni, and X. Roboam, "A systemic approach integrating driving cycles for the design of hybrid locomotives", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 62, no. 8, pp. 3541 – 3550, October 2013.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

K

KE 09 B.-R. Ke, M.-C. Chen, and C.-L. Lin, "Block-layout design using MAX-MIN Ant system for saving energy on mass rapid transit system", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 10, no. 2, pp. 226 – 235, June 2009.

KHM 00 E. Khmelnitsky, "On an optimal control problem of train operation", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 45, no. 7, pp. 1257 – 1266, July 2000.

KUR 99 H. Kurz, "Rolling across Europe's vanishing frontiers [electric railway technology]", *IEEE Spectrum*, Vol. 36, no. 2, pp. 44 – 49, February 1999.

L

LAD 14 P. Ladoux, J. Fabre, and H. Caron, "Power-Quality Improvement in AC Railway Substations: the concept of chopper-controlled impedance", *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 2, no. 3, pp. 6 – 15, September 2014.

LAD 15 P. Ladoux, J. M. Blaquiere, H. Caron, D. Iannuzzi, and M. Coppola, "New Three-wire supply systems for DC electric railways", *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 5, no. 3, pp. 112 – 119, September 2015.

LAF 13 M. Lafos Pastor, L. García-Tabarés Rodríguez, and C. Vázquez-Vélez, "Flywheels store to save: improving railway efficiency with energy storage", *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 1, no. 2, pp. 13 – 20, December 2013.

LES 14 J. Lesel, D. Bourdon, P. Debay, and B. Robyns, "Optimization of regenerative braking synchronization in automatic metro lines", *ElectrIMACS'14*, pp. 305 – 310, Valencia, Spain, May 2014.

LET 10 T. Letrouvé, A. Bouscayrol, W. Lhomme, N. Dollinger, F. Mercier Calvairac, "Different models of a traction drive for an electric vehicle simulation", *IEEE-VPPC'10*, Lille, France, September 2010.

LET 13a T. Letrouvé, "Structuration de la commande de la simulation au prototype d'un véhicule hybride double parallèle au travers de la Représentation Energétique Macroscopique", *Thèse de doctorat*, Université Lille1, France, Mars 2013.

LET 13b T. Letrouvé, "Control validation of Peugeot 3∞8 Hybrid 4 vehicle using reduced-scale power HIL simulation", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, Vol. 8, no. 5, pp. 1227 – 1233, September 2013.

LHO 07 W. Lhomme, "Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la REM", *Thèse de doctorat*, Université Lille1, France, Novembre 2007.

LHO 14 W. Lhomme, P. Delarue, A. Bouscayrol, et P. Barrade, "La REM, formalisme multiphysique de commande de systèmes énergétiques", *Techniques de l'Ingénieur*, d3066, Novembre 2014.

LIU 03 R. Liu, and I.-M. Golovicher, "Energy-efficient operation of rail vehicles", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, Vol. 37, no. 10, pp. 917 – 932, December 2003.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

LU 14 S. Lu, P. Weston, S. Hillmansen, H. B. Gooi, and C. Roberts, "Increasing the regenerative braking energy for railway vehicles", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, no. 6, pp. 2506 – 2515, December 2014.

LUK 01 P. Lukaszewicz, "Energy consumption and running time for trains", *Ph.D Dissertation*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, June 2001.

M

MAR 06 W. Marquis-Favre, E. Bideauxa, O. Mechinb, S. Scavardaa, F. Guillemardc, and M. Ebalardc, "Mechatronic Bond Graph modelling of an automotive vehicle", *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, Vol. 12, no. 2-3, pp. 189 – 202, 2006

MAY 13 C. Mayet, L. Horrein, A. Bouscayrol, P. Delarue, J.-N. Verhille, and E. Chattot, "Dynamical and static models of the traction system of an automatic subway", *EPE'13-ECCE Europe*, Lille, France, September 2013.

MAY 14a C. Mayet, L. Horrein, A. Bouscayrol, P. Delarue, J.-N. Verhille, E. Chattot, and B. Lemaire-Semail, "Comparison of different models and simulation approaches for the energetic study of a subway", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 63, no. 2, pp. 556 – 565, February 2014.

MAY 14b C. Mayet, J. Pouget, A. Bouscayrol, and W. Lhomme, "Influence of an energy storage system on the energy consumption of a diesel-electric locomotive", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 63, no. 3, pp. 1032 – 1040, March 2014.

MAY 14c C. Mayet, P. Delarue, A. Bouscayrol, J.-N. Verhille, and E. Chattot, "Impact of the mechanical limitations of an automatic subway on the energy consumption and the running time estimations", *ElectrIMACS'14*, Valencia, Spain, May 2014.

MAY 14d C. Mayet, P. Delarue, A. Bouscayrol, E. Chattot, and J.-N. Verhille, "Dynamic model and causal description of a traction power substation based on 6-pulse diode rectifier", *IEEE-VPPC'14*, Coimbra, Portugal, October 2014.

MAY 15a C. Mayet, P. Delarue, A. Bouscayrol, and E. Chattot, "Design of a new EMR-based simulation tool in the context of subway energy reduction", *Intelligent Transportation Systems (ITS) World Congress*, Bordeaux, France, October 2015.

MAY 15b C. Mayet, A. Bouscayrol, P. Delarue, E. Chattot, and I. Dekik, "Reduced-scale-power HIL simulation of a subway line", *IEEE-VPPC'15*, Montréal, Canada, October 2015.

MAY 16 C. Mayet, P. Delarue, A. Bouscayrol, E. Chattot, and J.-N. Verhille, "Comparison of different EMR-based models of traction power substations for energetic studies of subway lines", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, no. 3, pp. 1021 – 1029, March 2016.

MEG 15 http://megevh.univ-lille1.fr/ - Site officiel du réseau MEGEVH, 2015.

MIE 04 J. Van Mierlo, and G. Maggetto, "Innovative iteration algorithm for a vehicle simulation program", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 53, no. 2, pp. 401 – 412, March 2004.

© 2016 Tous droits réservés.

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

MIE 06 J. Van Mierlo, G. Maggetto, and P. Lataire, "Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles", *Energy Conversion and Management*, Elsevier, Vol. 47, no. 17, pp. 2748 – 2760, October 2006.

MIN 14 Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, "Les résultats de l'appel à projets sur les transports propres", Décembre 2014.

MIN 15a Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, "Energie, air et climat : Part et évolution des secteurs", 2015.

MIN 15b Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, "Repères : Chiffres clés du climat – France et Monde", *Service de l'observation et des statistiques*, Edition 2015, ISSN : 2115-7634, 2015.

MON 14 D. Montesinos-Miracle, C. Fontan-Tedar, and H. Vidal-Salvia, "Simulation of an electric racing car using Energetic Macroscopic Representation", *IEEE-VPPC'14*, Coimbra, Portugal, October 2014.

MOR 05 E. Morin, "Modélisation d'un réseau électrique de tramway : du composant au système", *Thèse de doctorat*, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, France, Janvier 2005.

MUL 12 G. Muller, "Tramways – Alimentation, conception, performances et design", *Techniques de l'Ingénieur*, c4442, Février 2012.

N

NGU 10 H. Nguyen Huu, L. Gerbaud, N. Retière, J. Roudet, and F. Wurtz, "Analytical modeling of static converters for optimal sizing of on-board electrical systems", *IEEE-VPPC'10*, Lille, France, September 2010.

O

OMC 13 Organisation Mondiale du Commerce, "Rapport sur le commerce mondial 2013 : Facteurs déterminant l'avenir du commerce mondiale", *Organisation Mondiale du Commerce*, 2013.

ONU 14 United Nations, "World urbanization prospects – the 2014 revision", *United Nation*, ISBN 978-92-1-151517-6, 2014.

P

PAY 61 H. Paynter, "Analysis and design of engineering systems", *MIT Press*, 1961.

PIR 09 C.-L. Pires, S.-I. Nabeta, and J.-R. Cardoso, "DC traction load flow including AC distribution network", *IET Power Electronics*, Vol. 3, no. 4, pp. 289 – 297, July 2009.

R

RAI 12 G. Raimondo, P. Ladoux, A. Lowinsky, H. Caron, and P. Marino, "Reactive power compensation in railways based on AC boost choppers", *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 2, no. 4, pp. 169 – 177, December 2012.

© 2016 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

ROB 12 X. Roboam, E. Bideaux, G. Dauphin-Tanguy, B. Sareni, and S. Astier, "Systemic design methodologies for electrical energy systems – Chapter 2: The Bond Graph formalism for energetic and dynamic approach of the analysis and synthesis of multiphysical systems", ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2012.

RTE 14 Réseau de Transport d'Electricité, "Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France", *Edition 2014*, 2014.

RUF 03 A. Rufer, P. Barrade, D. Hotellier, and S. Hauser, "Sequential supply for electrical transportation vehicles: properties of the fast energy transfer between supercapacitive tanks", *IAS Annual Meeting – Conference record of the Industry Applications Conference*, Vol. 3, pp. 1530 – 1537, October 2003.

RUF 04 A. Rufer, D. Hotellier, and P. Barrade, "A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, no. 2, pp. 629 – 636, April 2004.

S

SAB 98 V. Sabaté, "Traction électrique ferroviaire – Convertisseurs et moteurs", *Techniques de l'Ingénieur*, d5502, Mai 1998.

SAY 12 S.-A. Sayed, "Energetic Macroscopic Representation and multi-level energy management for heavy-duty hybrid vehicles using double planetary geartrain", *Ph.D Dissertation*, Université Lille1, France, June 2012.

SEI 11 W. Seiler, et J. Leduc, "Alimentation des véhicules ferroviaires urbains", *Techniques de l'Ingénieur*, d5548, Mai 2011.

SHE 11 J.-W. Sheu, and W.-S. Lin, "Automatic train regulation with energy saving using dual heuristic programming", *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 1, no. 2, pp. 80 – 89, June 2011.

SHE 13 X. Shen, S. Chen, G. Li, Y. Zhang, X. Jiang, and T. Tjing Lie, "Configure methodology of onboard supercapacitor array for recycling regenerative braking energy of URT vehicles", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 49, no. 4, pp. 1678 – 1686, July/August 2013.

SIE 15 http://www.siemens.com – Site officiel du groupe Siemens, 2015.

STE 07 M. Steiner, M. Klohr, and S. Pagiela, "Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles", *EPE'07-ECCE Europe*, Aalborg, Denmark, September 2007.

SU 14 S. Su, T. Tang, X. Li, and Z. Gao, "Optimization of multitrain operation in a subway system", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, no. 2, pp. 673 – 684, April 2014.

T

TER 12 A. Terciyanli, A. Açık, A. Çetin, M. Ermis, I. Çadırcı, C. Ermis, T. Demirci, and H.-F. Bilgin, "Power quality solutions for light rail public transportation systems fed by medium-voltage underground cables", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 48, no. 3, pp. 1017 – 1029, May/June 2012.

© 2016 Tous droits réservés. doc.univ-lille1.fr

Thèse de Clément Mayet, Lille 1, 2016

TIM 07 J.-M. Timmermans, J. Van Mierlo, P. Lataire, F. Van Mulders, and Z. McCaffree, "Test Platform for hybrid electric power systems: development of a HIL test platform", *EPE'07-ECCE Europe*, Aalborg, Denmark, September 2007.

TRA 15 http://www.transpole.fr – Site officiel de Transpole, 2015.

TRI 04 R. Trigui, J. Scordia, M. Desbois Renaudin, B. Jeanneret, and F. Badin, "Global forward backward approach for a systematic analysis and implementation of hybrid vehicle management laws", *EET'04*, Estoril, Portugal, March 2004.

TZE 98 Y.-S. Tzeng, R.-N. Wu, and N. Chen, "Electric network solutions of DC transit systems with inverting substations", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 47, no. 4, pp. 1405 – 1412, November 1998.

V

VER 07 J.-N. Verhille, "Représentation Energétique Macroscopique du métro VAL 206 et structures de commande déduites par inversion", *Thèse de doctorat*, Ecole Nationale Supérieure des Arts et métiers de Lille, France, Juillet 2007.

VER 10 J.-N. Verhille, R. Béarée, and A. Bouscayrol, "Causal-based generation of velocity reference for automatic subways", *IEEE-VPPC'10*, Lille, France, September 2010.

VIA 10 R. Vial, D. Riu, and N. Retière, "Simulating calculations and optimization design of a new HVDC supply power for light rail system", *IECON'10*, Glendale, USA, November 2010.

VIA 12 R. Vial, "Vers un dimensionnement optimal structure-commande de système multi-convertisseurs. Application aux réseaux de Tramway", *Thèse de doctorat*, Université de Grenoble, France, Janvier 2012.

W

WAN 12 W. Wang, and M. Cheng, "Simulation of Nanjing metro line 1 using metro simulator", IFAC-*PPPSC'12*, Toulouse, France, September 2012.

WAN 14 W. Wang, M. Cheng, Y. Wang, B. Zhang, Y. Zhu, S. Ding, and W. Chen, "A novel energy management strategy of onboard supercapacitor for subway applications with permanent-magnet traction system", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 63, no. 6, pp. 2578 – 2588, July 2014.

Y

YAN 13 X. Yang, X. Li, Z. Gao, H. Wang, and T. Tang, "A cooperative scheduling model for timetable optimization in subway systems", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 14, no. 1, pp. 438 – 447, March 2013.

YAN 14 X. Yang, B. Ning, X. Li, and T. Tang, "A two-objective timetable optimization model in subway systems", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, no. 5, pp. 1913 – 1921, October 2014.

YIN 14 J. Yin, D. Chen, and X. Li, "Intelligent train operation algorithms for subway by expert system and reinforcement learning", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, no. 6, pp. 2561 – 2571, December 2014.

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

YU 12 X. Yu, B. Wang, and X. Li, “Computer-controlled variable structure systems: the state-of-the-art”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 8, no. 2, pp. 197 – 205, May 2012.

Z

ZAN 96 R. Zanasi, “Power-oriented graphs for modeling electrical machines”, *MELECOM’96*, Bari, Italy, May 1996.

ZHU 14 L. Zhu, R. Yu, B. Ning, and T. Tang, “Communication-Based Train Control (CBTC) systems with cooperative relaying: design and performance analysis”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 63, no. 5, pp. 2162 – 2172, June 2014.

ZUR 94 R. Zurawski, and M. Zhou, “Petri nets and industrial applications: a tutorial”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 41, no. 6, pp. 567 – 583, December 1994.

© 2016 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr