



# **Approche modulaire de l'optimisation des flux de puissance multi-sources et multi-clients, à visée temps réel**

Clement Fauvel

## **► To cite this version:**

Clement Fauvel. Approche modulaire de l'optimisation des flux de puissance multi-sources et multi-clients, à visée temps réel. Automatique / Robotique. Ecole des Mines de Nantes, 2015. Français. ⟨NNT : 2015EMNA0181⟩. ⟨tel-01245429⟩

**HAL Id: tel-01245429**

**<https://theses.hal.science/tel-01245429v1>**

Submitted on 17 Dec 2015

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

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



HAL Authorization

# Thèse de Doctorat

**Clément FAUVEL**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du  
**grade de Docteur de l'École nationale supérieure des mines de Nantes**  
sous le label de l'Université de Nantes Angers Le Mans*

**École doctorale : Sciences et technologies de l'information, et mathématiques (STIM)**

**Discipline : Automatique et Productique, section CNU 61**

**Unité de recherche : Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN)**

**Soutenue le 23 octobre 2015**

**Thèse n° : 2015 EMNA 0181**

## **Approche modulaire de l'optimisation des flux de puissance multi-sources et multi-clients, à visée temps réel**

### **JURY**

Président :	<b>M. Emmanuel GODOY</b> , Professeur des Grandes Ecoles, Centrale-Supelec, Gif-sur-Yvette
Rapporteurs :	<b>M. Eric BIDEAUX</b> , Professeur des Grandes Ecoles, INSA-Lyon, Villeurbanne <b>M. Thierry-Marie GUERRA</b> , Professeur des Universités, Université de Valenciennes
Examineur :	<b>M. Luc LORON</b> , Professeur des Universités, Polytech Nantes, Saint Nazaire
Invité :	<b>M. Philippe FIANI</b> , Ingénieur R&D, Sherpa Engineering, Paris
Directeur de thèse :	<b>M. Philippe CHEVREL</b> , Professeur des Grandes Ecoles, Ecole des Mines de Nantes, Nantes
Co-directeur de thèse :	<b>M. Fabien CLAVEAU</b> , Maître assistant, Ecole des Mines de Nantes, Nantes

---

# Remerciements

Après plusieurs années plongé dans le flux constant de création d'une thèse, écrire *ses remerciements* est une victoire que l'on savoure à la pointe de son crayon. Il s'agit aussi de cet instant calme où l'on se retourne et contemple le chemin parcouru. Ce dernier a été abrupte, long et sinueux, mais bordé de souvenirs joyeux qui marquent et forgent.

Mes premiers remerciements vont à mon directeur de thèse, M. Philippe Chevrel, qui a cru dans mon potentiel et par ses conseils et encouragements m'a permis d'acquérir le savoir et les compétences qui m'étaient nécessaires. Merci aussi à mon encadrant, M. Fabien Claveau, pour ses conseils et pour m'avoir donné l'occasion de faire mes premiers pas en enseignement. A tous les deux, je souhaite saluer tout particulièrement leur patience et leur sympathie, deux qualités qui ont rythmé mes journées de travail.

Je tiens aussi à remercier M. Philippe Fiani, responsable R&D à Sherpa Engineering, qui par ses idées innovantes et son expertise a fortement contribué au développement de cette thèse. A travers lui, je remercie aussi la société Sherpa Engineering qui a perçu l'intérêt de ces travaux et financé leur réalisation.

Enfin, j'adresse mes remerciements sincères aux membres de l'IRCCyN, du DAPI, et de l'école des Mines pour les discussions, les instants de détente et leur aide apportée au cours de ces années.

L'expérience de la thèse n'est pas uniquement une élévation sur le plan scientifique, c'est aussi une opportunité de rencontres et de découvertes culturelles. Celles-ci se sont montrées particulièrement riches durant ces années. Je souhaite donc remercier du fond du cœur ces ami(e)s avec qui, le temps d'une soirée, d'un weekend ou d'un ciné, je me suis évadé.

Je pense fortement à Jérémie, Carlos et Mica, la fine équipe de doctorants, avec qui j'ai pu partager ces moments de *delirium*, au parfum d'aguardiente et aux rythmes de cumbia. A tous ces nouveaux amis rencontrés pendant et après le travail, Angelica, Paula, Lili, Mi et Majid. A ceux qui m'ont fait découvrir le karma-yoga, Jesi, Bene, Maria, Antonia, Federico. Et bien sur, à Yier, cette énigmatique chinoise cachée au fond du couloir.

Une pensée à mes amis de longue date Matthieu, Bérénice, Noémie, Camille, Wil, Quentin et Clémence, que je retrouve maintenant avec grand plaisir.

---

A ceux qui continuent de trimer quand moi je me repose, Axel, Juliette, Steven, Sylvain, Yuan, Wendjin. Sachez que la voie est ouverte, elle est jalonnée de cervoiserie et de Team Building party.

A mes parents, mon frère et ma famille qui m'ont soutenu tout au long de cette expérience.

Et enfin à tous ceux que je ne cite pas, mais qui garde une place forte dans ma mémoire pour les bons instants partagés.

# Résumé et Mots Clés

## Résumé

Les systèmes énergétiques désignent une classe de systèmes dont les spécificités structurelles et fonctionnelles posent la question de la distribution de l'énergie, en temps réel, pour satisfaire des services. Cette problématique multi-objectifs, nommée énergétique, a pour solution une stratégie de gestion, dont la conception représente un problème ouvert. Les verrous étudiés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre d'un partenariat industriel et en particulier celui des démarches de conception systémique. Trois contributions sont apportées. La première est une méthodologie de conception modulaire et générique de la stratégie énergétique, pour les systèmes multi-clients et multi-sources. Elle définit deux types d'éléments fonctionnels : les clients et les sources, interagissant par le biais d'un nœud, porteur de la stratégie. La seconde traite la simplification de la stratégie par une décomposition selon deux problématiques déjà connues de la littérature : l'hybridation de sources et la concurrence de clients. La troisième porte sur la sélection d'algorithmes novateurs ou existants, compatibles avec une cible temps réel, pour exécuter la stratégie. Enfin, la stratégie énergétique d'un camion frigorifique disposant d'une architecture énergétique hybride série est conçue par notre approche modulaire, et la faisabilité algorithmique est validée en simulation.

## Mots-clés

systèmes énergétiques, stratégie énergétique, conception systémique, commande robuste, commande prédictive

---

## Abstract

The energy systems describe a class of systems whose structural and functional characteristics raise the problem of the energy distribution to satisfy the services in real time. The solution of this multi-objectives problem, namely energetics, is the energy management strategy, whose design is still an open problem. The solutions studied in this thesis are incorporated in the framework of an industrial partnership and particularly in those systemic design approaches. The first contribution is a methodology of modular and generic design of the energy management strategy, for the multi-clients and multi-sources systems. It defines two types of functional elements : the clients and the sources, interacting through a node, which is the carrier of the strategy. The second contribution deals with the generic formulation of the strategy and its simplification by means of decomposition in accordance with two problems : the hybridization of sources and the competition of clients, which are already known in the literature. The third contribution is partial to the selection of innovative or existing algorithms, which are compatible with a real-time target to execute the strategy. Finally, the energy strategy of a refrigerated truck with a hybrid energy architecture is designed by the proposed modular approach, and the algorithm feasibility is validated by the simulation.

## Keywords

energy systems, energy management strategy, systemic design, robust control, predictive control

## Publication List

- FAUVEL, Clément, Fabien CLAVEAU et Philippe CHEVREL (2013). « A generically well-posed H2 control problem for a one shot feedforward and feedback synthesis ». In : *2013 17<sup>th</sup> International Conference on System Theory, Control and Computing*. IEEE. p. 201–206. (Voir pp. 120, 176).
- (2014). « Energy Management in Multi-Consumers Multi-Sources System : A Practical Framework ». In : *19th IFAC World Congress*. Cape Town, South Africa.
  - (2015a). « A Two-Layer LPV Based Control Strategy for Input and State Constrained Problem : Application to Energy Management ». In : *14th European Control Conference (ECC)*. Linz, Autralia. (Voir pp. 98, 99).
  - (2015b). « System and exogeneous signals state feedback and feedforward : about consistency of the related H2 problem ». *Journal of the Franklin Institute (soumis)*, 2015.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>i</b>
<b>Résumé et Mots Clés</b>	<b>iii</b>
<b>Notations</b>	<b>xiv</b>
<b>Glossaire</b>	<b>xv</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Conception des Systèmes Energétiques : Etat de l'Art</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction du Chapitre . . . . .	5
1.2 Les Systèmes Énergétiques . . . . .	6
1.2.1 Épistémologie Systémique . . . . .	7
1.2.2 Système Énergétique vue par le prisme Systémique . . . . .	9
1.3 Modélisation Multi-Physiques . . . . .	12
1.3.1 Généralités . . . . .	12
1.3.2 Revue des Formalismes . . . . .	13
1.3.3 Apports de la Modélisation . . . . .	16
1.3.4 Résumé . . . . .	18
1.4 Stratégie Énergétique . . . . .	19
1.4.1 Revues de la Gestion Énergétique . . . . .	20
1.4.2 Stratégies de Gestion Énergétique . . . . .	24
1.4.3 Apport de la Stratégie de Commande . . . . .	26
1.5 Conclusion du Chapitre . . . . .	27
<b>2 Méthodologie pour une Représentation Modulaire des Systèmes Énergétiques</b>	<b>31</b>
2.1 Introduction du Chapitre . . . . .	32
2.2 Le Référentiel Système . . . . .	32
2.2.1 Présentation . . . . .	32
2.2.2 La Représentation par Ensemble Organico-Fonctionnel (EOF) . . . . .	34
2.3 Caractérisation du Système Énergétique . . . . .	36
2.3.1 Les (EOF-Énergie) . . . . .	36



## TABLE DES MATIÈRES

---

2.3.2	La Chaîne Énergétique . . . . .	36
2.3.3	Le Système Énergétique . . . . .	40
2.3.4	Discussion . . . . .	41
2.4	Représentation Modulaire du Système Énergétique . . . . .	43
2.4.1	Hypothèses de Travail et Objectif . . . . .	43
2.4.2	Nomenclature des Modules Énergétiques . . . . .	44
2.4.3	Causalité de Pilotage . . . . .	45
2.4.4	Guide de Conception des Modules Énergétiques . . . . .	48
2.4.5	Résumé . . . . .	52
2.5	Module d'Interconnexion Énergétique : le Nœud . . . . .	52
2.5.1	Description du Nœud . . . . .	52
2.5.2	Exemple . . . . .	55
2.6	Conclusion du Chapitre . . . . .	56
<b>3</b>	<b>Définition et Décomposition des Nœuds Énergétiques</b>	<b>57</b>
3.1	Introduction du Chapitre . . . . .	58
3.2	Notations . . . . .	58
3.2.1	Ensembles . . . . .	58
3.2.2	Variables . . . . .	59
3.3	Formulation Générique de la Stratégie Énergétique . . . . .	60
3.3.1	Clés de Lecture et Hypothèses de Travail . . . . .	60
3.3.2	Problème multi-objectifs : $\mathcal{P}_n$ . . . . .	61
3.3.3	Construction des Signaux de Communications . . . . .	65
3.3.4	Problème mono-objectif : $\mathcal{P}'_N$ . . . . .	67
3.4	Définitions des Nœuds Unitaires . . . . .	69
3.4.1	Motivations . . . . .	69
3.4.2	Descriptions . . . . .	69
3.4.3	Élaboration des Stratégies . . . . .	73
3.5	Définition du Nœud d'Hybridation : MS_SC . . . . .	74
3.5.1	Motivations . . . . .	74
3.5.2	Description . . . . .	74
3.5.3	Stratégie Multi-Sources : $\Xi_{MS}$ . . . . .	75
3.5.4	Illustration . . . . .	77
3.6	Définition du Nœud de Concurrence : SS_MC . . . . .	78
3.6.1	Descriptions . . . . .	78
3.6.2	Stratégie Multi-Clients : $\Xi_{MC}$ . . . . .	80
3.6.3	Illustration . . . . .	83
3.7	Décomposition du Nœud Général . . . . .	85
3.7.1	Motivation . . . . .	85
3.7.2	Illustration . . . . .	85
3.8	Conclusion du Chapitre . . . . .	89

<b>4</b>	<b>Outils de Résolution des Stratégies Énergétiques</b>	<b>91</b>
4.1	Introduction du Chapitre	91
4.2	Contrôle Optimal ou Prédicatif des Systèmes Dynamiques Contraints	93
4.2.1	Synthèse directe d'une solution explicite/pré-calculée	93
4.2.2	Synthèse prédictive nécessitant une optimisation en-ligne	94
4.2.3	Stabilité	95
4.3	Problématique MS_SC : Résolution par LPV-MPC	96
4.3.1	Positionnement	96
4.3.2	Principes du LPV-MPC	98
4.3.3	Conception de la stratégie d'Hybridation	101
4.3.4	Cas d'étude illustratif	105
4.4	Problématique SS_MC : Approche Combinatoire	109
4.4.1	Positionnement	109
4.4.2	Construction d'un jeu de Configurations	112
4.4.3	Optimisation des Configurations (Branch and Bound)	114
4.5	Conclusion du Chapitre	119
<b>5</b>	<b>Conception de la Stratégie d'un Camion Frigorifique Hybride Série</b>	<b>121</b>
5.1	Introduction du Chapitre	121
5.2	Présentation du Modèle Camion-FHS	123
5.2.1	Système de Mission	123
5.2.2	Chaîne Énergétique	125
5.2.3	Modélisation Organique	126
5.3	Formalisation Modulaire du Système Énergétique	137
5.3.1	Les Clients	137
5.3.2	Les Sources	141
5.3.3	Le Nœud Global	143
5.4	Conception de la Stratégie Énergétique	145
5.4.1	Stratégie Nœud d'Accumulation	146
5.4.2	Stratégie Nœud d'Hybridation	147
5.4.3	Stratégie Nœud de Concurrence	151
5.5	Simulation et Résultats	152
5.5.1	Scénario	152
5.5.2	Résultats	154
5.6	Conclusion du chapitre	158
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>161</b>
	<b>Annexes</b>	<b>165</b>
A	Résumé du Formalisme Modulaire	167
B	État de l'art sur la synthèse $H_2/LQ$	171
B.1	Rappels Généraux	171
B.2	Etude des méthodes de synthèse pour les problèmes $H_2/LQ$	175
C	Paramètres du Camion-FHS	179

## TABLE DES MATIÈRES

---

D	Aperçu d'un procédé de décomposition généralisé . . . . .	181
---	---	-----

# Table des figures

1.1	Triptyque de Conception . . . . .	6
1.2	Le paradigme systémique . . . . .	9
1.3	Tétraèdre de Paynter . . . . .	14
1.4	Schéma d'une Architecture Conventionnelle en Bond Graph à mot . . . . .	17
1.5	Schéma d'une Architecture Hybride en Bond Graph à mot . . . . .	17
1.6	Schéma d'une Architecture Multi-Services en Bond Graph à mot . . . . .	18
1.7	Schéma d'une Architecture Multi-Source/Multi-Services en Bond Graph à mot . . . . .	18
1.8	Deux exemples de Contrôle Hiérarchique . . . . .	23
2.1	Description des six niveaux systèmes (SHERPA ENGINEERING 2013) . . . . .	33
2.2	Description Niveau Sur-Système d'un Logement Habité (Source : (ARNAL 2013)) . . . . .	34
2.3	Niveau EOF ( <i>lien rouge : électrique ; lien orange : mécanique ; lien vert : informationnel</i> ) . . . . .	34
2.4	Mode de Pilotage des EOF . . . . .	35
2.5	Identification du (EOF-énergie) d'un Sous-Système . . . . .	36
2.6	Caractérisation de l'(EOF-énergie) pour le sous-système <i>vivabilité</i> ARNAL 2013 . . . . .	37
2.7	(EOF-énergie) : Exemple trois missions . . . . .	38
2.8	Chaînes Énergétiques obtenues par regroupement des (EOF)-énergies . . . . .	39
2.9	Définition Organico-Fonctionnelle du Système Énergétique (exemple avec trois missions) . . . . .	40
2.10	Caractérisation des systèmes énergétiques par continuité du référentiel système . . . . .	41
2.11	Causalité de Pilotage pour le Lien Source-Client . . . . .	46
2.12	Chaîne Énergétique Exemple : Confort Thermique . . . . .	47
2.13	Vision modulaire nœud générique : trois sources et trois clients . . . . .	53
2.14	Exemple nœud $2 \times 2$ : deux confort thermiques, une source photovoltaïque (PV) et une source EDF . . . . .	55
3.1	Nœuds Unitaires de Transformation ( $U_T$ ) . . . . .	70
3.2	Nœud Unitaire d'accumulation $U_A$ . . . . .	71

## TABLE DES FIGURES

---

3.3	Nœud Unitaire de Distribution : $U_D$	72
3.4	Nœud d'hybridation (MS_SC) avec deux sources	75
3.5	Résultats illustration MS_SC	79
3.6	Nœud concurrence (SS_MC) avec deux Clients	80
3.7	Résultats illustration SS_MC	84
3.8	Illustration MS_MC Décomposé pour 2 Sources et 2 Clients actifs	86
3.9	Comparaison des stratégies générale et décomposée pour un système à deux sources et deux clients	88
4.1	Comparaison de l'architecture LPV-MPC à une architecture hiérarchique	99
4.2	Schéma de Principe de la Synthèse LPV-MPC	100
4.4	<i>Flow Chart</i> de l'heuristique de résolution pour $\mathcal{PO}$	117
5.1	Représentation (EOF) du sous-système de mission Mobilité	123
5.2	Représentation (EOF) du sous-système de mission Conditionnement	124
5.3	Modélisation par (EOF-énergie) de la chaîne énergétique	125
5.4	Courbe de rendement de la machine électrique	127
5.5	Approximation de la batterie : cellule RC élémentaire	132
5.6	Courbe d'évolution d'une cellule RC	133
5.7	Cartographies du moteur thermique	135
5.8	Cartographie des points de fonctionnement optimaux du moteur thermique	136
5.9	Vision Modulaire du Camion Frigorifique avec Hybridation Série	143
5.10	Décomposition modulaire du Camion Frigorifique avec Hybridation Série	146
5.11	Étude de la réponse indicielle du régulateur paramétré $\Sigma_{MS}(\theta)$	150
5.12	Scénario de livraison : <i>vitesse de référence et temps de pause ; au second arrêt la porte du compartiment est ouverte pendant 200s</i>	153
5.13	Résultats pour les clients pour la phase 1	154
5.14	Résultats pour les sources et paramètre $\theta$	155
5.15	Résultats pour le scénario 1 : <i>Source bloc-batterie disponible</i>	156
5.16	Résultats pour la phase 2	157
5.17	Distribution des temps de calcul des algorithmes	158
5.18	Distribution des facteurs de sous-optimalité	159
19	Vision modulaire nœud générique : trois sources et trois clients	168
20	Procédure de décomposition générale (1/3)	182
20	Procédure de décomposition générale (2/3)	183
20	Procédure de décomposition générale (3/3)	184
21		185

# Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre Système Complexe et Système Compliqué . . . . .	8
1.2	Clé de lecture de la bibliographie . . . . .	28
3.1	Formulation Synthétique pour la Stratégie Nœud . . . . .	61
5.1	Jeu de configurations pour la mobilité . . . . .	138
5.2	Jeu de configurations pour le conditionnement . . . . .	140
5.3	Paramètres de simulation . . . . .	153
4	Sous-Système Mobilité . . . . .	179
5	Sous-Système Conditionnement . . . . .	180
6	(EOF-energie) Bloc-batterie . . . . .	180
7	(EOF-energie) Electrogène . . . . .	180







# Notations

$P_m^f$	Puissance fournie par le module $m$
$P_m^c$	Puissance consommée par le module $m$
$P_m^{max}$	Puissance maximale échangeable par le module $m$
$P_m^{min}$	Puissance minimale échangeable par le module $m$
$P_m^e$	Puissance échangée par le module $m$
$P_m^d$	Signal de puissance disponible par le module $m$
$P_m^b$	Signal de puissance demandée par le module $m$
$E^d$	Energie disponible
$E_c$	Coût de l'énergie
$m$	Module
$c_i$	Client $i$
$s_j$	Source $j$
$(d)$	Disponibilité en énergie
$(b)$	Besoin en énergie
$q_{ress}^0$	Quantité de matière de ressources initiales
$q_{ress}^{max}$	Quantité de matière de ressources maximales
$q_{ress}^e$	Quantité de matière de ressources prélevées
$q_{ress}^d$	Quantité de matière de ressources disponibles
$Q^b$	indice de satisfaction
$\bar{Q}$	indice de satisfaction maximale atteignable
$S$	Satisfaction d'un module
$\bar{S}$	Insatisfaction d'un module
$n_c^{tot}$	nombre de clients
$n_s^{tot}$	nombre de sources
$\bar{n}_c^{tot}$	nombre de clients passif
$\bar{n}_s^{tot}$	nombre de sources passives

# Glossaire

**Système Complexe** (p. 8)

Système dont la densité des liens bidirectionnels, ou de rétroaction, interdit sa compréhension par un procédé d'analyse.

**La Systémique** (p. 8)

Discipline qui regroupe les démarches théoriques pratiques et méthodologiques relatives à l'étude de ce qui est reconnu trop complexe pour pouvoir être abordé de façon réductionniste.

**Système Énergétique**  
(première définition)  
(p. 9)

Système composé de sous-systèmes organisés en fonction d'un objectif, qui manipulent et échangent de l'énergie pour atteindre cet objectif.

**Stratégie de Gestion**  
**Énergétique** (p. 19)

Processus algorithmique contrôlant les échanges d'énergie dans un système énergétique.

**Ensemble**  
**Organico-Fonctionnel**  
(EOF) (p. 34)

Fonctionnalité pour laquelle une solution organique existe.

**Chaîne Énergétique**  
(p. 37)

Agrégation d'(EOF-énergie) isolés au sein de sous-systèmes de mission différents, mais présentant des organes en communs.

**Système Énergétique**  
(seconde définition) (p. 40)

Complexe des chaînes énergétiques identifiées au sein de chaque sous-systèmes. La mise en commun des ressources et des services définissent son contexte.

**Mission majeure des**  
**systèmes énergétiques**  
(p. 42)

Mise à disposition intelligente des ressources en vue de garantir un ensemble de fonctionnalités, réalisable au travers des chaînes énergétiques.

**Source** (p. 44)

Module énergétique associé à une ressource du système. Elle a pour fonction de mettre à disposition une énergie en réponse à une demande, pour un coût minimal et dans la limite de sa capacité.

**Le client** (p. 44)

Module énergétique assujetti à l'un des services du système de missions. Il a pour fonction de maximiser la satisfaction de service en consommant au mieux une énergie disponible.

**Signal de Besoin** (p. 44)

Concatène les informations suivantes :

$$(b)_{c_i}^m := \begin{cases} la\ puissance\ max.\ échangeable, \\ la\ puissance\ min.\ échangeable, \\ la\ puissance\ nominale\ désirée, \\ sa\ satisfaction \end{cases}$$

**Signal de Disponibilité**  
(p. 45)

Concatène les informations suivantes :

$$(d)_{s_j}^m := \begin{cases} Puissance\ max.\ échangeable \\ Puissance\ mini.\ échangeable \\ Énergie\ disponible \\ Coût\ de\ l'énergie. \end{cases} \quad (1)$$

**Module Actif** (p. 47)

Qualifie un client en causalité client ou une source en causalité source.

**Module Passif** (p. 47)

Qualifie une source en causalité client, ou un client en causalité source.

**Configuration** (p. 109)

Pour un client, sa stratégie (heuristique, commande optimale, etc.) et ses paramètres de réglages internes, ayant un impact sur l'énergie consommée, et sur sa performance, sont mutualisés sous la dénomination de *configuration*.

**Similarité** (p. 109)

Deux configurations sont similaires, si leur couple *demande d'énergie/satisfaction* sont égaux pour un même scénario.

**Configuration nominale**  
(p. 109)

Une *configuration nominale* est la configuration qui garantie la satisfaction maximale d'un système, pour un scénario donné.

**Jeu de configurations**  
(p. 109)

Un jeu de configurations désigne un ensemble dénombrable de configurations non-similaires conçues pour un même système.



# Introduction Générale

## Contexte et Motivation

L'inter-connectivité croissante des objets et l'augmentation du nombre des unités de calculs embarquées complexifient les systèmes. Ce changement de nature pousse les méthodologies de conception initialement fondées sur l'analyse des systèmes à évoluer vers une vision holiste. Ces principes sont définis au travers de paradigmes épistémologiques, la systématique étant l'un d'entre eux.

L'ingénierie systèmes comprend bien l'enjeu de la complexité des systèmes et construit ces méthodes de conception autour de la systémique. Son langage le plus connu est très certainement SysML (Systems Modeling Language), développé comme l'extension d'un second langage encore plus général UML (Unified Modeling Language). On remarque qu'une propriété appréciée pour le développement des outils de conception est leur généralité, c'est-à-dire leur validité pour des classes de systèmes. Un moyen d'y parvenir est de s'appuyer sur des invariants, e.g. des procédés de communication standardisés, un contexte formalisé, etc. ; pour décrire le système selon des modules fonctionnels et non organiques.

Dans le contexte de cette thèse, nous nous intéressons à une classe de systèmes particulière, celle des systèmes complexes intégrant une infrastructure énergétique, aussi couramment appelés systèmes énergétiques. Ceux-ci se rencontrent à la fois dans le contexte de l'habitat pour désigner par exemple le raccordement des systèmes de production privés (éolienne, panneaux solaires, etc.) aux systèmes consommateurs (électroménager, voiture électrique, etc.) ; ou dans le domaine automobile pour qualifier la conjonction des ressources embarquées (batterie, carburants, etc.) et des services consommateurs (mobilité, auxiliaires de confort, etc.). Qu'ils s'agissent d'enjeux économiques ou écologiques, ces systèmes posent deux questions, celle de leur dimensionnement, et celle de la distribution optimisée des flux d'énergie, en temps réel, pour satisfaire des services. Cette problématique multi-objectifs, nommée énergétique, a pour solution une stratégie de gestion, dont la conception représente un problème ouvert. Elle est au cœur de ce travail de thèse.

De nombreux projets de recherches et industriels exposent des solutions adaptées aux cas d'études considérés (voir e.g. [a. SCIARRETTA et al. \(2014\)](#) pour le domaine automobile). Pourtant, en dépit d'invariants connus des systèmes énergétiques et en partie exploités par la modélisation multi-physique (Bond Graph ([KARNOPP et ROSENBERG 1983](#) ;

Eric BIDEAUX et al. 2006), Représentation Modulaire Macroscopique (Alain BOUSCAYROL et al. 2000)) les systèmes énergétiques ne disposent pas d'un langage de conception modulaire suffisamment holiste pour porter à la fois la modélisation du système énergétique et la conception de sa stratégie énergétique. D'autre part, les problématiques sont le plus souvent étudiées selon un axe unique : hybridation de ressources, ou concurrence des services consommateurs, ou optimisation énergétique des services, mais rarement les trois à la fois.

SHERPA ENGINEERING (2013), société experte en modélisation, simulation et conception de contrôle-commande, souhaite au travers du financement de cette thèse étendre son champ d'application aux systèmes énergétiques. Plus précisément, elle recherche une méthodologie de conception applicable à une large variété de systèmes énergétiques, produisant des solutions algorithmiques implémentables sur des cibles temps réels, et cohérente avec leur référentiel systémique.

Face à ces besoins spécifiques, trois problématiques sont identifiées : 1) comment définir un système énergétiques selon un prisme systémique, c'est-à-dire qui souligne à la fois la structure, le contexte, la finalité, l'évolution et l'activité du système ; 2) comment formuler de façon modulaire et générique la stratégie de gestion énergétique ; 3) quels outils algorithmiques permettent une conception pragmatique de ces stratégies.

Cette thèse aborde ces problématiques dans le contexte des systèmes énergétiques multi-ressources, multi-services.

Trois contributions méthodologiques et algorithmiques sont présentées : la première définit un support méthodologique de conception modulaire et générique de la stratégie énergétique, pour les systèmes multi-clients et multi-sources. Elle définit deux types d'éléments fonctionnels : les clients et les sources, interagissant par le biais d'un nœud, porteur de la stratégie. La seconde traite la simplification de la stratégie par une décomposition selon deux problématiques déjà connues de la littérature : l'hybridation de sources et la concurrence de clients. La troisième porte sur la sélection d'algorithmes, novateurs ou plus classiques et compatibles avec une cible temps réel, pour exécuter la stratégie. Les développements et concepts proposés sont mis en œuvre dans le cadre d'un cas d'étude élaboré par nos soins . Ce dernier traite de la conception et de la déclinaison algorithmique de la stratégie énergétique d'un camion frigorifique disposant d'une architecture énergétique hybride série. Des résultats de simulation illustrent notre propos.

## Plan du Mémoire

Ce mémoire de thèse est organisé en cinq chapitres dont les objectifs et les contributions clés sont résumés ici.

Le **chapitre 1** introduit une définition des systèmes énergétiques selon trois prismes. Le premier est celui de la systémique, un ensemble de paradigmes qui aborde les systèmes complexes selon cinq composantes : environnement, activité, finalité, structure et évolution. Le second, celui de la modélisation multi-physique, et le dernier celui de la stratégie énergétique. La littérature sur ces sujets est examinée, privilégiant les courants prépondérants quant aux systèmes énergétiques et à leurs invariants systémiques. L'objectif in fine est la constitution d'un cadre d'étude formalisé pour la problématique de gestion énergétique des systèmes multi-clients et multi-sources.

Le **chapitre 2** présente la contribution clé de cette thèse, la modélisation des systèmes énergétiques selon une approche modulaire et générique. Tenant compte du référentiel de conception propre à la société Sherpa Engineering, nous proposons une description complète du système énergétique sur la base de son système de mission, et de ses Ensembles Organico-Fonctionnels (EOF). Cette description nous permet d'identifier deux types de modules énergétiques, que nous nommons *clients* et *sources*, communiquant selon un protocole que nous définissons. Ce dernier précise les propriétés énergétiques, les liens fonctionnels, et la causalité de pilotage de ces modules. Enfin, on introduit *le nœud* comme un module d'interconnexion énergétique formalisant à la fois les interactions physiques et la stratégie énergétique entre les *clients* et les *sources*.

Le **chapitre 3** formalise la stratégie d'un *nœud* dans le cas général, par la définition d'un problème d'optimisation générique. Les résultats obtenus sont ensuite déclinés pour deux problématiques considérées au **chapitre 1** : l'hybridation de sources, et la concurrence de clients. Enfin, nous proposons de simplifier la stratégie du nœud général en la décomposant en une stratégie d'hybridation et une stratégie de concurrence, résolues séquentiellement. Un exemple présente la mise en œuvre de cette simplification et compare les résultats d'une stratégie globale avec la stratégie décomposée.

Le **chapitre 4** cherche à résoudre les deux problématiques identifiées au **chapitre 3**, en ciblant spécifiquement les outils de la commande robuste et de la commande prédictive. Il débute par un rapide état de l'art sur ces sujets. Nous relevons notamment que le verrou de la complexité numérique, traditionnellement associé à la commande prédictive, tend peu à peu à être levé. Partant de ce constat, une première méthode fondée sur un contrôle hiérarchique est proposée, mêlant commande robuste et commande prédictive, en réponse à la problématique d'hybridation. Une illustration est donnée sur un cas simple. Sous l'hypothèse que les clients sont autonomes et disposent en interne de plusieurs modes de fonctionnement, la problématique de concurrence est reformulée pour faire apparaître un problème combinatoire. Sa résolution par un algorithme de Branch



and Bound est détaillée.

Le **chapitre 5** fait le bilan des contributions : modélisation modulaire du système énergétique et conception de la stratégie, au travers de leur instanciation sur l'exemple d'un camion frigorifique dont l'architecture énergétique est de type hybride série. Les méthodes présentées au **chapitre 4** sont mises en œuvre. La faisabilité globale des contributions est validée en simulation, considérant un scénario de mission donné.

# Chapitre 1

## Conception des Systèmes Énergétiques : Etat de l'Art

### Sommaire

---

<b>1.1 Introduction du Chapitre</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Les Systèmes Énergétiques</b>	<b>6</b>
1.2.1 Épistémologie Systémique	7
1.2.2 Système Énergétique vue par le prisme Systémique	9
<b>1.3 Modélisation Multi-Physiques</b>	<b>12</b>
1.3.1 Généralités	12
1.3.2 Revue des Formalismes	13
1.3.3 Apports de la Modélisation	16
1.3.4 Résumé	18
<b>1.4 Stratégie Énergétique</b>	<b>19</b>
1.4.1 Revues de la Gestion Énergétique	20
1.4.2 Stratégies de Gestion Énergétique	24
1.4.3 Apport de la Stratégie de Commande	26
<b>1.5 Conclusion du Chapitre</b>	<b>27</b>

---

### 1.1 Introduction du Chapitre

En ingénierie système, l'élaboration d'une solution à un problème donné est organisée autour d'un jeu d'aller-retour entre la démarche de conception et celle d'évaluation. Dans ce contexte, les tendances actuelles sont de choisir la systémique comme support à la conception, et la simulation numérique comme moyen d'évaluation.

Dans cette thèse, nos contributions porteront principalement sur la démarche de conception. L'évaluation interviendra comme un outil de validation dans le dernier cha-

pitre.

Notre positionnement est celui de la systémique, à savoir le postulat qu'un système général (i.e. l'objet finalisé dans son environnement) se conçoit au travers de deux éléments : son *modèle multi-physique* (représentation intelligible de l'objet), et son *contrôle commande* (intelligence qui dirige l'objet). Pour cette raison, nous choisissons d'étudier les systèmes énergétiques, comme une conjonction de trois volets : Système Énergétique (i.e. notre système d'intérêt), Modélisation Multi-Physique et Stratégie Énergétique. Ce raisonnement est illustré par la Figure 1.1.

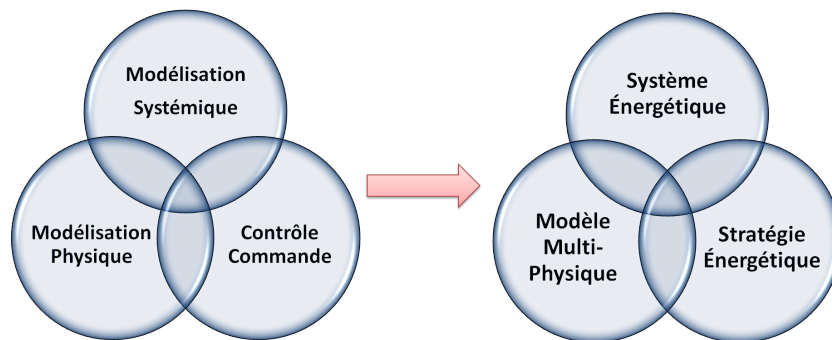


FIGURE 1.1 – Triptyque de Conception

L'objectif de ce chapitre est de résumer nos connaissances actuelles sur les systèmes énergétiques et leur conception. Sa structure reflète notre vision en trois champs ( Fig. 1.1) : la **section 1.2** dessine un premier contour pour les systèmes énergétiques selon le paradigme systémique ; la **section 1.3** introduit la modélisation multi-physique ; et enfin la **section 1.4** discute la conception et la classification des stratégies énergétiques.

## 1.2 Les Systèmes Énergétiques

La systémique est un courant épistémologique relativement récent (début 1970, pour la France) aux champs d'application multiples : biologie (VON BERTALANFFY 1956), sociologie (ERIKSSON 1997), et ingénierie système (SHERPA ENGINEERING 2013), (MOIGNE 1994). En automatique, son intégration reste singulière mais en forte progression, notamment dans les démarches de conception multi-physiques (cf. livre de Xavier ROBOAM (2012)).

Pour cette raison, et conformément à notre idée initiale (voir Fig. 1.1), nous introduisons notre définition des systèmes énergétiques par une brève revue de la systémique, de ses motivations, et des outils de conception/observation qu'elle apporte.

### 1.2.1 Épistémologie Systémique

#### 1.2.1.1 Un peu d'Histoire

L'épistémologie (du grec *épistémè* : la science ; et *logos* : le discours) est une science jeune, dont on trouve une trace dès le début du XVII<sup>e</sup> siècle. Plus exactement en 1637, lorsque René Descartes s'interroge sur l'existence d'une méthode générale pour comprendre les objets qui nous entourent. Toutefois, il faudra attendre les travaux de Kant, exposés dans la *Critique de la raison pure* (1781), pour que la notion d'épistémologie soit formulée (en allemand). Elle ne sera traduite et utilisée en français qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle.

De l'épistémologie, on connaît surtout la première méthode dite cartésienne ou *analyse*. Formulée par DESCARTES (1637), elle expose le regard et l'approche à avoir vis-à-vis des sciences selon quatre règles : « le précepte d'évidence », « le précepte réductionniste », « le précepte causaliste », « le précepte exhaustivité ».

Synthétiquement, l'analyse se résume à la compréhension d'un objet par divisions successives en sous-parties intelligibles. De ce raisonnement, il découle plusieurs avancées scientifiques, notamment dans le domaine de la thermodynamique.

Cependant, au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, des scientifiques de plusieurs domaines (VON BERTALANFFY 1956 ; MOIGNE 1994) démontrent l'insuffisance de cette pratique pour la conception de systèmes denses en interactions.

Un exemple bien connu décrit par ZOBRIST (2014), est celui de la nuée d'oiseaux. Son vol n'est pas un objet dont on peut obtenir une représentation par analyse. Il n'obéit pas à un schéma type dont il serait possible d'analyser chaque composant (e.g. il est faux de vouloir comparer la nuée à un système décomposé-hiérarchisé par un maître). La nuée est un système évolutif, tant dans sa forme que dans la distribution de ses décisions. Elle communique avec elle-même et son environnement. Cependant, cet objet n'est pas non plus chaotique, il obéit à des lois comme les principes de la physique (vol de l'oiseau), mais aussi des heuristiques :

1. Chaque oiseau dès qu'il se trouve en périphérie revient vers le centre, et le nombre d'oiseaux se recentrant régit le mouvement de l'ensemble, car :
2. Chaque oiseau veille en permanence à ne jamais entrer en collision avec ses voisins immédiats

#### 1.2.1.2 Motivation : la Complexité

Dans les années vingt, VON BERTALANFFY (1956), biologiste autrichien, propose une nouvelle qualification des systèmes vivants, celle de *complexes d'éléments en interactions*. Cette approche dit *holiste*, en opposition avec le *réductionnisme*, met en exergue les aspects d'organisation dans les systèmes, ainsi que la disparition de certaines propriétés essentiels lors d'une observation par analyse.

Il en surgit une nouvelle classe de système dont la définition peut se résumer ainsi :

**Définition 1.1** (Système Complexe).

Un système complexe désigne un système dont la densité des liens bidirectionnels, ou de rétroaction, interdit sa compréhension par un procédé d'analyse.

Un moyen efficace de mémoriser cette distinction est de raisonner à partir du Tableau 1.1 <sup>1</sup>.

Pour comprendre...	
un système compliqué	un système complexe
on peut le <i>simplifier</i> pour découvrir son <i>intelligibilité</i> (explication)	on doit le <i>modéliser</i> pour construire son <i>intelligibilité</i> (compréhension)

TABLE 1.1 – Comparaison entre Système Complexe et Système Compliqué

La découverte de ces systèmes a motivé les épistémologistes à développer une nouvelle discipline de recherche, la systémique :

**Définition 1.2** (La Systémique (DONNADIEU et al. 2003)).

« La systémique est une discipline qui regroupe les démarches théoriques pratiques et méthodologiques relatives à l'étude de ce qui est reconnu trop complexe pour pouvoir être abordé de façon réductionniste. »

**1.2.1.3 Le Paradigme Systémique de MOIGNE (1994)**

Dans le champ disciplinaire que forme la systémique, MOIGNE (1994) introduit un paradigme dans le but d'aider à la compréhension des systèmes complexes. En pratique cette démarche a principalement été appliquée dans les études sociologiques ou biologiques (voir ERIKSSON (1997) et références incluses).

Toutefois, comme le remarque Xavier ROBOAM (2012), son influence est sous-jacente dans la plupart des travaux modernes de conception, notamment dans les démarches de modélisation multi-physiques (cf. **section 1.3**).

Le point fondamental de cette vision est très certainement son positionnement vis-à-vis de l'objet à observer. De même que dans les approches holistes, l'objet est identifié au travers d'un prisme ouvert sur l'environnement et organisé autour de cinq axes de lecture (voir Figure 1.2). La description de l'objet est ainsi résumée :

« un objet qui, dans un environnement, doté de finalités, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au fil du temps, sans qu'il perde pourtant son identité unique.. » (Jean-Louis Le Moigne)

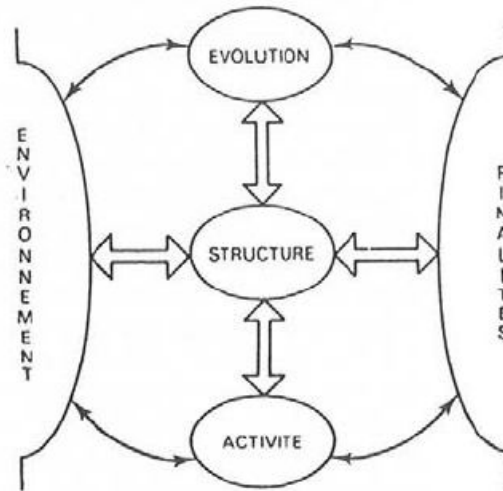


FIGURE 1.2 – Le paradigme systémique

Dans sa Théorie des Systèmes Général, Le-Moigne construit un canevas matriciel pour l'observation en croisant le paradigme systémique avec les trois axes suivants :

- Fonctionnelle : *ce que l'objet fait*
- Ontologique : *ce que l'objet est*
- Génétique : *ce que l'objet devient*

Cette démarche s'avère très fine mais aussi très compliquée. Par la suite (voir **section 2.2**), nous opterons pour un référentiel de description plus simple et s'appuyant sur les propriétés fonctionnelles.

### 1.2.2 Système Énergétique vue par le prisme Systémique

Les systèmes énergétiques désignent une catégorie de *smart-système* ayant un rôle prépondérant dans les échanges d'énergie. Dans cette direction, une première définition proposée par [Xavier ROBOAM \(2012\)](#) est :

**Définition 1.3** (Système Énergétique ([Xavier ROBOAM 2012](#))).

Un système énergétique est composé de sous-systèmes organisés en fonction d'un objectif, qui manipulent et échangent de l'énergie pour atteindre cet objectif.

Cette description est intéressante mais au regard de la systémique n'est pas suffisante. Pour la compléter, nous proposons d'organiser notre raisonnement sur la base du paradigme systémique (Fig. 1.2).

1. Source : Fiche de Lecture sur Modélisation des systèmes complexes, Réseau Intelligence Complexité, <http://www.mcxapc.org/>

### 1.2.2.1 Évolution

Deux phénomènes physiques à caractère universel retiennent notre attention pour décrire l'évolution des systèmes énergétiques : *l'énergie* et *l'entropie* (Source : Techniques de l'Ingénieurs [EXPERTS ETI \(2015\)](#)).

#### Énergie

La notion d'énergie (du grec *energia*, *force en action*) est introduite par Thomas Young en 1807. Ce concept universalise les sciences. De part les propriétés conférées à l'énergie, on est en mesure d'expliquer des phénomènes divers et de solutionner certains problèmes scientifiques. Mathématiquement l'énergie est un scalaire et se mesure en Joule [J]. Elle se manifeste de manière macroscopique au travers de la mécanique, la thermodynamique et l'électronique.

L'une de ses propriétés essentielles, mise en avant par Helbert L Von Helmotz, est sa conservation pour un système isolé. La thermodynamique révélera qu'elle peut cependant subir des transformations d'une forme à une autre, ou bien être échangée entre deux systèmes liés.

Fondamentalement, l'énergie est liée à la notion de puissance, l'un étant l'intégrale de l'autre. Mathématiquement, considérant deux éléments s'échangeant une puissance  $P_e(t)$  sur l'intervalle  $[t_0; t_0 + T_p]$ . L'énergie  $E_e(t_0)$  se calcule alors d'après la relation :

$$E_e(t_0) = \int_{t_0}^{t_0+T_p} P_e(t) dt \quad (1.1)$$

#### Entropie

L'entropie, seconde notion physique importante, caractérise l'évolution d'un système. Elle est introduite suite à l'expression du second principe de la thermodynamique : « l'état d'équilibre final d'un système est à l'échelle microscopique le plus désordonné atteignable. » Cette grandeur se manifeste en pratique par le concept de causalité, et l'irréversibilité de certaines transformations physiques. Fictivement, cette grandeur est équivalente à une perte d'information sur le système. Elle se mesure en  $[J.K^{-1}]$ .

### 1.2.2.2 Environnement

Les systèmes énergétiques se réalisent dans un contexte particulier, celui des échanges d'énergie entre **ressources** (énergie électrique, potentiel) et **services**.

#### Ressources

Les ressources correspondent à une énergie brute qu'il faut transformer : e.g. cellule de batterie, carburant, potentiel hydraulique, ... Nous choisissons de les spécifier selon deux propriétés :

- leur *réversibilité* ; i.e. peut-on inverser ou non le flux d'énergie afin de régénérer de la ressource

- leur *capacité* ; i.e. la ressource est-elle limitée ? Si oui, à quelle quantité ?

Leur comportement vis-à-vis du système énergétique est passif. Ceci signifie que ce dernier impose le prélèvement ou la génération de ressources. La causalité de pilotage se fait donc du système énergétique vers la ressource.

### Services

Les services désignent des fonctionnalités que le système énergétique doit satisfaire. Leur exécution est à la charge de systèmes que l'on qualifie de demandeurs d'énergie. Sous l'action de scénarios (voir définition suivante), les services expriment au travers des systèmes demandeurs des besoins en énergie. Lorsque le système énergétique est dans l'incapacité à les satisfaire, le service est opéré selon un mode *dégradé*. Nous verrons par la suite que dégrader un service peut s'effectuer progressivement (voir **Chapitre 4**).

Autre remarque, il n'y a aucune obligation à considérer un système demandeur comme strictement énergivore. Dans le cas où un procédé du contexte exprime ponctuellement le besoin de décharger son énergie dans le système énergétique, on le qualifiera le service de régénérant.

### 1.2.2.3 Activité

#### Scénarios

En phase de conception, les scénarios désignent une activité simulée de l'environnement, sous forme déterministe (e.g. profil temporel (Sébastien DELPRAT 2002 ; JAAFAR, SARENI et X ROBOAM 2010)) ou probabiliste (e.g. chaîne de Markov (SOUFFRAN, MIÉGEVILLE et GUÉRIN 2011)). En phase de vie réelle, nous étendons cette dénomination à l'activité prédite de l'environnement. Dans un système énergétique, les besoins des demandeurs s'exprime pour la majorité des cas au travers des scénarios. Lorsque ces derniers prennent la forme d'une prédiction sur les demandes futures, on est en présence d'un système énergétique avec prédiction des besoins.

La modélisation d'un scénario, que ce soit pour un système énergétique ou pas, est un travail particulièrement difficile car il repose exclusivement sur l'expertise du concepteur. Afin d'éviter les erreurs, plusieurs travaux portent sur la classification de profils fictifs. Dans le contexte énergétique et pour une mission donnée, JAAFAR, SARENI et X ROBOAM (2010) s'intéressent aux critères suivant : la puissance maximale demandée, la puissance moyenne et l'énergie totale utile.

On terminera en notant que les scénarios ne sont pas exclusivement réservés aux besoins. Les stratégies de commande nécessaires au prélèvement des ressources peuvent être proposées sous la forme de scénarios décisionnelles (cf. Heuristique à la **section 1.4**).

### 1.2.2.4 Structure et Finalité

Le rôle des systèmes énergétiques a été partiellement développé par la *Définition 1.3*, il s'agit de la maîtrise des échanges énergétiques en vue de garantir certains objectifs.



En pratique, cette finalité dépend de la structure du système et se traduit par une stratégie de gestion énergétique.

En toute logique, un moyen d'approfondir la compréhension des systèmes énergétiques selon leur composante structure et finalité, est d'examiner la littérature concernant les méthodes de modélisation, et de conception du contrôle commandes, pour en extraire des invariants. Ce travail est respectivement réalisé dans la **section 1.3** et la **section 1.4**.

### 1.3 Modélisation Multi-Physiques

La conception par la modélisation est le second volet de notre revue des systèmes énergétiques. Dans cette section, nous passons en revue les diverses approches de modélisation, utiles dans le cadre des systèmes énergétiques. Puis, nous relevons les apports de ces méthodes.

#### 1.3.1 Généralités

La complexité des systèmes (énergétique ou non) oblige à développer des méthodes de modélisation décrivant le système au-delà de son fonctionnement interne. Sous l'impulsion du mouvement cybernétique, la modélisation mathématique par des outils graphiques se développe. Elle apporte une clarification quant à la structure des systèmes.

##### 1.3.1.1 Le Schéma-Bloc

Le *schéma-bloc* est un outil graphique définissant le comportement d'un système au travers de blocs connectés par des lignes d'actions. Par exemple, dans l'étude dynamique des systèmes, les blocs sont spécifiés par des fonctions de transfert, et les lignes d'actions caractérisent des signaux. Ce mode de description est très apprécié dans le domaine de l'automatique pour l'analyse et la simulation de lois de commande.

Malheureusement, la simplicité des liens (i.e. transport d'une seule nature d'information selon une direction unique) limite dans une modélisation plus avancée des systèmes.

Toutefois, on notera que des « surcouches » logiciels (e.g. PhySim, AmeSim, Autonomie) ont été développées pour s'interfacer entre la modélisation par schéma-blocs et des représentations plus générales, qualifiées de multi-physiques.

##### 1.3.1.2 Les Modèles Multi-Physiques

Les formalismes dits « multi-physiques » sont proposés comme une alternative aux schéma-blocs, pour décrire un système ainsi que ses interactions (physiques ou informationnelles). Ces langages graphiques font interagir des blocs, dont la particularité est de porter au minimum deux types d'entrées et de sorties : l'une matérialise les phénomènes

d'action et de réaction, l'autre les signaux de modulations (commandes) ou de mesures.

Dans ce chapitre, nous discutons trois formalismes remarquables pour leurs apports au domaine de la conception des systèmes énergétiques : le Bond-Graph (KARNOPP et ROSENBERG 1983 ; Geneviève DAUPHIN-TANGUY 1999), la modélisation par flux de puissance (PEREZ et al. 2006 ; Eric BIDEAUX et al. 2006), et la REM (Alain BOUSCAYROL et al. 2000). Cet état de l'art s'inspire des ouvrages de Xavier ROBOAM (2012) et de Walter LHOMME (2007).

### 1.3.2 Revue des Formalismes

#### 1.3.2.1 Formalisme Bond Graph (BG)

Le Bond Graph (ou Graphe de liaison) est une modélisation graphique, multi-domaines, des systèmes physiques dynamiques. Le concept est proposé en 1955 par Henry M. Paynter, chercheur du MIT de Boston. Sa formalisation se concrétisera au travers des travaux de ses deux doctorants, KARNOPP et ROSENBERG (1983). De nos jours, le Bond Graph et ses dérivés sont enseignés dans plusieurs écoles ou universités françaises et déployés dans certains projets industriels (Geneviève DAUPHIN-TANGUY 1999 ; GUILLEMARD 1996). L'universalité du Bond Graph a permis la description de nombreux systèmes dans des domaines aussi variés que l'automobile, les procédés chimiques ou bien l'électronique de puissance (cf. Geneviève DAUPHIN-TANGUY (1999) et références incluses pour une vision générale de la théorie et des applications).

Deux niveaux de finesse sont envisageables. Le premier est macroscopique. Le système est décrit au travers de boîtes noires et de leurs interactions physiques. Les flux se joignent autour d'éléments de jonction, matérialisant une conversion de la puissance. Cette représentation se nomme judicieusement « Bond Graph à mot ». Cette vision encapsulée apporte un intérêt lorsqu'il s'agit de décrire les concepts généraux, et notamment, la structure d'un système (e.g. lors des phases initiales de conceptions, ou bien pour une première observation).

Le second niveau, plus détaillé, conserve les informations structurelles et les complète par une précision sur la nature des transferts de puissance : gyrateur  $GY$  et transformateur  $TF$ . Les phénomènes énergétiques intrinsèques sont aussi représentés : les dissipations, par des éléments  $R$  ; les accumulations par induction, par des éléments  $I$  et les accumulations par capacité, par des éléments  $C$ .

Le caractère énergétique de la modélisation Bond Graph est acquis par la nature bidirectionnelle des liens, marquant les interactions entre éléments ou jonctions. Chacun d'entre eux véhicule deux informations : une variable généralisée d'effort,  $e$ , et une variable généralisée de flux,  $f$ . Le produit des deux définit la puissance instantanée circulant entre deux éléments. En raison de cette relation, ces variables sont aussi appelées variables de puissance (Geneviève DAUPHIN-TANGUY 1999).

On nomme variables généralisées d'énergie le moment  $p$  et le déplacement  $q$ . Les relations entre variables généralisées ( $e, f, p, q$ ) et éléments passifs ( $R, C, I$ ) sont résumées par le tétraèdre de Paynter (cf. Fig. 1.3).

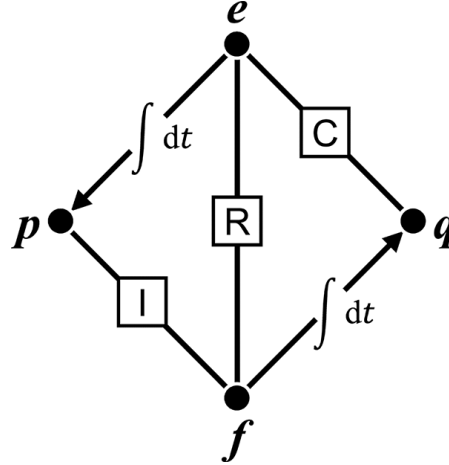


FIGURE 1.3 – Tétraèdre de Paynter

L'une des forces du Bond Graph se mesure par la richesse des informations que l'on peut en extraire. On notera notamment les travaux en synthèse de commande robuste (SUEUR et G DAUPHIN-TANGUY 1991 ; E BIDEAUX et al. 2003), en dimensionnement (LAFFITE 2004 ; FOTSU NGWOMPO 1997) ou bien en réduction de modèle (LOUCA et J. L. STEIN 1999) (cf. X. ROBOAM et al. (2012) ou Geneviève DAUPHIN-TANGUY (1999) pour une revue complète). Depuis la forme graphique, il est possible d'obtenir un modèle d'état du système, créant une passerelle entre les outils graphiques et les outils analytiques.

Récemment, cette palette d'outils s'est vu complétée par une nouvelle méthode graphique pour la synthèse de régulateur. Il a été démontré que le résultat obtenu était comparable aux méthodes d'optimisation Lagrangienne type Principe du Maximum de Pontryagin (MOUHIB et al. 2009).

### 1.3.2.2 Modélisation par Flux de Puissance

La modélisation par flux de puissance est un formalisme dérivé du Bond Graph (PEREZ et al. 2006 ; SERRAO et RIZZONI 2008 ; Eric BIDEAUX et al. 2006). L'idée est de mettre en exergue la structure d'échange d'énergie, à défaut des phénomènes de dissipation. Chaque élément représente un groupe d'organes, associé à une fonctionnalité (ou sous-fonctionnalité) du système. On y retrouve ainsi, des éléments *réservoir d'énergie*, des éléments de transfert de puissance et des éléments récepteurs d'énergie.

La modélisation s'effectue sur le principe de transfert d'énergie et de pertes. Les éléments sont modélisés par des rendements (cartographies ou fonctions), autorisant le calcul de la puissance de sortie  $P_t^{e-out}$  suivant la puissance d'entrée  $P_t^{e-in}$ . Dans le cas général, la relation modélisant le transfert s'écrit :

$$P_t^{e-in}(t) = \eta_t(P_t^{e-out}(t)) \quad (1.2)$$

Où  $\eta_t$  décrit le rendement selon la puissance de sortie.

Les éléments peuvent être modulés par des signaux de contrôle ou de perturbation, attribuant la propriété de « multi-physique » au formalisme.

Cette méthodologie est explicitement ciblée pour l'observation et la représentation des interactions énergétiques dans les systèmes. La circulation de l'énergie est en particulier soulignée par des liens de puissance orientés.

Ce formalisme a été exploité dans le cadre du dimensionnement d'un voilier hybride (F. DUPRIEZ-ROBIN et al. 2009).

### 1.3.2.3 Représentation Énergétique Macroscopique (REM)

La Représentation Énergétique Macroscopique (REM) est une autre forme de modélisation des systèmes, introduite récemment par Alain BOUSCAYROL et al. (2000). Elle est le résultat du croisement entre deux formalismes, le Graphe Informel Causal (GIC) (HAUTIER, FAUCHER et CARON 1999) et le formalisme Système Multi-Machines Multi-convertisseur (SMM) (A BOUSCAYROL, DELARUE et GUILLAUD 2005). Sa symbolique s'appuie elle aussi sur des éléments multi-ports. Les échanges, sous la forme de flèches monodirectionnelles, symbolisent des variables d'effort et des variables de flux.

À la différence du Bond Graph où la finesse du modèle est poussée jusqu'à représentation de sous-éléments phénoménologiques (dissipation et stockage), la REM conserve une approche macroscopique et met en lien des éléments par le biais de leurs interactions fonctionnelles. Un exemple concret est celui des phénomènes de dissipation, implicitement matérialisés par les éléments d'accumulation, sous forme de pertes.

Bien que relativement récent, ce formalisme a été appliqué dans plusieurs cas d'étude. Notamment pour traiter la modélisation de systèmes énergétiques complexes (DELARUE et al. 2003; W LHOMME, A BOUSCAYROL et BARRADE 2004; VERHILLE et al. 2004), ou bien dans l'élaboration de commande par inversion du système (Alain BOUSCAYROL 2003).

Cet outil graphique adopte le point de vu de l'électricien et identifie des fonctions élémentaires liées aux échanges énergétiques du système. Les stockages d'énergies sont matérialisés par des éléments sources tandis que les couplages énergétiques sont distingués selon la nature de l'énergie mise en jeu. Les stockages locaux, comme l'inertie mécanique d'un arbre, sont matérialisés dans les accumulateurs. Cette représentation souligne à la fois les échanges énergétiques mais aussi les contraintes liées à l'association

des organes. La distinction entre signaux mesurés et signaux de commande est réalisé par une symbolique spécifique.

Par ailleurs, le caractère macroscopique de la représentation facilite, par rapport à une approche Bond Graph, la lecture du graphe, et notamment la compréhension fonctionnelle de la structure du système.

Cette méthode permet entre autres de concevoir la commande du système par inversion des éléments. Dans leurs travaux [A BOUSCAYROL et DELARUE \(2002\)](#) donnent des étapes de simplifications dans le but d'obtenir une Structure Pratique de Commande (SPC). Second point d'intérêt, l'inversion du système dans le but d'obtenir une architecture de commande peut être réalisée graphiquement. Celle-ci peut être optimisée ([Alain BOUSCAYROL 2003](#)) afin d'aboutir à la Structure Maximale de Commande.

### 1.3.3 Apports de la Modélisation

#### 1.3.3.1 Lignes de Puissance et Ligne de Modulation

Le Bond Graph est un moyen de lier, dans un système, la cause à l'effet, au travers du concept de causalité. Cette propriété est d'un intérêt majeur lorsqu'il s'agit d'inverser un système. Dans le contexte cible des systèmes énergétiques, on s'intéresse à un phénomène macroscopique, le cheminement de l'énergie.

Un formalisme basé sur l'examen des lignes de puissance est proposé par [S.-T. WU et YUCEF-TOUMI \(1995\)](#). Ce dernier sera repris dans le contexte automobile par [NG-WOMPO et E BIDEAUX \(2005\)](#), et en Bond Graph par [Eric BIDEAUX et al. \(2006\)](#). Il pose les deux définitions suivantes :

- *les lignes de puissance* : liens de type entrée/sortie, formés entre une source, ou un stockage d'énergie, et un élément dont l'une des variables d'énergie est associée à une sortie du système.
- *les lignes de modulation* : liens de type entrée/sortie, constitués entre un élément modulé par une commande et un élément dont l'une des variables d'énergie est associée à une sortie du système.

Ces lignes ont pour avantage de souligner les variables par lesquelles un contrôle des flux de puissance est envisageable à travers une commande. Elles sont présentes dans les trois formalismes.

#### *Remarque 1.4.*

En REM, l'élaboration de la structure de commande s'appuie sur nombre de ligne de modulation et donc structurellement ne permet pas de vérifier l'ensemble des propriétés du système, cf. la notion d'*ordre d'essentialité* dans [JARDIN \(2010\)](#) et [EL FEKI et al. \(2012\)](#). Toutefois elle met en évidence l'existence d'une couche décisionnelle supplémentaire, nommée stratégie dont l'élaboration est à la charge du concepteur.

### 1.3.3.2 Identification des Architectures

En utilisant la notion de ligne de puissance introduite par les formalismes de modélisation, on est en mesure d'identifier l'architecture énergétique d'un système. Généralement, on distingue quatre structures ou architectures, décrites dans les paragraphes suivants par des Bond Graph à mots (Eric BIDEAUX et al. 2006).

**Conventionnelles (Fig. 1.4)** Le système énergétique contient des lignes de puissances découplées, et une ligne de modulation par service. Il s'agit de la structure la plus élémentaire. Chaque service se fournit en énergie auprès d'une ressource et se pilote par une variable de puissance. Cette structure est décrite par la Figure 1.4, les liens demi-flèches désignent une interrelation de cause à effet entre les blocs ; les flèches continues symbolisent les lignes de puissances qui traversent le système ; et les flèches discontinues désignent les lignes de modélisation.

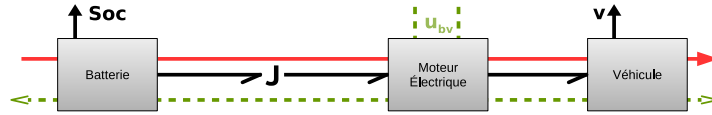


FIGURE 1.4 – Schéma d'une Architecture Conventionnelle en Bond Graph à mot

### Hybrides (Fig. 1.5)

Le système énergétique contient plusieurs lignes de puissance par service. Le nombre de lignes de modulation est au minimum égal au nombre de lignes de puissance. Cette architecture est conçue pour combiner les avantages respectifs de chacune des ressources et de leur procédé de génération d'énergie. Cette structure est décrite par la Figure 1.5, les conventions schématiques précédentes sont conservées.

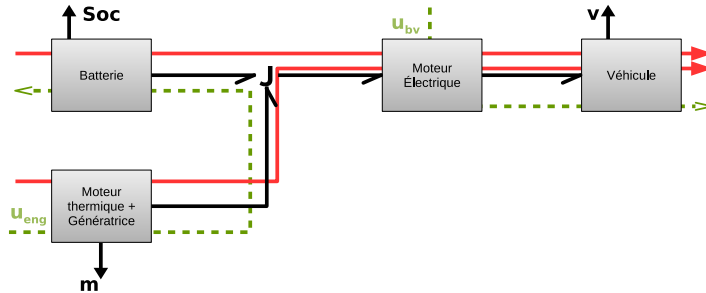


FIGURE 1.5 – Schéma d'une Architecture Hybride en Bond Graph à mot

**Multi-Services (Fig. 1.6)**

Le système énergétique contient un ensemble de services partageant la même ligne de puissance. Le nombre de lignes de modulation est au minimum égal au nombre de lignes de besoin. Les architectures multi-services s'apparentent à une structure duale des architectures hybrides. La Figure 1.6, illustre cette structure en conservant les conventions schématicques précédentes.

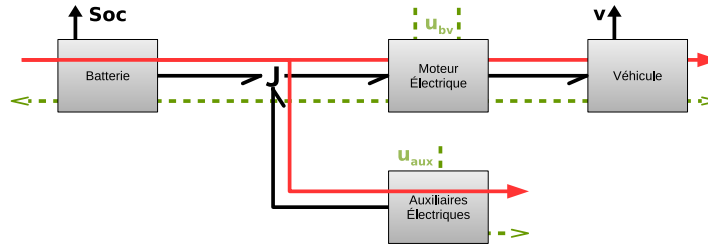


FIGURE 1.6 – Schéma d'une Architecture Multi-Services en Bond Graph à mot

**Multi-sources/Multi-services (Fig. 1.7)**

Le système énergétique contient plusieurs lignes de puissances atteignant plusieurs services. On décompte au minimum une ligne de puissance par service et par ligne de puissance. Cette structure est décrite par la Figure 1.7, les conventions schématicques précédentes sont conservées.

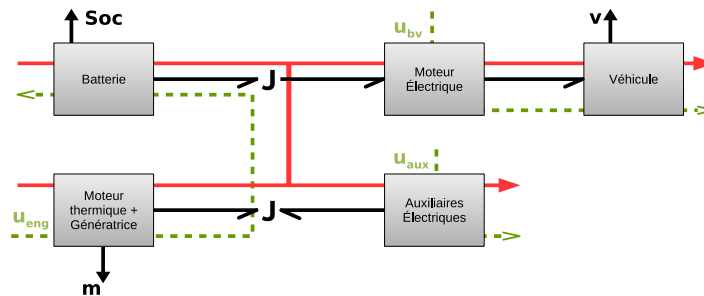


FIGURE 1.7 – Schéma d'une Architecture Multi-Source/Multi-Services en Bond Graph à mot

**1.3.4 Résumé**

Bond Graph, REM et flux de Puissance, sont trois variantes de formalismes graphiques adaptées aux systèmes énergétiques. Le premier donne la priorité à la description opérationnelle des systèmes (approche structurelle), le second privilégie la fonction,

tandis que le troisième offre une vision macroscopique du cheminement de l'énergie.

Le *Bond Graph* est le formalisme historique de la modélisation multi-physiques. Il est le vecteur de nombreuses contributions dans le registre de la modélisation des systèmes dynamiques voire de la commande. L'analyse des lignes de puissance donnent des conditions nécessaires pour la construction de la commande (e.g. platitude). D'autre part, comme il est précédemment souligné, le Bond Graph dual permet de construire un modèle de commande optimale (MOUHIB et al. 2009).

La *modélisation par flux de puissance* souligne clairement la structure énergétique des sources et des consommateurs, en modélisant les relations de transferts et les pertes. Ce formalisme offre un intérêt pour la gestion de l'énergie lorsque celle-ci se focalise sur la circulation et la priorité des flux d'énergie. Malheureusement, la synthèse de commande locale pour par exemple la gestion des dynamiques n'est pas possible.

La *Représentation Énergétique Macroscopique* représente un compromis entre ces méthodologies, notamment par sa vision fonctionnelle et la possibilité de construire une architecture de commande structurée en deux niveaux : la commande locale (ou régulation) obtenue par inversion graphique ; et la stratégie globale. Toutefois, aucune méthode générique n'est proposée pour élaborer une stratégie globale.

Globalement, la causalité, et les lignes de puissance, offrent des informations sur les directions de circulation de l'énergie, et surtout sur l'activité (ou la passivité) des éléments sur le système. Ces données seront exploitées dans la formulation de la problématique.

## 1.4 Stratégie Énergétique

La gestion énergétique est le dernier des prismes de conception pour définir les systèmes énergétiques. Généralement, on conçoit la gestion énergétique par la formulation d'une problématique, qui aboutit soit à une intelligence, soit à un dimensionnement particulier. Dans le cadre de cette thèse, on se limitera à l'élaboration des stratégies. La définition suivante est alors admise :

**Définition 1.5** (Stratégie de Gestion Énergétique).

La stratégie de gestion énergétique, désigne le processus algorithmique contrôlant les échanges d'énergie dans un système énergétique.

Cette section vise à comprendre les méthodologies et structures de commande employées pour élaborer une stratégie énergétique. Notre motivation est de relever les invariants et les manques.

Afin de clarifier cette étude, notons qu'il existe deux cadres d'application pour les stratégies énergétiques :

- *Hors-ligne* : le système est simulé, les scénarios et les conditions terminales sont déterminés. Ce mode est principalement réservé au dimensionnement ou bien à la



calibration des systèmes.

- *En-ligne* : l'optimisation a lieu en temps réel, à partir des mesures disponibles. Il existe donc des contraintes sur le temps et la mémoire attribués aux calculs. Dans certain cas, des informations sur un futur proche (voire une condition terminale) peuvent être estimées. Ce mode est celui de l'optimisation temps réel.

Les stratégies hors-lignes seront peu étudiées dans cette thèse. Le raisonnement se portera plus particulièrement sur les stratégies en-ligne.

## 1.4.1 Revues de la Gestion Énergétique

### 1.4.1.1 Les Problématiques

On dénombre quatre types de problèmes liés à la gestion de l'énergie.

#### Dimensionnement

Le dimensionnement d'un système énergétique est une phase de conception majeure. Elle consiste à trouver la structure, ou le jeu de paramètre qui optimise l'efficacité globale du système (SILVAS, HOFMAN et STEINBUCH 2012). FELLINI et al. (1999) simulent l'architecture parallèle d'un véhicule et l'optimisent pour déterminer les puissances des organes (e.g batterie, moteur électrique et thermique). Dans (Eric BIDEAUX et al. 2006), la structure du système est dimensionnée à partir de l'étude des flux de puissance.

Le dimensionnement repose sur des algorithmes d'optimisation globaux tel : la programmation dynamique (SINOQUET, ROUSSEAU et MILHAU 2011; Florian DUPRIEZ-ROBIN 2010; HOFMAN, DRUTEN et al. 2005), la programmation quadratique séquentielle (SQP) (FELLINI et al. 1999), la programmation par essais particuliers (PSO) (GAO, MI et EMADI 2007).

Cette tâche est intrinsèquement liée à la définition de l'environnement. Lorsque les scénarios sont diversifiés, elle s'avère compliquée. Une proposition intéressante de SOUF-FRAN, MIÈGEVILLE et GUÉRIN (2011) est de s'appuyer sur une définition statistique, comme les chaînes de Markov, pour décrire l'environnement.

**Plannification d'une trajectoire (e.g. Eco-driving)** L'objectif est d'élaborer une trajectoire pour les sorties (et/ou les états) d'un système, tel que ses fonctionnalités soient respectées tout en minimisant un coût. Dans le cadre des systèmes énergétiques, la fonction à minimiser correspond le plus souvent au coût de l'énergie (e.g. €/kW) mais peut aussi intégrer des notions plus générales comme le vieillissement d'organe, les rejets de polluant, etc.

Un exemple bien connu et emblématique est celui de l'éco-driving. Il consiste à élaborer une trajectoire, souvent définies par une vitesse, garantissant confort et sécurité pour une consommation de carburant, et un rejet de polluants minimisés (voir e.g. (LUU, NOUVELIERE et MAMMAR 2010; LUU 2011)). Cette problématique pose deux questions :

comment obtenir et traiter les informations de l'environnement ? Et, à quelle vitesse doit rouler le véhicule ? Certains s'appuient sur le véhicule précédent (KAMAL, MUKAI et MURATA 2011), d'autre sur le GPS (DIB et al. 2014) ou encore sur la connaissance du trafic (MENSING et al. 2013).

La recherche sur cette exemple est maintenant suffisamment avancée pour fournir des résultats expérimentaux (DIB et al. 2014). Plusieurs stratégies sont envisageables pour répondre à cette problématique. Les plus fréquentes sont basées sur des techniques de contrôle optimal, et leurs déclinaisons par horizon glissant (RHC) (LUU, NOUVELIERE et MAMMAR 2010 ; KAMAL, MUKAI et MURATA 2011). Un autre enjeu majeur de ce problème est la gestion du service lorsque l'énergie vient à manquer. Ce cas particulier reste peu étudié dans la littérature.

### **Distribution de ressources (e.g. Véhicule Hybride)**

L'hybridation a pour principe de coupler deux ressources pour combiner leur utilisation et tirer parti de leur avantages respectifs (coût, puissance, etc.) (PAYMAN 2009). Les architectures hybrides peuvent varier sensiblement suivant la nature et la position du couplage (Sébastien DELPRAT 2002 ; Walter LHOMME 2007), mais l'objectif est identique.

Il s'agit de l'une des problématiques les plus étudiées dans la littérature (cf. les *surveys* de (WIRASINGHA et EMADI 2011 ; SILVAS, HOFMAN et STEINBUCH 2012 ; A. SCIARRETTA et GUZZELLA 2007)). Cette problématique est généralement résolue par une approche type *Equivalent Consumption Minimisation Strategy* (ECMS), ou bien par application directe de la théorie de la commande optimale (Voir paragraphe suivant).

### **Concurrence de services**

La gestion de l'énergie pose la question de la distribution d'énergie entre différents services (e.g. chauffe-eau, chauffage, électroménager, etc.). Cette finalité est un invariant des systèmes énergétiques complexes. On la retrouve par exemple dans le domaine automobile lorsqu'en supplément de la mobilité, on considère les besoins énergétiques liés aux auxiliaires (e.g. climatisation, chauffage) (GROSSARD, KACHROUDI et ABROUG 2012). Ou bien dans le bâtiment où tous les consommateurs sont reliés à un même réseau électrique (ABRAS 2009)

Cette problématique est analogue à celle des systèmes sur-actionné. Un moyen de la traiter est donc de la formuler comme un problème d'allocation de ressource (OPPENHEIMER, DOMAN et BOLENDER 2006 ; VERMILLION, SUN et BUTTS 2007 ; Y. CHEN et J. WANG 2014). Une seconde voie explorée est de modéliser les services comme des joueurs qui coopèrent dans leurs échangent d'énergie (L. CHEN et al. 2010 ; SAAD et al. 2012 ; STEPHENS, SMITH et MAHANTI 2015). La résolution de ce problème passe par la théorie des jeux.

### 1.4.1.2 Structures de Commande

#### Commande Centralisée

L'approche la plus directe pour formuler la problématique énergétique est de concevoir un contrôleur centralisé (HA et al. 2006 ; PAYMAN 2009) dont le rôle est aussi bien d'assurer la production d'énergie par les sources, que les fonctionnalités des consommateurs. Cette méthode présente l'avantage de considérer toutes les interactions. Cependant, lorsque le système à concevoir est complexe, sa mise en œuvre peut se révéler ardue. De plus, comme le souligne dans sa thèse ZARATE FLOREZ (2012), de telles méthodes risquent d'aboutir à une solution trop compliquée pour être calculée dans le temps imparti.

Il est donc assez fréquent de devoir réaliser un travail de simplification ou bien de synthèse spécifique au cas d'étude.

#### Commande Hiérarchisée

Afin de simplifier le problème, l'une des approches préconisée est la structuration de la commande en niveaux hiérarchisés (ROSARIO et al. 2007 ; LEFORT et al. 2013). Ces idées s'appuient sur les résultats théoriques, en termes de stabilité et de sous-optimalité, des travaux sur la commande et la coordination des systèmes dynamiques hiérarchisés (cf. (MESAROVIC, MACKO et TAKAHARA 1970 ; FINDEISEN et al. 1980 ; SINGH 1980 ; SILJAK 1991)).

Dès les années 60, l'arrivée de la commande prédictive dans le milieu industriel s'accompagne d'une structuration du problème (RICHALET 1993). Classiquement, quatre niveaux de commande sont distingués. La Figure 1.8, présente une déclinaison de cette décomposition. Les sous-problèmes sont regroupés selon la dynamique des sous-systèmes considérés. En bas de l'échelle se situe les processus rapides, souvent en grand nombre. En haut, une instance unique de pilotage lente.

Dans le contexte des systèmes énergétiques, ROSARIO et al. (2007) proposent une structure hiérarchique à trois niveaux fondée sur les couches fonctionnelles des systèmes énergétiques, et leur dynamiques. Le niveau *EMS* (Energy Management System) construit une stratégie à long terme (e.g. quelques secondes pour un véhicule hybride) qui agit sur les systèmes inférieurs en modifiant leurs espaces de contraintes, ou bien leurs dynamiques. Le niveau *PMS* (Power Management System) traite les échanges d'énergie sur des instants rapides (e.g. millisecondes) afin de satisfaire l'équilibre entre demande et production tout en tenant compte des contraintes pré-calculées. Enfin, le dernier niveau noté *PES* (Power Electronic) concerne les ajustements opérés par l'électronique rapprochée, afin de garantir la stabilité et le respect des saturations.

#### Commande Décentralisée-Coordonnée

Dans sa thèse, ZARATE FLOREZ (2012) traite le cas très particulier de la production d'énergie par une suite de barrages hydrauliques. Ce système énergétique complexe

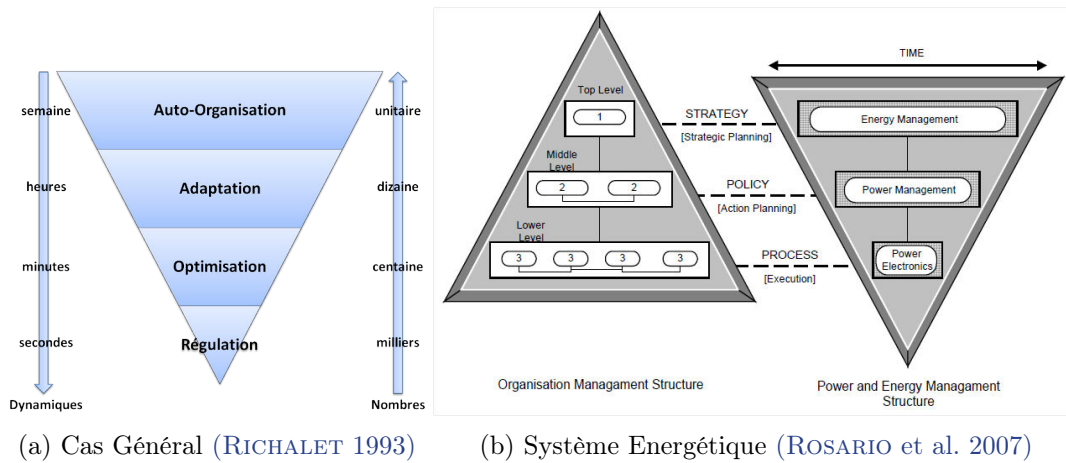


FIGURE 1.8 – Deux exemples de Contrôle Hiérarchique

présente une architecture où chaque ressource a une capacité dépendante des ressources en amont. Pour le résoudre, l'auteur propose la formulation d'un problème décentralisé-coordonné. Deux méthodes de coordination sont testées, *par les prix* et *par la prédiction des interactions*. La solution est calculée sur un horizon prédictif glissant, selon une méthode géométrique. L'objectif est ici de garantir une solution faiblement sous-optimale malgré les forts couplages.

La vision décentralisée est aussi privilégiée dans le domaine de la domotique. Pour la gestion du chauffage d'une maison, MOROŞAN et al. (2010) comparent les différentes formulations (centralisée, décentralisée et distribuée) à un contrôleur type MPC. Ils constatent que l'emploi d'un contrôle prédictif améliore les performances lors des transitions entre un espace occupé et vide, mais en contrepartie requiert un coût de calcul prohibitif. Pour cette raison, ils concluent que dans le cas de système de grande dimension, il y a un intérêt à s'appuyer sur une structure décentralisée du régulateur, et des problèmes simplifiés.

### Multi-Agent

Un moyen très générique et modulaire d'aborder les problèmes énergétiques, est de concevoir les sources et les consommateurs comme des agents, reliés à un même bus d'énergie (ABRAS 2009; JAMONT, MENDES et OCCELLO 2011). Pour cela, on suppose que les consommateurs et les sources sont autonomes du point de vue du « contrôle ». Il est alors possible de les encapsuler sous forme d'agents, dont les protocoles de communication sont fixés. Dans (ABRAS 2009) les échanges d'information sont réduits à une prévision des demandes en énergie, et à la satisfaction de l'agent. Dans cette méthode le raisonnement est identique, que le groupe de système soit globalement producteur d'énergie, ou bien consommateur. Cependant, comme le remarque ARNAL et ANTHIERENS (2011), les études exposent des résultats intéressants, mais restent limitées à des

simulations. De plus, à notre connaissance, le cas des systèmes énergétiques contenant plusieurs bus d'énergie de natures différentes n'a pas été examiné.

### 1.4.2 Stratégies de Gestion Énergétique

Deux étapes sont nécessaires à la conception d'une stratégie de gestion énergétique : formaliser les objectifs de contrôle inhérents à l'optimisation des flux énergétiques, développer et implémenter une méthode de résolution.

#### 1.4.2.1 Conception des critères

##### Critère de Minimisation des Pertes

SEILER et SCHRÖDER (1998) proposent pour les véhicules hybrides de se focaliser sur les pertes d'énergie dans la chaîne de traction pour formuler un critère. Celui-ci est appelé *Loss Minimization Strategy* (LMS) et permet d'estimer la répartition de puissance qui minimise les pertes totales. Ce point de vue est intéressant lorsque les ressources à disposition ont un coût sensiblement équivalent. Afin de tenir compte de l'état de charge dans les éléments à accumulation, il est cependant nécessaire d'introduire une fonction de sensibilité qui agit en fonction de la charge ou de la décharge (SCORDIA 2004).

##### Critère de Consommation Équivalente

Un second critère très étudié (PAGANELLI et al. 2000 ; A. SCIARRETTA et GUZZELLA 2007) est l'*Equivalent Consumption Minimization Strategy* (ECMS), ou stratégie de minimisation de la consommation équivalente. L'idée est simple, considérant une source primaire et une source réversible (e.g. véhicule hybride parallèle), toute décharge sur la source réversible devra à un instant donné, être compensée soit par la source primaire, soit par une régénération d'un des consommateurs.

Cette formulation a l'avantage d'offrir une explication pragmatique du critère optimisé. La complexité du paramétrage revient à trouver la valeur d'un unique coefficient  $s(t)$ , agissant comme une pondération entre les deux sources. En-ligne, ce dernier peut être déterminé par une analyse de la trajectoire passée (KOOT et al. 2005) ou bien instantanément d'après l'estimation de l'état de charge (KLEIMAIER et SCHRODER 2002). Dans (KEULEN, JAGER et STEINBUCH 2008), le coefficient est adapté en fonction du niveau de charge de la batterie et l'énergie cinétique récupérable.

#### 1.4.2.2 Méthodes de résolution

Il est couramment admis (SCORDIA 2004 ; A. SCIARRETTA et GUZZELLA 2007), que les méthodologies de gestion énergétique sont séparées en deux familles :

- les méthodes exactes, issues de la commande optimale,
- les méthodes heuristiques.

Plusieurs articles traitent de l'état de l'art des stratégies de commande appliquées aux cas particuliers des véhicules hybrides. Il est intéressant à cet égard de consulter les

travaux de WIRASINGHA et EMADI (2011) (et références incluses), pour une revue des stratégies appliquées aux véhicules hybrides type Plugged (PHEV) ; et SALMASI (2007) ou A. SCIARRETTA et GUZZELLA (2007) pour les véhicules hybrides classique (parallèle ou série). Une présentation synthétique de ces méthodes est donnée ci-après :

### Méthodes exactes

Les méthodes exactes sont en générale les plus compliquées à mettre en œuvre car elles nécessitent une résolution analytique du problème. Dans le cas où elles sont employées pour déterminer la commande d'un système dynamique tel qu'un critère soit minimiser, on parle de *commande optimale*.

La Programmation Dynamique est un moyen de résolution plébiscité qui s'appuie sur le *principe d'optimalité de Bellman*, i.e. la solution optimal d'un problème s'obtient à partir des solutions optimales des sous-problèmes. Il permet entre autre de résoudre les problèmes de commande optimale (BORNE et al. 1990).

Les approches dites d'Hamilton-Jacobi reposent sur le calcul de l'hamiltonien du problème, puis sur l'application directe du Principe du Maximum de Pontryagin (BORNE et al. 1990) pour obtenir la solution optimale, sur un intervalle donné.

Dans le domaine automobile, Sébastien DELPRAT (2002) a démontré son intérêt pour élaborer la stratégie énergétique d'un véhicule hybride parallèle. Il a été démontré que la complexité d'un tel problème peut être réduit à la détermination d'un multiplicateur de Lagrange  $\lambda_0$ . Puis dans (S. DELPRAT et al. 2004), qu'une relation pouvait s'établir entre l'approche pragmatique ECMS et l'application du Principe du Maximum pour un certain choix de  $\lambda_0$ .

Par ailleurs, plusieurs études (S. DELPRAT et al. 2004 ; N. KIM, S. CHA et PENG 2010) ont montré que ce coefficient était constant pour un scénario donné. Suite à ce constat, de nombreuses propositions ont été faites quant à l'obtention de ce paramètre en-ligne ou hors-ligne. Parmi celles-ci, nous retiendrons l'utilisation de la distribution de puissance passée (BERNARD et al. 2010 ; N. KIM, S. CHA et PENG 2010), ou bien de cartographie (KERMANI 2009).

### Heuristiques

Les méthodes heuristiques sont reconnues pour leur pragmatisme et sont, pour cette raison, privilégiées en contexte industriel. Dans les véhicules hybrides, elles sont notamment employées pour basculer d'un mode de fonctionnement à un autre. Par exemple, SCHOUTEN, SALMAN et KHEIR (2003), emploient de la logique floue pour gérer la répartition d'énergie dans un véhicule hybride. Dans (LIN et al. 2003 ; B. WU et al. 2004), les changements de mode sont conditionnés par des zones de puissance calculées hors-ligne par une programmation dynamique. Cette méthode offre l'avantage d'être optimale pour un scénario déterminé, mais n'apporte aucune garantie en cycle réel sans possibilité de

prédiction fiable.

Parmi les stratégies heuristiques, on retiendra aussi celles dites de *charge-sustaining/charge-depleting* (CS/CD) (Sébastien DELPRAT 2002 ; N. KIM, S. W. CHA et PENG 2012) qui distinguent deux modes de fonctionnement pour les sources réversibles. Le premier (CS) consiste à réguler son utilisation autour d'une valeur de charge nominale. L'objectif fonctionnel étant de garantir un certain état de charge en fin d'utilisation. Le second mode, vise à utiliser la source réversible comme une source classique, c'est à dire sans contrainte terminale sur son état de charge. Toutes deux peuvent s'appuyer sur la formulation *Equivalent Consumption Minimization Strategy* pour établir une stratégie de distribution optimisée.

Enfin, comme le remarquent HOFMAN, STEINBUCH et al. (2007), les approches heuristiques sont très intéressantes pour décrire et piloter les démarrages et arrêts des sources. Leur combinaison avec une méthode de commande optimale est judicieuse pour traiter des architectures dont l'état de fonctionnement varie dans le temps, comme c'est le cas pour un véhicule hybride parallèle, qui régénère l'énergie de freinage.

Ces approches ont souvent le désavantage de nécessiter une étude de calibration relativement complexe, faisant appel à une expertise du système considéré.

### 1.4.3 Apport de la Stratégie de Commande

#### 1.4.3.1 Invariants des Stratégies

La formulation des problèmes énergétique, notamment par l'approche *ECMS*, souligne la nécessité de quantifier le fonctionnement du système au travers d'un *coût énergétique*. L'obtention de cette valeur varie d'une étude à l'autre, mais l'idée est qu'elle détermine l'utilisation d'une ressource, et surtout permette une comparaison entre plusieurs moyens de production.

Un second invariant concerne la satisfaction des services. Le système énergétique pourvoit certaines fonctionnalités en énergie, et par conséquent garantit leur opérationnalité. Comme dans (GROSSARD, KACHROUDI et ABROUG 2012), ces objectifs fonctionnels doivent être formulés dans la stratégie.

Enfin, bien qu'elle ne soit pas systématique, la présence d'une source réversible (e.g. une batterie) dans les systèmes énergétiques facilite l'atteinte des objectifs précédents. Elle complique cependant fortement l'élaboration de la stratégie, en ajoutant des contraintes supplémentaires, notamment sur l'amplitude de l'état de charge.



### 1.4.3.2 Clé de Lecture de la Problématique Énergétique

Les remarques précédentes dégagent deux exigences quant à la gestion des systèmes énergétiques :

- l'opérationnalité : le système énergétique doit garantir par sa structure et son activité le maintien des fonctionnalités.
- l'optimalité énergétique : le coût énergétique associé au système doit être minimisé, dans la limite de l'opérationnalité.

En croisant les architectures listées au travers de la **section 1.3** (sur la modélisation multi-physique) avec ces exigences, on met en évidence un canevas matriciel, qui révèle une nouvelle lecture de la bibliographie (cf. Tableau 1.2). A chacune des mailles correspond au moins un problème, les problèmes les plus complexes étant composés de plusieurs mailles.

## 1.5 Conclusion du Chapitre

Dans notre examen de la littérature, nous avons approché la description des systèmes énergétiques selon trois volets : *la vision systémique*, *la modélisation multi-physique* et *la stratégie énergétique*.

La systémique se présente comme une démarche innovante pour la description des systèmes complexes, c'est à dire denses en interactions. Elle préconise une approche des systèmes selon des voies peu empruntées dans la littérature. On note l'existence de paradigme, apportant une clarification et une organisation dans la description des systèmes. Grâce aux connaissances universelles, l'environnement, l'évolution et l'activité des systèmes énergétiques ont pu être précisés.

La modélisation par élément multi-physiques s'inscrit comme un moyen de représentation incontournable pour décrire les systèmes énergétiques. Elle éclaire la compréhension relativement à la structure des systèmes, et à la nature des processus en action. Cet axe de recherche est relativement riche. On regrettera toutefois, qu'il n'apporte pas une définition plus précise des frontières du système énergétique.

Enfin, l'étude de la gestion énergétique par la littérature souligne une classification en quatre problèmes généraux. Pour y répondre, on dénombre plusieurs structures et solutions de commande, en majorité focalisée sur l'optimalité du système. Toutefois, il s'agit de méthodes faiblement génériques dont le développement nécessite une expertise du système dans sa globalité.

De l'étude de la modélisation et des stratégies énergétiques, nous avons extrait une classification croisant exigences de la stratégie (opérationnalité et optimalité) et architectures. Cette clé de lecture permet d'organiser la réflexion et les travaux bibliographiques selon le Tableau 1.2). Nous relevons ainsi que la majorité des cas traités concerne l'hybridation de ressources, ou bien l'optimisation d'un service vis-à-vis d'un scénario. Aucune



	Optimalité énergétique	Opérationnalité
<b>Conventionnelle</b>	<p>Dimensionnement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>chaîne de propulsion</i> : (SILVAS, HOFMAN et STEINBUCH 2012; FELLINI et al. 1999; SINOQUET, ROUSSEAU et MILHAU 2011; Florian DUPRIEZ-ROBIN 2010; HOFMAN, DRUTEN et al. 2005), (SOUFFRAN, MIÈGEVILLE et GUÉRIN 2011)</li> </ul> <p>Plannification de trajectoire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>confort thermique ou optique</i> : (ARNAL et ANTHIERENS 2011), (MOROŞAN et al. 2010)</li> <li>• <i>écodriving</i> : (LUU, NOUVELIERE et MAMMAR 2010), (DIB et al. 2014), (KAMAL, MUKAI et MURATA 2011), (GROSSARD, KACHROUDI et ABROUG 2012), (MENSING et al. 2013)</li> </ul>	
<b>Hybride</b>	<p>(Dimensionnement)</p> <p>(Plannification de trajectoire)</p> <p>Distribution de ressource :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>hybride série</i> : (BERNARD et al. 2010), (RIPACCIOLI et al. 2010)</li> <li>• <i>hybride parallèle</i> : (Sébastien DELPRAT 2002), (PAGANELLI et al. 2000),</li> </ul>	
<b>Multi-Services</b>	<p>(Dimensionnement)</p> <p>(Plannification de trajectoire)</p> <p>Concurrence de services :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Bâtiment</i> : (ABRAS 2009), (JAMONT, MENDES et OCCELLO 2011), (LEFORT et al. 2013)</li> <li>• <i>Véhicule</i> : (KACHROUDI, GROSSARD et ABROUG 2012), (GROSSARD, KACHROUDI et ABROUG 2012), (Y. CHEN et J. WANG 2014)</li> <li>• <i>Théorie des jeux</i> : (SAAD et al. 2012), (STEPHENS, SMITH et MAHANTI 2015)</li> </ul>	
<b>Multi-Source/Multi-Service</b>	<p>(Dimensionnement)</p> <p>(Plannification de trajectoire)</p> <p>(Distribution de ressources)</p>	<p>(Concurrence de services)</p>

TABLE 1.2 – Clé de lecture de la bibliographie

étude aborde directement le problème général des architectures multi-ressources, multi-services.

Finalement, cette synthèse bibliographique nous amène à remarquer que malgré les invariants structurels et stratégiques, il existe un manque quant-à une vision méthodologique de la formulation des stratégies de gestion pour les systèmes énergétiques. Nous proposons donc de positionner cette thèse sur la recherche d'une démarche de conception s'appuyant sur les outils systémiques, qui apportent une formulation générique, et en particulier modulaire, des systèmes énergétiques. Afin d'aboutir à une solution exploitable pour les systèmes embarqués, nous privilégierons la simplification de la formulation (notamment par une décomposition) à la recherche d'un optimum.



## Chapitre 2

# Méthodologie pour une Représentation Modulaire des Systèmes Énergétiques

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction du Chapitre</b>	<b>32</b>
<b>2.2</b>	<b>Le Référentiel Système</b>	<b>32</b>
2.2.1	Présentation	32
2.2.2	La Représentation par Ensemble Organico-Fonctionnel (EOF)	34
<b>2.3</b>	<b>Caractérisation du Système Énergétique</b>	<b>36</b>
2.3.1	Les (EOF-Énergie)	36
2.3.2	La Chaîne Énergétique	36
2.3.3	Le Système Énergétique	40
2.3.4	Discussion	41
<b>2.4</b>	<b>Représentation Modulaire du Système Énergétique</b>	<b>43</b>
2.4.1	Hypothèses de Travail et Objectif	43
2.4.2	Nomenclature des Modules Énergétiques	44
2.4.3	Causalité de Pilotage	45
2.4.4	Guide de Conception des Modules Énergétiques	48
2.4.5	Résumé	52
<b>2.5</b>	<b>Module d'Interconnexion Énergétique : le Nœud</b>	<b>52</b>
2.5.1	Description du Nœud	52
2.5.2	Exemple	55
<b>2.6</b>	<b>Conclusion du Chapitre</b>	<b>56</b>

---

## 2.1 Introduction du Chapitre

Générique et modulaire sont deux propriétés plébiscitées par les industriels dans leurs démarches de conception des systèmes. La première rend compte de la capacité d’une approche fondée sur l’utilisation d’objets ou de problèmes génériques. La seconde qualifie la capacité d’une approche à dissocier le système considéré en sous-systèmes génériques dont la conception et le fonctionnement peuvent être réalisés indépendamment.

Comme le souligne notre état de l’art, la systémique et le développement d’outils de modélisation dédiés aux systèmes énergétiques, suggèrent l’existence d’une genericité pour ces derniers. Cependant, nous n’avons relevé aucune synergie entre cette propriété et les conceptions des stratégies énergétiques, telles qu’elles sont actuellement pratiquées. La modularité est quant-à-elle quasiment inexistante, la gestion énergétique étant le plus souvent réalisée à partir d’une modélisation globale des problèmes (FELLINI et al. 1999; KACHROUDI, GROSSARD et ABROUG 2012; LUU, NOUVELIERE et MAMMAR 2010).

Tenant compte de ces remarques, nous proposons dans ce chapitre une vision, à notre connaissance originale et pragmatique des systèmes énergétiques. Celle-ci est fondée sur une approche organico-fonctionnelle, qui enrichit la vision générique des systèmes énergétiques, et offre un support multi-physique propice à une décomposition modulaire. L’objectif est de formuler deux classes de modules énergétiques : les modules *clients* et les modules *sources*. Ceux-ci sont mis en relation par le biais d’un module d’interconnexion énergétique nommé *nœud*, porteur de la stratégie énergétique.

Ce chapitre est organisé en trois sections. La **section 2.2** introduit succinctement le référentiel de conception employé par SHERPA ENGINEERING, qui est le point de départ de notre raisonnement systémique. La **section 2.3** caractérise les systèmes énergétiques par le moyen d’ensembles organico-fonctionnels (voir *Définition 2.1*). La **section 2.4** présente le formalisme modulaire, par la définition des modules énergétiques, de leurs conventions de communication et de leurs causalités. Enfin, la **section 2.5** définit le module d’interconnexion énergétique.

## 2.2 Le Référentiel Système

### 2.2.1 Présentation

En Ingénierie des Systèmes, la conception s’appuie sur des démarches standardisées, en général propre aux entreprises. SHERPA ENGINEERING, partenaires de ces travaux de recherche, emploie pour ses propres besoins un référentiel à six niveaux, dérivé des principes de la systémique de Le-Moigne (voir **section 1.2**). Cet outil est principalement dédié à un usage industriel, toutefois, on note son utilisation dans quelques travaux académiques, par exemple (ARNAL 2013), où il est appliqué à la conception du confort thermique et visuel d’un immeuble.

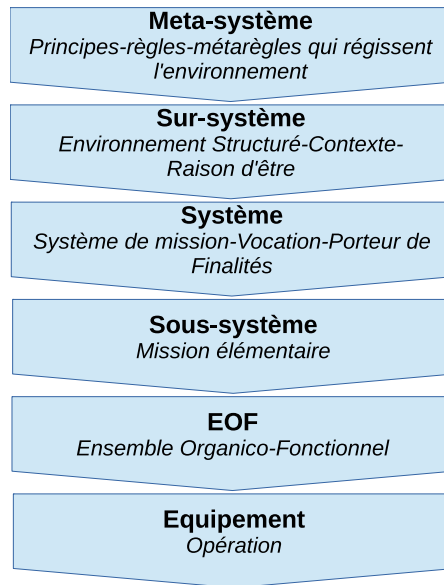


FIGURE 2.1 – Description des six niveaux systèmes (SHERPA ENGINEERING 2013)

Le référentiel considéré ici, et appelé par la suite *référentiel système*, articule six niveaux de description, représentés sur une échelle verticale (voir Figure 2.1). A chaque niveau, le point de vue sur le système et la nature de son modèle sont modifiés, tout en conservant une observation holiste (environnement, structure, finalité, etc.). Il s'agit là d'un processus d'abstraction/raffinement du système, conforme aux principes systémiques. A titre de comparaison, les démarches plus usuelles de *Targeting Cascading* (ALLISON et al. 2006 ; H. M. KIM, MICHELENA et al. 2003 ; H. M. KIM, RIDEOUT et al. 2003) conservent la nature des systèmes mais affinent la description par un procédé de réduction, plus proche de l'analyse.

Les niveaux du référentiel, et la nature de leurs informations sont définis ainsi :

- le *méta-système* contient l'ensemble des règles, telles les normes ou les principes physiques, auxquels sont sujets le système et son environnement. Il décrit la connaissance universelle de l'humain sur le système.
- Le *sur-système* positionne le système vis-à-vis de son environnement et de l'infrastructure qui le porte. Par exemple, le sur-système d'un véhicule contient le réseau routier, la circulation, les points de recharge énergétique, etc. Ce niveau exprime la raison d'être du système.
- Le *Système de missions* définit le système considéré au travers des missions qu'il doit réaliser, et du service final qu'il doit rendre à l'homme.
- Le niveau *sous-système* décrit les prestations intégrées au système. En pratique, à chaque sous-système correspond une mission du système de mission.
- Le niveau *Ensemble Organico-Fonctionnels* modélise un sous-système porteur d'une

mission selon des ensembles organico-fonctionnels, c'est-à-dire des fonctions ayant une solution organique (voir *définition 2.1*).

- Le niveau *Équipement Opération* est celui de la composition matérielle du système. Il présente une solution technologique sous la forme, par exemple, d'un schéma électronique, ou bien d'un dessin technique.

Dans (ARNAL 2013), la conception par le référentiel souligne deux finalités pour décrire une habitation : la *survivabilité* et la *vivabilité*. Le premier concerne les missions de sécurité (incendie, intrusion, ...), le second les missions de confort. Ces définitions sont illustrés par la Figure 2.2.

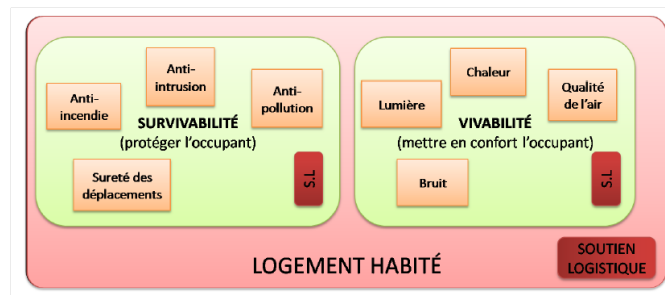


FIGURE 2.2 – Description Niveau Sur-Système d'un Logement Habité (Source : (ARNAL 2013))

## 2.2.2 La Représentation par Ensemble Organico-Fonctionnel (EOF)

Dans le langage du *référentiel système*, il est défini que :

**Définition 2.1** (Ensemble Organico-Fonctionnel (EOF)).

Un Ensemble Organico-Fonctionnel (EOF) identifie une fonctionnalité pour laquelle une solution organique existe.

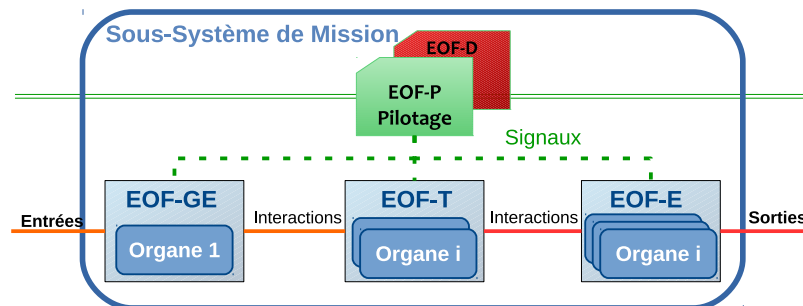


FIGURE 2.3 – Niveau EOF (lien rouge : électrique ; lien orange : mécanique ; lien vert : informationnel)

La Figure 2.3 présente la modélisation d'un sous-système de mission, au niveau (EOF). On distingue trois types d'(EOF), constituant une chaîne d'interaction ordonnée de la gauche vers la droite :

1. *EOF-Gestionnaire d'Entrées* (EOF-GE),
2. *EOF-Transformateur* (EOF-T), et
3. *EOF-Effecteur de sortie* (EOF-E).

Les interactions entre ces (EOF) sont représentées par des traits pleins. A noter que dans le cas général la nature de ces interactions est ouverte, et se précise en fonction du contexte. Il peut s'agir par exemple de liens *humain-humains* (i.e. sociaux), *humain-machines* ou *machine-machines* (i.e. physique), etc.

Les (EOF) sont sous la supervision ou le contrôle d'une intelligence, par le biais de liens de communication (lignes discontinues vertes sur les schémas). En général, trois niveaux d'intelligence suffisent pour modéliser les systèmes complexes :

- *Niveau Opérant* (EOF-OP) : effectue l'opération,
- *Niveau Pilotage* (ou information) (EOF-P), et
- *Niveau Décisionnel* (EOF-D).

Par exemple, pour la conduite d'un véhicule, le niveau opérant regroupe les boucles de contrôle bas niveau de la propulsion/direction ; le niveau de pilotage, correspond au « robot » qui accélère, freine, tourne le volant ; le niveau décisionnel établit l'ordre de dépasser un véhicule, de changer un rapport de boîte, etc.

Dans cette thèse, nous traiterons principalement les intelligences de nature pilotage, le décisionnel sera secondaire. Par conséquent seuls les (EOF-P) seront présents sur les prochaines figures.

Pour compléter cette description, on peut distinguer trois modes de contrôle suivant les liens qui sont définis entre l'intelligence (EOF-P, EOF-D) et les autres (EOF) : *poussé*, l'action se fait par l'(EOF-GE) ; *tiré*, l'action se fait par l'(EOF-E) ; et *maîtrisé*, l'action se fait par l'(EOF-T) tout en communiquant avec les autres (EOF). Ces variantes sont présentées par la Figure 2.4.

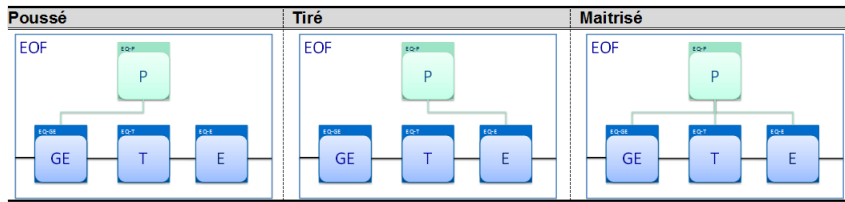


FIGURE 2.4 – Mode de Pilotage des EOF

Enfin, remarquons que les (EOF) sont des entités en-capsulées, à l'image des « poupées gigognes ». Sans changer de nature de modélisation, on affine la description d'un sous-système en exprimant le contenu de ces (EOF) par une nouvelle chaîne d'(EOF)



conservant l'organisation de la Figure 2.3. Le passage vers une description type « composant » s'effectue par continuité, en passant au niveau Équipement Opération (EO), non-décrit ici.

## 2.3 Caractérisation du Système Énergétique

### 2.3.1 Les (EOF-Énergie)

Dans cette thèse, nous appelons *EOF-énergie* un sous-système admettant pour entrée une ressource brute, et livrant en sortie une énergie utile au service d'une mission. Nous avons le sentiment qu'un tel sous-système peut être modélisé par une chaîne d'(EOF) dont les interactions sont uniquement de nature *énergétique* (voir Figure 2.5). Les relations fonctionnelles suivantes sont alors définies :

- (EOF-GE) met à disposition une énergie primaire à partir de la ressource
- (EOF-T) transforme l'énergie primaire en une énergie utile
- (EOF-E) livre l'énergie requise au service d'une mission.

Ces trois éléments sont sous la supervision d'un processus de pilotage. Celui-ci centralise les informations provenant à la fois de l'environnement et des autres sous-systèmes adjacents. Ce canal trans-système est symbolisé par une double ligne verte.

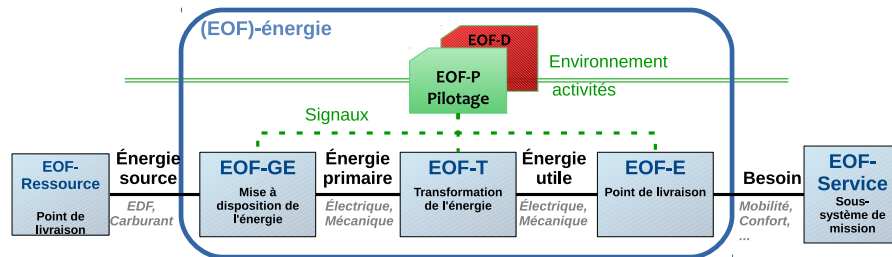


FIGURE 2.5 – Identification du (EOF-énergie) d'un Sous-Système

Par la suite, nous postulons que tous les sous-systèmes de mission contiennent ou sont reliés à un (EOF-énergie). Celui-ci peut être obtenu par réorganisation des (EOF) initiaux. Un tel procédé est implicitement utilisé dans les travaux de [ARNAL et ANTHIERENS \(2011\)](#), dans lesquels le sous-système de mission *vivabilité* est initialement modélisé par trois (EOF), avant d'être affiné (voir Figure 2.6). On remarque alors que l'(EOF)-GE est, dans ce cas particulier, assimilable à un (EOF)-énergie. Les (EOF) complémentaires (i.e. (EOF)-T et (EOF)-GE) sont mutualisés pour décrire les missions de confort.

### 2.3.2 La Chaîne Énergétique

Pour un système contenant plusieurs sous-système de missions, il résulte de notre postulat une série d'(EOF-énergie). Dans certain cas, ces (EOF) ciblent des solutions organiques communes.

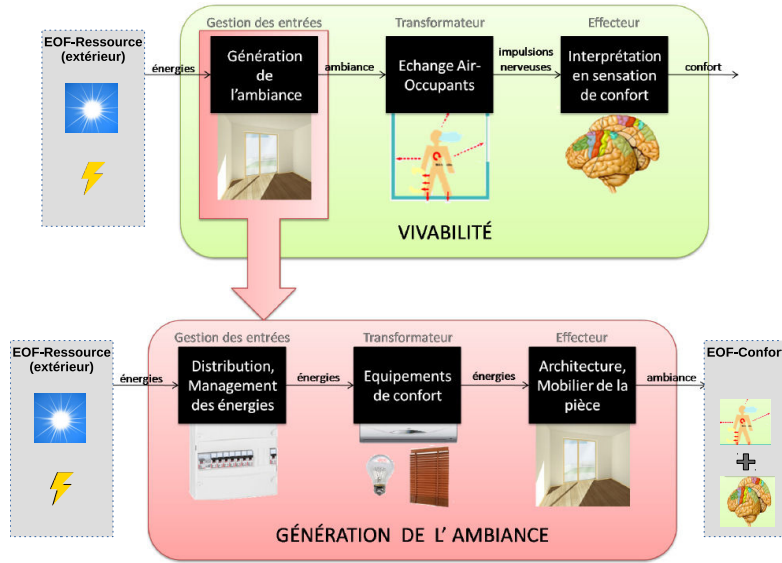


FIGURE 2.6 – Caractérisation de l'(EOF-énergie) pour le sous-système *vivabilité* ARNAL 2013

Par exemple, pour un système de mission arbitraire contenant trois sous-systèmes, on identifie trois (EOF-énergie) (Fig. 2.7). Dans ce cas particulier, on observe (Fig. 2.7a et Fig. 2.7b) que deux services distincts (Service A, et Service B), partagent des (EOF) communs, en l'occurrence l'(EOF-GE)<sub>2</sub> et l'(EOF-T)<sub>2</sub>. Concrètement cela sous-entend que ces fonctionnalités sont réalisées par un même groupe d'organes. A l'inverse, le service C, décrit par (Fig. 2.7c), présente un cheminement énergétique organiquement indépendant des deux autres.

Nous proposons de concaténer les (EOF-énergie) contenant des groupes d'organes en commun, au travers d'un nouvel objet énergétique que nous nommons *chaîne énergétique*. Cette idée est résumée par la définition suivante :

**Définition 2.2** (Chaîne Énergétique).

L'agrégation d'(EOF-énergie) identifiés au sein de sous-systèmes de mission différents, mais présentant des organes en communs, forme une *chaîne énergétique*.

Dans le cas de l'exemple précédent (Fig. 2.7) , les (EOF-énergie) sont mutualisés pour former deux chaînes énergétiques (Fig. 2.8). Pour terminer, remarquons que deux chaînes énergétiques ne partagent pas de ressources, de services, ni de systèmes de pilotage, même si elles sont issues d'un même système.

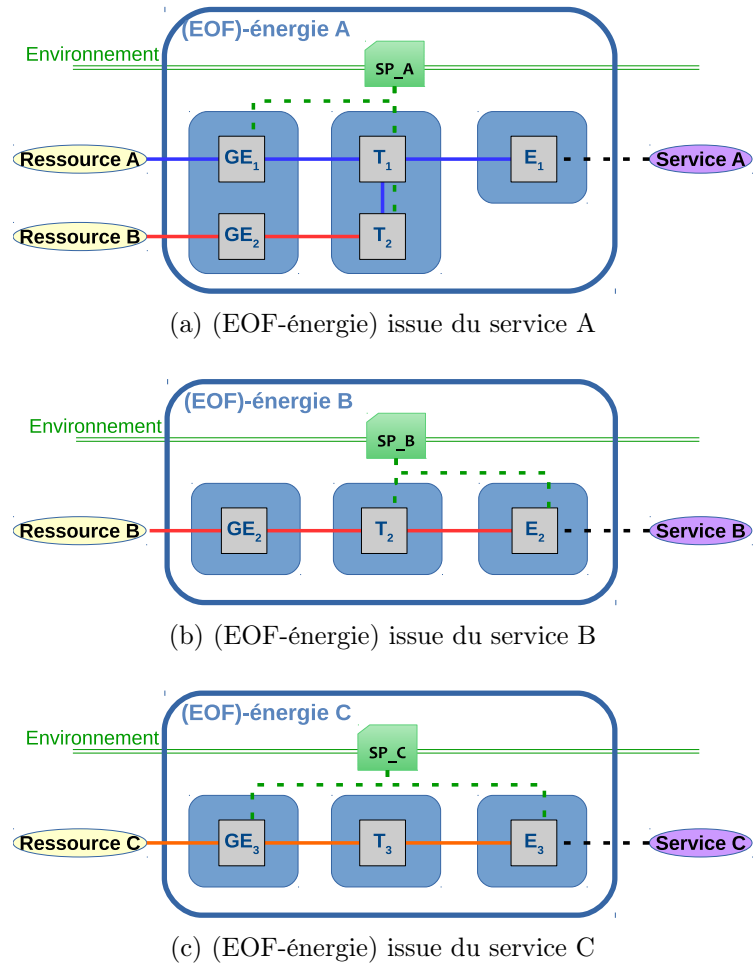
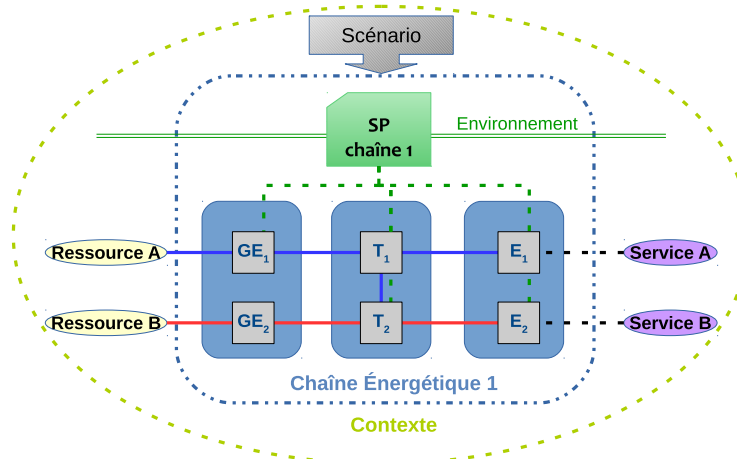
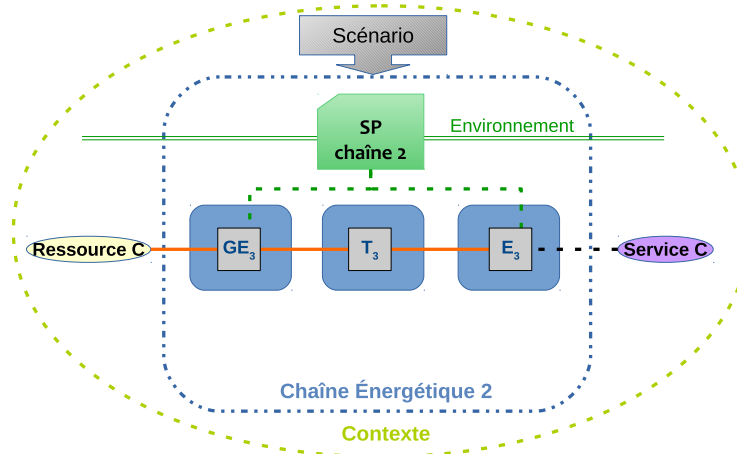


FIGURE 2.7 – (EOF-énergie) : Exemple trois missions



(a) Chaîne Énergétique 1



(b) Chaîne Énergétique 2

FIGURE 2.8 – Chaînes Énergétiques obtenues par regroupement des (EOF)-énergies

### 2.3.3 Le Système Énergétique

Dernière étape de la caractérisation systémique, le système énergétique est défini comme la mutualisation des chaînes énergétiques. On pose la définition suivante :

**Définition 2.3** (Système Énergétique).

Le système énergétique d'un système de mission est le complexe des chaînes énergétiques identifiées au sein de chaque sous-système. La mise en commun des ressources et des services définissent son contexte.

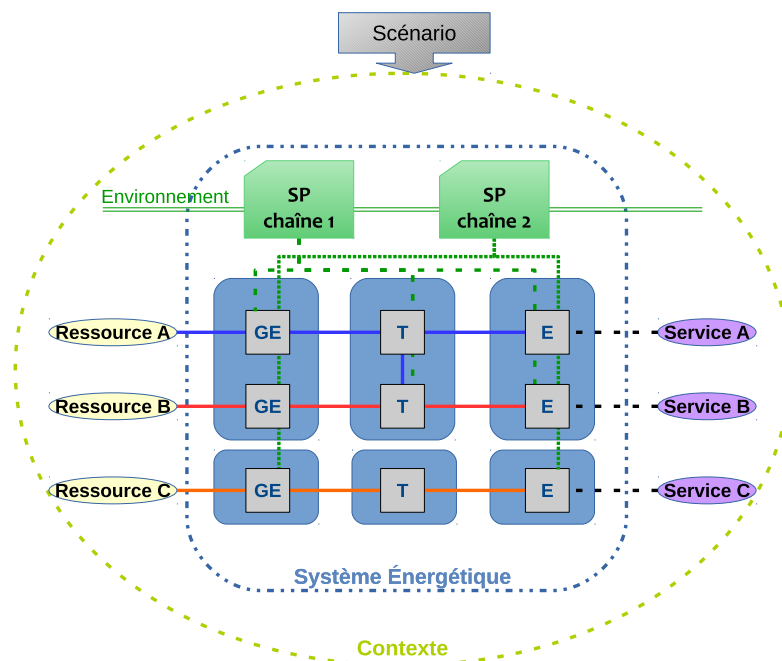


FIGURE 2.9 – Définition Organico-Fonctionnelle du Système Énergétique (exemple avec trois missions)

La Figure 2.9 représente une vue synthétique du système énergétique dans le cadre de l'exemple du système à trois missions considéré jusqu'à présent. Le contexte du système énergétique global est défini par agrégation des contextes associés à chacune des chaînes énergétiques. L'activité future et passée se déduit du scénario (déterministe ou probabiliste, réel, ou simulé lors d'une phase de conception par exemple). Ces conventions complètent la description de l'environnement proposée dans la **section 1.2**.

Le pilotage des éléments est réalisé par un processus centralisé, potentiellement capable de communiquer avec l'environnement (mesures, prévisions). Il symbolise ce que l'on nomme couramment *stratégie énergétique*.

### 2.3.4 Discussion

#### 2.3.4.1 Intérêts et Liens avec la Littérature

La démarche de caractérisation, que nous proposons ici, s'appuie sur l'utilisation d'un support graphique multi-physiques, pour faciliter la compréhension des systèmes énergétiques et leur intégration dans les systèmes généraux. Son intérêt est double.

Tout d'abord, elle s'inscrit dans la continuité des processus de conception de l'ingénierie système, en s'appuyant notamment sur un référentiel systémique pour la construction d'un socle organico-fonctionnel, l'(EOF-énergie).

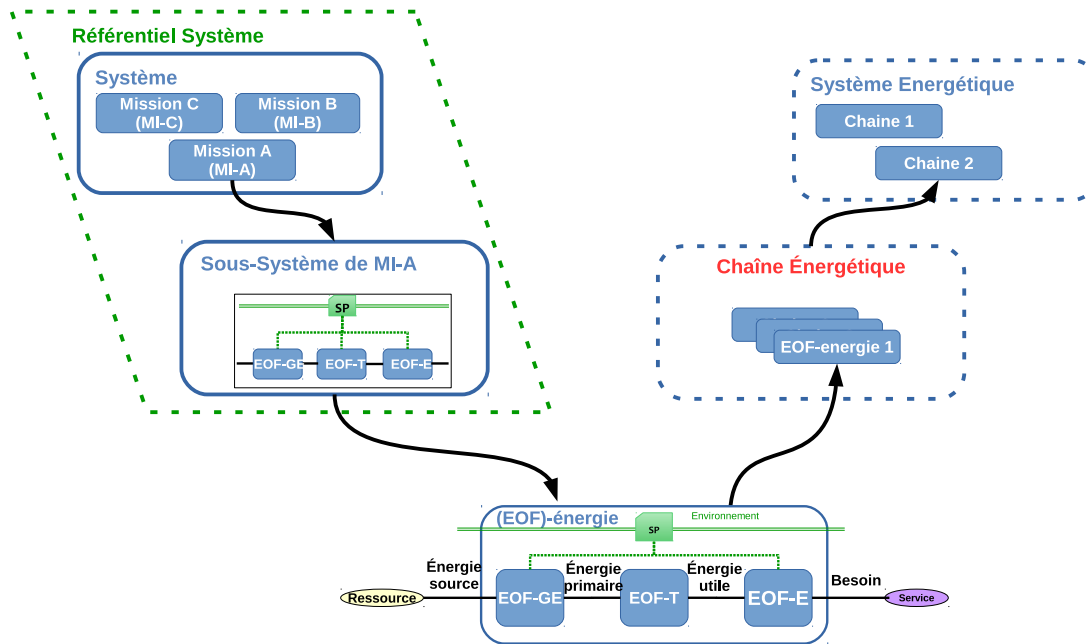


FIGURE 2.10 – Caractérisation des systèmes énergétiques par continuité du référentiel système

Par ailleurs, le parcours des étapes de caractérisation : (EOF-énergie), puis chaîne énergétique, puis système énergétique (Fig. 2.10) clarifie la structure énergétique, tout en conservant la trace des finalités originelles (services).

Le niveau (EOF) est particulièrement utile, car il isole les groupes organiques par fonctionnalité, tout en gardant un niveau de détails suffisant pour faire apparaître des liens physiques génériques. L'intérêt ici est de souligner l'architecture du système, et les cheminements d'énergie possibles, des ressources jusqu'aux finalités du système.

L'objet *chaîne énergétique* est le pivot de cette description. Il lie les principes et outils de modélisation rencontrés dans notre état de l'art (voir **chapitre 1**). Tout d'abord, au niveau « haut », en identifiant les éléments de contexte tels les *ressources* et les *services* (voir **section 1.2**). Mais aussi, par le « bas », en proposant une trame organico-fonctionnelle qui vient en surcouche des outils de modélisation multi-physique (e.g. REM,

Bond Graph).

#### 2.3.4.2 Finalités et Exigences

Les systèmes énergétiques étant construits comme un composé de ces chaînes énergétiques (voir *définition 2.3*), leur finalité se déduit comme un complexe des vocations des chaînes énergétiques. Nous posons alors :

**Définition 2.4.** La mission majeure des systèmes énergétiques est la mise à disposition intelligente des ressources en vue de garantir un ensemble de fonctionnalités, réalisable au travers des chaînes énergétiques.

Cette mission principale est complétée de deux exigences, extrapolées de notre revue sur la gestion énergétique :

- l'optimalité énergétique par :
  - la gestion des ressources
  - la transformation de l'énergie
  - la satisfaction des services
- l'opérationnalité par :
  - la sécurité et la robustesse du système et de son environnement

Les éléments ci-dessus précisent le cadre stratégique proposé pour la gestion énergétique. Les problématiques énergétiques rencontrées dans notre état de l'art ont vocation à être revisitée dans ce cadre.

#### 2.3.4.3 Formulation Synthétique d'un Problème d'Optimisation

Toujours avec la motivation de rester générique, nous proposons de résumer finalités et exigences en formulant un problème d'optimisation multi-sources/multi-services synthétique, noté  $\mathbf{PO_g}$ .

---

Problème de Gestion Énergétique Multi-Sources/Multi-Services ( $\mathbf{PO_g}$ )

---

critère :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{cout d'utilisation des ressources} \\ \text{perte de transformation} \\ \text{satisfaction des services} \end{array} \right.$$

sujet :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{au scénario} \\ \text{à la limitation des ressources (réversibilité et capacité)} \\ \text{aux saturations physiques (e.g. amplitude de puissance)} \\ \text{aux dynamiques des composants} \\ \text{aux couplages de puissance (jonction ou disjonction)} \end{array} \right.$$


---

Celui-ci reprend les coûts identifiés dans notre revue en **section 1.4** : *l'utilisation des ressources, les pertes de transformation et la satisfaction des services*. Cette liste exhaustive nous semble suffisante pour expliciter les problèmes d'optimisation liés à la gestion énergétique. A l'inverse, la liste des contraintes n'est pas figée à ce stade.

## 2.4 Représentation Modulaire du Système Énergétique

La méthodologie que nous souhaitons introduire est, dans les grands axes, voisine des méthodologies de conceptions des gestionnaires énergétiques *multi-agents* (ABRAS 2009), à la différence qu'elle distingue deux natures de modules énergétiques, nommés *clients* et *sources*, en lien direct avec les éléments du sur-système : *services* et *ressources*. Dans cette section, nous présentons leur nomenclature, leur protocole de communication, ainsi qu'un guide de conception. Nous définissons aussi une *causalités de pilotage*, pour signifier si le module a ou non la maîtrise directe de ses échanges d'énergie.

### 2.4.1 Hypothèses de Travail et Objectif

Dans la suite, nous ferons les hypothèses suivantes :

**Hypothèse 2.5.** *Le système étudié est caractérisé au travers de la vision systémique, dans le cadre du référentiel système.*

Autrement dit, le système de missions et ses sous-systèmes porteurs de finalités sont identifiés, et un modèle (EOF) du système énergétique peut être extrait suivant la méthodologie précédente (*définition 2.3*).

**Hypothèse 2.6.** *Tous les modules énergétiques disposent (sauf si précisé) d'une connaissance de l'environnement suffisante pour prédire le scénario d'activité sur un horizon de temps  $T_p$  glissant.*

Cette hypothèse sera symbolisée graphiquement par une double ligne verte et mathématiquement par le signal  $w(t)$ .

*Remarque 2.7.* Dans nos figures, le système possède une représentation endogène mais son ouverture sur son environnement est traitée implicitement au travers des composants du contexte (i.e. ressources, services, scénarios).

**Hypothèse 2.8.** *Pour chaque interaction service-(EOF-E) et ressource-(EOF-GE), on peut définir :*

- *la satisfaction : fonction qualifiant la réalisation du service.*
- *le coût énergétique : fonction qualifiant la mise à disposition d'une ressource.*

Pour rappel, notre objectif est de concevoir une méthodologie de représentation modulaire, c'est-à-dire, dont l'élaboration ne nécessite pas la connaissance détaillée du fonctionnement des consommateurs et des ressources qui l'environnent. Cette méthode doit aussi être compatible avec les principes de gestions énergétiques existant.



## 2.4.2 Nomenclature des Modules Énergétiques

Pour atteindre les objectifs fixés, les (EOF) de la chaîne énergétique sont réorganisés de façon à concevoir deux modules énergétiques : *le client* (définition 2.9) et *la source* (définition 2.11). Ceux-ci sont assimilés à des boîtes noires et communiquent à partir de signaux conventionnés : *le besoin* (définition 2.10) et *la disponibilité* (définition 2.12). Le lien de causalité pour leurs échanges énergétiques est défini à la section 2.4.3 par la notion de *causalités de pilotage*.

### 2.4.2.1 Le Client

**Définition 2.9** (Module Énergétique Client).

**Le client** est un module énergétique assujetti à l'un des services du système de missions. Son rôle est de maximiser la satisfaction du service en consommant au mieux une énergie disponible.

Ce module se compose a minima d'un couple formé par un service et l'(EOF-E) qui le réalise. Il contient potentiellement plusieurs organes transformateurs d'énergie provenant d'un (EOF-T), à condition que ces derniers ne soient pas séparés par une jonction énergétique. Pour une plus grande clarté, l'ensemble des organes constituant le client est nommé Système Opérant (SO) (Fig. 2.11).

Le client  $i$  est un élément multi-ports qui possède une connaissance partielle de son environnement. Lorsqu'il est connecté à un second module  $m$ , de type *source*, il échange par son port physique de l'énergie, notée  $P_{c_i}^f$  (puissance fournie), ou  $P_{c_i}^c$  (puissance consommée) suivant la causalité retenue. Il reçoit les *disponibilités* en énergie  $(d)_m^{c_i}$  et communique en retour un *besoin*  $(b)_{c_i}^m$  dont le contenu est défini ci-après.

**Définition 2.10** (Signal de Besoin).

**Le besoin**  $(b)_{c_i}^m$  en provenance d'un client  $c_i$  et reçu par un module  $m$ , concatène les informations suivantes :

$$(b)_{c_i}^m := \begin{cases} P_{c_i}^{max}(t) & : \text{la puissance maximale échangeable,} \\ P_{c_i}^{min}(t) & : \text{la puissance minimale échangeable,} \\ P_{c_i}^b(t) & : \text{la puissance nominale désirée,} \\ S_{c_i}(P_{c_i}^e) & : \text{la fonction de satisfaction} \end{cases}$$

Le détail précis de ces signaux est donné en même temps que la présentation des modules à la section 2.4.4.

### 2.4.2.2 La source

**Définition 2.11** (Module Énergétique Source).

**Une source** est un module énergétique associé à une ressource du système. Elle a pour fonction de mettre à disposition une énergie en réponse à une demande, pour un coût minimal et dans la limite de sa capacité.

Ce module énergétique est composé d'un couple formé par un (EOF-GE) et la ressource qu'il exploite. Il contient potentiellement plusieurs organes transformateurs d'énergie provenant d'un (EOF-T), à condition que ces derniers ne soient pas séparés par une jonction énergétique. Le groupe d'organes ainsi constitué est nommé Système Générateur (SG) (Fig. 2.11).

La source hérite des propriétés de la ressource exploitée, à savoir une réversibilité potentielle et une capacité, toutes deux pouvant être limitées (cf. **section 1.2, chapitre 1**). Comme le client, elle possède aussi une connaissance partielle de son environnement.

Il s'agit d'un élément multi-ports. Lorsqu'elle est reliée à un module  $m$  de nature *client*, elle échange par son port physique une puissance, notée  $P_{s_i}^f$  ou  $P_{s_i}^c$  suivant la causalité. Par son port de communication, elle reçoit un *besoin*  $(b)_m^{s_j}$  et communique en retour une *disponibilité*  $(d)_{s_j}^m$  dont le contenu est défini ci-après.

**Définition 2.12** (Signal de Disponibilité).

La disponibilité  $(d)_{s_j}^m$  reçue par un module  $m$  et en provenance d'une source  $s_j$ , concatène les informations suivantes :

$$(d)_{s_j}^m := \begin{cases} P_{s_j}^{max}(t) & : \text{ la puissance maximale échangeable} \\ P_{s_j}^{min}(t) & : \text{ la puissance minimale échangeable} \\ E_{s_j}^d & : \text{ l'énergie disponible sur l'horizon} \\ Ec_{s_j}(P_{s_j}^e) & : \text{ la fonction coût de l'énergie.} \end{cases} \quad (2.1)$$

Le détail précis de ces signaux est donné en même temps que la présentation des modules à la section 2.4.4.

### 2.4.3 Causalité de Pilotage

Source et client sont naturellement compatibles. La normalisation de leurs ports (physiques et de communications) autorise à les connecter directement, à condition de respecter des conventions de causalité pour le contrôle. On distingue deux causalités de pilotage pour chaque module, schématisées par la Figure 2.11. Sur cette figure, les légendes suivantes sont adoptées : les signaux sont représentés par des traits verts orientés et discontinus. Les liens physiques sont des traits pleins noirs, et leur orientation traduit la causalité ; les modules ont une connaissance individuelle de l'environnement (notamment par les scénarios), cette information est schématisée par une double ligne verte ; enfin, le module disposant de la causalité de contrôle admet une bordure légèrement plus épaisse.

Pour comprendre l'origine des causalités de pilotage, il faut lever le voile sur les modules et détailler les relations (physiques et informationnelles) régissant leur comportement. Pour illustrer, on symbolise l'intelligence interne des modules par un bloc de contrôle (CTRL), et les groupes d'organes par (SG) ou (SO) définis précédemment.

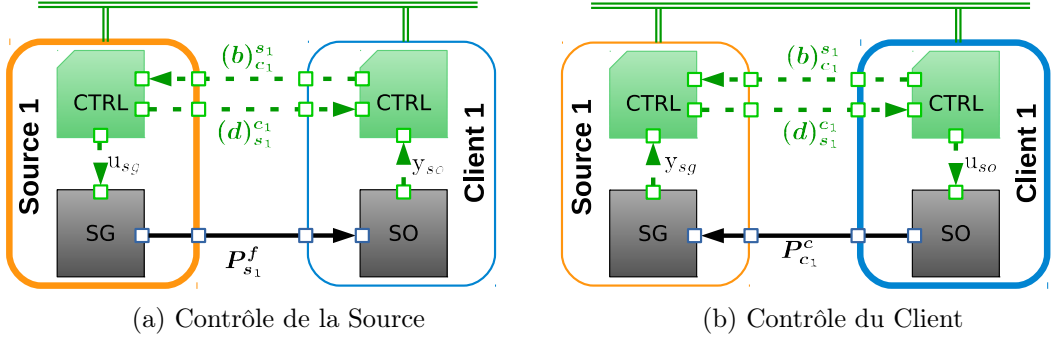


FIGURE 2.11 – Causalité de Pilotage pour le Lien Source-Client

La *causalité source* correspond au cas où la source détient le contrôle sur son système générateur (SG), via une variable interne ( $u_{sg}$ ). Celle-ci reçoit un besoin  $(b)_{c_1}^{s_1}$ . Elle traite la demande afin d'établir une consigne de commande ( $u_{sg}$ ) pour le système générateur (SG). Ce dernier impose en sortie de la source l'échange de puissance, nommé *puissance fournie*  $P_{s_1}^f$ . Ce cas est représenté par la Figure 2.11a.

Cette causalité est représentée par la relation (2.2), où  $w$  formalise l'influence de l'environnement. Un client connecté directement à une source voit son comportement décrit par l'équation (2.3), où  $y_{so}$  est la sortie physique supportant le service fourni.

$$\begin{cases} (d)_{s_1}^{c_1} &= \Xi_s((b)_{c_1}^{s_1}, w) \\ P_{s_1}^f &= \Phi_s(u_{sg}, w) \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} (b)_{c_1}^{s_1} &= \Xi_c((d)_{s_1}^{c_1}, w) \\ y_{so} &= \bar{\Phi}_c(P_{s_1}^f, w) \end{cases} \quad (2.3)$$

La seconde causalité, notée *causalité client*, correspond à un pilotage où la stratégie est interne au client. Celui-ci reçoit une disponibilité  $(d)_{s_1}^{c_1}$ , qu'il convertit en une consigne de commande  $u_{so}$  pour le système opérant (SO). Ce dernier impose en sortie du client l'échange de puissance, nommé *puissance consommée*  $P_{c_1}^c$ . Ce cas est schématisé par la Figure 2.11b.

Cette causalité est formalisée au travers de la relation (2.5), où  $w$  formalise l'influence de l'environnement. Une source connectée directement à un client voit son comportement décrit par l'équation (2.4), où  $y_{sg}$  est la sortie physique impactant la ressource.

$$\begin{cases} (d)_{s_1}^{c_1} &= \Xi_s((b)_{c_1}^{s_1}, w) \\ y_{sg} &= \bar{\Phi}_s(P_{c_1}^c, w) \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} (b)_{c_1}^{s_1} &= \Xi_c((d)_{s_1}^{c_1}, w) \\ P_{c_1}^c &= \Phi_c(u_{so}, w) \end{cases} \quad (2.5)$$

## 2.4. REPRÉSENTATION MODULAIRE DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

Dans l'esprit la modularité énergétique vise à masquer ces relations. Elles sont présentées ici dans un but explicatif.

Pour conclure, la causalité des modules est résumée à deux qualificatifs :

**Définition 2.13** (Module Actif ou Passif).

On qualifie d'« actif » un client en causalité client et de « passif » un client en causalité source.

De même, une source est qualifiée d'« active » lorsqu'elle est en causalité source, et de « passive » sinon.

La connexion des modules énergétiques sera réalisée par un module d'interconnexion énergétique, nommé *nœud* et détaillé dans la **section 2.5**. Notons dès à présent que la causalité de pilotage des modules énergétiques influera sur la structure et la stratégie du nœud.

### 2.4.3.1 Exemple

Pour clarifier les définitions précédentes, et notamment les propriétés de causalités de pilotage, nous appliquons notre formalisme modulaire pour le cas de la *vivabilité* d'une pièce (voir Fig. 2.2), en nous focalisant sur l'aspect *chaleur*.

Soit une pièce fermée, dont l'évolution de la température est régulée par un système chauffant relié au réseau électrique de l'habitation. Le système énergétique est décrit par la Figure 2.12a sous la forme d'un (EOF-énergie), précisant la ressource (ici *EDF*), le service visé (le *confort*) et un scénario (la *température de référence*).

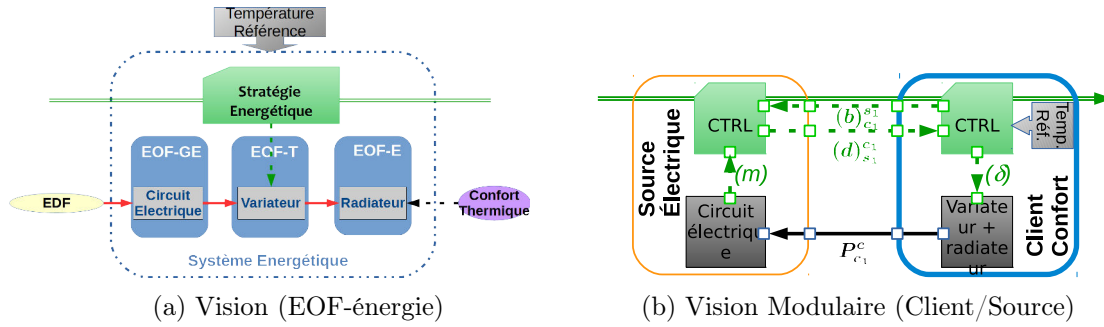


FIGURE 2.12 – Chaîne Énergétique Exemple : Confort Thermique

Sa description modulaire admet un client et une source, connectés en causalité client. Elle est représentée par la Figure 2.12b où :

- le client « confort » est le module qui a pour mission d'assurer le confort thermique. Son système opérant (SO) est composé du radiateur (paroi de transfert thermique), de la résistance et de son variateur. La variable de contrôle interne régule la puissance résistive. La satisfaction est évaluée par une erreur entre la température de

la pièce, et une référence préétablie. À tension constante, son besoin est assimilable à une estimation du courant nécessaire pour maximiser sa satisfaction.

- la « source électrique » est le module qui génère une puissance électrique. Son système générateur est composé du circuit électrique (e.g. disjoncteur, horloge heure creuse/pleine, ...). Sa disponibilité peut être formalisée au travers d'une tension et d'une intensité maximale.

L'environnement désigne les signaux exogènes mesurables. Le scénario est implicitement contenu dans le client « confort ».

#### 2.4.4 Guide de Conception des Modules Énergétiques

La conception des clients et des sources est un exercice qui s'appuie sur les spécificités des organes. Ce guide aborde leur formulation selon des relations génériques et macroscopiques. L'objectif *in fine* est de formuler les signaux qui seront communiqués : besoins et de disponibilités (voir *Définitions 2.10 et 2.12*).

##### 2.4.4.1 Les Sources

**Modèle Processus Interne** Soit une source  $j$  associée à une ressource disposant d'une quantité de matière initiale  $q_{ress}^0$ , et une quantité maximale  $q_{ress}^{max}$ . La conversion de cette ressource en énergie primaire est réalisée par le système générateur d'énergie (SG). Ce procédé est modélisé par  $f_{sgj}$  définissant la puissance échangée pour une quantité de matière prélevée  $q_{ress}^e(t)$  par :

$$P_{sj}^e(t) = f_{sgj}(q_{ress}^e(t)) \quad (2.6)$$

Dans le cas où la ressource peut être régénérée,  $f_{sgj}^r$  définit le procédé inverse :

$$q_{ress}^e(t) = f_{sgj}^r(P_{sj}^e(t)) \quad (2.7)$$

Les limites physiques du processus (SG) supposées statiques sont notées  $P_{sgj}^{min}$  et  $P_{sgj}^{max}$ .

Le coût de l'énergie est supposé varier en fonction de la quantité de matière restante  $q_{ress}^d(t)$  et de la puissance échangée. On pose  $p_{ress}(q_{ress}^d(t))$  le prix de la ressource restante et on définit à partir du modèle de régénération (2.7), le coût de consommation :

$$c_{sgj}(P_{sj}^e, q_{ress}^d) = f_{sgj}^r(P_{sj}^e) \times p_{ress}(q_{ress}^d) \quad (2.8)$$

**Évaluation du Signal de Disponibilité** Les sources communiquent vers le module (dénnoté par l'indice  $m$ ) qui leur est adjoint un signal de disponibilité  $(d)_{sj}^m$ . Ce dernier

est calculé sur l'intervalle  $[t_0, t_0 + T_p]$ , et pour rappel (voir *définition 2.12*) doit contenir les données suivantes :

$$(d)_{s_j}^m := \begin{cases} P_{s_j}^{max}(t) & : \text{Puissance maximale échangeable} \\ P_{s_j}^{min}(t) & : \text{Puissance minimale échangeable} \\ E_{s_j}^d & : \text{Énergie Disponible sur l'horizon} \\ Ec_{s_j}(P_{s_j}^e) & : \text{Coût de l'énergie.} \end{cases} \quad (2.9)$$

On déduit des contraintes physiques du processus et de la quantité de matière disponible, les signaux d'amplitude de puissance échangeables :

$$\begin{cases} P_{s_j}^{max}(t) = \min \left( P_{sg_j}^{max}, f_{sg_j}(q_{ress}^d(t)) \right) \\ P_{s_j}^{min}(t) = \max \left( P_{sg_j}^{min}, -f_{sg_j}(q_{ress}^{max} - q_{ress}^d(t)) \right) \end{cases} \quad (2.10)$$

Pour construire la fonction coût, [BORSENBERGER et al. \(2012\)](#) proposent d'associer à toute source un coût pour l'énergie générée à partir de ses ressources (2.8), éventuellement complété par un coût de démarrage.

Pour une puissance échangée  $P_{s_j}^e(t)$  et une ressource disponible  $q_{ress}^d(t)$ , on pose :

$$Ec_{s_j}(P_{s_j}^e, q_{ress}^d(t)) = c_{sg_j}(P_{s_j}^e, q_{ress}^d) + c_{on/off}(P_{s_j}^e) \quad (2.11)$$

avec  $c_{on/off}(P_{s_j}^e)$  le coût de démarrage/arrêt de la source.

Par la suite, nous proposons de simplifier la relation (2.11) en supposant que la quantité de matière varie très peu sur l'intervalle  $[t_0, t_0 + T_p]$ . Ainsi :

$$Ec_{s_j}(P_{s_j}^e) = c_{sg_j}(P_{s_j}^e, q_{ress}^d) + c_{on/off}(P_{s_j}^e) \quad (2.12)$$

L'énergie disponible sur l'horizon de temps  $[t_0, t_0 + T_p]$  s'évalue comme l'intégrale de la puissance maximale livrable, sous la condition que la quantité de matière restante soit positive :

$$E_{s_j}^d = \int_{t_0}^{t_0+T_p} P_{s_j}^{max}(t) dt \quad (2.13)$$

**Causalité Source : Source Active** D'après la *définition 2.11* la vocation d'une source est la mise à disposition d'une énergie, en réponse à une demande et en tenant compte de ses propres limites physiques.

Lorsque sa causalité est active, son processus de contrôle interne doit calculer la quantité de matière échangée  $q_{ress}^e(t)$  en tenant compte des mesures endogènes (e.g. la quantité de matière restante) et des données exogènes contenues dans un signal de besoin  $(b)_m^{s_j}$  (voir Fig. 2.11a).

Pour un signal de besoin :

$$(b)_m^{s_j} := \left\{ P_m^{max}(t), P_m^{min}(t), P_m^b(t), S_m(P_{s_j}^f) \right\} \quad (2.14)$$

la stratégie énergétique qui respecte la vocation de la source est la solution au problème d'optimisation  $\mathcal{PO}_{s_j}$  défini par :

$$q_{ress}^{e*}(t) = \arg \min_{\nu_{ress_j}(t)} Ec_{s_j}(f_{sg_j}(\nu_{ress_j}(t))) \quad (2.15)$$

Sous les contraintes :

$$t \in [t_0, t_0 + T_p], \quad (2.15a)$$

$$q_{ress}^d(t_0) - q_{ress}^{max} \leq \nu_{ress_j}(t) \leq q_{ress}^d(t_0), \quad (2.15b)$$

$$P_m^{min} \leq f_{sg_j}(\nu_{ress_j}(t)) \leq P_m^{max}, \quad (2.15c)$$

$$P_{s_j}^{min} \leq f_{sg_j}(\nu_{ress_j}(t)) \leq P_{s_j}^{max}, \quad (2.15d)$$

Et, à partir de la relation (2.6), on en déduit la puissance fournie :

$$P_{s_j}^f(t) = f_{sg_j}(q_{ress}^{e*}(t)) \quad (2.16)$$

#### 2.4.4.2 Les Clients

**Modèle Physique Interne** Soit un client  $i$ , réalisant un service particulier dont un indice de satisfaction  $Q_{c_i}^s$  puisse être défini à partir de la puissance qu'il échange  $P_{c_i}^e(t)$  et son activité  $w_s(t)$  :

$$Q_{c_i}^s = h_{c_i}\left((P_{c_i}^e(t)), w_s(t)\right) \quad (2.17)$$

**Évaluation du Signal de Besoin** Les clients communiquent au module qui leur est adjoint un signal de besoin  $(b)_{c_i}^m$ . Ce dernier est calculé sur l'intervalle  $[t_0, t_0 + T_p]$ , et pour rappel (voir *définition 2.12*) doit contenir les données suivantes :

$$(b)_{c_i}^m := \begin{cases} P_{c_i}^{max}(t) & : \text{Puissance maximale échangeable} \\ P_{c_i}^{min}(t) & : \text{Puissance minimale échangeable} \\ P_{c_i}^b(t) & : \text{Puissance Demandée} \\ S_{c_i}(P_{c_i}^e) & : \text{Satisfaction du client} \end{cases} \quad (2.18)$$

Les contraintes sur l'amplitude des puissances échangées sont déduites des contraintes physiques du système opérant.

La puissance demandée par le client  $P_{c_i}^b(t)$  est calculée comme la puissance qui maximise l'indice de satisfaction du service (2.17), pour un scénario  $w_s(t)$  et des données exogènes contenues dans un signal de disponibilité :

$$(d)_m^{c_i} := \left\{ P_m^{max}(t), P_m^{min}(t), E_m^d(t_0), Ec_m(P_{c_i}^e) \right\}, \quad (2.19)$$

Soit encore,

$$P_{c_i}^b(t) = \arg \max_{\nu(t)} Q_{c_i}^s(\nu(t), w_s(t)) \quad (2.20)$$

Sous la contrainte :

$$P_{c_i}^{max}(t) \leq \nu(t) \leq P_{c_i}^{max}(t) \quad (2.20a)$$

On note que l'énergie disponible et les amplitudes de puissances exogènes ne sont pas prises en compte à ce niveau de la stratégie.

A partir de la puissance demandée  $P_{c_i}^b(t)$  on déduit la satisfaction maximale atteignable comme :

$$\bar{Q}_{c_i} = Q_{c_i}^s \left( f_{so}(P_{c_i}^b(t)), w_s(t) \right) \quad (2.21)$$

On construit la fonction de satisfaction qui sera communiquée au travers du signal de *besoin*, comme la normalisation de l'indice de satisfaction, par la satisfaction maximale  $\bar{Q}_{c_i}$  :

$$S_{s_j}(P_{c_i}^e) = \frac{Q_{c_i}^s(P_{c_i}^e(t), w_s(t))}{\bar{Q}_{c_i}} \quad (2.22)$$

*Remarque 2.14.* Par la suite, dans les problèmes d'optimisation où la fonction objectif est à minimiser, nous utiliserons plutôt le niveau d'*insatisfaction*, noté  $\bar{S}_{c_i}(P_{c_i}^e(t))$ , et défini par :

$$\bar{S}_{c_i}(P_{c_i}^e) = \left( 1 - S_{c_i}(P_{c_i}^e) \right) \quad (2.23)$$

**Causalité Client : Client Actif** D'après la *définition 2.9* la vocation d'un client est de satisfaire au mieux un service donné.

Lorsque sa causalité est active, son processus de contrôle interne doit calculer la puissance consommée  $P_{c_i}^c(t)$ , tout en tenant compte des données exogènes contenues dans le signal de disponibilité, notamment les contraintes liées à l'amplitude de puissance (2.25b).

Pour un signal de disponibilité :

$$(d)_m^{c_i} := \left\{ P_m^{max}(t), P_m^{max}(t), E_m^d, Ec_m(P_{c_i}^c) \right\}, \quad (2.24)$$

la stratégie énergétique qui respecte la vocation d'un client est modélisée par le problème d'optimisation  $\mathcal{PO}_{c_j}$  défini par :

$$P_{c_i}^c(t) = \arg \max_{\nu_{c_i}(t)} S_{c_i}(\nu_{c_i}(t)) \quad (2.25)$$

Sous les contraintes :

$$\int_{t_0}^{t_0+T_p} \nu_{c_i}(t) dt \leq E_m^d(t_0) \quad (2.25a)$$

$$P_m^{min} \leq \nu_{c_i}(t) \leq P_m^{max} \quad (2.25b)$$



### 2.4.5 Résumé

Dans le cas où le système énergétique contient plusieurs sources ou plusieurs clients, deux possibilités se présentent. Il existe un nombre égal de clients et de sources, et chaque chaîne énergétique ne contient qu'une seule paire *client-source*. Tous les modules de même nature sont donc indépendants les uns des autres. Les causalités de contrôle suffisent pour connecter les modules entre eux, et le système fonctionne naturellement. Il s'agit d'un cas trivial, que l'on étudiera tout de même dans le chapitre suivant.

Plus fréquemment, les chaînes énergétiques contiennent plusieurs sources ou plusieurs clients. Leur connexion est alors portée par un *module d'interconnexion énergétique* que nous nommerons *nœud*.

## 2.5 Module d'Interconnexion Énergétique : le Nœud

### 2.5.1 Description du Nœud

#### 2.5.1.1 Caractéristiques

Pour un système énergétique contenant une chaîne énergétique constituée de  $n_c^{tot}$  clients et  $n_s^{tot}$  sources, on pose la définition suivante :

**Définition 2.15** (Module d'Interconnexion Énergétique : le Nœud).

Le **nœud** est un module d'interconnexion énergétique situé entre les modules clients et sources d'une même chaîne énergétique. Il possède des entrées et des sorties multi-physiques, regroupées par triplets : un lien physique, une entrée et une sortie de communication (Fig. 2.13).

Suivant le nombre de modules connectés, et leur nature, on choisit de nommer différemment les nœuds. Ainsi :

- *Un nœud d'hybridation* est une jonction d'énergie impliquant plusieurs sources et un client (i.e.  $n_s^{tot} > 1$  et  $n_c^{tot} = 1$ ).
- *Un nœud de concurrence* est une jonction d'énergie impliquant plusieurs clients et une source (i.e.  $n_s^{tot} = 1$  et  $n_c^{tot} > 1$ ).
- *Un nœud général* est une jonction d'énergie impliquant plusieurs clients et plusieurs sources (i.e.  $n_s^{tot} > 1$  et  $n_c^{tot} > 1$ ).

En plus, de cette catégorisation nous proposons de caractériser le nœud selon trois attributs :

- le nombre de sources passives, noté  $\bar{n}_s$ ,
- le nombre de clients passifs, noté  $\bar{n}_c$ ,
- le nombre de variables de commandes internes, noté  $n_\delta$ .

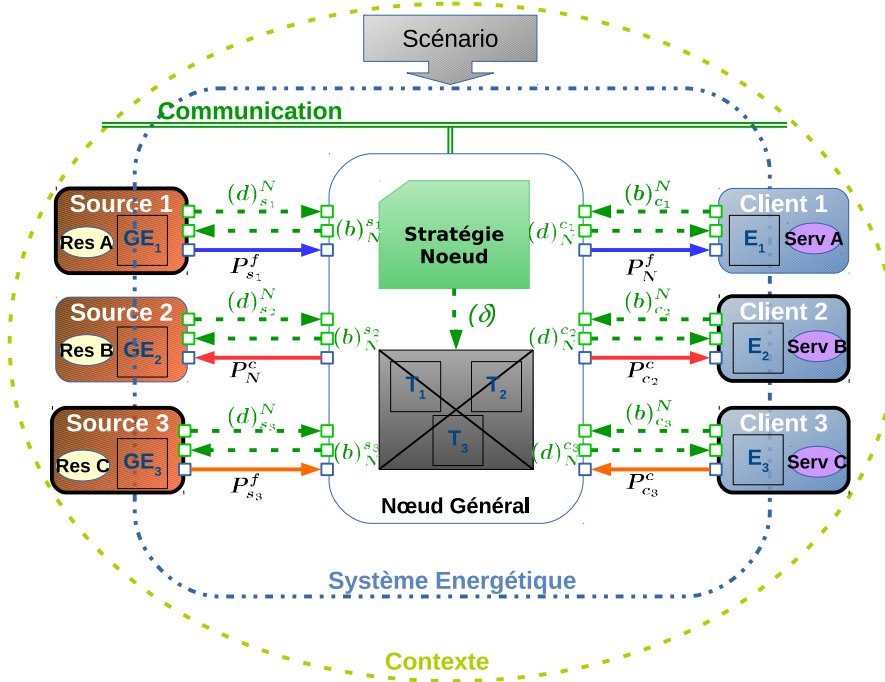


FIGURE 2.13 – Vision modulaire nœud générique : trois sources et trois clients

Le nœud se compose d'un processus de pilotage, nommé *stratégie du nœud*, et un groupe d'organes considéré pour le moment comme une boîte noire. La Figure 2.13 schématise le cas particulier du système énergétique à trois missions issus de notre précédent travail de caractérisation des systèmes énergétiques (Fig. 2.9). Les ports de communication, symbolisés par des carrés verts, sont les ports de la stratégie du nœud. Les ports physiques, symbolisés par des carrés noirs, sont les ports du groupe organique (symbolisé par le bloc gris contenant des (EOF-T)). La causalité de pilotage des modules est exprimée par un contour plus épais.

### 2.5.1.2 La Stratégie Énergétique du Nœud

La stratégie énergétique centralise les communications ainsi que l'intelligence en charge de la gestion énergétique. Son rôle est de calculer les signaux de besoins  $(b)_N^{s_j}$  à communiquer pour chaque source  $j$ , les disponibilités  $(d)_N^{c_i}$  pour chaque client  $i$ , ainsi qu'un vecteur de consignes  $\delta(t)$  pour les organes du nœud. Pour cela, l'intelligence repose sur des informations exogènes en provenance de son contexte, ainsi que les signaux conventionnels des modules : disponibilités  $(d)_{s_j}^N$  pour les sources, et besoins  $(b)_{c_i}^N$  pour les clients. La stratégie est formalisée par la relation suivante :

$$\left( (b)_N^s, (d)_N^c, \delta(t) \right) = \Xi \left( (d)_s^N, (b)_c^N \right) \quad (2.26)$$

où les notations suivantes sont posées :

- $(b)_N^s$ , la liste des besoins  $(b)_N^{s_j}$  calculés par le nœud et demandés aux sources,
- $(d)_N^c$ , la liste des disponibilités  $(d)_N^{c_i}$  calculées par le nœud et proposées pour les clients,
- $(d)_s^N$ , la liste des disponibilités  $(d)_{s_j}^N$  proposées par les sources au nœud,
- $(b)_c^N$ , la liste des besoins  $(b)_{c_i}^N$  demandés par les clients au nœud.

Les listes étant ordonnées par des indices croissants e.g. :

$$(d)_c^N := \{(d)_{c_1}^N, (d)_{c_2}^N, \dots\} \quad (2.27)$$

### 2.5.1.3 Les Organes du Nœud

Le groupe d'organes contenu dans le nœud met en commun les énergies provenant des modules connectés par le biais de sa structure interne. Sa fonction est d'assurer physiquement les transferts d'énergie entre les modules. On modélise ses interactions selon la relation (2.28), où  $\delta(t)$  est la consigne donnée par la stratégie énergétique. En entrée on retrouve les puissances physiques provenant des modules en causalité de pilotage (actifs) : puissance fournie  $P_{s_j}^f(t)$  pour une source  $j$ , et puissance consommée  $P_{c_i}^c(t)$  pour un client  $i$ . En sortie, on obtient les puissances des modules sans causalité de pilotage (passifs) : puissance fournie  $P_{c_i}^f(t)$  pour un client  $i$ , et puissance consommée  $P_{s_j}^c(t)$  pour une source  $j$ .

$$\left( P_s^c(t), P_c^f(t) \right) = \Gamma_N \left( P_s^f(t), P_c^c(t), \delta(t) \right) \quad (2.28)$$

Les notations suivantes sont admises :

- $P_s^c(t)$ , la liste des puissances  $P_{s_j}^c(t)$  calculées par le nœud et consommées sur les sources,
- $P_c^f(t)$ , la liste des puissances  $P_{c_i}^f(t)$  calculées par le nœud et fournies aux clients,
- $P_s^f(t)$ , la liste des puissances  $P_{s_j}^f(t)$  fournies par les sources au nœud,
- $P_c^c(t)$ , la liste des puissances  $P_{c_i}^c(t)$  consommées par les clients au nœud.

Les listes étant ordonnées par des indices croissants e.g. :

$$P_c^c(t) := \{P_{c_1}^c(t), P_{c_2}^c(t), \dots\} \quad (2.29)$$

Concrètement, la relation (2.28) traduit trois concepts physiques : l'accumulation, la perte et la transformation d'énergie. Sur la base de ces principes, nous choisissons de décomposer l'équation (2.28) un système de trois équations :

$$\Gamma_N : \begin{cases} x_a(t) &= \xi_N \left( P_s^f(t), P_c^c(t), \delta(t) \right) \\ \kappa(t) &= \eta_N \left( P_s^f(t), P_c^c(t), \delta(t) \right) \\ \left( P_s^c(t), P_c^f(t) \right) &= \Phi_N \left( P_s^f(t), P_c^c(t), \delta(t) \right) \end{cases} \quad (2.30)$$

dans lesquelles  $x_a(t)$  modélise l'accumulation temporaire d'énergie dans la structure organique du nœud,  $\kappa(t)$  désigne l'énergie perdue lors du transfert, et  $\Phi_N()$  désigne une relation de distribution et de transformation de l'énergie. Les scalaires  $x_a(t)$  et  $\kappa(t)$  sont internes aux nœuds et ne sont pas communiqués aux modules.

D'après le principe de conservation de l'énergie, ces données physiques vérifient le bilan d'énergie du nœud (2.31) à chaque instant  $t$ .

$$\sum_{j \in \mathcal{S}_N} P_{s_j}^c(t) + \sum_{i \in \mathcal{C}_N} P_{c_i}^f(t) + \kappa(t) = \sum_{j \in \mathcal{S}_N} P_{s_j}^f(t) + \sum_{i \in \mathcal{C}_N} P_{c_i}^c(t) + x_a(t) \quad (2.31)$$

*Remarque 2.16.* Concernant  $x_a(t)$ , il est important de bien comprendre qu'il ne s'agit pas d'une nouvelle source d'énergie, mais d'une donnée physique liée aux caractéristiques des organes (e.g. une raideur mécanique, une capacité électrique). Par conséquent, elle n'intervient pas comme une ressource du système énergétique mais permet de vérifier le bilan d'énergie du nœud.

### 2.5.2 Exemple

Reprenons l'exemple précédent (paragraphe 2.4.3.1), celui du confort thermique d'une pièce. Supposons maintenant que l'habitation contienne deux pièces distinctes, contenant chacune un système de pilotage, et que l'énergie électrique provienne en partie d'un panneau photovoltaïque. En admettant que le pilotage des radiateurs soit centralisé, le système énergétique contient deux modules clients confort en causalité source, un module source photovoltaïque en causalité source, et une source fournisseur d'énergie (e.g. EDF) en causalité client. Ces quatre modules sont connectés sur un même nœud (Fig. 2.14).

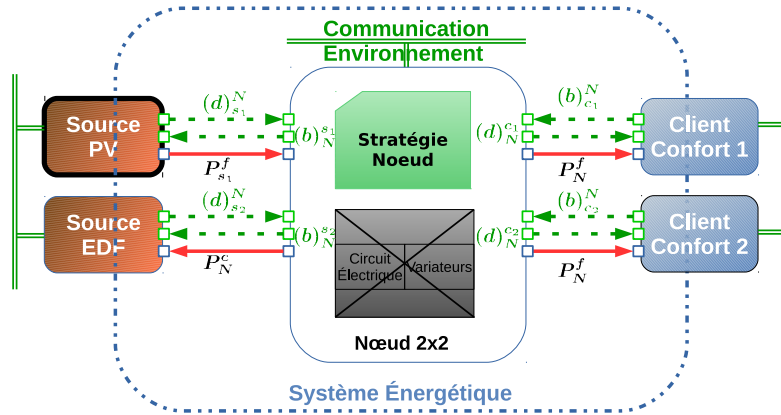


FIGURE 2.14 – Exemple nœud  $2 \times 2$  : deux confort thermiques, une source photovoltaïque (PV) et une source EDF

Les organes du nœud sont composé du réseau électrique et des variateurs. Sa formu-

lation est donnée par (2.32), dérivé du système d'équation général (2.30).

$$\Gamma_{2 \times 2} : \begin{cases} x_a(t) &= \xi_{22} \left( P_{s_1}^f(t), \delta(t) \right) \\ \kappa(t) &= \eta_{22} \left( P_{s_1}^f(t), \delta(t) \right) \\ \left( P_{s_2}^c(t), P_{c_1}^f(t), P_{c_2}^f(t) \right) &= \Phi_{22} \left( P_{s_1}^f(t), \delta(t) \right) \end{cases} \quad (2.32)$$

La relation d'équilibre énergétique suivante doit par ailleurs être vérifiée :

$$P_{s_2}^c(t) + P_{c_1}^f(t) + P_{c_2}^f(t) + \kappa(t) = P_{s_1}^f(t) + x_a(t) \quad (2.33)$$

La stratégie du nœud pilote les variateurs en tenant compte des disponibilités des sources, et des besoins des clients. Dans le cadre de l'exemple, il est formalisé par la relation (2.34) déduite du cas général (2.26).

$$\left[ \{ (b)_N^{s_1}, (b)_N^{s_2} \}, \{ (d)_N^{c_1}, (d)_N^{c_2} \}, \delta(t) \right] = \Xi_{2 \times 2} \left( \{ (d)_{s_1}^N, (d)_{s_2}^N \}, \{ (b)_{c_1}^N, (b)_{c_2}^N \} \right) \quad (2.34)$$

## 2.6 Conclusion du Chapitre

Le recours au référentiel de conception systémique de SHERPA ENGINEERING permet de caractériser les systèmes énergétiques selon une représentation par *Ensemble Organico-Fonctionnel*. Ce point de vue sur le système met en avant ses frontières, et ses interactions avec les sous-systèmes de missions. Cette modélisation est aussi le pivot entre le *référentiel système* existant, et l'approche modulaire que nous proposons ensuite.

L'approche proposée s'appuie sur la définition de deux types de modules fonctionnels : les sources et les clients, sur la normalisation de leurs signaux d'entrées et de sorties, et sur la définition de leur causalité de pilotage. Ainsi, pour une causalité donnée, un client et une source sont naturellement compatibles.

A l'inverse, lorsque la causalité est opposée, ou lorsque le système est multi-clients et/ou multi-sources, la présence d'un nœud est nécessaire pour formaliser les interactions physiques et de communication. La genericité de la méthode repose sur la relation physique (2.28) propre à représenter un large choix d'architecture. Le nœud est aussi porteur d'une stratégie énergétique, que nous définirons dans le chapitre suivant.

Le vocabulaire et la représentation graphique supports de la méthodologie modulaire sont regroupés en **annexe A**.

## Chapitre 3

# Définition et Décomposition des Nœuds Énergétiques

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction du Chapitre</b>	<b>58</b>
<b>3.2</b>	<b>Notations</b>	<b>58</b>
3.2.1	Ensembles	58
3.2.2	Variables	59
<b>3.3</b>	<b>Formulation Générique de la Stratégie Énergétique</b>	<b>60</b>
3.3.1	Clés de Lecture et Hypothèses de Travail	60
3.3.2	Problème multi-objectifs : $\mathcal{P}_n$	61
3.3.3	Construction des Signaux de Communications	65
3.3.4	Problème mono-objectif : $\mathcal{P}'_N$	67
<b>3.4</b>	<b>Définitions des Nœuds Unitaires</b>	<b>69</b>
3.4.1	Motivations	69
3.4.2	Descriptions	69
3.4.3	Élaboration des Stratégies	73
<b>3.5</b>	<b>Définition du Nœud d'Hybridation : MS_SC</b>	<b>74</b>
3.5.1	Motivations	74
3.5.2	Description	74
3.5.3	Stratégie Multi-Sources : $\Xi_{MS}$	75
3.5.4	Illustration	77
<b>3.6</b>	<b>Définition du Nœud de Concurrence : SS_MC</b>	<b>78</b>
3.6.1	Descriptions	78
3.6.2	Stratégie Multi-Clients : $\Xi_{MC}$	80
3.6.3	Illustration	83
<b>3.7</b>	<b>Décomposition du Nœud Général</b>	<b>85</b>
3.7.1	Motivation	85
3.7.2	Illustration	85
<b>3.8</b>	<b>Conclusion du Chapitre</b>	<b>89</b>

---

## 3.1 Introduction du Chapitre

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé un cadre de modélisation modulaire pour les systèmes énergétiques. Celui-ci distingue deux modules énergétiques : les sources et les clients. Lorsqu'une source et un client adoptent une même causalité, ou lorsque le système énergétique est multi-clients et/ou multi-sources, l'interconnexion est réalisée par l'entremise d'un module d'interconnexion énergétique, le nœud. Ce dernier modélise à la fois les interactions physique et la stratégie.

Dans la continuité de cette méthodologie, ce chapitre a pour objectifs de formaliser génériquement la stratégie d'un nœud général, en s'appuyant sur les signaux de sortie des modules clients et sources, et de simplifier son élaboration par décomposition. Dans cette optique un système de notations distinguant variables physiques et variables de communication pour chaque module est présenté (cf. **section 3.2**).

La **section 3.3** formule mathématiquement la stratégie énergétique selon une architecture à deux niveaux. Le premier niveau est un problème d'optimisation contraint, dont l'objectif est de fixer la valeur des flux de puissances qui traversent le nœud en établissant un compromis entre la satisfaction des clients et le coût de l'énergie générée par les sources. Sa formulation dérive du problème synthétique  $\mathbf{PO}_g$  précédemment construit à partir de la caractérisation des systèmes énergétiques (cf. **section 2.3.4.3**). Le second niveau construit les signaux à communiquer aux modules à partir des résultats du problème d'optimisation.

Les **sections 3.4-3.5** déclinent la structure et la stratégie du nœud général selon trois nœuds usuels (unitaires, concurrentiels et hybrides) correspondant aux problématiques récurrentes et identifiées dans notre état de l'art (voir Tab. 1.2, **chapitre 1**). De premiers éléments de simplification sont apportés pour résoudre le problème d'optimisation inhérent à leur stratégie. Enfin, des exemples illustrent les nœuds d'hybridation (paragraphe 3.5.4) et de concurrence (paragraphe 3.6.3).

Pour terminer, la **section 3.7** propose la décomposition du nœud général en nœuds d'hybridation et nœuds de concurrence. Les deux stratégies (générale et décomposée) sont étudiées au travers d'une illustration puis comparées.

## 3.2 Notations

### 3.2.1 Ensembles

Pour un nœud d'énergie  $N$ , les modules, sources ou clients, qui y sont reliés sont numérotés et notés  $s_1$  pour la *source 1*,  $c_2$  pour le *client 2*. Leurs indices sont également partitionnés au travers des notations suivantes :

- sans tenir compte de la Causalité de Pilotage<sup>1</sup> :

---

1. La causalité de pilotage est définie au paragraphe 2.4.3

- $\mathcal{S}_N^{tot}$ , l'ensemble des indices des sources liées au nœud  $N$ , de cardinal  $n_s^{tot}$ .
- $\mathcal{C}_N^{tot}$ , l'ensemble des indices des clients liés au nœud  $N$ , de cardinal  $n_c^{tot}$ .
- pour la Causalité Source :
  - $\mathcal{S}_N$ , l'ensemble des indices des sources en causalité source du nœud  $N$  (donc actives vis-à-vis du nœud), de cardinal  $n_s$ .
  - $\bar{\mathcal{C}}_N$ , l'ensemble des indices des clients en causalité source du nœud  $N$  (donc passifs vis-à-vis du nœud), de cardinal  $\bar{n}_c$ .
- pour la Causalité Client :
  - $\bar{\mathcal{S}}_N$ , l'ensemble des indices des sources en causalité client du nœud  $N$  (donc passives vis-à-vis du nœud), de cardinal  $\bar{n}_s$ .
  - $\mathcal{C}_N$ , l'ensemble des indices des clients en causalité client du nœud  $N$  (donc actifs vis-à-vis du nœud), de cardinal  $n_c$ .

Tel que :  $\bar{\mathcal{S}}_N \cup \mathcal{S}_N = \mathcal{S}_N^{tot}$  couvre l'ensemble des sources et  $\bar{\mathcal{C}}_N \cup \mathcal{C}_N = \mathcal{C}_N^{tot}$  l'ensemble des clients, connectés au nœud  $N$ .

### 3.2.2 Variables

Les variables sont continues et définies pour tout  $t$  appartenant à l'intervalle  $[t_0, t_0 + T_p]$ , avec  $T_p$  un entier positif fixé. Les énergies sont calculées selon (1.1), c'est-à-dire par intégration de la puissance sur l'intervalle de définition.

Les indices  $_c$  et  $_s$  spécifient respectivement si la variable est associée à un client ou bien à une source. L'exposant  $^e$  symbolise quant-à lui une puissance physique échangée entre deux modules sans précision sur la causalité qui les lie. Il peut donc figurer une puissance consommée (exposant  $^c$ ) ou bien une puissance fournie (exposant  $^f$ ).

#### Variables Physiques

- Sans tenir compte de la Causalité :  $\forall i \in \mathcal{C}_N^{tot}$  et  $\forall j \in \mathcal{S}_N^{tot}$ 
  - $P_{c_i}^e(t)$  puissance échangée par le client  $i$  à l'instant  $t$ .
  - $P_{s_j}^e(t)$  puissance échangée par la source  $j$  à l'instant  $t$ .
- Causalité source :  $\forall i \in \bar{\mathcal{C}}_N$  et  $\forall j \in \mathcal{S}_N$ 
  - $P_{c_i}^f(t)$  puissance fournie au client  $i$  à l'instant  $t$ .
  - $P_{s_j}^f(t)$  puissance fournie par la source  $j$  à l'instant  $t$ .
- Causalité client :  $\forall i \in \mathcal{C}_N$  et  $\forall j \in \bar{\mathcal{S}}_N$ 
  - $P_{c_i}^c(t)$  puissance consommée par le client  $i$  à l'instant  $t$ .
  - $P_{s_j}^c(t)$  puissance consommée sur la source  $j$  à l'instant  $t$ .

#### Signaux de Communications et Internes

- Sortant d'une Source :  $\forall j \in \mathcal{S}_N^{tot}$ 
  - $E_{s_j}^d$  énergie disponible sur la source  $j$  sur l'intervalle  $[t_0, t_0 + T_p]$ .
  - $Ec_{s_j}(P_{s_j}^e)$  coût de la source  $j$  pour une puissance échangée  $P_{s_j}^e(t)$ .



- Sortant d'un Client :  $\forall i \in \mathcal{C}_N^{tot}$ 
  - $P_{c_i}^b(t)$  puissance demandée au client  $i$  à l'instant  $t$ .
  - $S_{c_i}(P_{c_i}^e)$  satisfaction du client  $i$  pour une puissance échangée  $P_{c_i}^e(t)$
- Interne au Noeud :
  - $\delta(t)$  consigne de la stratégie aux organes du nœud.

*Variables de Décision (Interne à la Stratégie)*

- Scalaires :
  - $\nu_{s_j}(t)$  : pour une source
  - $\nu_{c_i}(t)$  : pour un client
- Ensemble de variables :
  - $\boldsymbol{\nu}_s(t) := \left( \{\nu_{s_j}(t)\} | j \in S_N \right)$  : Ensemble des variables de décision associées aux sources en causalité active
  - $\boldsymbol{\nu}_c(t) := \left( \{\nu_{c_i}(t)\} | i \in C_N \right)$  : Ensemble des variables de décision associées aux clients en causalité active.

### 3.3 Formulation Générique de la Stratégie Énergétique

#### 3.3.1 Clés de Lecture et Hypothèses de Travail

Dans l'état de l'art (cf. **chapitre 1**) nous avons constaté que les stratégies énergétiques sont le plus souvent élaborées à partir d'une loi heuristique ou bien par la résolution d'un problème d'optimisation. Dans le **chapitre 2** la finalité et le périmètre des systèmes énergétiques ont été clarifiés, nous permettant ainsi de formuler un problème d'optimisation synthétique (cf. **PO<sub>g</sub>**, page 42).

Suite à notre décomposition modulaire et à la définition des standards de communication, nous souhaitons caractériser ce problème pour en déduire une formulation explicite de la stratégie énergétique.

Pour mener à bien ce travail, l'architecture de la stratégie est séparée en deux volets. Le premier, présenté à la **section 3.3.2**, pose pour un horizon  $[t_0, t_0 + T_p]$ , avec  $T_p$  l'horizon de prédiction, un problème d'optimisation multi-objectifs contraints noté  $(\mathcal{P}_n)$ . Son rôle est de fixer les degrés de libertés de l'infrastructure énergétiques suivant les besoins et les disponibilités des modules.

Le second volet, présenté à la **section 3.3.3**, élabore les signaux qui seront mis à disposition des *modules énergétiques*.

Enfin, la **section 3.3.4** présente une formulation mono-objectif de  $(\mathcal{P}_n)$  au travers d'un second problème d'optimisation  $(\mathcal{P}'_n)$ , obtenu à partir de la somme pondérée des objectifs de  $(\mathcal{P}_n)$ . Ce dernier problème, sera celui que nous retiendrons pour la conception des stratégies énergétiques de cette thèse.

Dans tout le chapitre, nous supposons que :

- le nœud connecte  $n_c^{tot}$  modules client et  $n_s^{tot}$  modules source,
- la causalité de chaque module énergétique est connue du nœud,
- les clients ont transmis au nœud leur satisfaction au travers d'un signal de besoin  $(b)_{c_i}^N$ ,
- les sources ont transmis au nœud leur coût d'exploitation au travers d'un signal de disponibilité  $(d)_{s_j}^N$ ,
- il existe une hiérarchisation imposée par le système ou bien le concepteur entre les clients (resp. les sources).

### 3.3.2 Problème multi-objectifs : $\mathcal{P}_n$

Les objectifs et les contraintes du problème ( $\mathcal{P}_n$ ), premier niveau de la stratégie, sont résumés par le Tableau 3.1. Les paragraphes suivants définissent mathématiquement les contraintes et objectifs. On notera  $\nu_{c_i}(t)$ , la variable de décision liée au client  $i$ , et  $\nu_{s_j}(t)$  la variable de décision liée à la source  $j$ .

---

Problème Optimisation Multi-Objectif du Nœud ( $\mathcal{P}_n$ )
<p>Fonction Objectifs :</p> $\begin{cases} \text{Critère d'Opérationnalité (3.1),} \\ \text{Critère d'Optimalité énergétique (3.2),} \\ \text{Critère de Transformation (3.3)} \end{cases}$ <p>sujet aux contraintes sur :</p> $\begin{cases} \text{la dynamiques des modules (3.4),(3.5),} \\ \text{la structure du nœud (3.7), (3.8),} \\ \text{les limites techniques (3.9),(3.10),} \\ \text{les limites de stockages (3.14)} \end{cases}$

---

TABLE 3.1 – Formulation Synthétique pour la Stratégie Nœud

Pour faciliter l'écriture, les listes de variables sont concaténées et symbolisées par une *police* en « **gras** ». Par exemple :  $\boldsymbol{\nu}_s(t) := \{\nu_{s_j}(t)\}_{j \in \mathcal{S}_N^{tot}}$  (cf. **section 3.2**).

#### 3.3.2.1 Fonction objectif et Critères

Les objectifs du problème ( $\mathcal{P}_n$ ) sont au nombre de trois et chacun d'eux fait écho à une exigence du système énergétique (cf. **chapitre 1**, paragraphe 1.4.3.2).

### CHAPITRE 3. DÉFINITION ET DÉCOMPOSITION DES NŒUDS ÉNERGÉTIQUES

**Critère d'opérationnalité** L'exigence d'opérationnalité supposée atteinte parfaitement si le niveau d'insatisfaction des clients est nul. On définit ici le critère d'opérationnalité  $\mathcal{C}_{op}$  à partir des fonctions  $\bar{S}_{c_i}(P_{c_i}^e(t))$ , caractérisant l'insatisfaction d'un client  $i$ , et contenues dans les signaux de besoins  $(b)_{c_i}^N$ . Ces fonctions ne dépendent pas de la causalité des clients.

On note  $\mathbf{P}_c^e(t) := \{P_{c_i}^e(t)\}_{i \in [1, \dots, n_c^{tot}]}$ , l'ensemble des puissances échangées par les clients, le critère d'opérationnalité est défini par :

$$\begin{aligned} \mathcal{C}_{op}(\mathbf{P}_c^e(t)) &= \alpha_1 \bar{S}_{c_1}(P_{c_1}^e(t)) + \dots + \alpha_i \bar{S}_{c_i}(P_{c_i}^e(t)) + \dots + \alpha_{n_c} \bar{S}_{c_{n_c^{tot}}}(P_{c_{n_c^{tot}}}^e(t)) \\ &= \sum_{i \in \mathcal{C}_N^{tot}} \alpha_i \bar{S}_{c_i}(P_{c_i}^e(t)) \end{aligned} \quad (3.1)$$

où les coefficients  $\{\alpha_i\}_{i \in [1, \dots, n_c^{tot}]}$  pondèrent les clients entre eux, et traduisent une hiérarchisation définie par le concepteur.

**Critère d'optimalité** L'exigence d'optimalité énergétique est supposée atteinte parfaitement si le coût de production de l'énergie, pour une puissance demandée, est minimal. On définit ici le critère d'optimalité énergétiques  $\mathcal{C}_{ce}$  à partir des fonctions  $Ec_{s_j}(P_{s_j}^e(t))$ , correspondant au coût d'utilisation d'une source  $j$ , et contenues dans les signaux de disponibilités  $(d)_{s_j}^N$ . Ces fonctions ne dépendent pas de la causalité des sources.

On note  $\mathbf{P}_s^e(t) := \{P_{s_j}^e(t)\}_{j \in [1, \dots, n_s^{tot}]}$ , l'ensemble des puissances échangées par les sources, le critère d'optimalité énergétique est défini par :

$$\begin{aligned} \mathcal{C}_{ce}(\mathbf{P}_s^e(t)) &= \beta_1 Ec_{s_1}(P_{s_1}^e(t)) + \dots + \beta_j Ec_{s_j}(P_{s_j}^e(t)) + \dots + \beta_{n_s} Ec_{s_{n_s^{tot}}}(P_{s_{n_s^{tot}}}^e(t)) \\ &= \sum_{j \in \mathcal{S}_N^{tot}} \beta_j Ec_{s_j}(\nu_{s_j}(t)) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Où les coefficients  $\{\beta_{s_j}\}_{j \in [1, \dots, n_s^{tot}]}$  pondère les sources entre elles, et traduisent une hiérarchisation définie par le concepteur.

**Critère de Transformation** L'exigence d'optimalité pour la transformation de l'énergie se résume par une pénalisation de l'énergie perdue  $\kappa(t)$  ou accumulée  $x_a(t)$  par les organes du nœud (2.30), notée

$$\mathcal{C}_p(\kappa(t), x_a(t)) \quad (3.3)$$

#### 3.3.2.2 Contraintes

**Dynamiques des Modules** La dynamique et les retards des modules actifs impactent la stabilité du nœud et doivent être modélisés par un système de  $n_s$  équations pour les sources, et  $n_c$  équations pour les clients, toutes potentiellement non-linéaires.

*Contraintes dynamiques liées aux sources :*

$$P_{s_j}^f(t) = f_{src_j}(\boldsymbol{\nu}_s(t)) := \begin{cases} \dot{x}_{src_j}(t) &= g_{src_j}(x_{src_j}(t), \boldsymbol{\nu}_s(t)) \\ P_{s_j}^f(t) &= h_{src_j}(x_{src_j}(t), \boldsymbol{\nu}_s(t)) \end{cases} \quad (3.4)$$

avec  $\boldsymbol{\nu}_s(t) := \{\nu_{s_j}(t)\}_{j \in \mathcal{S}_N}$  les variables de décision associées aux sources actives.

*Contraintes dynamiques liées aux clients :*

$$P_{c_i}^c(t) = f_{c_{lt_i}}(\boldsymbol{\nu}_c(t)) := \begin{cases} \dot{x}_{c_{lt_i}}(t) &= g_{c_{lt_i}}(x_{c_{lt_i}}(t), \boldsymbol{\nu}_c(t)) \\ P_{c_i}^c(t) &= h_{c_{lt_i}}(x_{c_{lt_i}}(t), \boldsymbol{\nu}_c(t)) \end{cases} \quad (3.5)$$

avec  $\boldsymbol{\nu}_c(t) := \{\nu_{c_i}(t)\}_{i \in \mathcal{C}_N}$  les variables de décision associées aux clients actifs.

*Remarque 3.1.* Seuls les modules actifs (*définition 2.13*) nécessitent d'être modélisés. La dynamique des modules passifs est liée à la structure du nœud (3.6).

**Structure du Nœud** Dans le chapitre précédent, les organes du nœud ont été modélisés par un groupe de trois équations (2.30). Celles-ci interviennent dans le problème  $\mathcal{P}_N$  comme des contraintes :

$$\begin{cases} x_a(t) &= \xi_N(\boldsymbol{\nu}_s(t), \boldsymbol{\nu}_c(t), \delta(t)) \\ \kappa(t) &= \eta_N(\boldsymbol{\nu}_s(t), \boldsymbol{\nu}_c(t), \delta(t)) \\ (\mathbf{P}_s^c(t), \mathbf{P}_c^f(t)) &= \Phi_N(\boldsymbol{\nu}_s(t), \boldsymbol{\nu}_c(t), \delta(t)) \end{cases} \quad (3.6)$$

Pour l'écriture de  $\mathcal{P}_N$ , nous précisons la relation de transformation  $\Phi_N$  selon chacune des sorties du nœud, soit un système de  $\bar{n}_s$  contraintes égalitaires pour les sources (3.7) et  $\bar{n}_c$  contraintes égalitaires pour les clients (3.8).

*Contraintes structurelles liées aux sources :*

$$\begin{cases} P_{s_1}^c(t) - \Phi_N^{s_1}(\boldsymbol{\nu}_s(t), \boldsymbol{\nu}_c(t), \delta(t)) &= 0 \\ \vdots & \\ P_{s_{\bar{n}_s}}^c(t) - \Phi_N^{s_{\bar{n}_s}}(\boldsymbol{\nu}_s(t), \boldsymbol{\nu}_c(t), \delta(t)) &= 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

*Contraintes structurelles liées aux clients :*

$$\begin{cases} P_{c_1}^f(t) - \Phi_N^{c_1}(\boldsymbol{\nu}_s(t), \boldsymbol{\nu}_c(t), \delta(t)) &= 0 \\ \vdots & \\ P_{c_{\bar{n}_c}}^f(t) - \Phi_N^{c_{\bar{n}_c}}(\boldsymbol{\nu}_s(t), \boldsymbol{\nu}_c(t), \delta(t)) &= 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

### CHAPITRE 3. DÉFINITION ET DÉCOMPOSITION DES NŒUDS ÉNERGÉTIQUES

**Limites Techniques (Puissance)** L'exigence d'opérationnalité induit que l'on garantisse la sécurité des modules. Une mesure pratique consiste à intégrer au problème des bornes sur l'amplitude des puissances. Pour cela, on distingue deux contraintes inégalitaires, dites *contraintes techniques* : l'une pour les modules sources (3.9), l'autre pour les modules clients (3.10). Chacune d'elle est un ensemble d'inéquation respectivement de dimension  $n_s^{tot}$  et  $n_c^{tot}$ , tel que :

*Contraintes Techniques liées aux sources :*

$$\left\{ \begin{array}{l} -P_{s_1}^e(t) \leq -P_{s_1}^{min}(t) \\ \vdots \\ -P_{s_{n_s^{tot}}}^e(t) \leq -P_{s_{n_s^{tot}}}^{min}(t) \\ P_{s_1}^e(t) \leq P_{s_1}^{max}(t) \\ \vdots \\ P_{s_{n_s^{tot}}}^e(t) \leq P_{s_{n_s^{tot}}}^{max}(t) \end{array} \right. \quad (3.9)$$

*Contraintes Structurelles liées aux clients :*

$$\left\{ \begin{array}{l} -P_{c_1}^e(t) \leq -P_{c_1}^{min}(t) \\ \vdots \\ -P_{c_{n_c^{tot}}}^e(t) \leq -P_{c_{n_c^{tot}}}^{min}(t) \\ P_{c_1}^e(t) \leq P_{c_1}^{max}(t) \\ \vdots \\ P_{c_{n_c^{tot}}}^e(t) \leq P_{c_{n_c^{tot}}}^{max}(t) \end{array} \right. \quad (3.10)$$

où  $\left\{ (P_{s_j}^{min}(t), P_{s_j}^{max}(t)) \right\}_{j \in S_N^{tot}}$  et  $\left\{ (P_{c_i}^{min}(t), P_{c_i}^{max}(t)) \right\}_{i \in C_N^{tot}}$  sont les amplitudes de puissances communiquées respectivement par la disponibilité  $(d)_{s_j}^N$  et le besoin  $(b)_{c_i}^N$ .

Dans la suite, cet ensemble de contrainte sera décrit par la forme ensembliste (3.11) pour les sources et (3.12) pour les clients.

$$\mathbf{P}_s^e(t) \in \mathcal{P}_s \quad (3.11) \quad \mathbf{P}_c^e(t) \in \mathcal{P}_c \quad (3.12)$$

**Contraintes de Stockages** Les sources sont par définition des éléments qui provisionnent de l'énergie, sur un terme plus ou moins long, pour la libérer à l'instant voulu. Elles possèdent une capacité limitée quantifiée dans les signaux de disponibilités  $(d)_{s_j}^N$  par une quantité d'énergie  $E_{s_1}^d(t_0)$  consommable pour l'horizon d'optimisation.

### 3.3. FORMULATION GÉNÉRIQUE DE LA STRATÉGIE ÉNERGÉTIQUE

On modélise la relation entre l'énergie consommée et la puissance échangée par :

$$E_{s_j}(t) = g_{stk}(P_{s_j}^e(t)) \quad (3.13)$$

Avec  $E_{s_1}^d(t_0)$  l'énergie disponible pour l'horizon  $[t_0, t_0 + T_p]$ , on modélise la contrainte de stockage par :

$$\begin{cases} E_{s_1}(t) & \leq E_{s_1}^d(t_0) \\ \vdots \\ E_{s_{n_s^{tot}}}(t) & \leq E_{s_{n_s^{tot}}}^d(t_0) \end{cases} \quad (3.14)$$

Dans la suite, ce système de contraintes sera décrit par la forme ensembliste :

$$\mathbf{E}_s(t) \in \mathcal{E}_s^d \quad (3.15)$$

#### 3.3.3 Construction des Signaux de Communications

Le second niveau de la stratégie construit les signaux de communication à transmettre aux clients et aux sources.

Pour rappel (2.26), les signaux de communications transmis par le nœud aux modules sont définis par :

$$(\mathbf{b})_N^s := \{(b)_N^{s_j}\}_{j \in [1, \dots, n_s^{tot}]} \quad \text{et} \quad (\mathbf{d})_N^c := \{(d)_N^{c_i}\}_{i \in [1, \dots, n_c^{tot}]}, \quad (3.16)$$

et contiennent les informations suivantes :

$$(b)_N^{s_j} := \begin{cases} P_N^{max}(t) & : \text{Puissance maximale échangeable,} \\ P_N^{min}(t) & : \text{Puissance minimale échangeable,} \\ S_N(P_{c_i}^e) & : \text{Satisfaction du client,} \\ P_{s_j N}^b(t) & : \text{Puissance demandée.} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$(d)_N^{c_i} := \begin{cases} P_N^{max}(t) & : \text{Puissance maximale échangeable} \\ P_N^{min}(t) & : \text{Puissance minimale échangeable} \\ E_N^d & : \text{Énergie disponible sur l'horizon } [t_0, t_0 + T_p] \\ Ec_N(P_{s_j}^e) & : \text{Coût de l'énergie.} \end{cases} \quad (3.18)$$

**Puissance demandée aux sources** A partir des solutions du problème d'optimisation  $\mathcal{P}_N : \delta^*(t)$ , la consigne optimale pour les organes du nœuds,  $\boldsymbol{\nu}_s^*(t)$ , la décision optimale pour les sources et  $\boldsymbol{\nu}_c^*(t)$ , la décision optimale pour les clients. On déduit les puissances demandées aux sources :

$$P_{s_j}^b(t) = \begin{cases} f_{srj_j}(\nu_{s_j}^*(t)) & \text{si } j \in \mathcal{S}_N \\ \Phi_N^{s_j}(\boldsymbol{\nu}_s^*(t), \boldsymbol{\nu}_c^*(t), \delta^*(t)) & \text{si } j \in \bar{\mathcal{S}}_N \end{cases} \quad (3.19)$$

### Amplitude de puissance

Pour déterminer les valeurs des puissances maximales échangeables du nœud vers les modules, on distingue trois cas de figure :

1. le module est actif alors sa borne est induite par les contraintes physiques des organes du nœud  $P_{N_m}^{max}$ ,
2. le module est passif et c'est un client alors sa borne est calculée comme la puissance circulant sur le nœud si les sources produisent leur puissance maximale, et les autres clients consomment leur puissance minimale,
3. le module est passif et c'est une source alors sa borne est calculée comme la puissance circulant sur le nœud si les autres sources produisent leur puissance minimale, et les clients consomment leur puissance maximale.

Lorsque les organes du nœud contiennent des degrés de liberté, les cas 2 et 3 dépendent du choix de  $\delta(t)$  par  $(\mathcal{P}_n)$ . Concrètement, pour un module quelconque  $m$ , ces trois cas s'écrivent respectivement :

$$P_m^{max}(t) = \begin{cases} P_{N_m}^{max} & , \text{ si } m \in \mathcal{C}_N \cup \mathcal{S}_N \\ \min \left( P_{N_m}^{max}, \Phi_N^m(\mathbf{P}_s^{max}(t), \mathbf{P}_c^{min}(t), \delta^*(t)) \right) & , \text{ si } m \in \bar{\mathcal{C}}_N \\ \min \left( P_{N_m}^{max}, \Phi_N^m(\mathbf{P}_s^{min}(t), \mathbf{P}_c^{max}(t), \delta^*(t)) \right) & , \text{ si } m \in \bar{\mathcal{S}}_N \end{cases} \quad (3.20)$$

avec,

$$\mathbf{P}_s^{max}(t) := \{P_{s_j}^{max}(t)\}_{j \in \mathcal{S}_N} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{P}_c^{min}(t) := \{P_{c_i}^{min}(t)\}_{i \in \mathcal{C}_N} \quad (3.22)$$

On pratique le même raisonnement pour la puissance minimale.

$$P_m^{min}(t) = \begin{cases} P_{N_m}^{min} & , \text{ si } m \in \mathcal{C}_N \cup \mathcal{S}_N \\ \max \left( P_{N_m}^{min}, \Phi_N^m(\mathbf{P}_s^{min}(t), \mathbf{P}_c^{max}(t), \delta^*(t)) \right) & , \text{ si } m \in \bar{\mathcal{C}}_N \\ \max \left( P_{N_m}^{min}, \Phi_N^m(\mathbf{P}_s^{max}(t), \mathbf{P}_c^{min}(t), \delta^*(t)) \right) & , \text{ si } m \in \bar{\mathcal{S}}_N \end{cases} \quad (3.23)$$

avec,

$$\mathbf{P}_s^{max}(t) := \{P_{s_j}^{max}(t)\}_{j \in \mathcal{S}_N} \quad (3.24)$$

$$\mathbf{P}_c^{min}(t) := \{P_{c_i}^{min}(t)\}_{i \in \mathcal{C}_N} \quad (3.25)$$

**La Satisfaction** On choisit de définir au sein du nœud un niveau d'insatisfaction pour chaque module source en relation avec la distance entre la puissance échangée  $P_{s_j}^e(t)$ , et l'optimalité calculée par  $\mathcal{P}_n$ . Cette fonction est imposée quadratique et définie par :

$$\bar{S}_N(P_{s_j}^e) = z_{sat_N}^2(t) \quad (3.26)$$

où :

$$\dot{z}_{sat_N}(t) = P_{s_j}^b(t) - P_{s_j}^e(t) \quad (3.27)$$

### 3.3. FORMULATION GÉNÉRIQUE DE LA STRATÉGIE ÉNERGÉTIQUE

*Remarque 3.2.* Dans la pratique le problème d'optimisation énergétique est modélisé comme un problème de minimisation. En conséquence nous emploierons fréquemment au cours de cette thèse la fonction *d'insatisfaction*  $\bar{S}_N(P_{s_j}^e)$  déduite de  $S_N(P_{s_j}^e)$  par :

$$\bar{S}_N(P_{s_j}^e) = 1 - S_N(P_{s_j}^e) \quad (3.28)$$

**Énergie Disponible** L'énergie disponible depuis le nœud est quantifiée comme l'énergie totale restante après optimisation du problème  $\mathcal{P}_N$ . Pour la calculer, on définit  $P_{c_i}^{e*}(t)$  la puissance optimisée échangée avec les clients, par :

$$P_{c_i}^{e*}(t) = \begin{cases} f_{clt_i}(\nu_{c_i}^*(t)) & \text{si } i \in \mathcal{C}_N \\ \Phi_N^{c_i}(\nu_s^*(t), \nu_c^*(t), \delta^*(t)) & \text{si } i \in \bar{\mathcal{C}}_N \end{cases} \quad (3.29)$$

En tenant compte des pertes et de l'accumulation d'énergie, on déduit l'énergie disponible sur le nœud :

$$E_N^d = \sum_{j \in \mathcal{S}_N^{tot}} E_{s_j}^d + x_a(t_0) - \int_{t_0}^{t_0+T_p} \left( \kappa(t) + \sum_{i \in \mathcal{C}_N^{tot}} P_{c_i}^{e*}(t) \right) dt \quad (3.30)$$

**Coût de l'énergie** Enfin, plusieurs moyens existent pour quantifier le coût de l'énergie au niveau d'un nœud. Ici, nous proposons qu'il soit évalué comme une fonction linéaire en la puissance échangée par le client. Soit :

$$Ec_N(P_{c_i}^e) = \left( \frac{\sum_{j \in \mathcal{S}_N^{tot}} Ec_{s_j}(P_{s_j}^b)}{\sum_{j \in \mathcal{S}_N^{tot}} P_{s_j}^b(t)} \right) P_{c_i}^e \quad (3.31)$$

#### 3.3.4 Problème mono-objectif : $\mathcal{P}'_N$

Le problème  $\mathcal{P}_N$  présenté au travers de ses objectifs et de ses contraintes (Tab. 3.1) est un problème d'optimisation multi-objectifs. Un moyen courant de résoudre cette classe de problème est de traduire leur formulation comme un problème mono-objectif dont le critère équivaut à une somme pondérée des objectifs initiaux.

A partir des critères de  $\mathcal{P}_N$ , et sur la base de cette précédente remarque, nous définissons le critère  $J_N$  comme une somme pondérée des objectifs de  $\mathcal{P}_N$ , où les coefficients  $\gamma_k$  sont fixés par le concepteur, sur la base de connaissances métiers, ou d'un processus d'optimisation multi-objectifs.

$$J_N = \int_{t_0}^{t_0+T_p} \left( \gamma_1 C_{op}(\mathbf{P}_c^e(t)) + \gamma_2 C_{ce}(\mathbf{P}_s^e(t)) + \gamma_3 C_p(\kappa(t), x_a(t)) \right) dt \quad (3.32)$$



### CHAPITRE 3. DÉFINITION ET DÉCOMPOSITION DES NŒUDS ÉNERGÉTIQUES

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons que la conception du premier niveau de la stratégie énergétique d'un nœud consiste à résoudre le problème d'optimisation mono-objectif  $\mathcal{P}'_N$  minimisant sur l'horizon  $[t_0, t_0 + T_p]$  la fonction objectif (3.32) sous les contraintes de  $\mathcal{P}_N$ . Ce problème est génériquement défini par :

**Problème  $\mathcal{P}'_N$**

$$\min_{\boldsymbol{\nu}_s(t), \boldsymbol{\nu}_c(t), \delta(t)} J_N(\mathbf{P}_s^e(t), \mathbf{P}_c^e(t), \delta(t)) \quad (3.33)$$

sous les contraintes :

$$P_{s_j}^f(t) = f_{src_j}(\nu_{s_j}(t)), \quad \forall j \in S_N \quad (3.33a)$$

$$P_{c_i}^c(t) = f_{clt_i}(\nu_{c_i}(t)), \quad \forall i \in C_N \quad (3.33b)$$

$$E_{s_j}(t) = g_{stk_j}(P_{s_j}^e(t)), \quad \forall j \in S_N^{tot} \quad (3.33c)$$

$$\kappa(t) = \eta_N(\boldsymbol{\nu}_s(t), \boldsymbol{\nu}_c(t), \delta(t)), \quad (3.33d)$$

$$P_{s_j}^e(t) - \Phi_N^{s_j}(\boldsymbol{\nu}_s(t), \boldsymbol{\nu}_s(t), \delta(t)) = 0, \quad \forall j \in \bar{S}_N \quad (3.33e)$$

$$P_{c_i}^e(t) - \Phi_N^{c_i}(\boldsymbol{\nu}_s(t), \boldsymbol{\nu}_c(t), \delta(t)) = 0, \quad \forall i \in \bar{C}_N \quad (3.33f)$$

$$\mathbf{P}_s^e(t) \in \mathcal{P}_s, \quad (3.33g)$$

$$\mathbf{P}_c^e(t) \in \mathcal{P}_c, \quad (3.33h)$$

$$\mathbf{E}_s(t) \in \mathcal{E}_s^d, \quad (3.33i)$$

Les solutions optimales de ce problème sont notées :

$$\delta^*(t), \quad \boldsymbol{\nu}_c(t) = \{\nu_{c_i}^*(t)\}_{i \in C_N}, \quad \boldsymbol{\nu}_s(t) = \{\nu_{s_j}^*(t)\}_{j \in S_N}, \quad (3.34)$$

et sont transmises vers le second niveau de la stratégie pour construire génériquement les signaux de communication par application des définitions de la **section 3.3.3**.

$$\left( (\mathbf{b})_N^s, (\mathbf{d})_N^c \right) = \Xi_N \left( (\mathbf{d})_s^N, (\mathbf{b})_c^N \right) \quad (3.35)$$

En résumé, (3.35) précise la stratégie du nœud modélisée par une boîte noire (2.26) dans le **chapitre 2**. La suite de la thèse, déclinera le problème  $\mathcal{P}'_N$  pour trois nœuds élémentaires correspondant à des problématiques récurrentes pour les systèmes énergétiques.

## 3.4 Définitions des Nœuds Unitaires

### 3.4.1 Motivations

Dans notre présentation sur les nœuds, et en particulier des causalités de pilotage, nous avons pu constater qu'un module client et un module source sont naturellement compatibles, à partir du moment où ils partagent une même causalité. Cependant, on retient trois cas de figure, où la considération d'un élément de jonction, sous la forme d'un nœud, est nécessaire :

1. Il existe une perte ou une accumulation entre ces deux modules qui, pour le besoin de la conception, sont modélisés indépendamment.
2. Les deux modules ont une causalité de pilotage opposée.

Les nœuds qui en résultent sont dits *unitaires*.

Cette section étudie trois nœuds unitaires particuliers faisant échos à trois fonctionnalités : la transformation (avec pertes) :  $U_T$  ; l'accumulation :  $U_A$  ; et la distribution :  $U_D$ . L'objectif est dans un premier temps de décrire les caractéristiques structurelles qui distinguent ces nœuds (**section 3.4.2**), puis sur la base de ces connaissances élaborer leur stratégie (**section 3.4.3**)

Notons dès-à-présent que ces trois nœuds sont présentés principalement pour deux raisons :

- leur simplicité, qui nous permet ainsi d'introduire nos notations,
- leur participation à la décomposition de la stratégie (voir **section 3.7**).

### 3.4.2 Descriptions

#### 3.4.2.1 Nœud Unitaire de Transformation : $U_T$

On appelle nœud unitaire de transformation ( $U_T$ ) un nœud dont les deux modules connectés ont une causalité identique, et pour lequel le phénomène d'accumulation est négligé. Deux configurations sont alors distinguables :

- Les modules sont en causalité source (Fig. 3.1a) et les flux physiques sont des puissances fournies  $P_{s_1}^f$  et  $P_{c_1}^f$ .
- Les modules sont en causalité client (Fig. 3.1b) et les flux physiques sont des puissances consommées  $P_{s_1}^c$  et  $P_{c_1}^c$ .

Dans ces deux situations, le nœud n'a pas la maîtrise de l'énergie et il ne comporte donc pas de variable interne (i.e.  $n_\delta = 0$ ). Sa stratégie s'écrit sous la forme d'une boîte noire :

$$\left( (b)_{U_T}^{s_1}(t), (d)_{U_T}^{c_1}(t) \right) = \Xi_{U_T} \left( (d)_{s_1}^{U_T}(t), (b)_{c_1}^{U_T}(t) \right) \quad (3.36)$$

Ces caractéristiques structurelles diffèrent selon la causalité.

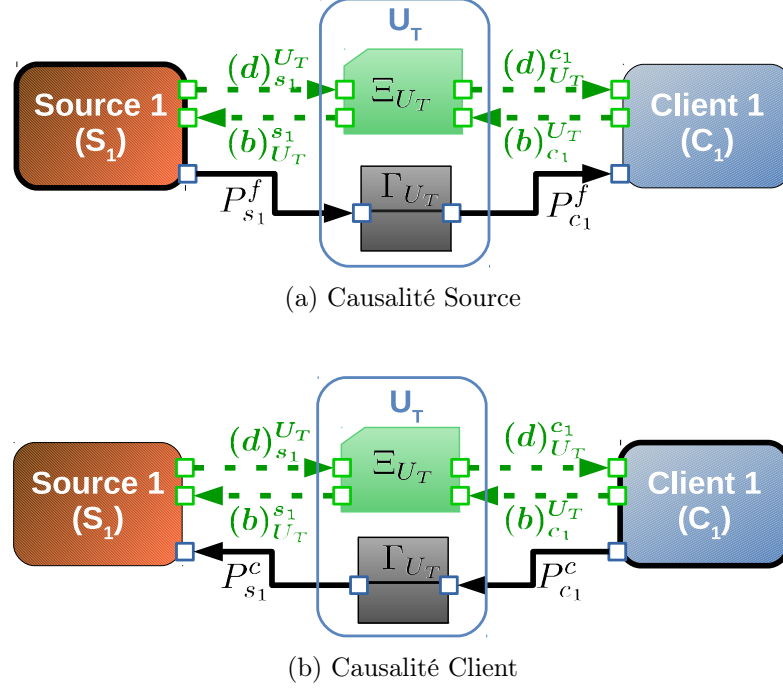


FIGURE 3.1 – Nœuds Unitaires de Transformation ( $U_T$ )

**Causalité Source** Les organes du nœud sont modélisés par la relation structurelle :

$$(P_{c_1}^f(t), \kappa(t)) = \Gamma_{U_T}(P_{s_1}^f(t)) \quad (3.37)$$

Celle-ci se compose d'une équation de perte  $\eta_{U_T}(t)$  et d'une équation de distribution  $\Phi_{U_T}(t)$ , toutes deux dépendantes du flux d'énergie entrant dans le nœud.

$$\Gamma_{U_T} : \begin{cases} \kappa(t) &= \eta_{U_T}(P_{s_1}^f(t)) \\ P_{c_1}^f(t) &= \Phi_{U_T}(P_{s_1}^f(t)) \end{cases} \quad (3.38)$$

Le bilan d'énergie (2.31) s'écrit :

$$\Phi_{U_T}(P_{s_1}^f(t)) + \eta_{U_T}(P_{s_1}^f(t)) = P_{s_1}^f(t) \quad (3.39)$$

**Causalité Client** Les organes du nœud sont modélisés par la relation structurelle :

$$(P_{s_1}^c(t), \kappa(t)) = \Gamma_{U_T}(P_{c_1}^c(t)) \quad (3.40)$$

De même que précédemment, la relation  $\Gamma_{U_T}(t)$  est composée d'une équation de perte  $\eta_{U_T}(t)$  et d'une équation de distribution  $\Phi_{U_T}(t)$ .

$$\Gamma_{U_T} : \begin{cases} \kappa(t) &= \eta_{U_T}(P_{c_1}^c(t)) \\ P_{s_1}^c(t) &= \Phi_{U_T}(P_{c_1}^c(t)) \end{cases} \quad (3.41)$$

Le bilan d'énergie (2.31) s'écrit :

$$\Phi_{U_T}(P_{c_1}^c(t)) + \eta_{U_T}^b(P_{c_1}^c(t)) = P_{c_1}^c(t) \quad (3.42)$$

*Remarque 3.3.* Les deux bilans d'énergie (3.39) et (3.42) montrent qu'en l'absence de pertes ce nœud ne modifie pas les interactions physiques et correspond donc à une connexion naturelle entre une source et un client.

*Remarque 3.4.* Pour rappel, la causalité est indépendante du signe de la puissance échangée.

### 3.4.2.2 Nœud Unitaire d'Accumulation : $U_A$

On nomme nœud unitaire d'accumulation ( $U_A$ ), un nœud dont les modules sont tous les deux actifs (voir Fig. 3.2), et qui ne comporte pas de pertes. Les flux physiques échangés sont respectivement  $P_{s_1}^f$ , la puissance fournie, et  $P_{c_1}^c$  la puissance consommée. Dans cette situation, le nœud n'a pas la maîtrise de l'énergie et il ne comporte donc pas de variable interne (i.e.  $n_\delta = 0$ ).

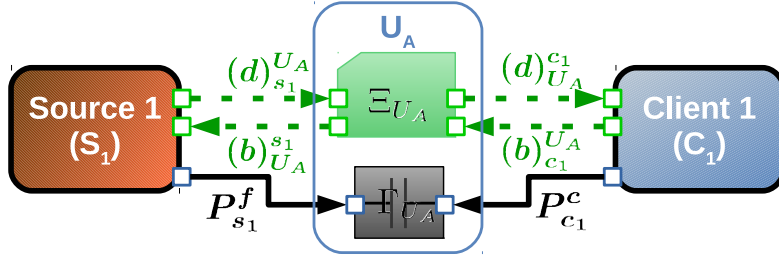


FIGURE 3.2 – Nœud Unitaire d'accumulation  $U_A$

Sa stratégie sous la forme boîte-noire s'écrit :

$$\left( (b)_{U_A}^{s_1}(t), (d)_{U_A}^{c_1}(t) \right) = \Xi_{U_A} \left( (d)_{s_1}^{U_A}(t), (b)_{c_1}^{U_A}(t) \right) \quad (3.43)$$

Et on modélise ses organes par une unique relation structurelle :

$$\Gamma_{U_A} : x_{U_A}(t) = \xi_{U_A}(P_{s_1}^f(t), P_{c_1}^c(t)) \quad (3.44)$$

Le bilan d'énergie (2.31) s'écrit :

$$x_{U_A}(t) = P_{c_1}^c(t) + P_{s_1}^f(t) \quad (3.45)$$

On en déduit donc :

$$\xi_{U_A}(P_{s_1}^f(t), P_{c_1}^c(t)) = P_{c_1}^c(t) + P_{s_1}^f(t) \quad (3.46)$$

### CHAPITRE 3. DÉFINITION ET DÉCOMPOSITION DES NŒUDS ÉNERGÉTIQUES

*Remarque 3.5.* Physiquement, ce nœud présente un cas singulier, il n'a pas la maîtrise directe de l'énergie qui entre par ses ports physiques, et surtout il n'a aucun moyen d'évacuer les sur-plus ou de prélever les manques de puissance sur un module passif. Les transitoires sont amortis par la variable d'accumulation mais sa structure peut être endommagée si les deux modules ont des actions contradictoires prononcées.

Idéalement, ce cas de figure est donc à éviter lors de la conception, mais nous verrons à la **section 3.7** qu'il peut se montrer utile pour décomposer une stratégie générale.

#### 3.4.2.3 Nœud Unitaire de Distribution : $U_D$

On appelle nœud unitaire de distribution ( $U_D$ ) un nœud dont la source et le client sont tous les deux passifs (voir Figure 3.3), et dont l'accumulation et les pertes sont négligées. Ce type de nœud joue le rôle d'un distributeur d'énergie piloté par la consigne  $\delta(t)$  calculée par la stratégie. Il maîtrise donc à la fois l'énergie fournie au client  $P_{c_1}^f(t)$  et l'énergie consommée sur la source  $P_{s_1}^c(t)$ .

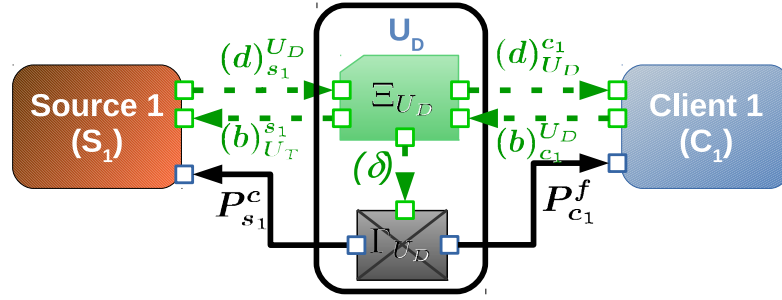


FIGURE 3.3 – Nœud Unitaire de Distribution :  $U_D$

La stratégie du nœud s'écrit sous la forme boîte-noire :

$$\left( (b)_{U_D}^{s_1}(t), (d)_{U_D}^{c_1}(t), \delta(t) \right) = \Xi_{U_D} \left( (d)_{s_1}^{U_D}(t), (b)_{c_1}^{U_D}(t) \right) \quad (3.47)$$

La structure des organes est modélisée par :

$$\Gamma_{U_D} : \begin{cases} P_{s_1}^c(t) &= \Phi_{U_D}^1(\delta(t)) \\ P_{c_1}^f(t) &= \Phi_{U_D}^2(\delta(t)) \end{cases} \quad (3.48)$$

Son bilan d'énergie s'écrit :

$$P_{s_1}^c(t) + P_{c_1}^f(t) = 0 \quad (3.49)$$

Il s'en déduit alors la relation triviale.

$$\Phi_{U_D}^1(\delta(t)) = -\Phi_{U_D}^2(\delta(t)) \quad (3.50)$$

### 3.4.3 Élaboration des Stratégies

Dans ces trois configurations, la construction des signaux de communication est identique au cas général (**section 3.3.3**). Le problème d'optimisation  $\mathcal{P}'_n$  peut en revanche être omis pour les nœuds de transfert  $U_T$  et d'accumulation  $U_A$ , du fait de nos hypothèses sur la causalité des modules.

En revanche, ce problème d'optimisation est nécessaire pour concevoir le nœud de distribution  $U_D$  est sera détaillé à la **section 3.4.3.2**.

#### 3.4.3.1 Stratégie Nœuds : $U_T$ et $U_A$

Dans l'introduction de notre méthodologie (voir section précédente), nous avons stipulé qu'un module actif consomme (ou fournit) de l'énergie en respectant les contraintes qui lui sont attribuées. Ceci permet entre autre une connexion naturelle entre deux modules de même causalité.

Dans le cas des nœuds unitaires  $U_T$  et  $U_A$ , plutôt que résoudre  $\mathcal{P}'_n$  il est préférable de s'appuyer sur les décisions du module actif pour construire les signaux de communication suivantes :

$$\begin{cases} \nu_{s_1}^*(t) &= P_{c_1}^b(t) + x_a(t) \\ \nu_{c_1}^*(t) &= P_{s_1}^d(t) \end{cases} \quad (3.51)$$

#### 3.4.3.2 Stratégie Nœud $U_D$

Dans le contexte du nœud de distribution, nous proposons de concevoir la stratégie comme la solution du problème d'optimisation  $\mathcal{P}_{U_D}$  déduit de  $\mathcal{P}'_n$  (voir **section 3.3.4**) par simplification. De part les caractéristiques de  $\Gamma_{U_D}$ , l'optimisation se concentre sur une seule variable  $\delta(t)$  et s'écrit :

**Problème  $\mathcal{P}_{U_D}$**

$$\min_{\delta(t)} \int_{t_0}^{t_0+T_p} \left( \gamma_1 \alpha_1 \bar{S}_{c_1}(P_{c_1}^f(t)) + \gamma_2 \beta_1 Ec_{s_1}(P_{s_1}^c(t)) \right) dt \quad (3.52)$$

sous les contraintes :

$$E_{s_1}(t) = g_{stk_1}(P_{s_1}^c(t)), \quad (3.52a)$$

$$P_{s_1}^c(t) - \Phi_N^{s_1}(\delta(t)) = 0, \quad (3.52b)$$

$$P_{c_1}^f(t) - \Phi_N^{c_1}(\delta(t)) = 0, \quad (3.52c)$$

$$P_{s_1}^c(t) \in \mathcal{P}_{s_1}, \quad (3.52d)$$

$$P_{c_1}^f(t) \in \mathcal{P}_{c_1}, \quad (3.52e)$$

$$E_{s_1}(t) \in \mathcal{E}_{s_1}^d, \quad (3.52f)$$

## CHAPITRE 3. DÉFINITION ET DÉCOMPOSITION DES NŒUDS ÉNERGÉTIQUES

La stratégie  $\Xi_{U_D}$  (3.47) s'obtient par l'application des règles de construction (cf. **section 3.3.3**) et par la résolution de ce problème. Elle recherche l'équilibre entre la satisfaction du client, et un coût d'énergie, tout en respectant les contraintes d'amplitude des modules, et la disponibilité de la source.

### 3.5 Définition du Nœud d'Hybridation : MS\_SC

#### 3.5.1 Motivations

Les cas où plusieurs modules de nature identique sont liés à un unique module de nature opposé forme une famille de problème que l'on nomme « Multi-Mono ». La duplicité d'un module de même nature implique nécessairement une stratégie de pilotage pour le nœud. Nous étudions cette structure particulière sous les hypothèses suivantes :

**Hypothèse 3.6.** *Les pertes et l'accumulation d'énergie internes aux nœuds « Multi-Mono » sont négligées.*

**Hypothèse 3.7.** *Les modules connectés à la face « multi » du nœud sont en causalité active.*

Dans les deux sections suivantes nous tenterons de souligner les invariants des problématiques d'hybridation de sources (**section 3.6**) et de concurrence de clients (**section 3.6**), par la définition de leur structure et de leur stratégie. Nous verrons à la **section 3.7** qu'une telle sélection est suffisante pour exprimer la majorité des problèmes.

#### 3.5.2 Description

Le nœud d'hybridation ou  $MS\_SC$  (pour *Multi-Source Single-Client*), décrit une structure composée de plusieurs sources et un seul client (Fig. 3.4). Sa fonctionnalité consiste à réunir les puissances provenant des sources, et de la transmettre à un module type client. L'objectif de sa stratégie est de générer une disponibilité  $(d)_{MS}^{c_1}$  pour le module client et un ensemble de besoin  $(b)_{MS}^{s_j}$  pour chacune des sources  $j$ , de façon à satisfaire le besoin  $(b)_{c_1}^{MS}$ . Pour cela, elle sélectionne la meilleure hybridation entre les sources, tenant compte de leur disponibilité  $(d)_{s_j}^{MC}$ .

Soit  $n_s^{tot} > 1$  et  $n_c^{tot} = 1$ , d'après nos hypothèses le nœud est caractérisé par des sources actives :

$$\bar{\mathcal{S}}_{MS} = \emptyset \quad \text{et} \quad \mathcal{S}_{MS}^{tot} = \mathcal{S}_{MS} \quad (3.53)$$

Par conséquent les organes du nœud n'ont pas besoin d'être pilotés ( $\delta = \emptyset$ ). A l'inverse, si on choisit une causalité passive, on crée des degrés de liberté dans la structure du nœud qu'il faut traiter par la stratégie.

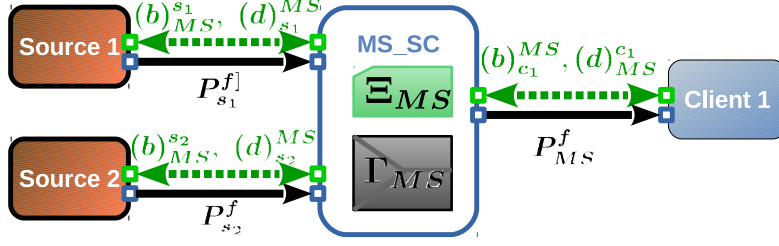


FIGURE 3.4 – Nœud d'hybridation (MS\_SC) avec deux sources

D'après notre description générique (section 2.5), les relations multi-physiques du nœud sont de la forme :

$$\begin{aligned} P_{c_1}^f(t) &= \Gamma_{MS}(\mathbf{P}_s^f(t)) \\ \left( (\mathbf{b})_{MS}^s(t), (d)_{MS}^{c_1}(t) \right) &= \Xi_{MS} \left( (\mathbf{d})_s^{MS}(t), (b)_{c_1}^{MS}(t) \right) \end{aligned} \quad (3.54)$$

avec :

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_s^f(t) &:= \left\{ P_{s_j}^f(t) \right\}_{j \in [1, \dots, n_s]}, \quad (\mathbf{d})_s^{MS}(t) := \left\{ (d)_{MS}^{s_j}(t) \right\}_{j \in S_{MS}}, \\ (\mathbf{b})_{MS}^s(t) &:= \left\{ (b)_{MS}^{s_j}(t) \right\}_{j \in S_{MS}} \end{aligned} \quad (3.55)$$

L'hypothèse de non stockage sur le nœud implique un bilan de puissance nulle, donc :

$$P_{c_1}^f(t) = \sum_{j=1}^{n_s} P_{s_j}^f(t) \quad (3.56)$$

En l'absence de pertes internes au nœud (Hypothèse 3.6), la relation structurelle  $\Gamma_{MS}$  et la contrainte (3.56) sont strictement équivalentes. On pose alors :

$$\Gamma_{MS}(\mathbf{P}_s^f(t)) = \sum_{j=1}^{n_s} P_{s_j}^f(t) \quad (3.57)$$

### 3.5.3 Stratégie Multi-Sources : $\Xi_{MS}$

#### 3.5.3.1 Problème d'Optimisation $\mathcal{P}_{MS}$

Pour rappel, le nœud  $MS\_SC$ , contient  $n_s^{tot}$  sources actives et un seul client passif, il ne présente ni accumulation, ni perte de transfert. Les signaux de disponibilités  $(d)_{s_j}^{MS}$  des sources  $j$ , et le besoin  $(b)_{c_1}^{MS}$  sont supposés connus sur l'horizon  $[t_0, t_0 + T_p]$ .

On dérive de  $\mathcal{P}'_N$  un nouveau problème d'optimisation, que l'on note  $\mathcal{P}_{MS}$  pour *Problème d'Optimisation Multi-Sources*, et dont la variable de décision est  $\nu_s(t)$ .



### CHAPITRE 3. DÉFINITION ET DÉCOMPOSITION DES NŒUDS ÉNERGÉTIQUES

#### Problème $\mathcal{P}_{MS}$

$$\min_{\boldsymbol{\nu}_s(t)} \int_{t_0}^{t_0+T_p} \left( \gamma_1 \alpha_1 \bar{S}_{c_1}(P_{c_1}^f(t)) + \gamma_2 \sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}} \beta_{s_j} Ec_{s_j}(P_{s_j}^f(t)) \right) dt \quad (3.58)$$

sous les contraintes :

$$P_{s_j}^f(t) = f_{src_j}(\nu_{s_j}(t)), \quad \forall j \in S_N \quad (3.58a)$$

$$E_{s_j}(t) = g_{stk_j}(P_{s_j}^f(t)), \quad \forall j \in S_N \quad (3.58b)$$

$$P_{c_1}^f(t) - \sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}} P_{s_j}^f(t) = 0, \quad (3.58c)$$

$$\mathbf{P}_s^f(t) \in \mathcal{P}_s, \quad (3.58d)$$

$$P_{c_1}^f(t) \in \mathcal{P}_{c_1}, \quad (3.58e)$$

$$\mathbf{E}_s(t) \in \mathcal{E}_s^d, \quad (3.58f)$$

Les solutions optimales de ce problème sont définis par :

$$\boldsymbol{\nu}_s(t) = \left\{ \nu_{s_j}^*(t) \right\}_{j \in \mathcal{S}_{MS}} \quad (3.59)$$

Les pondérations  $\{\beta_j\}_{j \in [1, \dots, n_s]}$  traduisent une hiérarchisation des sources tandis que  $\alpha_{c_1}$  normalise la satisfaction. Les coefficients  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$  règlent le compromis entre l'exigence d'optimalité énergétique et l'opérationnalité.

#### 3.5.3.2 Construction des Signaux

Pour construire les signaux de communications, on applique directement les propositions de la **section 3.3.3**. En premier lieu, on calcule les puissances demandées aux sources :

$$P_{s_j}^b(t) = f_{src_j}(\nu_{s_j}^*(t)) \quad (3.60)$$

Puis on en déduit les signaux de besoins et de disponibilités :

$$(b)_{MS}^{s_j} := \left\{ \begin{array}{ll} P_{MS}^{max}(t) & = P_{c_1}^{max}(t), \\ P_{MS}^{min}(t) & = P_{c_1}^{min}(t) \\ P_{MS}^b(t) & = P_{s_j}^b(t), \\ \bar{S}_{MS}(P_{s_j}^c) & = z_{sat_{MS}}^2(t) \end{array} \right\} \quad (3.61)$$

avec

$$\dot{z}_{sat_{MS}}(t) = P_{s_j}^f(t) - P_{s_j}^b(t) \quad (3.62)$$

Et,

$$(d)_{MS}^{c_1} := \left\{ \begin{array}{lcl} P_{MS}^{max}(t) & = & \sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}} P_{s_j}^{max}(t), \\ P_{MS}^{max}(t) & = & \sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}} P_{s_j}^{max}(t), \\ E_{MS}^d & = & \sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}} E_{s_j}^d - \int_{t_0}^{t_0+T_p} P_{c_1}^{e*}(t) dt, \\ E_{c_{MS}}(P_{c_i}^c) & = & \left( \frac{\sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}} E_{c_{s_j}}(P_{s_j}^b)}{\sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}} P_{s_j}^b(t)} \right) (P_{c_1}^c(t))^2 \end{array} \right\} \quad (3.63)$$

où

$$P_{c_1}^{e*}(t) = \sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}} f_{src_j}(\nu_{s_j}^*(t)) \quad (3.64)$$

### 3.5.4 Illustration

#### 3.5.4.1 Protocole

La stratégie nœud précédemment proposée est mise en œuvre dans le cas d'une chaîne énergétique contenant deux sources et un client, en causalité source. Le client suit un scénario alternant des créneaux de puissance de valeurs différentes.

La source 1 correspond à une ressource peu onéreuse et réversible, mais limitée par une puissance maximale de  $P_{s_1}^{max} = 20W$  et une puissance minimale de  $P_{s_1}^{min} = -20W$ . Elle est calibrée pour être dans l'incapacité d'assurer la totalité du scénario (capacité limitée). La source 2 est plus onéreuse et non réversible mais dimensionnée pour assurer les pics de puissance maximaux du scénario client :  $P_{s_2}^{min} = 0W$  et  $P_{s_2}^{max} = 26W$ .

Les prix des sources sont fixés<sup>2</sup> :  $p_{s_1} = 1$ ,  $p_{s_2} = 8$ , et le coût de production est proportionnel au carré de la puissance produite par les sources. Soit :

$$E_{c_{s_j}}(P_{s_j}^f) = \left( p_{s_j} P_{s_j}^f(t) \right)^2 \quad (3.65)$$

La satisfaction est modélisée comme l'intégrale au carrée de l'erreur entre la puissance totale fournie au client  $P_{c_1}^f(t)$  et la puissance demandée par le client  $P_c^b(t_0)$  :

$$\bar{S}_{c_1}(\mathbf{P}_s^f) = z_{sat_c}^2(t) \quad (3.66)$$

---

2. unités équivalente à €/kW

avec

$$\dot{z}_{sat_c} = P_c^b(t) - \sum_{j \in \mathcal{S}_N} P_{s_j}^f(t) \quad (3.67)$$

On privilégie dans la fonction objectif de  $\mathcal{P}_{MS}$  le critère d'opérationnalité (i.e.  $\gamma_1 = 80$ , et  $\gamma_2 = 1$ ).

### 3.5.4.2 Résultats

Le problème d'optimisation  $\mathcal{P}_{MS}$  est résolu pour un horizon  $T_p = 10s$  avec un pas de temps de  $0.1s$ , par une méthode de recherche du type point-intérieur.

On observe sur les Figures 3.5a et 3.5b, deux phases de fonctionnement. Avant  $t_{lim} = 15s$ , la source 1 assure l'ensemble du scénario dans la limite de sa puissance maximale. Au-delà de  $t_{lim} \approx 14s$ , un basculement s'opère. La puissance fournie par la source 2 devient prépondérante, tandis que la source 1 est progressivement éteinte jusqu'à l'épuisement totale de son énergie disponible (cf. Fig. 3.5b).

## 3.6 Définition du Nœud de Concurrence : SS\_MC

### 3.6.1 Descriptions

Le nœud de concurrence ou  $SS\_MC$  (pour *Single-Source Multiple-Client*)<sup>3</sup>, décrit une structure composée de plusieurs clients et une seule source (cf. Fig. 3.6). Sa fonctionnalité principale consiste à attribuer une énergie disponible  $(d)_{MC}^{c_i}$  pour chacun des clients  $i$  connectés, au regard de leur besoin respectif  $(b)_{c_i}^{MC}$  et de la disponibilité du module source  $(d)_{s_1}^{MC}$ . D'autres part, lorsque la disponibilité d'énergie est trop faible, son rôle secondaire est de sélectionner les clients dont les fonctions seront dégradées (i.e. qui ne recevront pas leur demande en énergie). Enfin elle communique vers la source un signal de besoin  $(b)_{MC}^{s_1}$ .

Soit  $n_s^{tot} = 1$  et  $n_c^{tot} > 1$ , d'après nos hypothèses le nœud est caractérisé par des clients actifs :

$$\bar{\mathcal{C}}_{MC} = \emptyset \quad \text{et} \quad \mathcal{C}_{MC}^{tot} = \mathcal{C}_{MC} \quad (3.68)$$

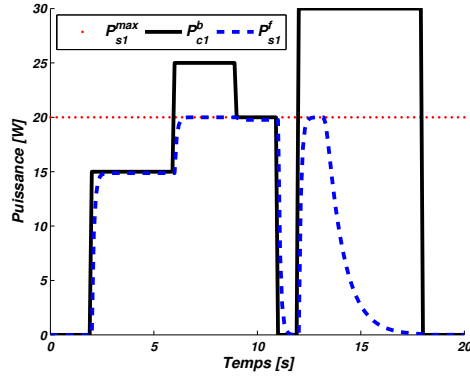
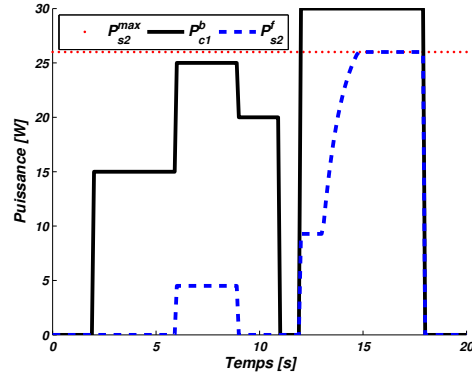
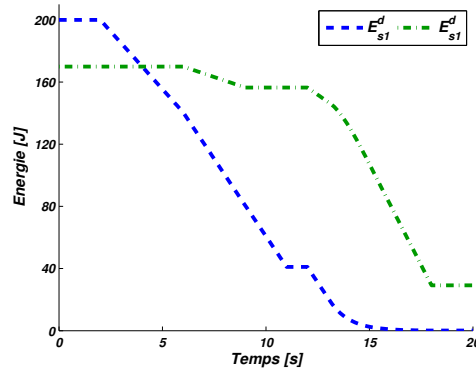
Par conséquent les organes du nœud n'ont pas besoin d'être pilotés ( $\delta = \emptyset$ ). A l'inverse, si on choisit une causalité passif, on crée des degrés de liberté dans le nœud qu'il faut traiter par la stratégie.

D'après notre description générique (voir équation (2.5)), les relations multi-physiques régissant son fonctionnement sont de la forme :

$$\begin{aligned} P_{s_1}^c(t) &= \Gamma_{MC}(\mathbf{P}_c^c(t)) \\ \left( (b)_{MC}^{s_1}(t), (\mathbf{d})_{\mathbf{MC}}^c(t) \right) &= \Xi_{MC} \left( (d)_{s_1}^{MC}(t), (\mathbf{b})_{\mathbf{c}}^{\mathbf{MC}}(t) \right) \end{aligned} \quad (3.69)$$

---

3. Abrégé par  $MC$  pour les indices et les schémas


 (a) Analyse des flux de puissance sur la source  $s_1$ 

 (b) Analyse des flux de puissance sur la source  $s_2$ 


(c) Évolution de l'énergie disponible

FIGURE 3.5 – Résultats illustration MS\_SC

avec

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_c^c(t) &:= \left\{ P_{c_i}^c(t) \right\}_{i \in \mathcal{C}_{MC}}, & (\mathbf{d})_{MC}^c(t) &:= \left\{ (d)_{MC}^{c_i}(t) \right\}_{i \in \mathcal{C}_{MC}}, \\ (\mathbf{b})_{MC}^c(t) &:= \left\{ (b)_{MC}^{c_i}(t) \right\}_{i \in \mathcal{C}_{MC}} \end{aligned} \quad (3.70)$$

Selon la propriété d'équilibre énergétique, on sait que :

$$P_{s_1}^c(t) = \sum_{i \in \mathcal{C}_{MC}} P_{c_i}^c(t) \quad (3.71)$$

En l'absence de pertes (Hypothèse 3.6), la relation structurelle  $\Gamma_{MC}$  et la contrainte d'équilibre énergétique sont strictement équivalentes :

$$\Gamma_{MC}(\mathbf{P}_c^c(t)) = \sum_{i \in \mathcal{C}_{MC}} P_{c_i}^c(t) \quad (3.72)$$

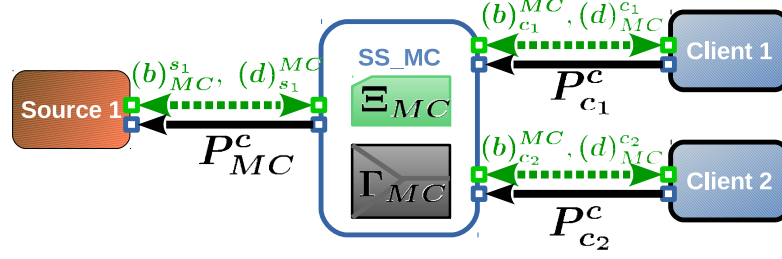


FIGURE 3.6 – Nœud concurrence (SS\_MC) avec deux Clients

### 3.6.2 Stratégie Multi-Clients : $\Xi_{MC}$

#### 3.6.2.1 Problème d'Optimisation $\mathcal{P}_{MC}$

Pour rappel, le nœud  $SS\_MC$ , contient  $n_c^{tot}$  clients actifs et une seule source passive, il ne présente ni accumulation, ni pertes de transfert. Les signaux de besoins  $(b)_{c_i}^{MC}$  des clients  $i$ , et la disponibilité  $(d)_{s_1}^{MC}$  sont supposés connus sur l'horizon  $[t_0, t_0 + T_p]$ .

On dérive de  $\mathcal{P}'_N$  un nouveau problème d'optimisation, que l'on note  $\mathcal{P}_{MC}$  pour *Problème d'Optimisation Multi-Clients*, dont la variable de décision est  $\nu_c(t)$ .

#### Problème $\mathcal{P}_{MC}$

$$\min_{\nu_c(t)} \int_{t_0}^{t_0+T_p} \left( \gamma_1 \sum_{i \in \mathcal{C}_{MC}} \alpha_i \bar{S}_{c_i}(P_{c_i}^c(t)) + \gamma_2 \beta_{s_1} E_{c_{s_1}}(P_{s_1}^c(t)) \right) dt \quad (3.73)$$

sous les contraintes :

$$P_{c_i}^c(t) = f_{c_{lt}i}(\nu_{c_i}(t)), \quad \forall i \in C_N \quad (3.73a)$$

$$E_{s_1}(t) = g_{stk_1}(\nu_{s_1}(t)), \quad (3.73b)$$

$$0 = P_{s_1}^c(t) - \sum_{i \in \mathcal{C}_{MC}} P_{c_i}^c(t), \quad (3.73c)$$

$$P_{s_1}^c(t) \in \mathcal{P}_{s_1}, \quad (3.73d)$$

$$\mathbf{P}_c^c(t) \in \mathcal{P}_c, \quad (3.73e)$$

$$E_{s_1}(t) \in \mathcal{E}_{s_1}^d, \quad (3.73f)$$

Les solutions optimales de ce problème sont définis par :

$$\nu_c^*(t) = \{\nu_{c_i}^*(t)\}_{i \in \mathcal{C}_{MC}} \quad (3.74)$$

Les pondérations  $\{\alpha_i\}_{i \in [1, \dots, n_c]}$  traduisent une hiérarchisation des clients tandis que  $\beta_{s_1}$  normalise le coût de l'énergie. Les coefficients  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$  règlent le compromis entre l'existence d'optimalité énergétique et l'opérationnalité.

### 3.6.2.2 Construction des Signaux

Pour construire les signaux de communications, on applique directement les propositions de la **section 3.3.3**. En premier lieu, on calcule la puissance demandée à la source :

$$P_{s_1}^b(t) = \sum_{i \in \mathcal{C}_{MC}} f_{clt_i}(\nu_{c_i}^*(t)) \quad (3.75)$$

Puis on en déduit les signaux de besoins et de disponibilités :

$$(b)_{MC}^{s_1} := \left\{ \begin{array}{lcl} P_{MC}^{max}(t) & = & \sum_{i \in \mathcal{C}_{MC}} P_{c_j}^{max}(t), \\ P_{MC}^{min}(t) & = & \sum_{i \in \mathcal{C}_{MC}} P_{c_j}^{min}(t) \\ P_{MC}^b(t) & = & P_{s_1}^b(t), \\ \bar{S}_{MC}(P_{s_1}^c(t)) & = & z_{sat_{MC}}^2(t) \end{array} \right\} \quad (3.76)$$

avec

$$\dot{z}_{sat_{MC}}(t) = P_{s_1}^c(t) - P_{s_1}^b(t) \quad (3.77)$$

Et,

$$(d)_{MC}^{c_i} := \left\{ \begin{array}{lcl} P_{MC}^{max}(t) & = & P_{s_1}^{max}(t), \\ P_{MC}^{min}(t) & = & P_{s_1}^{min}(t), \\ E_{MC}^d(t_0) & = & E_{s_1}^d(t_0) - \int_{t_0}^{t_0+T_p} \sum_{i \in \mathcal{C}_{MC}} P_{c_i}^{e*}(t) dt, \\ Ec_{MC}(P_{c_i}^c(t)) & = & \left( \frac{Ec_{s_j}(P_{s_1}^b(t))}{P_{s_1}^b(t)} \right) (P_{c_i}^c)^2(t) \end{array} \right\} \quad (3.78)$$

où  $\nu_{c_i}^*(t)$  sont les solutions de  $\mathcal{P}_{MC}$  défini dans le paragraphe précédent, et

$$P_{c_i}^{e*}(t) = f_{clt_i}(\nu_{c_i}^*(t)) \quad (3.79)$$

### 3.6.2.3 Formulation Simplifiée : Homothétie du Besoin

De part les hypothèses formulées pour la conception de clients actifs (section 2.4.4), la puissance demandée par chacun d'entre eux correspond déjà à la solution d'un problème d'optimisation visant une satisfaction maximale sans violer les contraintes de disponibilités. Il est donc judicieux de s'appuyer sur ce signal pour calculer la puissance fournie.

### CHAPITRE 3. DÉFINITION ET DÉCOMPOSITION DES NŒUDS ÉNERGÉTIQUES

La première solution, consiste à construire la fonction d'insatisfaction comme une fonction quadratique construite à partir de l'intégrale de l'écart entre la puissance demandée  $P_{c_i}^b$ , et la puissance échangée, soit :

$$\bar{S}_{c_i}(P_{c_i}^c(t)) = z_{sat_{c_i}}^2(t) \quad (3.80)$$

avec

$$\dot{z}_{sat_{c_i}}(t) = P_{c_i}^b(t) - P_{c_i}^c(t) \quad (3.81)$$

Le critère qui en découle sera alors quadratique, ce qui numériquement facilite l'obtention d'une solution.

Une seconde proposition est de restreindre l'espace de décision à un ensemble de solution qui soit une homothétie du profil initialement demandée.

**Proposition 3.8.** *Pour tout  $t$  dans  $[t_0, t_0 + T_p]$  et tout client  $i$  de  $\mathcal{C}_{MC}^{tot}$ , la solution optimale  $\nu_c^*(t)$  vérifie :*

$$\nu_c^*(t) = \left\{ \lambda_{c_i}^* P_{c_i}^b(t) \right\}_{i \in \mathcal{C}_{MC}^{tot}} \quad \text{où } \lambda_{c_i}^* \in [0, 1] \quad (3.82)$$

Dans ces conditions, le problème d'optimisation revient à chercher  $n_c^{tot}$  variables pour l'ensemble de l'intervalle. De part le changement de variable, la nouvelle variable de décision est  $\lambda := \{\lambda_{c_i}\}_{i \in \mathcal{C}_{MC}}$ . Ce nouveau problème, noté  $\mathcal{P}'_{MC}$ , s'écrit :

**Problème  $\mathcal{P}'_{MC}$**

$$\min_{\lambda} \int_{t_0}^{t_0+T_p} \left( \gamma_1 \sum_{i \in \mathcal{C}_{MC}} \alpha_i \bar{S}_{c_i}(P_{c_i}^c(t)) + \gamma_2 \beta_{s_1} Ec_{s_1}(P_{s_1}^c(t)) \right) dt \quad (3.83)$$

sous les contraintes :

$$\nu_{c_i}(t) = \lambda_{c_i} P_{c_i}^b(t), \quad \forall i \in \mathcal{C}_{MC}, \lambda_{c_i} \in [0, 1] \quad (3.83a)$$

$$P_{c_i}^c(t) = f_{dlt_i}(\nu_c(t)), \quad \forall i \in \mathcal{C}_N \quad (3.83b)$$

$$E_{s_1}(t) = g_{stk_1}(\nu_{s_1}(t)), \quad (3.83c)$$

$$P_{s_1}^c(t) - \sum_{i \in \mathcal{C}_{MC}} P_{c_i}^c(t) = 0, \quad (3.83d)$$

$$P_{s_1}^c(t) \in \mathcal{P}_{s_1}, \quad (3.83e)$$

$$\mathbf{P}_c^c(t) \in \mathcal{P}_c, \quad (3.83f)$$

$$E_{s_1}(t) \in \mathcal{E}_s^d, \quad (3.83g)$$

*Remarque 3.9.* Le rapport d'homothétie  $\lambda$  est ici fixe sur l'horizon d'optimisation. On pourrait cependant enrichir la stratégie en « découper » l'horizon en sous-intervalle, et en calculant un rapport d'homothétie pour chacun d'entre eux.

### 3.6.3 Illustration

#### 3.6.3.1 Protocole

La stratégie du nœud de concurrence est mise en œuvre dans le cas d'une chaîne énergétique contenant deux clients actifs et une source passive.

Les clients ont une activité prédéterminée et se distinguent par des priorités différentes :  $\alpha_1 = 4$  et  $\alpha_2 = 1$ . Leur satisfaction est calculée selon (3.80)

La source 1 correspond à une ressource peu onéreuse et réversible, mais limitée par une puissance maximale de  $P_{s_1}^{max} = 20W$  et une puissance minimale de  $P_{s_1}^{min} = -20W$ . Elle est calibrée pour être dans l'incapacité d'assurer la totalité du scénario (capacité limitée), et modélisée sans dynamique.

Son coût de production est proportionnel au carré de la puissance produite par les sources. Soit :

$$Ec_{s_1}(P_{s_1}^c(t)) = \left(p_{s_1} P_{s_1}^c(t)\right)^2 \quad (3.84)$$

avec  $p_{s_1} = 1$ .

On privilégie dans la fonction objectif de  $\mathcal{P}_{MC}$  le critère d'opérationnalité (i.e.  $\gamma_1 = 80$ , et  $\gamma_2 = 1$ ).

#### 3.6.3.2 Résultats

La stratégie est élaborée sur le principe des homothéties pour un horizon glissant  $T_p = 20s$ . Le scénario est séquencé en trois phases :

**Phase 1**, de  $t = 0s$  à  $t = 6s$  le client 1 est le seul client en activité.

**Phase 2**, de  $t = 6s$  à  $t = 14s$  le client 1 et 2 sont en activités etaturent la puissance maximale de la source 1.

**Phase 3** : de  $t = 14s$  à  $t = 18s$  le client 1 et 2 sont en activités, et la source 1 atteint sa capacité limite d'énergie.

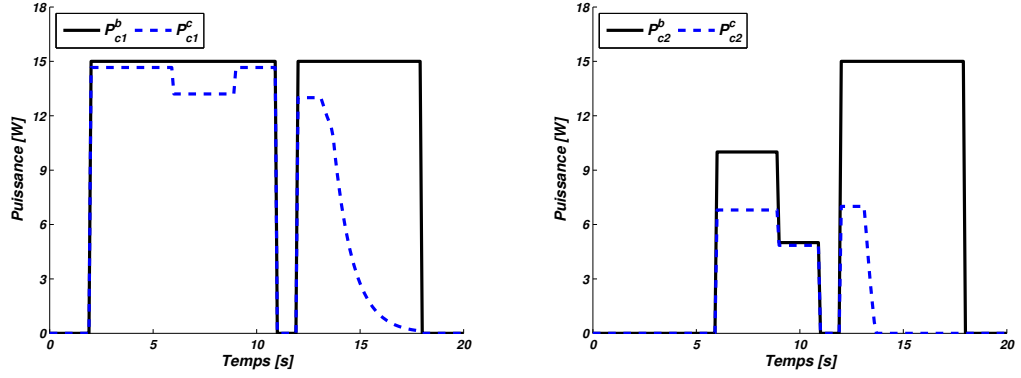
Le problème d'optimisation  $\mathcal{P}_{MC}$  est résolu pour un horizon  $T_p = 10s$  avec un pas de temps de  $0.1s$ , par une méthode de recherche du type point-intérieur.

On observe que dans la **phase 1**, le client 1 reçoit toute sa demande (Fig. 3.7a).

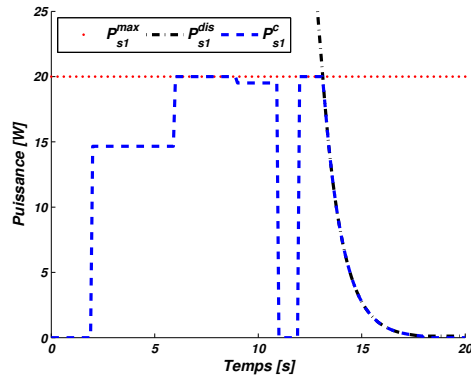
Dans la **phase 2**, la source sature (Fig. 3.7c) et la stratégie du nœud dégrade les clients en cohérence avec nos pondérations  $\alpha_i$ , c'est-à-dire en défavorisant le client 2 (Fig. 3.7b) .

Dans la **phase 3**, l'énergie est insuffisante pour maintenir les demandes actuels (Fig. 3.7c). La stratégie anticipe et dégrade le client 2 jusqu'à son arrêt (Fig. 3.7b). Grâce à cette dégradation, le client 2 est maintenu actif quelques secondes supplémentaires (Fig. 3.7a).





(a) Analyse des flux de puissances fournies pour le client 1 (b) Analyse des flux de puissances fournies pour le client 2



(c) Analyse des flux de puissance et de l'énergie de la source 1

FIGURE 3.7 – Résultats illustration SS\_MC

## 3.7 Décomposition du Nœud Général

### 3.7.1 Motivation

Dans cette section, nous présentons un moyen pragmatique de diminuer la complexité de la stratégie du nœud général, par une décomposition sur la base des nœuds élémentaires précédemment définis (i.e. nœud d'hybridation, nœud de concurrence et nœuds unitaires). L'objectif *in fine* est de pouvoir concevoir la stratégie d'un système énergétique quelconque au moyen d'un ensemble dénombré de stratégies identifiées.

La simulation et l'implémentation d'une stratégie décomposée pose nécessairement la question de la synchronisation des algorithmes. Ici, nous proposons que les stratégies soient résolues séquentiellement tel que :

**Proposition 3.10.** *La stratégie  $\Xi_{MC}$ , du nœud de concurrence est résolue avant la stratégie  $\Xi_{MS}$ , du nœud de d'hybridation.*

Afin de clarifier l'idée, la décomposition est présentée au travers d'un exemple.

### 3.7.2 Illustration

#### 3.7.2.1 Protocole

On s'intéresse à nouveaux aux exemples de modules sources et de modules clients, respectivement définis à la **section 3.5.4** et à la **section 3.6.3**. On suppose cette fois-ci qu'ils sont inter-connectés au travers d'un nœud (Fig. 3.8), dont la stratégie de gestion énergétique est à concevoir.

Pour rappels, les modules sont définis avec les caractéristiques suivantes :

- Source 1 :
  - Réversible
  - Amplitude Décharge Max : 20W
  - Coût Faible :  $p_1 = 1\text{€}/\text{kW}$
- Source 2 :
  - Irréversible
  - Amplitude Décharge Max : 26
  - Coût Fort :  $p_2 = 8\text{€}/\text{kW}$
- Client 1 :
  - Scénario 1 : deux échelon d'amplitude 15W.
  - Durée d'activité : 20s
  - Priorité Forte :  $\alpha_1 = 4$
- Client 2 :
  - Scénario 2 : deux échelon d'amplitude 10W et 15W,
  - Durée d'activité : 20s

### CHAPITRE 3. DÉFINITION ET DÉCOMPOSITION DES NŒUDS ÉNERGÉTIQUES

— Priorité Faible :  $\alpha_2 = 1$

Les fonctions de satisfaction sont définies par (3.80), et les fonctions de coûts énergétiques par (3.84). Pour rappels, elles sont définies par :

$$\bar{S}(P_c^c(t)) = \left( \int_{t_0}^{t_0+t} (P_c^b(\tau) - P_c^c(\tau)) d\tau \right)^2 \quad (3.85)$$

$$Ec_{s_j}(P_{s_j}^f(t)) = \left( p_{s_j} P_{s_j}^f(t) \right)^2 \quad (3.86)$$

Les sources sont dimensionnées telles que l'énergie initiale stockée n'est pas suffisante pour réaliser l'exigence d'opérationnalité sur l'ensemble du scénario.

La gestion énergétique est dans un premier temps conçue à partir de la stratégie du nœud général. Le problème d'optimisation  $\mathcal{P}'_N$  est formalisé, et résolu en ligne au travers d'une méthode de recherche type *point-intérieur*, pour un pas de temps de 0.1s et un horizon de prédiction  $T_p = 10s$ .

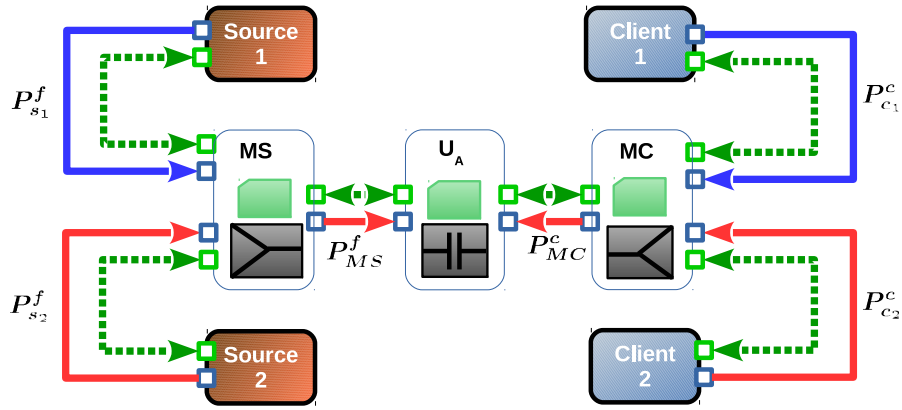


FIGURE 3.8 – Illustration MS\_MC Décomposé pour 2 Sources et 2 Clients actifs

Puis, la gestion énergétique est conçue selon le schéma de décomposition introduit par la Figure 3.8. Notons que le type de nœud unitaire situé entre les deux nœuds mono-multis dépend des hypothèses de causalités faites lors de la conception des nœuds d'hybridation et de concurrence. Dans cette thèse, nous avons choisi au travers de l'hypothèse 3.7 d'imposer une causalité active sur la face « multi », le nœud unitaire est alors de type *accumulation*.

Les problèmes d'optimisation  $\mathcal{P}_{MS}$  et  $\mathcal{P}_{MC}$  sont formulés à partir de nos résultats précédents. La stratégie du nœud d'accumulation est triviale (voir la section 3.4.3). Les stratégies liées aux problématiques de concurrence et d'hybridation sont résolues en ligne au travers d'une méthode de recherche type *point-intérieur*, pour un pas de temps de 0.1s et un horizon de prédiction  $T_p = 10s$ .

### 3.7.2.2 Analyse des Résultats

L'ensemble des résultats est présenté par la Figure 3.9, et distingue les flux de puissance et les signaux de communications principaux, pour chacun des modules, tel que

- Source 1 : Figure 3.9a
- Source 2 : Figure 3.9b
- Accumulation : Figure 3.9c
- Client 1 : Figure 3.9d
- Client 2 : Figure 3.9e

On note que les deux stratégies comparées (générale et décomposée) ont globalement des résultats similaires et en adéquation avec nos choix de coûts et de priorités pour les modules. Toutefois, pour le nœud décomposé, le compromis entre satisfaction des clients et coûts d'énergie est modifié en défaveur des clients (voir Fig. 3.9d-3.9e vs. Fig. 3.9a-3.9b).

Cette sous-optimalité provient en grande partie de l'approximation réalisée pour calculer le coût de l'énergie en sortie du nœud d'hybridation (3.30), qui sur-évalue le prix réel. Une correction sur le jeu de pondération (coût, priorité) est supposé rétablir le compromis d'origine.

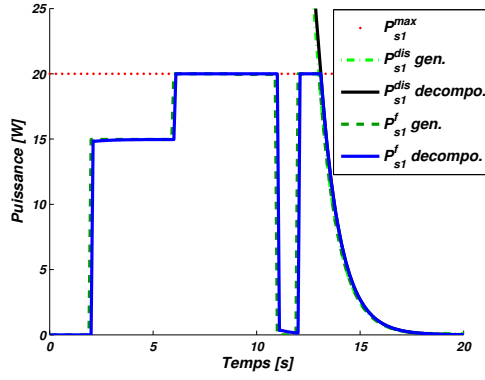
La variation la plus notable entre ces méthodes de gestion énergétique s'observe sur l'accumulation d'énergie (Fig. 3.9c). Pour la stratégie issue du nœud général, l'équilibre énergétique est explicite d'où une accumulation nulle.

Pour le nœud décomposé, celle-ci oscille entre  $[-0.75, 0.75]$ , et est corrélée avec les instants où des transitoires rapides opèrent. Toutefois, nous pouvons remarquer que lors des régimes statiques, l'accumulation converge vers son optimum, grâce notamment à notre conception particulière des signaux de communication.

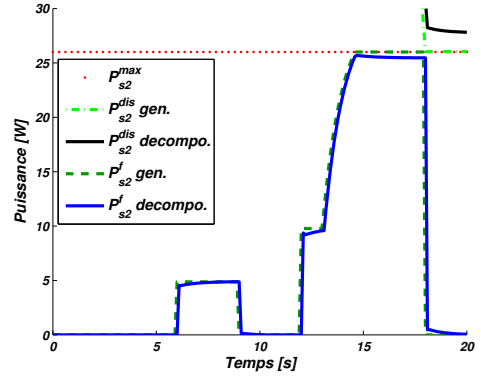
Un moyen de compenser cette sous-optimalité serait d'inclure directement dans les problèmes d'optimisation un modèle des retards.

Globalement, la forme décomposée voit son optimum se déplacer vers un équilibre sous-optimal mais qui conserve une stabilité. L'énergie accumulée varie durant les phases transitoires selon une amplitude non-négligeable mais maîtrisée. En régime permanent, elle converge vers une valeur nulle. La décomposition nous semble cependant suffisamment intéressante pour qu'une approche générique de sa mise en œuvre soit proposée.

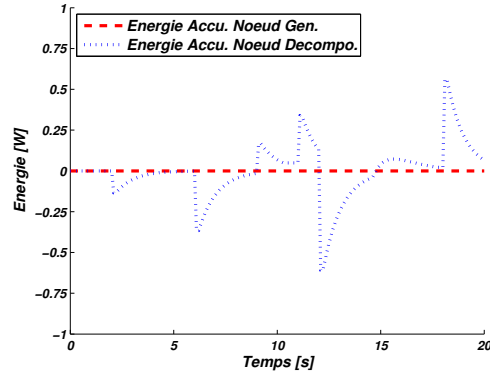
### CHAPITRE 3. DÉFINITION ET DÉCOMPOSITION DES NŒUDS ÉNERGÉTIQUES



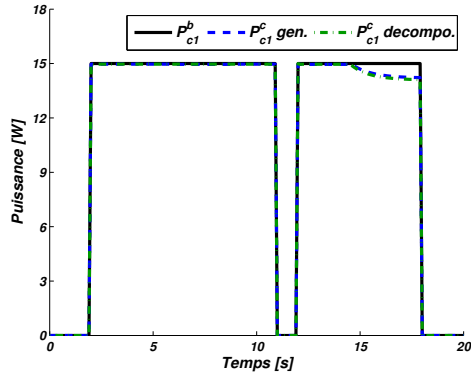
(a) Flux de puissance pour la source 1



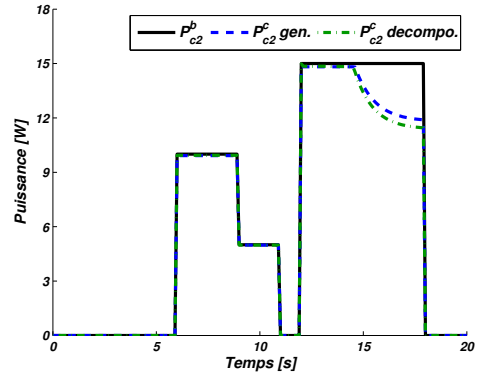
(b) Flux de puissance pour la source 2



(c) Énergie accumulée dans le nœud



(d) Flux de puissance pour le client 1



(e) Flux de puissance pour le client 2

FIGURE 3.9 – Comparaison des stratégies générale et décomposée pour un système à deux sources et deux clients

## 3.8 Conclusion du Chapitre

Le nœud général, par sa formulation non explicite, peut représenter une large variété d'architecture de systèmes énergétiques. Nous avons ici réduit la conception de sa stratégie à deux étapes.

La première étape de conception est la modélisation de la problématique de distribution des flux de puissance entre les modules. Grâce à notre vision modulaire des systèmes énergétiques, ce travail est systématisée par un problème d'optimisation  $\mathcal{P}'_N$ , dont le critère modélise un compromis entre le coût d'exploitation des sources et la satisfaction des clients.

La seconde étape est le dimensionnement hors-ligne des signaux de communications à transmettre aux modules. Cette étape est un problème ouvert qui peut reposer sur les spécificités techniques du nœud, ou bien des choix de conception. Ici, une construction générique et pertinente est proposée. Celle-ci sera employée dans les chapitres suivants.

Le point fort de cette méthode de conception est de traduire la vision systémique des systèmes énergétiques (**chapitre 1**), vers un langage mathématique pouvant être interpréter directement par des théoriciens, et notamment des automaticiens.

Une seconde voie de recherche explorée par ce chapitre est de diminuer la complexité du problème d'optimisation en le décentralisant sur des nœuds de plus faibles dimensions, et identifiés par la littérature.

En contre-partie l'optimalité de la distribution d'énergie n'est plus garantie. Dans notre exemple, ce fait se constate par l'accumulation d'énergie entre deux nœuds durant les phases transitoires.

Ce phénomène s'explique par les retards de communications entre les nœuds, et la résolution séquentielle du problème. A ce sujet, le positionnement de la thèse est de favoriser l'opérationnalité des clients, face à l'économie d'énergie. Pour cette raison, la problématique de concurrence est systématiquement posée comme *leader*.

Une seconde interprétation possible de l'accumulation d'énergie, cette fois-ci fonctionnelle, est que notre formalisme au stade actuel ne modélise pas explicitement le phénomène d'accumulation temporaire d'énergie dans les sources réversibles. Celui-ci est implicitement exploité par le nœud général ou d'hybridation, par la réversibilité de la source.

Nous pensons que ce phénomène, au même titre que le stockage d'énergie dans les clients, devrait apparaître au travers de ports additionnels sur les modules. Toutefois, la détection et la représentation de cette fonctionnalité ne sera pas étudiée dans cette thèse et fera l'office d'une perspective de recherche.

Afin maintenant de rejoindre notre objectif d'une stratégie « temps réel » pour la gestion énergétique, le chapitre suivant analyse les outils de la commande prédictive et de la commande optimale, pour répondre aux besoins d'intelligence des nœuds de

### CHAPITRE 3. DÉFINITION ET DÉCOMPOSITION DES NŒUDS ÉNERGÉTIQUES

---

concurrence et d'hybridations. Notons dès maintenant que l'idée d'un contrôle des clients par *homothétie* émise dans ce chapitre sera une piste de résolution exploitée.

## Chapitre 4

# Outils de Résolution des Stratégies Énergétiques

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction du Chapitre</b>	<b>91</b>
<b>4.2</b>	<b>Contrôle Optimal ou Prédicatif des Systèmes Dynamiques</b>	
	<b>Contraints</b>	<b>93</b>
4.2.1	Synthèse directe d'une solution explicite/pré-calculée	93
4.2.2	Synthèse prédictive nécessitant une optimisation en-ligne	94
4.2.3	Stabilité	95
<b>4.3</b>	<b>Problématique MS_SC : Résolution par LPV-MPC</b>	<b>96</b>
4.3.1	Positionnement	96
4.3.2	Principes du LPV-MPC	98
4.3.3	Conception de la stratégie d'Hybridation	101
4.3.4	Cas d'étude illustratif	105
<b>4.4</b>	<b>Problématique SS_MC : Approche Combinatoire</b>	<b>109</b>
4.4.1	Positionnement	109
4.4.2	Construction d'un jeu de Configurations	112
4.4.3	Optimisation des Configurations (Branch and Bound)	114
<b>4.5</b>	<b>Conclusion du Chapitre</b>	<b>119</b>

---

### 4.1 Introduction du Chapitre

Le chapitre précédent a montré que la conception d'une stratégie énergétique dans le cas général peut être ramenée à la résolution de deux problématiques : l'hybridation de sources (**section 3.5**) et la concurrence de clients (**section 3.6**). Le **chapitre 1** relève pour ces problèmes les voies de résolution les plus usuelles. Une tendance est de réserver la théorie du contrôle optimale à la problématique d'hybridation ([Sébastien DELPRAT 2002](#); [RIPACCIOLI et al. 2010](#); [a. SCIARRETTA et al. 2014](#)), et la théorie des jeux à la



problématique de concurrence (SAAD et al. 2012 ; STEPHENS, SMITH et MAHANTI 2015). Cette distinction s'explique par la localisation des sous-systèmes de missions hors du périmètre de contrôle du système énergétique (voir **section 2.3, chapitre 2**).

Ce chapitre a pour objectifs d'apporter deux solutions algorithmiques à chacune des problématiques désignées ci-dessus, telles qu'elles soient pertinentes vis-à-vis d'un usage en temps réel (i.e. capacité de calcul/mémoire limitée ; et temps d'actualisation rapide).

Pour limiter notre périmètre d'étude, la position de cette thèse est de modéliser la problématique  $\mathcal{P}'_N$  par un système linéaire contraint en l'état et l'entrée de commande, dont le critère de minimisation est quadratique (4.1).

Pour atteindre ce but, il est supposé que :

**Hypothèse 4.1.**

1. les modules énergétiques sont modélisés par des fonctions dynamiques et linéaires,
2. les fonctions de satisfactions et de coûts énergétiques sont des critères quadratiques associées à des fonctions dynamiques et linéaires,
3. les contraintes physiques (amplitude des puissances, énergies disponibles) sont convexes.

Alors, le problème d'optimisation  $\mathcal{P}'_N$  se formule génériquement par :

**Problème Linéaire Quadratique Contraint**

$$\min_{u(t)} J_{LQ} = \int_{t_0}^t (x^\top(\tau)Qx(\tau) + 2x^\top(\tau)Su(\tau) + u^\top(\tau))d\tau \quad (4.1)$$

sous les contraintes :

$$\dot{x}(t) = \mathcal{F}(x(t), u(t), w_p(t)), \quad (4.1a)$$

$$\underline{c}_i \leq \mathcal{C}_i(x(t), u(t)) \leq \bar{c}_i, \quad \forall i \in \llbracket 1, 2.n_s^{tot} + n_c^{tot} \rrbracket \quad (4.1b)$$

où l'état  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  est associé aux modèles dynamiques des modules, du stockage, et des fonctions coûts énergétique et satisfaction ; le vecteur de signaux exogènes  $w_p(t) \in \mathbb{R}^{m_w}$  est associé aux demandes de puissance ; le vecteur  $u_p(t) \in \mathbb{R}^{m_u}$  est associé aux consignes de puissance, et consignes interne au nœud (i.e.  $\delta(t)$ ) ; le vecteur de sortie  $y_p(t) \in \mathbb{R}^y$  est associé aux puissances et à l'énergie échangées ; et enfin  $\mathcal{C}_i(x(t), u(t))$  désigne les  $n_s^{tot} + n_c^{tot}$  contraintes sur la puissance, et les  $n_s^{tot}$  contraintes sur l'énergie disponible.

A cause des contraintes qui interviennent sur la sortie ou l'état du système dynamique, ce problème ne peut se résoudre par les méthodes de synthèses  $H_2/LQ$  usuelles (cf. **annexe B**)

Pour répondre à ce problème générique, ce chapitre débute par une revue des outils de la commande linéaire quadratique contrainte, et de la commande prédictive (cf. **section 4.2**). Notre motivation est de constituer une base de connaissances quant aux solutions compatibles avec des cibles embarquées, et ciblant en particulier la problématique d'hybridation de sources.

Puis, la **section 4.3** expose une solution algorithmique pour la problématique d'hybridation, architecturée selon deux niveaux. L'idée principale est de satisfaire en temps réel le compromis énergie/performance, grâce à une loi de commande robuste et paramétrée, calculée hors-ligne. Puis, une seconde loi de commande, bénéficiant d'une action prédictive et exécutée à un pas plus lent, adapte en temps réel le contrôleur robuste aux contraintes sur les états et les signaux d'entrée.

Pour terminer, la **section 4.4** considère la problématique de concurrence des clients. En nous positionnant sur une méthode de contrôle indirecte, la problématique énergétique est formulée comme un problème combinatoire et résolue par un algorithme de *Branch and Bound* (WOLSEY 1998).

## 4.2 Contrôle Optimal ou Prédicatif des Systèmes Dynamiques Contraints

Le choix d'une méthode de résolution pour le problème linéaire quadratique contraint (4.1) dépend de la taille de l'horizon, de la linéarité du système, et de la localisation des contraintes. Dans le cas présent, et compte tenu des *hypothèses 4.1*, nous présentons deux solutions particulières pour lesquelles des outils algorithmiques existent, l'une est explicite et pré-calculée, l'autre est prédictive.

### 4.2.1 Synthèse directe d'une solution explicite/pré-calculée

Une première voie pour le contrôle des systèmes linéaires contraints est de résoudre hors-ligne le problème quadratique sur un horizon fini et d'en dériver une solution explicite.

Dans le cas discret, BEMPORAD et al. (2002) et JOHANSEN, PETERSEN et SLUPPHAUG (2002) caractérisent la solution comme une fonction affine par morceaux en l'état. Le processus de résolution du problème (4.1) consiste alors à partitionner l'espace d'état en région pour lesquelles le régulateur linéaire est unique. Puis à calculer pour chacune des régions les coefficients des régulateurs. Les résultats sont ensuite organisés dans une base de donnée avant d'être implantés dans le système réel. Le choix du « bon » jeu de coefficient est réalisé en temps réel par reconstruction de l'état et recherche dans la base de donnée.

BEMPORAD et al. (2002) obtiennent les lois de commandes par résolution d'un problème quadratique multi-paramétriques (*multi-parametric Quadratic Programming* (mp-QP)), tandis que JOHANSEN, PETERSEN et SLUPPHAUG (2002) raisonnent sur des principes géométriques. Globalement, les auteurs conseillent pour des soucis de mémoire, de réserver ces solutions à des systèmes de taille « moyenne » (BEMPORAD et al. 2002), ou bien de relâcher certaines contraintes (JOHANSEN, PETERSEN et SLUPPHAUG 2002).

Notons qu’une toolbox MPT (Multi-Parametric Toolbox), développée sur la base des travaux de BEMPORAD et al. (2002), existe et est proposée par KVASNICA et al. (2015).

Une alternative lorsque les contraintes sont uniquement situées sur l’entrée de commande, est de calculer les coefficients à l’aide d’une méthode de programmation dynamique (MARE et DE DONÁ 2007).

En résumé, ces approches ont l’avantage de proposer une loi de commande explicite par retour d’état. En contre-partie, elles obligent à mémoriser dans le contrôleur les régions et les solutions associées. BEMPORAD et al. (2002) évalue à  $2^q$  la borne supérieure du nombre de régions, où  $q$  est le nombre de contraintes.

Autre limite de ces méthodes, une modification de l’une des bornes de l’espace de contraintes oblige à réactualiser les régions du contrôleur. Dans des systèmes comme les systèmes énergétiques, où les contraintes sont définies constantes uniquement pour un horizon d’optimisation, cela peut s’avérer problématique.

#### 4.2.2 Synthèse prédictive nécessitant une optimisation en-ligne

Le principe de *prédiction* consiste à simuler pour un état initial  $x(t_0)$  donné le comportement futur du système sur un horizon dit de prédiction  $T_p$ . Les algorithmes de commande s’appuyant sur le concept de prédiction sont couramment désignés comme des solutions *Model Predictive Control* (MPC) ou *Non-linear Model Predictive Control* (NMPC) (RICHALET 1993; J M MACIEJOWSKI 2002; L. WANG 2009). Ces méthodes ont été largement plébiscitées pour la régulation de processus contraints et lents, notamment en pétrochimie. Dans sa revue, QIN et BADGWELL (2003) comparent plusieurs méthodes industrielles commercialisées entre 1980 et 2000, pour les systèmes linéaires et non-linéaires.

Depuis 2000, le domaine de recherche lié à la commande *Model Predictive Control* suscite un regain d’intérêt, en se focalisant tout particulièrement sur les verrous de mise en œuvre sur cible embarquée. Des améliorations algorithmiques majeures ont été apportées pour : assurer l’exécution en temps réel ; adapter la complexité numérique à des cibles matériels diverses : *Processeur DSP à faible coût* (FRISON et JØRGENSEN 2015), *FPGA* (JEREZ et al. 2014) ; et générer par prototypage rapide du code C, C++ performant.

Ces outils de génération de code permettent de transcrire de façon optimisée des problèmes MPC linéaires ou non-linéaires, depuis différents environnements. Un premier outils, CVXGEN (MATTINGLEY et BOYD 2012), a été proposé sur la base des travaux de Y. WANG et BOYD (2010) permettant de traiter des problèmes linéaires discrets de MPC, en générant du code C optimisé et intégrant un solveur de Quadratic-Programming, (QP). L’algorithme FiOrdOs développé par ULLMANN et RICHTER (2013) se présente comme une alternative. Citons aussi les outils développés sous Maple<sup>®</sup> ou Mathematica<sup>®</sup> par OHTSUKA (2015) : AutoGen et AutoGenU couplés au solveur Continuous/GMRES, qui permettent de manipuler des problèmes de commande pour des systèmes continus, non-linéaires. Sous l’environnement Matlab<sup>®</sup>, ACADO (HOUSKA, FERREAU et DIEHL 2011)

traite aussi les problèmes NMPC.

L'évolution des solveurs dédiés à ce type de problème profite aussi au domaine de la commande. Pour la résolution du problème QP en temps-réel, on peut distinguer d'une part les algorithmes cherchant l'optimalité du premier ordre (algorithme type gradient) comme ceux utilisés dans FiOrdOs (ULLMANN et RICHTER 2013). D'autre part, les algorithmes satisfaisant une optimalité du second ordre comme les méthodes de *point intérieur* (*interior-point*), approches utilisées par *e.g.* dans (MATTINGLEY et BOYD 2012), HPMPC (FRISON, SORENSEN et al. 2014) et FORCES (DOMAHIDI et al. 2012); ou les méthode des contraintes actives (*active-set*) comme le solver qpOASES (KUFOALAR et al. 2015; FERREAU et al. 2014).

Un *benchmarking* de quelques-uns de ces outils est proposé dans KUFOALAR et al. (2015), semblant montrer la supériorité de qpOASES en termes de temps de calcul et de capacité mémoire.

En conclusion, les efforts consentis sur la formulation mathématique optimisée des problèmes (N)MPC et les solveurs supports aboutissent à des temps de calcul en ligne permettant la résolution de problèmes de commande pour des systèmes de taille moyenne (de l'ordre de la dizaine d'états, et de quelques entrées de commande) de l'ordre de quelques millisecondes. A titre d'exemple, Y. WANG et BOYD (2010) à l'origine de CVXGEN présentent un exemple de commande MPC avec 3 entrées de commande, 12 états, et des contraintes sur les états avec un pas d'échantillonnage tenu de 5 ms, certes implémenté sur un PC de haute performance. En embarqué, quelques dizaines de ms (30ms) sont nécessaires par exemple pour implémenter un MPC pour un système d'ordre 12, 5 entrées sur un calculateur Cortex A9 cadencé à 1 MHz (FRISON et JØRGENSEN 2015) (calculateur équipant typiquement les téléphones portables ou les cartes de développement type Beagle-Bone®). Des cadences de l'ordre de la micro-seconde sont même atteintes sur FPGA standard dans le cadre des travaux de JEREZ et al. (2014) (système d'ordre 8).

A première vue, ces performances rendent envisageable la mise-en-œuvre de ces outils en embarqué. Il faut toutefois noter que le champ d'action des différentes solutions logicielles citées ci-dessus est en pratique souvent limité et qu'il n'existe pas à ce jour d'outils de commande prédictive universel.

### 4.2.3 Stabilité

En considérant les changements de régulateurs suffisamment lents, on peut estimer les solutions de BEMPORAD et al. (2002) ou de JOHANSEN, PETERSEN et SLUPPHAUG (2002), comme stables.

A l'inverse, les méthodes MPC ne disposent pas spontanément de garanties *a priori* sur la stabilité de la solution. Plusieurs moyens existent pour y remédier, notamment par l'ajout d'un coût terminal qui soit une fonction locale de Lyapunov, et en contraignant l'état final à rester dans un sous-espace invariant (MICHALSKA et D Q MAYNE 1993;

H. CHEN et ALLGÖWER 1998 ; D. MAYNE et al. 2000). Usuellement, le coût terminal apporte un gain de performance, et n'ajoute pas de complexité. Cependant, la présence de l'espace invariant terminal complique et la conception, et la résolution.

Une voie alternative consiste à omettre la contrainte et le coût terminal, tout en supposant que l'état initial appartient à un sous-espace suffisamment étroit, et que l'horizon de prédiction est suffisamment grand, pour assurer une stabilité asymptotique du contrôleur (CHMIELEWSKI et MANOUSIOUTHAKIS 1996 ; PRIMBS et NEVISTIĆ 2000 ; LIMON et al. 2006).

Pour une vision plus générale de la commande MPC, et en particulier des aspects relatifs à la stabilité et à la robustesse, il est conseillé de se référer à l'ouvrage de RAWLINGS et David Q. MAYNE (2009).

### 4.3 Problématique MS\_SC : Résolution par LPV-MPC

#### 4.3.1 Positionnement

En tenant compte des *hypothèses 4.1* énoncées en introduction quant à la nature dynamique et quadratique des fonctions de coûts énergétique et de satisfactions, nous posons :

$$Ec_{s_j}(P_{s_j}^b(t)) = z_{ec_j}^\top(t)z_{ec_j}(t) \quad (4.2)$$

$$S_{c_i}(P_c^{d_i}(t)) = z_{sat_i}^\top(t)z_{sat_i}(t) \quad (4.3)$$

avec  $z_{sat_i}(t)$  et  $z_{ec_j}(t)$  des signaux respectivement associées à la satisfaction et au coût de l'énergie, supposés décrits par les modèles dynamiques :

$$\begin{cases} \dot{x}_{ec_j}(t) = g_{ec_j}(x_{ec_j}(t), P_{s_j}^f(t)) \\ z_{ec_j}(t) = h_{ec_j}(x_{ec_j}(t), P_{s_j}^f(t)) \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{sat_i}(t) = g_{sat_i}(x_{sat_i}(t), P_{c_i}^f(t), P_{c_i}^b(t)) \\ z_{sat_i}(t) = h_{sat_i}(x_{sat_i}(t), P_{c_i}^f(t)) \end{cases} \quad (4.5)$$

Le problème d'hybridation de sources  $\mathcal{P}_{MS}$  (voir MS\_SC **section 3.5**) est formulé en considérant la fonction de satisfaction (4.5) et les coûts énergétique (4.4).

Sous cette forme, la problématique de commande est celle de l'optimisation d'un système non-homogène (i.e.  $P_{c_1}^b(t)$ , (4.6f) est un signal exogène), par un critère quadratique défini pour un horizon fini (4.6) et en présence de contraintes sur l'état (4.6h), (4.6i), (4.6j).

**Problème  $\mathcal{P}_{MS}$  Quadratique**

$$\min_{\boldsymbol{\nu}_s(t)} J_{MS} = \int_{t_0}^{t_0+T_p} \left( \gamma_1 \alpha_1 z_{sat_1}^\top(t|t_0) z_{sat_1}(t|t_0) + \gamma_2 \sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}^{tot}} \beta_{s_j} z_{ec_j}^\top(t|t_0) z_{ec_j}(t|t_0) \right) dt \quad (4.6)$$

sous les contraintes :

$$\mathbf{P}_s^f(t|t_0) = g_{src}(\mathbf{P}_s^f(t_0), \boldsymbol{\nu}_s(t|t_0)), \quad (4.6a)$$

$$\mathbf{E}_s(t|t_0) = g_{stk}(\mathbf{E}_s(t_0), \boldsymbol{\nu}_s(t|t_0)), \quad (4.6b)$$

$$P_{c_1}^f(t|t_0) = \sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}^{tot}} P_{s_j}^f(t|t_0), \quad (4.6c)$$

$$\dot{x}_{ec_j}(t|t_0) = g_{ec_j}(x_{ec_j}(t|t_0), P_{s_j}^f(t|t_0)), \quad (4.6d)$$

$$z_{ec_j}(t|t_0) = h_{ec_j}(x_{ec_j}(t|t_0), P_{s_j}^f(t|t_0)), \quad (4.6e)$$

$$\dot{x}_{sat_1}(t|t_0) = g_{sat_1}(x_{sat_1}(t|t_0), P_{c_1}^f(t|t_0), P_{c_1}^b(t)), \quad (4.6f)$$

$$z_{sat_1}(t|t_0) = h_{sat_1}(x_{sat_1}(t|t_0), P_{c_1}^f(t|t_0)) \quad (4.6g)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}^{tot}} P_{s_j}^f(t|t_0) \in \mathcal{P}_c, \quad (4.6h)$$

$$\mathbf{P}_s^f(t|t_0) \in \mathcal{P}_s, \quad (4.6i)$$

$$\mathbf{E}_s(t|t_0) \in \mathcal{E}_s^d, \quad (4.6j)$$

Conformément à nos hypothèses, les fonctions  $g_{src}$  (4.6a) et  $g_{stk}$  (4.6b) sont nécessairement linéaires, et les espaces de contraintes  $\mathcal{P}_c$ ,  $\mathcal{P}_s$  et  $\mathcal{E}_s^d$  sont convexes. Notons aussi que la notation «  $P_{c_1}^f(t|t_0)$  » souligne que le problème est sur un horizon glissant, et se distingue d'un problème de synthèse hors-ligne.

Ce problème est donc à mettre en relation avec la problématique linéaire quadratique sous contrainte (4.1). Sous l'hypothèse d'un espace de contraintes invariant, les outils précédemment présentés (MPC, LQ contraint explicite) peuvent s'appliquer.

Nous avons toutefois cherché à développer notre propre outil fondé sur les théories de la commande robuste pour plusieurs raisons. Premièrement, pour bénéficier de la lisibilité des codes engendrés, et des méthodologies de réglage maintenant bien connues. Secondement, pour garantir une stabilité et une robustesse du système, sans nécessiter une synthèse contraignante ou non-standardisée. Et enfin, pour obtenir une solution qui s'accommode facilement des contraintes d'implémentation en temps réel.

### 4.3.2 Principes du LPV-MPC

#### 4.3.2.1 Objectifs

Soit système continu (linéaire ou non-linéaire) représenté par (4.7), avec les vecteurs  $x(t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $u(t) \in \mathbb{R}^{m_u}$ ,  $d(t) \in \mathbb{R}^{m_d}$  et  $y_p(t) \in \mathbb{R}^{p_y}$  désignant respectivement les signaux d'états, d'entrées de commande, d'entrées de signaux exogènes (perturbations ou références) et de sorties mesurées.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= \mathcal{F}(x(t), u(t), d(t)) \\ y_p(t) &= \mathcal{H}(x(t), u(t), d(t)) \end{cases} \quad (4.7)$$

On considère  $N_c$  contraintes réparties arbitrairement sur l'entrée ou l'état.

$$\forall i \in \{1, N_c\}, \quad \underline{c}_i \leq \mathcal{C}_i(x(t), u(t)) \leq \bar{c}_i \quad (4.8)$$

Admettons que : **(A1)** : Le système défini par (4.7) est contrôlable.

**(A2)** : Les signaux exogènes sont connus, ou prédits avec une précision « suffisante », sur l'horizon de temps glissant  $[t, t + T_p]$ .

Pour répondre à la problématique de commande de (4.7) sous les contraintes (4.8), nous proposons dans (FAUVEL, CLAVEAU et CHEVREL 2015a) un correcteur architecturé en deux niveaux (Fig. 4.1b) tel que :

- La « Boucle de Régulation Paramétrée », ou le contrôleur de niveau 1 (L1), qui assure au nominal, i.e. en dehors du régime des contraintes, stabilité et performance (e.g. LQ/ $H_2$ ). Elle peut être à temps continu ou à temps discret, le plus important étant qu'elle autorise une écriture déterministe de la boucle fermée. En conséquence, il n'est pas nécessaire que les contraintes du processus soient traitées par ce niveau.
- La « boucle d'adaptation aux contraintes », ou contrôleur de niveau 2 (L2) modifie en temps réel la valeur du paramètre de (L1) pour assurer le respect des différentes contraintes. Ce contrôleur exploite les mesures disponibles en provenance des niveaux inférieurs.

Sous un certain angle, cette approche s'apparente à combiner dans le contrôleur (L2) les niveaux *adaptation* et *optimisation* de l'architecture hiérarchisée classique (FINDELSSEN et al. 1980) (Fig. 4.1a).

L'idée est de synthétiser un premier niveau de contrôle « rapide » mais non contraint sous la forme d'un contrôleur Linéaire à Paramètres Variants (LPV). Puis d'ajouter un niveau supplémentaire pour adapter en temps réel le paramètre.

L'objectif *in fine* n'est pas d'augmenter la précision ou la performance du système, mais de modifier le comportement de la boucle fermée lorsqu'une violation de contrainte est détectée. L'approche est prédictive au sens où le choix du paramètre se fonde sur l'évaluation des contraintes sur un horizon futur glissant.

En déportant la gestion des contraintes dans une boucle de niveau supérieur, nous recherchons deux avantages. Le premier est de garantir les propriétés de stabilité et de

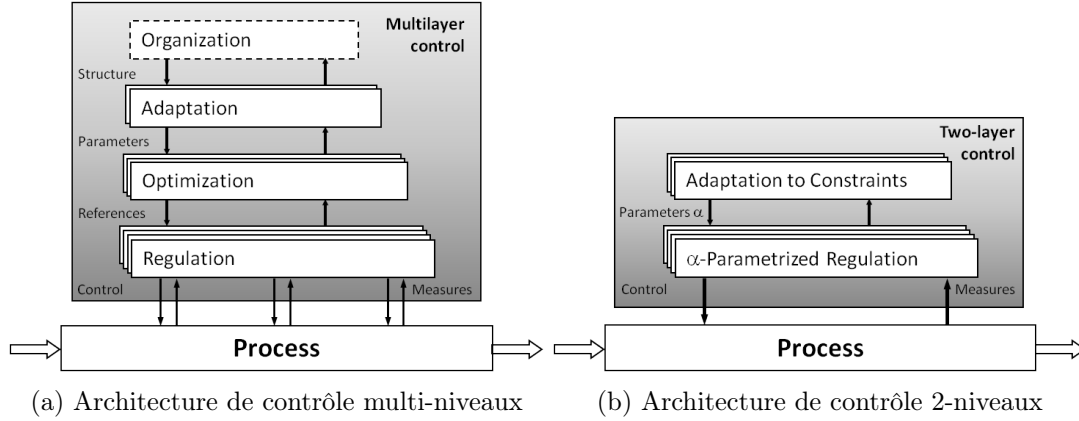


FIGURE 4.1 – Comparaison de l’architecture LPV-MPC à une architecture hiérarchique

robustesse du système, par le régulateur (L1). Le second, est de gérer les contraintes par actualisation du/des paramètre(s) sur l’horizon et avec un pas adapté. L’idée est de s’assurer que (L1) stabilise le processus en dépit de l’évolution paramétrique résultante.

#### 4.3.2.2 Méthodologie de Synthèse

Afin de clarifier notre discours, la méthodologie de synthèse du régulateur se fera sous l’hypothèse que le modèle du système (4.7) peut être ramené sous une forme LTI ou LFT. Ce problème peut se résumer à la Figure 4.2a pour la synthèse de (L1), et à la Figure 4.2b pour la synthèse de (L2).  $P$  désigne un modèle standard linéaire et invariant dans le temps (LTI), et la forme LFT  $\Delta_k(\theta)$  souligne l’utilisation d’un critère paramétré.  $z(t) \in \mathbb{R}^{p_z}$  regroupe les signaux aux écarts à minimiser et  $w(t) \in \mathbb{R}^{m_w}$  des signaux exogènes.

Pour construire le contrôleur LPV-MPC, les deux étapes suivantes sont suggérées.

**Proposition 4.2** (FAUVEL, CLAVEAU et CHEVREL (2015a)).

**Étape 1 :** Hors-ligne, concevoir un contrôleur explicite  $\Sigma_k(\theta)$  défini par (4.9), et dépendant du vecteur de paramètres  $\theta(t) \in \mathbb{R}^{n_\theta}$  (voir Figure 4.2a).

$$\begin{aligned} \Sigma_k(\theta) &= F_l(\bar{\Sigma}_k, \Delta_k(\theta)) \\ &= \bar{\Sigma}_k^{11} + \bar{\Sigma}_k^{12} \Delta_k(\theta) (I - \bar{\Sigma}_k^{22} \Delta_k(\theta))^{-1} \bar{\Sigma}_k^{21} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Où l’opérateur  $F_l(\cdot)$  dénote la boucle LFT basse (Lower Linear Fractional Transformation).



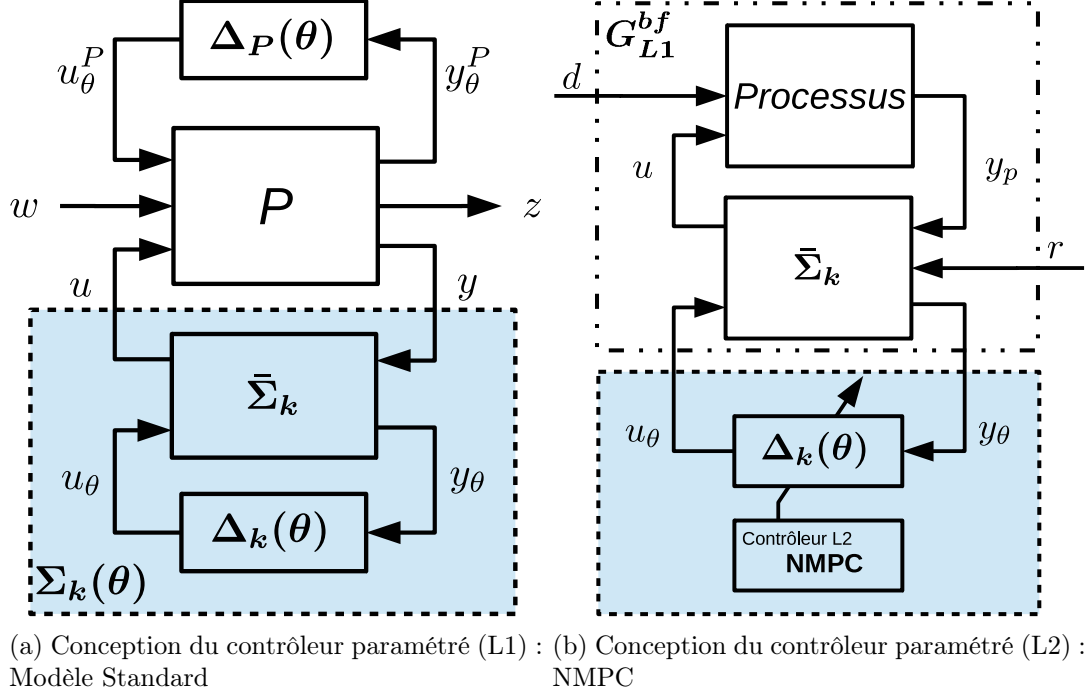


FIGURE 4.2 – Schéma de Principe de la Synthèse LPV-MPC

On définit  $\Delta_k(\theta)$  et  $\bar{\Sigma}_k(s)$  par :

$$\Delta_k(\theta) = \begin{bmatrix} I_{n_1} \theta_1 & & \\ & \ddots & \\ & & I_{n_{n_\theta}} \theta_{n_\theta} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\bar{\Sigma}_k(s) = \begin{bmatrix} \bar{\Sigma}_k^{11}(s) & \bar{\Sigma}_k^{12}(s) \\ \bar{\Sigma}_k^{21}(s) & \bar{\Sigma}_k^{22}(s) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

tel que les dimensions des sous-parties de  $\bar{\Sigma}_k(s)$  soient appropriées.

Le contrôleur  $\Sigma_k(\theta)$  est conçu tel que :

- (a) le contrôleur  $\Sigma_k(0) = F_l(\bar{\Sigma}_k, \Delta_k(0))$  soit le « meilleur » (au sens du concepteur) régulateur pour (4.7) à l'intérieur de l'espace de contrainte. Il sera qualifié de **contrôleur nominal** et noté  $\Sigma_{k_0}$ .
- (b)  $\Sigma_{bf}(\theta)$ , la boucle fermée du système est stable pour tout vecteur  $\theta(t)$  tel que

$$\theta(t) \in [\underline{\theta}; \bar{\theta}] \quad (4.12)$$

**Etape 2 :** En considérant  $\theta(t)$  comme la nouvelle variable de contrôle du système  $\Sigma_{bf}(\theta)$ , calculer en ligne le vecteur de paramètres permettant de rester dans l'espace de contraintes (4.8) en s'appuyant sur la connaissance des signaux prédits (voir (A2)).

Notons qu'il est ici implicitement suggéré de formuler le critère de performance via une méthodologie  $H_2$  /  $H_\infty$  (i.e. minimisation de  $\|T_{zw}\|_{2,\infty}$ ), en supposant au préalable que le système puissent s'approximer par un modèle LTI ou LPV (Linear Parametric Varying). Cette approche peut bien entendu être généralisée, en impliquant d'autres types de contrôle.

### 4.3.3 Conception de la stratégie d'Hybridation

Dans le contexte de la problématique d'hybridation de sources, nous proposons de résoudre le problème d'optimisation linéaire quadratique contraint (4.6) par application de la méthodologie LPV-MPC. La conception des deux niveaux de régulation dans ce contexte est présentée ainsi que la mise en œuvre algorithmique.

#### 4.3.3.1 Conception du contrôleur paramétré L1 : $\Sigma_{MS}(\theta)$ (Etape 1)

La première étape de la méthodologie LPV-MPC consiste donc à poser et résoudre un problème de commande faisant à la fois « sens », et amenant à la synthèse d'un régulateur paramétré robuste. Dans le contexte énergétique, une idée est de partir de la problématique initiale pour constituer un problème LQ paramétré. Le choix du paramètre doit créer un lien compréhensible entre sa valeur et les variables contraintes (puissances sources, énergies sources et puissance client).

Posons alors  $\beta_{s_j}(\theta_{s_j}) = \beta_{s_j} - \theta_{s_j}$ , où  $\theta = \{\theta_{s_j}\}_{j \in \mathcal{S}_{MS}^{tot}} \in \mathbb{R}^{n_s^{tot}}$  est notre vecteur de paramètres, et dérivons du critère initial (4.6) une nouvelle fonction objectif,  $J_{MS}(\theta)$  telle que chacun des coefficients  $\theta_i$  pénalise une source d'énergie dans le critère.

$$J_{MS}(\theta) = \int_{t_0}^{\infty} \left( \alpha_1 z_{sat_1}^T(t) z_{sat_1}(t) + \sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}^{tot}} \beta_{s_j}(\theta_{s_j}) z_{ec_j}^T(t) z_{ec_j}(t) \right) dt \quad (4.13)$$

A partir de ce nouveau critère, et sur la base des équations d'évolution des modules énergétiques (4.6a), le problème de synthèse du contrôleur (L1) est défini par :

**Problème  $\mathcal{P}_{MS}^{L1}$** 

$$\min_{\boldsymbol{\nu}_s(t)} \int_{t_0}^{\infty} \left( \gamma_1 \alpha_1 z_{sat_1}^\top(t) z_{sat_1}(t) + \gamma_2 \sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}^{tot}} \beta_{s_j}(\theta_{s_j}) z_{ec_j}^\top(t) z_{ec_j}(t) \right) dt \quad (4.14)$$

sous les contraintes :

$$\dot{x}_{ec_j}(t) = g_{ec_j}(x_{ec_j}(t), P_{s_j}^f(t)), \quad (4.14a)$$

$$z_{ec_j}(t) = h_{ec_j}(x_{ec_j}(t), P_{s_j}^f(t)), \quad (4.14b)$$

$$\dot{x}_{sat_1}(t) = g_{sat_1}(x_{sat_1}(t), P_{c_1}^f(t), P_{c_1}^b(t)), \quad (4.14c)$$

$$z_{sat_1}(t) = h_{sat_1}(x_{sat_1}(t), P_{c_1}^f(t)), \quad (4.14d)$$

$$\mathbf{P}_s^f(t) = g_{src}(\mathbf{P}_s^f(t_0), \boldsymbol{\nu}_s(t)), \quad (4.14e)$$

$$P_{c_1}^f(t) = \sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}^{tot}} P_{s_j}^f(t), \quad (4.14f)$$

Une première idée pour élaborer ce contrôleur est d'appliquer directement une méthode de synthèse de contrôleur LPV (Linear Parametric Varying) (SHAMMA 2012; CHEVREL 2007). Certaines de ces approches étendent le principes de l'optimisation d'un problème standard  $H_2$  /  $H_\infty$  (ZHOU, J.C. DOYLE et GLOVER 1996) au cas des systèmes LPV (e.g. APKARIAN, GAHINET et BECKER (1995)).

Une seconde approche consiste à construire le régulateur solution par séquençage puis interpolation. Ce procédé à l'avantage d'être pragmatique mais nécessite une analyse *a posteriori* pour évaluer des conditions sur l'amplitude et la vitesse de variation de  $\theta$  (cf. e.g. BOUALI, YAGOUBI et CHEVREL 2008) garantissant stabilité et robustesse.

*Remarque 4.3.* La conception du régulateur (L1) par résolution d'un problème quadratique paramétré, telle que nous venons de la présenter, correspond à la conception par modèle standard (Fig. 4.2a), pour  $w = P_{c_1}^b(t)$ ,  $u = \boldsymbol{\nu}_s(t)$ ,  $z = \begin{bmatrix} z_{sat}(t) \\ z_{ec}(t) \end{bmatrix}$ ,  $y$  un retour d'état, et  $F_l(P, \Delta_P(\theta))$  l'équivalence fréquentielle du problème quadratique.

#### 4.3.3.2 Conception du contrôleur L2 (Étape 2)

Une fois le contrôleur  $\Sigma_{MS}(\theta)$  obtenu nous devons concevoir le second niveau de commande dont l'objectif est le contrôle du paramètre  $\theta(t)$  en temps réel. Comme suggéré dans la Figure 4.2b, une solution typique est de se référer à un algorithme NMPC (Non-linear Model Predictive Control). Pour rappel, le contrôleur  $\Sigma_{MS}(\theta)$  s'écrit sous la forme LFT  $F_l(\bar{\Sigma}_{MS}(s), \Delta_{MS}(\theta))$  (voir (4.10)).

Le comportement en boucle fermé du processus par  $\bar{\Sigma}_{MS}$  est modélisé par le système

dynamique  $G_{L1}^{bf}(s)$  dont l'état  $X_{L1}^{bf}(t)$  s'écrit :

$$X_{L1}^{bf}(t) = [x_{src}(t) \quad x_{stk}(t) \quad x_{ec}(t) \quad x_{sat}(t) \quad x_{MS}(t)] \quad (4.15)$$

Avec  $x_{MS}(t)$  le vecteur d'états de  $\bar{\Sigma}_{MS}$ ,  $x_{src}(t)$ ,  $x_{stk}(t)$ ,  $x_{ec}(t)$  et  $x_{sat}(t)$  respectivement les états des fonctions (4.14a), (4.14c), (4.14e) contenues dans le problème de synthèse de (L1).

Soit  $[t_0, t_0 + T_p]$  l'intervalle d'optimisation, on pose  $Y(t|t_0)$  le vecteur contenant les signaux prédits sur l'horizon d'optimisation, tel que  $Y(t_0)$  soit une donnée d'entrée du problème.

$$Y(t|t_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_s^f(t|t_0) & \mathbf{E}_s(t|t_0) & P_{c1}^f(t|t_0) & X_{L1}^{cl}(t|t_0) & y_\theta(t|t_0) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Le contrôleur (L2), dans le contexte de la problématique d'hybridation, est défini comme la solution au problème d'optimisation suivant :

**Problème  $\mathcal{P}_{MS}^{L2}$**

$$\min_{\theta(t)} J_\theta = \int_{t_0}^{t_0+T_p} \theta(t)^T \theta(t) dt \quad (4.17)$$

sous les contraintes :

$$Y(t|t_0) = G_{L1}^{bf}(X_{L1}^{bf}(t_0), u_\theta(t|t_0), P_c^b(t)) \quad (4.17a)$$

$$u_\theta(t|t_0) = \Delta_{MS}(\theta) y_\theta(t|t_0) \quad (4.17b)$$

$$\underline{\theta}_i \leq \theta_i(t) \leq \bar{\theta}_i, \quad \forall i \in \{1, n_\theta\}, \quad (4.17c)$$

$$\underline{\gamma}_i \leq \dot{\theta}_i(t) \leq \bar{\gamma}_i, \quad \forall i \in \{1, n_\theta\}, \quad (4.17d)$$

$$P_{c1}^f(t|t_0) \in \mathcal{P}_c, \quad (4.17e)$$

$$\mathbf{P}_s^f(t|t_0) \in \mathcal{P}_s, \quad (4.17f)$$

$$\mathbf{E}_s(t|t_0) \in \mathcal{E}_s^d, \quad (4.17g)$$

Ce problème présente un coût quadratique, et des contraintes non-linéaires, induites par la forme LPV du contrôleur (L1). Il s'agit donc d'un problème compliqué à résoudre. Il peut s'analyser de la façon suivante :

$G_{L1}^{bf}$  prédit le comportement en boucle fermée des sources. (4.17b) est une relation non-linéaire liant le signal de contrôle du processus, aux sorties mesurées et à la variable de décision du problème  $\theta(t)$ . Les contraintes sur l'amplitude (4.17c) et la variation (4.17d) de  $\theta$  sont ajoutées pour satisfaire les conditions de stabilité et de robustesse exigées par (L1). Enfin, on retrouve les contraintes énergétiques du problème initiale (4.6h), (4.6i), (4.6j).

On note que la solution de ce problème en l'absence de contraintes est bien  $\theta = 0$ , nous garantissant ainsi que la stratégie nominale  $\bar{\Sigma}_{MS}$  est opérée à l'intérieur de la zone de contrainte.

*Remarque 4.4.* La correspondance entre le schéma de principe de la Figure 4.2b et le problème d'optimisation de (L2) s'obtient en posant  $d = \emptyset$ ,  $r(t) = P_{c_1}^b(t)$ ,  $y_p = [P_s^f(t_0) \ E_s(t_0)]$  et  $u = \nu_s(t)$ .

Au jour d'aujourd'hui, le contrôleur (L2) a pour vocation à être implémenter en temps discret (problème NMPC). Afin de simplifier la résolution en ligne du problème (4.17), il nous paraît judicieux de figer  $\theta(t)$  à une valeur constante par morceaux pour chaque pas de temps, i.e. pour un échantillonnage  $T_\theta$  de (L2), on suppose  $\theta(t) = \theta_k$  pour  $t = kT_\theta$ ,  $k \in \mathbb{N}$  et  $\theta_k \in \mathbb{R}^{n_\theta}$  constant. Ainsi, le problème d'optimisation peut se réécrire sous sa forme discrétisée (voir (4.33)).

#### 4.3.3.3 Vers une mise en œuvre temps réel

On se projette dans le contexte d'une mise en pratique avec contraintes temps réel, notamment des périodes d'actualisation pour le signal de commande issu de (L1), fixes et potentiellement rapides.

L'échantillonnage de la commande du processus  $\nu_s(t)$  est réalisée avec un pas de  $\delta_t$  tandis que le paramètre  $\theta(t)$  est actualisé par (L2) tous les  $T_\theta$ . Les choix de conception pour (L1) induisent des garanties dont le système bénéficie pour tout pas  $\delta_t$ . La valeur de  $T_\theta$  est à calibrer suivant l'horizon de prédiction  $T_p$  et les capacités de calculs du processeur embarqué. Pour une actualisation rapide de  $\theta(t)$  le contrôleur (L2) gagne en flexibilité pour maintenir le système dans sa zone de contrainte, cependant la complexité numérique croît. A l'inverse, un pas trop lent, mène vers une sous-optimalité, et un risque de voir le contrôleur (L2) anticiper le passage d'une contrainte trop tôt.

Pour terminer, nous souhaitons donner une idée de la stratégie algorithmique à embarquer.

---

#### Algorithme 1 : Principe de Contrôleur Temps Réel

---

**Contrôleur L1 :** à  $t = k\delta t$

**Data :**  $P_{c_1}^b(t)$ ,  $\theta$

Calculer  $P_s^b(t)$  grâce à  $\Sigma_k(\theta)$

**return**  $P_s^b(t)$

**Contrôleur L2 :** à  $t = kT_\theta$

**Data :**  $Y(t_0)$ ,  $P_{c_1}^b(t)$ ,  $\forall t \in [t_0, t_0 + T_p]$

Optimiser  $\theta$  selon (4.17)

**return**  $\theta$

---

#### 4.3.4 Cas d'étude illustratif

Afin d'aider à la compréhension nous appliquons la stratégie que nous venons de détailler à l'exemple illustré dans le chapitre précédent (**section 3.5.4**).

Pour rappel, nous considérons deux sources et un client connectés par le biais d'un nœud d'hybridation. On approxime le coût de l'énergie par la fonction quadratique (4.18) où  $p_{s_j}$  d'écrit le « prix du *kilowatt* ». La satisfaction est modélisée comme l'intégrale au carrée de l'erreur entre la puissance totale fournie au client  $P_{c_1}^f(t)$  et la puissance demandée par le client  $P_c^b(t_0)$  (4.19).

$$Ec(P_{s_j}^f(t)) = p_{s_j} (P_{s_j}^f(t))^2 \quad (4.18)$$

$$S(P_{c_1}^f(t)) = z_{sat}^2(t) \quad (4.19)$$

avec

$$\dot{z}_{sat}(t) = P_{c_1}^b(t) - \sum_{j \in \mathcal{S}_N} P_{s_j}^f(t) \quad (4.20)$$

Les comportements dynamiques des sources sont modélisés par des premiers ordres (4.21) avec  $\tau_{s_1} = 0.01s$  et  $\tau_{s_2} = 0.001s$ . Les prix sont fixés :  $p_{s_1} = 1$ ,  $p_{s_2} = 8$ , ainsi que la puissance maximale de production  $P_{s_1}^{max} = 20W$  et  $P_{s_2}^{max} = 26W$ . Le client est modélisé sans dynamique (i.e. gain unitaire) ni contraintes.

$$\dot{x}_{src_1}(t) = \frac{-1}{\tau_1} x_{src_1}(t) + \frac{1}{\tau_1} \nu_{s_1}(t), \quad \dot{x}_{src_2}(t) = \frac{-1}{\tau_2} x_{src_2}(t) + \frac{1}{\tau_2} \nu_{s_2}(t), \quad (4.21)$$

$$P_{s_1}^f(t) = x_{src_1}(t), \quad P_{s_2}^f(t) = x_{src_2}(t) \quad (4.22)$$

##### 4.3.4.1 Synthèse de (L1)

Pour la synthèse du correcteur  $\Sigma_{MS}(\theta)$ , on construit le problème d'optimisation paramétré (4.23) selon la méthode précédemment présentée, tel que  $\theta(t) = \begin{bmatrix} \theta_{s_1}(t) \\ \theta_{s_2}(t) \end{bmatrix}$ , et en choisissant pour pondérations :  $\alpha_1 = 80$ ,  $\beta_{s_j} = 1$ . Pour simplifier la résolution de (L2), on diminue le nombre de variable de décision en imposant le changement de variable  $\theta_{s_2}(t) = -\theta_{s_1}(t)$ .

**Problème  $\mathcal{P}_{MS}^{L1}$  : cas d'illustration**

$$\min_{\nu_s(t)} \int_{t_0}^{\infty} \left( \alpha_1 z_{sat_1}^2(t) + \sum_{j \in \mathcal{S}_{MS}^{tot}} \beta_{s_j}(\theta_{s_j}) p_{s_j}(P_{s_j}^f(t))^2 \right) dt \quad (4.23)$$

sous les contraintes :

$$\dot{x}_{src_1}(t) = \frac{-1}{\tau_1} x_{src_1}(t) + \frac{1}{\tau_1} \nu_{s_1}(t), \quad (4.23a)$$

$$P_{s_1}^f(t) = x_{src_1}(t), \quad (4.23b)$$

$$\dot{x}_{src_2}(t) = \frac{-1}{\tau_2} x_{src_2}(t) + \frac{1}{\tau_2} \nu_{s_2}(t), \quad (4.23c)$$

$$P_{s_2}^f(t) = x_{src_2}(t), \quad (4.23d)$$

$$P_{c_1}^f(t) = P_{s_1}^f(t) + P_{s_2}^f(t), \quad (4.23e)$$

$$0 = x_{ec_j}(t) - P_{s_j}^f(t) \quad (4.23f)$$

$$\dot{z}_{sat_1}(t) = P_c^b(t) - P_{c_1}^f(t), \quad (4.23g)$$

$$(4.24)$$

$\Sigma_{MS}(\theta)$  est obtenu par séquençage puis interpolation de la solution du problème d'optimisation, pour  $\theta_{s_1} \in [0, 3.8]$  :

$$\nu_s(t) = \begin{bmatrix} K_{11}(\theta) & K_{12}(\theta) & K_{13}(\theta) \\ K_{21}(\theta) & K_{22}(\theta) & K_{23}(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{sat_1}(t) \\ x_{src_1}(t) \\ x_{src_2}(t) \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Où

$$K_{11}(\theta) = 1.253 \times \theta^4 - 2.854 \times \theta^3 + 3.359 \times \theta^2 - 10.083 \times \theta + 25.303 \quad (4.26)$$

$$K_{12}(\theta) = -0.007 \times \theta^4 + 0.018 \times \theta^3 - 0.027 \times \theta^2 + 0.085 \times \theta - 0.224 \quad (4.27)$$

$$K_{13}(\theta) = -0.012 \times \theta^4 + 0.003 \times \theta^3 - 0.003 \times \theta^2 + 0.010 \times \theta - 0.025 \quad (4.28)$$

$$K_{21}(\theta) = -0.001 \times \theta^4 + 0.002 \times \theta^3 - 0.093 \times \theta^2 + 1.115 \times \theta + 4.081 \quad (4.29)$$

$$K_{22}(\theta) = 0.001 \times \theta^2 - 0.011 \times \theta - 0.033 \quad (4.30)$$

$$K_{33}(\theta) = -0.001 \times \theta - 0.004 \quad (4.31)$$

#### 4.3.4.2 Synthèse de (L2)

Posons  $G_{L1}^{bf}$  le modèle de la boucle fermée constituée par  $\Sigma_{MS}(\theta)$  et le système de synthèse défini par les relations dynamiques (4.23e)-(4.23f). On a :

$$X_{L1}^{bf}(t) = [x_{ec1}(t) \quad x_{ec2}(t) \quad x_{sat1}(t) \quad x_{src1}(t) \quad x_{src2}(t)] \quad (4.32)$$

Le correcteur (L2) est calculé en ligne par optimisation du problème (4.33) formulé à temps discret. On choisit pour cette illustration  $\theta(t)$  continu par morceaux avec  $t_k$  les instants de saut et  $T_\theta = \frac{T_p}{N_\theta}$  une période d'actualisation, tel que  $t_k = t_0 + kT_\theta$  pour  $k \in \llbracket 1; N_\theta \rrbracket$ , et  $\theta(\tau) = \theta_k$  pour  $\tau \in [t_{k-1}, t_k]$ .

Dans le cadre de cet exemple on posera  $N_\theta = 3$ .

$$\min_{\theta_k} J_\theta = T_\theta \sum_{k=1}^{N_\theta} \theta_k^\top \theta_k \quad (4.33)$$

sous les contraintes :

$$\forall k \in \llbracket 1; N_\theta \rrbracket, \tau \in [t_{k-1}, t_k] \quad (4.34)$$

$$Y(\tau|t_0) = G_{L1}^{bf} \left( X_{L1}^{bf}(t_0), u_\theta(\tau|t_0), P_{c1}^b(\tau) \right) \quad (4.34a)$$

$$u_\theta(\tau|t_0) = \Delta_k(\theta_k) \times y_\theta(\tau|t_0) \quad (4.34b)$$

$$0 \leq \theta_{k1} \leq 3.8, \quad (4.34c)$$

$$P_{c1}^f(\tau|t_0) \in \mathcal{P}_c, \quad (4.34d)$$

$$P_{s1}^f(\tau|t_0) \in \mathcal{P}_{s1}, \quad (4.34e)$$

$$P_{s2}^f(\tau|t_0) \in \mathcal{P}_{s2}, \quad (4.34f)$$

$$E_{s1}(\tau|t_0) \in \mathcal{E}_{s1}^d, \quad (4.34g)$$

$$E_{s2}(\tau|t_0) \in \mathcal{E}_{s2}^d, \quad (4.34h)$$

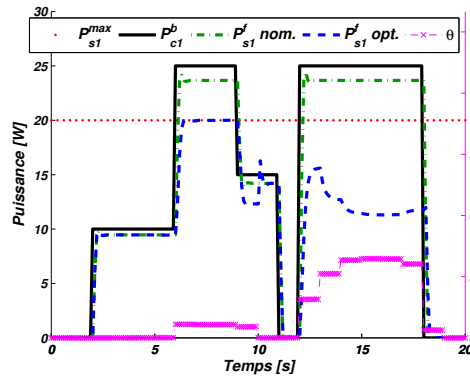
Ce problème non-linéaire est résolu par une méthode d'optimisation type « point-intérieur » via la fonction `fmincon` de Matlab. Dans l'esprit d'une commande sur horizon glissant (e.g. MPC), seule la première valeur de la solution optimale (i.e.  $\theta(t_1)$ ) est appliquée comme commande sur (L1) pour une durée  $T_\theta$ .

#### 4.3.4.3 Résultats

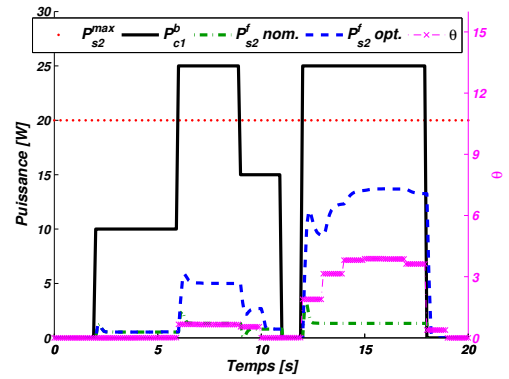
Le système avec ses correcteurs est simulé pour un scénario de demande client défini comme une succession d'échelons.

On compare (Fig. 4.3a) et (Fig. 4.3b) la sortie de chaque source suivant deux stratégies : la nominale, obtenue pour  $\theta = 0$  ; et l'optimal, obtenue pour  $\theta$  calculé à partir du problème (4.33). On constate que la stratégie nominale exploite la source la moins

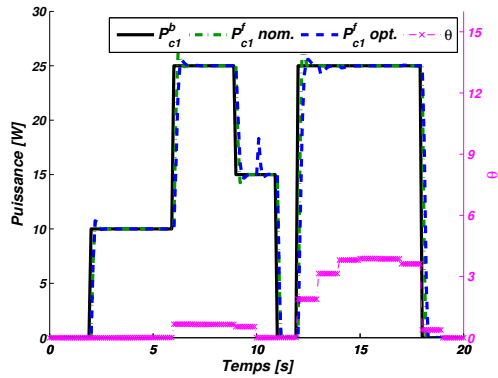




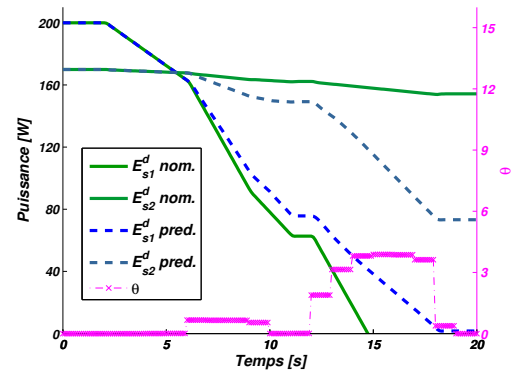
(a) Puissance demandée par le client versus puissance fournie par la source 1



(b) Puissance demandée par le client versus puissance fournie par la source 2



(c) Puissance demandée par le client versus puissance totale fournie



(d) Energie disponible sur les sources

chère pour satisfaire la demande mais viole la contrainte de puissance pour la source 1. En optimisant  $\theta$ , le ratio de distribution entre les sources évolue tel que la contrainte soit validée. Cette modification impacte légèrement le temps de réponse de la puissance générée (Fig. 4.3c) mais n'induit pas d'erreur statique.

## 4.4 Problématique SS\_MC : Approche Combinatoire

### 4.4.1 Positionnement

#### 4.4.1.1 Motivations

Le plus souvent, les clients sont des systèmes matériellement éloignés du système énergétique, pour lesquels une maîtrise directe de leur consommation est parfois impossible. Pour cette raison, il peut être avantageux de laisser une autonomie énergétique aux clients, et d'influencer indirectement leur consommation par la modulation de signaux annexes (e.g. le prix de l'énergie dans un Smart-Grid (SAAD et al. 2012)).

Dans la lignée de la distribution d'énergie par homothétie des besoins (voir **section 3.6.2.3**), et sur la base de cette réflexion, nous suggérons une approche pragmatique basée sur un contrôle des clients par *configurations*.

**Définition 4.5** (*Configuration*).

Pour un client, sa stratégie (heuristique, commande optimale, etc.) et ses paramètres de réglages internes, ayant un impact sur l'énergie consommée, et sur sa performance, sont mutualisés sous la dénomination de *configuration*.

L'intérêt des configurations par rapport à un contrôle direct de la consommation par le système énergétique est double. Tout d'abord, elle apporte une certaine garantie quant-à l'efficacité de la commande puisque celle-ci est directement calculée par le client, et peut donc s'appuyer sur une mesure plus fine des interactions avec l'environnement.

Secondement, ce mode de contrôle offre la possibilité au concepteur d'implémenter pour un même client plusieurs configurations avec des niveaux de consommation d'énergie différents, tel que pour chacune d'elles le service est assuré d'un comportement déterministe et pertinent (tout du moins, en l'absence d'une défaillance majeure sur le système).

Ces principes existent déjà en domotique ou bien dans le domaine automobile. Par exemple, dans une habitation, le système de chauffage est souvent associé à trois états : « confort », « économique », « hors-gel », et pour des véhicules récents les modes « sport », « normal » et « économique » sont parfois disponibles.

L'élaboration d'une telle stratégie de gestion est compatible avec l'architecture des nœuds mono-source/multi-clients, si l'on suppose que :

**Hypothèse 4.6.** *Chaque client  $i$  intègre  $n_{C_i}$  configurations, classées par niveaux de satisfaction et d'énergie décroissants, qui génèrent  $n_{C_i}$  demandes  $P_{C_i}^b(t)$  sur un horizon  $[t_0, t_0 + T_p]$ .*

*On notera  $C_{C_i}^k$  la  $k^{\text{ième}}$  configuration.*

Par la suite, nous emploierons le vocabulaire suivant :

**Définition 4.7** (Vocabulaire lié aux configurations).

- Un *jeu de configurations* désigne un ensemble dénombrable de configurations non-similaires conçues pour un même client,

- deux configurations sont *similaires*, si leur couple *demande d'énergie/satisfaction* sont égaux pour un même scénario,
- une *configuration nominale* est la configuration qui garantie la satisfaction maximale d'un système, pour un scénario donné.

Pour terminer, l'ensemble des demandes  $\mathcal{P}_{c_i}^b$  et l'ensemble des satisfactions  $\mathcal{S}_{c_i}$  modélisés comme des arbres où chaque branche définit un choix de configuration.

Ainsi, le nouveau signal de besoin communiqué au nœud est :

$$(b)_{c_i}^\bullet := \left\{ P_{c_i}^{min}, P_{c_i}^{max}, \mathcal{P}_{c_i}^b(t), \mathcal{S}_{c_i}(t) \right\} \quad (4.35)$$

#### 4.4.1.2 Problème Combinatoire

Soit  $[t_0, t_0 + T_p]$ , l'intervalle d'optimisation de la problématique de concurrence. Supposons tout d'abord que tous les clients du nœud actualisent leur configuration à des instants  $t_k$  synchronisés, de période  $T_\lambda$ . L'intervalle d'optimisation est alors segmenté en  $N_\lambda$  sous-intervalles  $T_k$ , de largeur  $T_\lambda = \frac{T_p}{N_\lambda}$ , tel que pour chaque  $T_k$  la configuration du client est fixe.

$$\forall k = \llbracket 1; N_\lambda \rrbracket, t_k = t_0 + kT_\lambda \text{ et } T_k = [t_{k-1}, t_k] \quad (4.36)$$

Soit  $\mathcal{C}_i$  le jeu de  $n_{\mathcal{C}_i}$  configurations du client  $i$ , on pose  $\Lambda_{c_i} = (\{\mathcal{C}_{c_i}^k\}_{\llbracket 1; N_\lambda \rrbracket} | \mathcal{C}_{c_i}^k \in \mathcal{C}_i)$  l'ensemble des séquences de configuration possible sur l'intervalle d'optimisation.

On note  $\tilde{g}_{clt_i}$  la relation liant la consommation de puissance d'un client, et le choix d'une séquence  $\lambda_{c_i} \in \Lambda_{c_i}$  telle que :

$$P_{c_i}^c(t|t_0) = \tilde{g}_{clt_i}((t|t_0), \lambda_{c_i}) \quad (4.37)$$

La fonction coût de l'énergie est modélisée comme pour la problématique d'hybridation, par une fonction dynamique (voir (4.4)), tandis que la satisfaction  $S_{c_i}((t|t_0), \lambda_{c_i})$  devient une fonction de la configuration.

En considérant ces notations, les hypothèses du chapitre, et en notant  $\mathbf{\lambda}$  et  $\mathbf{\Lambda}$  les listes contenant respectivement les séquences de configurations  $\lambda_{c_i}$  et les ensembles de séquences possibles  $\Lambda_{c_i}$ , le problème de concurrence de clients (voir SS\_MC, **section 3.6**) s'énonce :

**Problème  $\mathcal{P}_{MC}$** 

$$\min_{\lambda \in \Lambda} \int_{t_0}^{t_0+T_p} \left( \gamma_1 \sum_{i \in \mathcal{C}_{MC}^{tot}} \alpha_i \bar{S}_{c_i}(\lambda_{c_i}, (t|t_0)) + \gamma_2 \beta_{s_1} z_{ec_1}^T(t|t_0) z_{ec_1}(t|t_0) \right) dt \quad (4.38)$$

sous les contraintes :

$$P_{s_1}^c(t|t_0) = \sum_{i \in \mathcal{C}_{MC}^{tot}} P_{c_i}^c(\tau|t_0), \quad (4.38a)$$

$$\mathbf{P}_c^c(t|t_0) = \tilde{g}_{clt}((t|t_0), \lambda), \quad (4.38b)$$

$$\dot{x}_{ec_1}(t|t_0) = g_{ec_1}(x_{ec_1}(t|t_0), P_{s_1}^f(t|t_0)), \quad (4.38c)$$

$$z_{ec_1}(t|t_0) = h_{ec_1}(x_{ec_1}(t|t_0), P_{s_1}^f(t|t_0)), \quad (4.38d)$$

$$E_{s_1}(t|t_0) = g_{stk_1}(E_{s_1}(t_0), P_{s_1}^c(t|t_0)), \quad (4.38e)$$

$$\mathbf{P}_c^c(t|t_0) \in \mathcal{P}_c, \quad (4.38f)$$

$$P_{s_1}^c(t|t_0) \in \mathcal{P}_s, \quad (4.38g)$$

$$E_{s_1}(t|t_0) \in \mathcal{E}_{s_1}^d, \quad (4.38h)$$

Sous l'hypothèse 4.6 qui introduit le contrôle des clients par les configurations, on note que le problème d'optimisation de la stratégie de concurrence change de nature. La nouvelle variable de décision appartient à un ensemble fini et discret, le problème d'optimisation est donc un problème combinatoire. Trouver une solution à un tel problème est en principe facile, la méthode la plus triviale étant de calculer le coût de chaque solution et de sélectionner la « moins chère » qui satisfait les contraintes. Pour nous aider à optimiser efficacement ce problème, nous recommandons de se référer à la théorie de l'optimisation combinatoire (WOLSEY 1998).

Ce nouveau problème soulève à notre sens deux questions : 1) Comment construire génériquement un ensemble de configurations. 2) Comment user au mieux des propriétés énergétiques du système pour obtenir la meilleure séquence de configurations pour chaque client.

La notion de configuration est très large, et englobe plusieurs méthodes de synthèse. Dans le paragraphe 4.4.2, nous proposons deux méthodes de synthèses pour des ensembles de configurations basés soit sur un suivi de trajectoire, soit sur la minimisation d'un coût quadratique.

Puis dans le paragraphe 4.4.3, la résolution de la problématique de concurrence par un algorithme de *Branch and Bound* est envisagée. Plusieurs propriétés intéressantes sont mises en avant pour améliorer le calcul des bornes.

#### 4.4.2 Construction d'un jeu de Configurations

##### 4.4.2.1 Généralités

Soit un système dynamique linéaire  $(\Sigma_p)$  représenté par le modèle d'état (4.39), où  $x_p(t) \in \mathbb{R}^n$  définit l'état du système,  $u_p(t) \in \mathbb{R}^{m_u}$  sa commande et  $y_p(t) \in \mathbb{R}^{p_y}$  sa sortie mesurée.

$$(\Sigma_p) \begin{cases} \dot{x}_p(t) &= A_p x_p(t) + B_{p2} u_p(t) + B_{p1} w_p(t) \\ y_p(t) &= C_p x_p(t) \end{cases} \quad (4.39)$$

Ce système est soumis à une activité, représentée par un scénario  $w_p(t)$  connu sur un horizon de temps  $[t_0, t_0 + T_p]$  glissant.

En général, la construction d'une configuration peut se réaliser sur la base d'un cahier des charges, ou bien de l'expertise du concepteur. Toutefois, nous présentons ici deux méthodes pour construire génériquement un jeu de configurations, dans le cas des systèmes linéaires.

##### 4.4.2.2 Sur la base des signaux de référence

En premier lieu, supposons qu'à partir de  $w_p(t)$ , on puisse calculer une trajectoire de référence  $y_{ref}(t)$  pour la sortie  $y_p(t)$ , qui maximise les performances du système et est connue sur l'horizon  $[t_0, t_0 + T_0]$ .

Puis en second lieu, posons  $(\Sigma_k)$ , le régulateur dynamique linéaire satisfaisant les objectifs de conception, modélisé par (4.40), où  $\bar{y}(t) = y_{ref}(t)$  désigne une consigne à suivre.

$$(\Sigma_k) \begin{cases} \dot{x}_k(t) &= A_k x_k(t) + B_{k2} u(t) + B_{k1} \bar{y}(t) \\ u_p(t) &= C_k x_k(t) + D_{k2} u(t) + D_{k1} \bar{y}(t) \end{cases} \quad x(0) = x_0 \quad (4.40)$$

Alors, le contrôleur  $(\Sigma_k)$  et la consigne  $\bar{y}(t)$  forment une configuration de  $(\Sigma_p)$  notée  $\mathcal{C}_{ec}^0$ .

Pour construire une nouvelle configuration non-similaire, nous proposons de conserver le régulateur initial et de modifier uniquement le signal de consigne  $\bar{y}(t)$ .

**Proposition 4.8.** *Soit  $\delta y \in \mathbb{R}^p$  un vecteur non-nul, alors l'association du régulateur  $(\Sigma_k)$  et du signal de référence  $\bar{y}(t) = y_{ref}(t) - \delta y$  forme une configuration non-similaire avec la configuration  $\mathcal{C}_{ec}^0$ .*

En générant plusieurs biais de valeurs distinctes, on est en mesure de créer un jeu de configurations.

**Corollaire 4.9.** *Soit une suite  $\mathcal{D}_y = \{\delta y_0, \delta y_1, \dots, \delta y_l\}$ , tel que pour tout  $\delta y_i$  de  $\mathcal{D}_y$  :*

$$\begin{cases} \delta y_i \in \mathbb{R}^p, \\ \delta y_i \neq \delta y_j, \quad \forall \delta y_j \in \mathcal{D}_y \setminus \{\delta y_i\} \\ \delta y_0 = \mathbb{O}^p \end{cases} \quad (4.41)$$

*Alors, l'ensemble des  $l + 1$  configurations obtenues par application de la proposition 4.8 pour chacun des éléments de  $\mathcal{D}_y$  constitue un jeu de configurations pour le système  $(\Sigma_p)$ .*

#### 4.4.2.3 Sur la base d'un Critère Quadratique

Grâce à leur critère explicite, les méthodes de commande optimale offrent un moyen de conception pragmatique. La formulation LQ notamment, souligne clairement le compromis entre l'énergie (au sens H2) réservée à la commande et l'énergie attribuée aux performance (voir annexes (132)).

Considérons à nouveau le système  $(\Sigma_p)$  et supposons cette fois-ci qu'une configuration du système est définie par le régulateur linéaire  $K_{lq}$  solution du problème de commande quadratique suivant :

$$\begin{aligned} & \underset{u_p(t)}{\text{minimise}} && \int_{t_0}^{t_0+T_p} x_p^T(t) Q_0 x_p(t) + u_p^T(t) R_0 u_p(t) dt \\ & \text{sujet à} && \dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_{p2} u_p(t) + B_{p1} w_p(t) \end{aligned} \quad (4.42)$$

Tel que :

$$Q_0 = Q_0^T \geq 0, \quad R_0 = R_0^T > 0 \quad (4.43)$$

Cette configuration sera notée  $\mathcal{C}_{lq}^0$ .

Sans donner de consigne particulière, on pourra employer la forme standard pour construire ce problème à partir du modèle  $(\Sigma_p)$  et d'éventuelles objectifs de performances. Notons aussi qu'une trajectoire de référence peut être contenue sous la forme d'un modèle exogène dans le problème.

Pour construire génériquement les autres configurations, nous proposons de conserver la structure du problème linéaire quadratique (4.42) et de moduler uniquement les pondérations statiques du critère par un vecteur  $v \in \mathbb{R}^{m_u}$ . L'objectif est de conserver un sens pragmatique, tout en construisant des configurations non-similaires.

**Proposition 4.10.** *Soit  $v \in \mathbb{R}^{m_u}$  un vecteur de paramètres  $v_i$  non-nul on pose  $Q = Q_0(v)$  et  $R = R_0(v)$  les nouvelles pondérations déduite de  $Q_0$  et  $R_0$ . Alors, la solution au problème linéaire quadratique (4.10) définit une configuration pour  $(\Sigma_p)$  non-similaire avec la configuration  $\mathcal{C}^0$*

$$\begin{aligned} & \underset{u_p(t)}{\text{minimise}} && \int_{t_0}^{t_0+T_p} x_p^T(t) Q x_p(t) + u_p^T(t) R u_p(t) dt \\ & \text{sujet à} && \dot{x}_p(t) = A x_p(t) + B_{p2} u_p(t) + B_{p1} w_p(t) \end{aligned}$$

En itérant la proposition avec des vecteurs  $v$  différents, nous sommes en mesure de générer un jeu de configurations.

#### Corollaire 4.11.

Soit une suite  $\mathcal{D}_v = \{v_0, v_1, \dots, v_l\}$ , tel que pour tout  $v_i$  de  $\mathcal{D}_v$  :

$$\begin{cases} v_i \in \mathbb{R}^{m_u}, \\ v_i \neq v_j, & \forall v_j \in \mathcal{D}_v \setminus \{v_i\} \\ v_0 = \mathbb{O}^p \end{cases} \quad (4.44)$$

Alors, l'ensemble des  $l + 1$  configurations obtenues par application de la proposition 4.10 pour chacun des éléments de  $\mathcal{D}_v$  constitue un jeu de configuration pour le système  $(\Sigma_p)$ .

En raisonnant habilement sur les variations de  $v$ , il est possible de construire un jeu présentant des niveaux d'énergie consommée nettement différents, tout en garantissant que les fonctionnalités du système sont toujours présentes dans l'objectif de commande.

#### 4.4.3 Optimisation des Configurations (Branch and Bound)

Dans cette section, un algorithme de Branch and Bound est mis en place pour la résolution de la problématique de concurrence combinatoire. Pour faciliter la lecture, l'algorithme n'est pas présenté directement pour le problème (4.38) mais pour un problème combinatoire générique (4.45).

Afin d'aborder progressivement la logique de l'algorithme, la présentation est réalisée en deux temps. Tout d'abord on modélise et résout le cas d'un seul client, en soulignant les propriétés d'intérêt pour améliorer la vitesse de convergence. Puis, une extension au cas multi-clients est proposée.

##### 4.4.3.1 Modèle du Problème

Soit un client disposant d'un jeu de configuration  $\mathcal{C}_{c_i} = \{\mathcal{C}_{c_i}^1, \dots, \mathcal{C}_{c_i}^p\}$ . Pour un intervalle d'optimisation  $[t_0, t_0 + T_p]$  segmenté en  $N_\lambda$  sous-intervalles  $T_k$  (voir (4.36)), le client applique une configuration  $\lambda_{k_i}$  pour chacun des  $T_k$ . La séquence des configurations sur l'horizon complet d'optimisation est définie par  $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_{N_\lambda}\} \in \Lambda$ .

On pose  $E(\lambda)$  l'évaluation de l'énergie dépensée par le client suivant la séquence  $\lambda$ , et  $P(\lambda)$  la puissance consommée. Soit  $F(\lambda)$ , une fonction dynamique modélisant l'objectif de commande, et  $\bar{E}$  et  $\bar{P}$  respectivement l'énergie disponible et la puissance maximale sur l'intervalle d'optimisation.

Le problème consistant à maximiser  $F(\lambda)$  sous la contrainte d'une puissance et d'une énergie limitée, est un problème d'optimisation combinatoire noté  $\mathcal{PO}_c$ . Sa formulation est donnée par (4.45).

$$\underset{\lambda \in \Lambda}{\text{minimise}} \quad S(\lambda) \tag{4.45}$$

$$\text{sujet à} \quad E(\lambda) \leq \bar{E} \tag{4.45a}$$

$$P(\lambda) \leq \bar{P} \tag{4.45b}$$

$$\tag{4.46}$$

Cette classe de problème, très rencontrée en recherche opérationnelle (e.g. problème du voyageur) peut en principe se résoudre par énumération (WOLSEY 1998). Dans le cas présent, on dénombre  $(p)^{N_\lambda}$  séquences  $\lambda$ . Donc, pour un jeu avec  $p = 6$  configurations, et  $N_\lambda = 4$  sous-intervalles, on compte 1296 séquences à analyser. Devant la croissance

explosive des possibilités il est préférable de recourir à un algorithme de recherche comme le *Branch and Bound*.

#### 4.4.3.2 Post-traitement : simplification et analyse des propriétés

**Définition 4.12.** Soit  $\sigma = \{\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_i^*\}$  une séquence de  $i$  configurations prédéfinies. On note

i)  $\Lambda_\sigma$  le sous ensemble de  $\Lambda$  dont les  $i$  premières configurations sont données par  $\sigma$

$$\Lambda_\sigma = \left\{ \lambda \in \Lambda : \lambda = \{\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_i^*, \lambda_{i+1}, \dots, \lambda_{N_a}\} \right\} \quad (4.47)$$

ii)  $\mathcal{PO}_\sigma$  le problème d'optimisation défini par :

$$\mathcal{PO}_\sigma : \begin{cases} z_\sigma = \max_{\lambda \in \Lambda_\sigma} S(\lambda) \\ \text{sujet à} & E(\lambda) \leq \bar{E} \\ & P(\lambda) \leq \bar{P} \end{cases}$$

iii)  $\mathcal{PO}_\sigma^{\mathcal{R}}$  une relaxation de  $\mathcal{PO}_\sigma$  tel que

$$\mathcal{PO}_\sigma^{\mathcal{R}} : \begin{cases} z_\sigma^{\mathcal{R}} = \max_{x \in \Lambda_\sigma} S(\lambda) \end{cases}$$

iv)  $\bar{z}_\sigma$  une *upper bound* (UB) de  $\mathcal{PO}_\sigma$  et  $z_\sigma$  une *lower bound* (LB).

v)  $Z_\sigma$  l'ensemble des solutions réalisable de  $\mathcal{PO}_\sigma$

$$Z_\sigma = \left\{ S(\lambda) : \lambda \in \Lambda_\sigma, E(\lambda) \leq \bar{E} \text{ et } P(\lambda) \leq \bar{P} \right\} \quad (4.48)$$

Des propriétés très intéressantes peuvent être énoncées si le jeu de configuration  $\mathcal{C}_{c_i}$  est ordonné par niveaux d'énergie et de satisfaction croissants (e.g. la configuration  $p$  est la configuration nominale).

On pose  $\lambda_\sigma^n = \{\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_i^*, \mathcal{C}_{c_i}^p, \dots, \mathcal{C}_{c_i}^p\}$  et  $\lambda_\sigma^0 = \{\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_i^*, \mathcal{C}_{c_i}^1, \dots, \mathcal{C}_{c_i}^1\}$  deux séquences de configurations particulières.

*Propriété 4.13.* Si  $\mathcal{C}_{c_i}$  est un jeu de configuration ordonné par niveau d'énergie croissant, alors  $\lambda_\sigma^n$  est la solution de  $\mathcal{PO}_\sigma^{\mathcal{R}}$ .

*Démonstration.* Si le jeu est ordonné par énergie et satisfaction croissante alors  $\mathcal{C}_{c_i}^p$  est la configuration apportant une satisfaction maximale pour tout scénario, donc notamment durant les sous-intervalles  $T_k$ . □



Trivialement, on déduit que si  $E(\lambda_\sigma^n) \leq \bar{E}$ , et  $P(\lambda_\sigma^n) \leq \bar{P}$ , alors  $\lambda_\sigma^n$  est une solution optimale de  $\mathcal{PO}_\sigma$ . Et donc,  $\underline{z}_\sigma = \bar{z}_\sigma = S(\lambda_\sigma^n)$ .

*Propriété 4.14.* Si  $\mathcal{C}_{c_i}$  est un jeu de configuration ordonné par niveau d'énergie croissant alors  $\mathcal{PO}_\sigma$  admet une solution si et seulement si  $E(\lambda_\sigma^0) \leq \bar{E}$  et  $P(\lambda_\sigma^0) \leq \bar{P}$ .

*Démonstration.*  $\lambda_\sigma^0$  est inclus dans  $\Lambda_\sigma$ ,  $E(\lambda_\sigma^0) \leq \bar{E}$  et  $P(\lambda_\sigma^0) \leq \bar{P}$  donc  $\lambda_\sigma^0$  est une solution de  $\mathcal{PO}_\sigma$  (i.e.  $Z_\sigma \neq \emptyset$ )

Pour un jeu ordonné  $\lambda_\sigma^0$  est la séquence de  $\Lambda_\sigma$  consommant le moins d'énergie. Par conséquent, pour tout  $\lambda'_\sigma \in \Lambda_\sigma \setminus \{\lambda_\sigma^0\}$ , si  $E(\lambda'_\sigma) > \bar{E}$  on a  $E(\lambda'_\sigma) > \bar{E}$ , et donc  $Z_\sigma = \emptyset$   $\square$

Dans la pratique, vérifier la faisabilité de  $\mathcal{PO}_\sigma$  par la propriété 4.14 est un moyen de tester une première *lower bound*  $\underline{z}_\sigma = S(\lambda_\sigma^0)$ . Cette remarque sera utilisée dans l'heuristique de recherche.

#### 4.4.3.3 Résolution de $\mathcal{PO}$

Pour résoudre le problème  $\mathcal{PO}$ , nous avons développé une heuristique sur le principe de Branch and Bound. Pour rappel, il s'agit de progresser vers la solution optimale en alternant une phase de séparation (*Branch*), et une phase d'évaluation (*Bound*). En substance, la séparation isole un sous-ensemble des solutions et l'évaluation recherche une *lower bound* (LB) et une *upper bound* (UB) sur ce dernier. En fonction des résultats, l'heuristique marque le sous-problème comme *optimal* (i.e. on connaît la meilleure solution du sous-ensemble), *infaisable* (i.e. aucune solution possible), ou bien *limite*<sup>1</sup> (i.e. ne peut pas contenir la solution optimale du problème initial). Si aucune conclusion n'est possible, le problème est conservé en mémoire pour être, dans un second temps, à nouveau séparé et évalué.

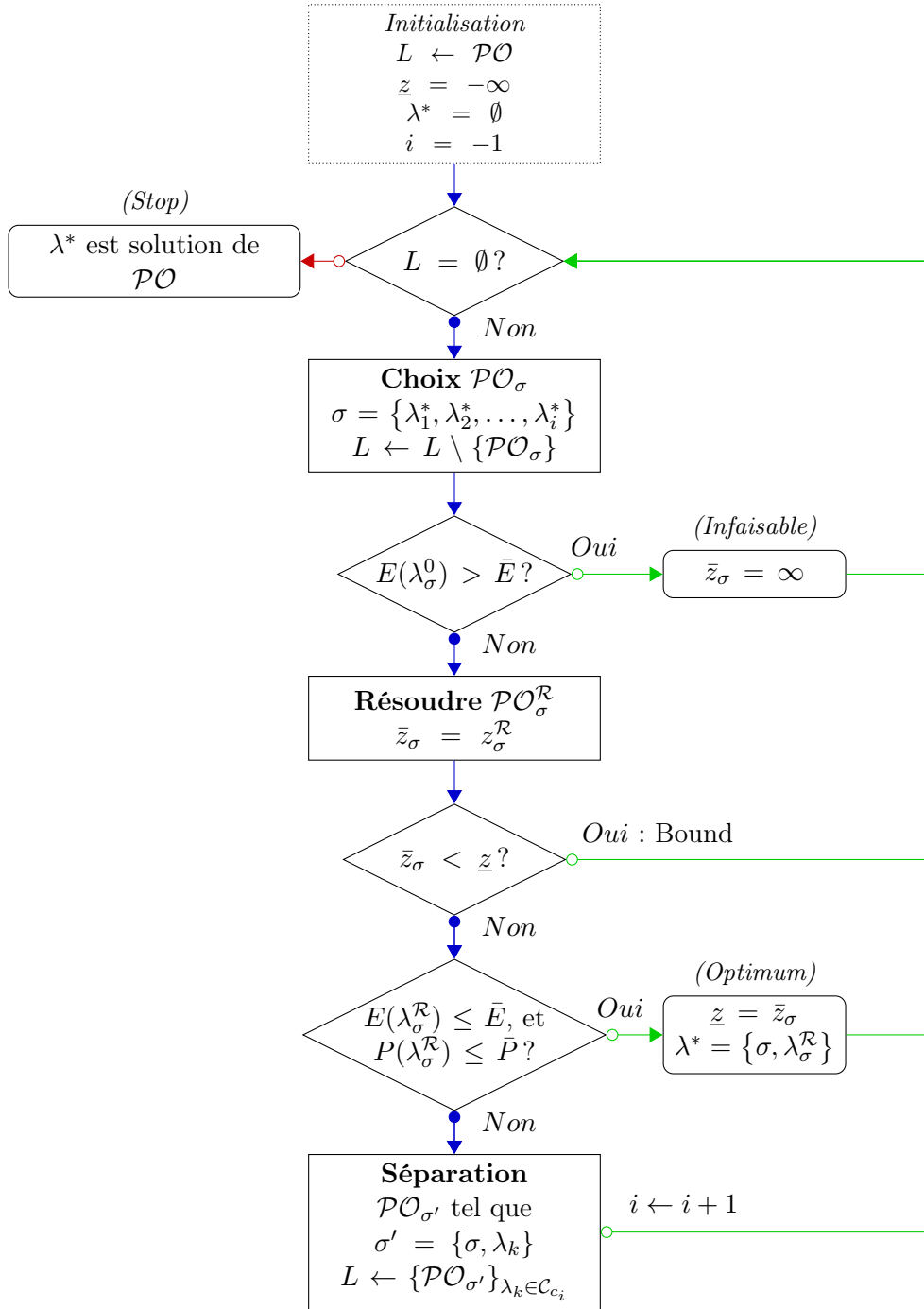
L'algorithme que nous mettons en avant est présenté en totalité par la Figure 4.4. Les notations sont définies par la Définition 4.12. La variable  $L$  mémorise les problèmes non marqués. Les étapes notoires sont décrites dans les paragraphes suivants.

**Marquage** Le statut des problèmes  $\mathcal{PO}_\sigma$  s'obtient en général par l'examen comparatif des bornes ((LB) et (UB)). Ici, on s'appuie sur les propriétés 4.13-4.14 pour inclure de nouvelles règles. En posant  $\underline{z}$  la borne inférieure du problème global, on admet que :

- si  $\bar{z}_\sigma < \underline{z}$ , alors  $\mathcal{PO}_\sigma$  est marqué *limite*
- si  $E(\lambda_\sigma^n) \leq \bar{E}$  et  $P(\lambda_\sigma^n) \leq \bar{P}$  alors  $\mathcal{PO}_\sigma$  est marqué *optimal* et  $\lambda_\sigma^* = \lambda_\sigma^n$
- si  $E(\lambda_\sigma^0) > \bar{E}$  et  $P(\lambda_\sigma^0) > \bar{P}$  alors  $\mathcal{PO}_\sigma$  est marqué *infaisable* et  $\underline{z}_\sigma = \infty$

---

1. *Bound* en anglais


 FIGURE 4.4 – Flow Chart de l'heuristique de résolution pour  $\mathcal{PO}$

**Choix de  $\mathcal{PO}_\sigma$**  Une sélection intelligente de  $\mathcal{PO}_\sigma$  permet de gagner en convergence vers la solution optimale. La procédure pour déterminer la faisabilité d'un problème est relativement rapide (voir Lemme 4.14), et permet le cas échéant, une réduction drastique du nombre de solutions à analyser. Pour cela, nous choisirons toujours le problème dont la séquence  $\sigma$  dégrade « au plus tard » la satisfaction.

**Séparation de  $\mathcal{PO}_\sigma$**  Notre méthode de séparation est assez « naïve ». Elle consiste à créer  $p$  nouveaux problèmes, en augmentant la séquence  $\sigma$  d'une nouvelle configuration prise dans le jeu.

Elle est toutefois compensée par une phase d'évaluation plus rapide (Choix+Marquage).

**Résolution de  $\mathcal{PO}_\sigma^R$**  Il s'agit d'un calcul rapide de la satisfaction maximale du problème non-contraint (voir Définition 4.12).

#### 4.4.3.4 Extension au cas multi-clients

Le raisonnement précédent est porté dans le cas plus compliqué où l'optimisation porte sur plusieurs systèmes, consommant une énergie commune. Dans le cas de trois systèmes, où l'on dispose respectivement d'un jeu de taille  $p_1$ ,  $p_2$  et  $p_3$ , et d'une optimisation sur  $N_\lambda$  sous-intervalles, pour  $i \in \llbracket 1; 3 \rrbracket$  on note  $\Lambda_{c_i}$  les ensembles de séquences possibles. Le problème d'optimisation combinatoire étendu  $\mathcal{POE}$  s'écrit :

$$\mathcal{POE} : \left\{ \begin{array}{l} ze = \max_{\substack{\lambda_{c_1} \in \Lambda_{c_1}, \\ \lambda_{c_2} \in \Lambda_{c_2}, \\ \lambda_{c_3} \in \Lambda_{c_3}}} \alpha_1 S_1(\lambda_{c_1}) + \alpha_2 S_2(\lambda_{c_2}) + \alpha_3 S_3(\lambda_{c_3}) \\ \text{sujet à} \quad E_1(\lambda_{c_1}) + E_2(\lambda_{c_2}) + E_3(\lambda_{c_3}) \leq \bar{E} \\ P_1(\lambda_{c_1}) + P_2(\lambda_{c_2}) + P_3(\lambda_{c_3}) \leq \bar{P} \\ \Lambda_{c_1} \subseteq \{\mathcal{C}_{c_1}^1, \dots, \mathcal{C}_{c_1}^{p_1}\}^{N_\lambda} \\ \Lambda_{c_2} \subseteq \{\mathcal{C}_{c_2}^1, \dots, \mathcal{C}_{c_2}^{p_2}\}^{N_\lambda} \\ \Lambda_{c_3} \subseteq \{\mathcal{C}_{c_3}^1, \dots, \mathcal{C}_{c_3}^{p_3}\}^{N_\lambda} \end{array} \right.$$

Le nombre de solutions à étudier est donc très grand  $(p_1 \times p_2 \times p_3)^{N_\lambda}$ .

Pour résoudre ce problème, remarquons tout d'abord que le problème  $\mathcal{POE}$  est mathématiquement équivalent au problème  $\mathcal{PO}$  avec  $p = p_1 \times p_2 \times p_3$ . Par conséquent, notre heuristique précédente est en mesure de trouver la solution à ce problème.

Secondement, posons  $\bar{p} = \max(p_1, p_2, p_3)$ , et  $W$  un ensemble de séquences de configurations tel que  $W \subseteq \{\mathcal{C}_c^1, \dots, \mathcal{C}_c^{\bar{p}}\}^{N_\lambda}$ . Pour tout  $w \in W$  notons  $w_{p_i}$  la séquence des  $p_i$

premières configurations de  $w$ . Nous définissons alors le problème suivant :

$$\mathcal{POE}^{\mathcal{R}} : \begin{cases} ze^{\mathcal{R}} = \max_{w \in W} & \alpha_1 \tilde{S}_1(w) + \alpha_2 \tilde{S}_2(w) + \alpha_3 \tilde{S}_3(w) \\ \text{sujet à} & E_1(w) + E_2(w) + E_3(w) \leq \bar{E} \\ & P_1(w) + P_2(w) + P_3(w) \leq \bar{P} \\ & W \subseteq \{\mathcal{C}_c^1, \dots, \mathcal{C}_c^{\bar{p}}\}^{N_\lambda} \end{cases}$$

Où

$$\forall i \in \{1, \dots, 3\}, \quad \tilde{S}_i(w) = S_i(w_{p_i}) \quad (4.49)$$

Le problème  $\mathcal{POE}^{\mathcal{R}}$  est une relaxation de  $\mathcal{POE}$  très intéressante. Tout d'abord, il est équivalent à  $\mathcal{PO}$  pour un nombre de configuration  $p = \bar{p}$ , et peut donc être résolu. Ensuite, en imposant que toutes les séquences des clients soient identiques, l'espace de décision est fortement réduit, et donc la complexité est moindre.

La solution de  $\mathcal{POE}^{\mathcal{R}}$  représente donc une *lower bound* judicieuse pour initier les calculs sur  $\mathcal{POE}$ . Nous pouvons aller encore plus loin en remarquant que la dernière des *upper bound* non-optimale de  $\mathcal{PO}$  pour  $p = \bar{p}$  est aussi une *upper bound* de  $\mathcal{POE}$ . Cependant, la démonstration n'est pas présentée ici.

## 4.5 Conclusion du Chapitre

Les solutions algorithmiques mises en évidence par l'état de l'art confortent notre intérêt initial pour une formulation quadratique des fonctions de satisfactions et de coûts de l'énergie. On note que le verrou historiquement lié à la complexité numérique des méthodes MPC tend à disparaître sous l'influence de nouveaux solveurs. Toutefois, malgré des perspectives intéressantes, les développements théoriques actuellement disponibles pour garantir une stabilité *a priori* du système par un contrôle MPC ne nous semblent pas convaincants pour un usage industriel.

Pour ces raisons, nous initions dans ce chapitre la méthodologie dite « LPV-MPC », qui apporte par la théorie du contrôle robuste des garanties quant à la stabilité et la robustesse du système en boucle fermée, tout en conservant un moyen d'action sur les contraintes. Il est cependant noté que la résolution du second problème d'optimisation, lié au contrôleur (L2), peut s'avérer particulièrement compliquée en raison de non-linéarités au niveau de certaines contraintes.

Dans le contexte de la problématique d'hybridation, les problèmes d'optimisation relatifs à la synthèse du contrôleur (L1) et du contrôleur (L2) sont spécifiés tout en laissant l'opportunité au concepteur de choisir les méthodes de résolution qui lui conviennent le mieux.

Par la mise en œuvre de l'algorithme au travers d'une illustration, nous souhaitons témoigner de sa pertinence pour la gestion énergétique des sources.

Du côté de la problématique de concurrence, les clients sont pilotés indirectement par un choix en temps réel de leur configuration. Ce chapitre introduit seulement les grandes lignes pour la conception de ces configurations. Une vision plus précise de leur mise en œuvre par synthèse  $H_2$  est disponible en annexe [B](#), et un travail sur une synthèse  $H_2$  unifiée pour des pondérations fréquentielles stables et instables a été proposé dans ([FAUVEL, CLAVEAU et CHEVREL 2013](#)).

Le choix de la configuration optimale parmi un jeu de configurations se formule comme un problème d'optimisation combinatoire. Là encore plusieurs méthodes de résolution sont possibles ([WOLSEY 1998](#)). Ayant constaté des propriétés intéressantes pour les jeux de configurations ordonnées par niveaux d'énergie et de satisfaction croissants, il est proposé d'utiliser un algorithme de Branch and Bound.

Notons que la caractérisation du point d'équilibre atteint par l'algorithme, dans le cas du problème de concurrence avec configuration, reste une question ouverte. Pour y répondre il faudra très certainement se tourner vers la théorie des jeux, et notamment les équilibre de Nash pour les jeux non-coopératifs ([SAAD et al. 2012](#)).

Les deux solutions algorithmiques présentées ici sont mises en œuvre dans le chapitre suivant, pour la conception de la stratégie énergétique d'un camion frigorifique hybride série.

## Chapitre 5

# Conception de la Stratégie d'un Camion Frigorifique Hybride Série

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Introduction du Chapitre</b>	<b>121</b>
<b>5.2</b>	<b>Présentation du Modèle Camion-FHS</b>	<b>123</b>
5.2.1	Système de Mission	123
5.2.2	Chaîne Énergétique	125
5.2.3	Modélisation Organique	126
<b>5.3</b>	<b>Formalisation Modulaire du Système Énergétique</b>	<b>137</b>
5.3.1	Les Clients	137
5.3.2	Les Sources	141
5.3.3	Le Nœud Global	143
<b>5.4</b>	<b>Conception de la Stratégie Énergétique</b>	<b>145</b>
5.4.1	Stratégie Nœud d'Accumulation	146
5.4.2	Stratégie Nœud d'Hybridation	147
5.4.3	Stratégie Nœud de Concurrence	151
<b>5.5</b>	<b>Simulation et Résultats</b>	<b>152</b>
5.5.1	Scénario	152
5.5.2	Résultats	154
<b>5.6</b>	<b>Conclusion du chapitre</b>	<b>158</b>

---

### 5.1 Introduction du Chapitre

A titre d'illustration, ce chapitre met en œuvre les outils méthodologiques et algorithmiques proposés dans les chapitres précédents, pour la conception du système énergétique d'un camion frigorifique, basé sur une architecture hybride série.

## CHAPITRE 5. CONCEPTION DE LA STRATÉGIE D'UN CAMION FRIGORIFIQUE HYBRIDE SÉRIE

---

La démarche débute (**section 5.2**) par la description du système d'intérêt *camion Frigorifique Hybride Série*, abrégé par *camion-FHS*, au travers du prisme systémique. Le système de mission et la chaîne énergétique sont identifiés et caractérisés par des solutions organiques.

A partir du recouplement de travaux académiques, un modèle simplifié de ce système est proposé. Notons dès à présent que ce cas d'étude est purement académique, et que par conséquent les dimensions du système sont arbitrairement définis.

Sur la base de cette modélisation, la **section 5.3** formule les modules énergétiques sources et clients, nous permettant à la fois de décrire l'architecture du système énergétiques portée par le module d'interconnexion *nœud*, et d'adresser le problème énergétique modélisé par  $\mathcal{P}'_n$ .

Ce problème d'optimisation est simplifié à la **section 5.4** par le schéma de décomposition précédemment introduit (cf. **section 3.7**), et résolu par application des solutions algorithmiques du **chapitre 4**.

Pour terminer, la pertinence des solutions algorithmiques et la faisabilité globale de notre méthodologie de conception sont testées à la **section 5.5** par la simulation du système d'intérêt camion FHS et sa stratégie énergétique, pour un scénario de livraison déterministe.

## 5.2 Présentation du Modèle Camion-FHS

### 5.2.1 Système de Mission

La vocation principale du camion-FHS est *le transport et la livraison de marchandises réfrigérées entre deux lieux géographiques distants*. Ce système de mission contient donc deux sous-systèmes de mission :

- *la mobilité* qui décrit le service de transport d'un bien ou d'une personne, entre deux lieux géographiques
- *le conditionnement* qui garantit le stockage de marchandises à une température constante et régulée.

Les Figures 5.1 et 5.2 modélisent ces sous-systèmes par des ensembles organico-fonctionnels, et présentent leur architecture.

#### 5.2.1.1 La Mobilité

La mobilité porte le service de transport d'un bien ou d'une personne, entre deux lieux géographiques. Son activité est modélisée par un profil de vitesse qui dans la pratique découle du parcours routier du véhicule. La fluctuation de la circulation est elle définie comme un élément environnemental non déterministe et assimilée à une perturbation.

On caractérise la structure du sous-système de mission à l'aide d'Ensemble Organico-Fonctionnel (Fig. 5.1). A l'extérieur, on modélise l'action de l'air et des frottements de la route par un (EOF)-Ambiant situé en entrée, et l'impact de la mobilité sur l'environnement par un second (EOF)-Ambiant, situé en sortie. La mobilité puise son énergie dans une chaîne énergétique, que nous détaillerons dans le paragraphe suivant 5.2.2.

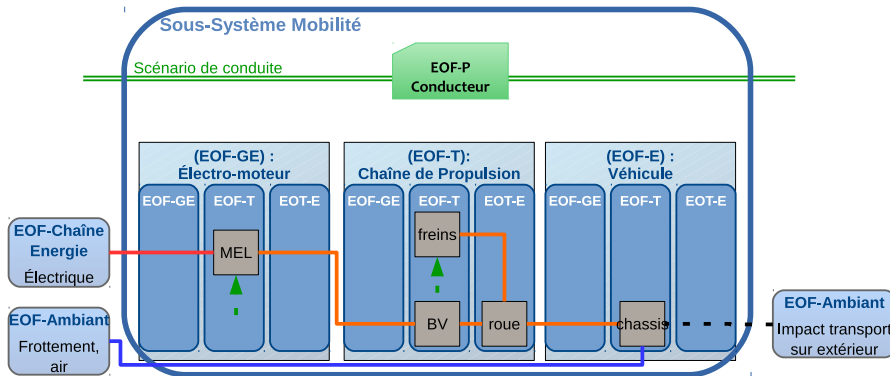


FIGURE 5.1 – Représentation (EOF) du sous-système de mission Mobilité

La structure interne de la mobilité se compose d'un (EOF-GE) *électro-moteur*, d'un (EOF-T) *chaîne de propulsion* et d'un (EOF-E) *véhicule*, qui se déclinent en cinq solutions organiques : une machine électrique (MEL), une boîte de vitesse (BV), des freins



## CHAPITRE 5. CONCEPTION DE LA STRATÉGIE D'UN CAMION FRIGORIFIQUE HYBRIDE SÉRIE

mécaniques, des roues et un châssis. Ces organes sont physiquement liés par des liens bi-directionnels. Sur le schéma (Fig. 5.1), les liens rouges désignent des échanges électriques, et les liens oranges des échanges mécaniques.

L'(EOF) de pilotage matérialise le conducteur qui sera par la suite simplifié par une loi de contrôle nommée *conducteur virtuel* (voir (5.15)-(5.18) ci-après). Les (EOF) sous son contrôle sont pointés par les flèches vertes, en l'occurrence la machine électrique et les freins. Les échanges d'informations entre organes et des organes vers l'(EOF-P) ne sont pas schématisés mais existent.

### 5.2.1.2 Le Conditionnement

Le conditionnement garantit le stockage de marchandises à une température constante et régulée. Son activité correspond aux scénarios d'ouverture et de fermeture de la porte durant les périodes de livraison. La température extérieure au véhicule est l'un des éléments majeur de l'environnement et est supposée déterministe.

La structure de ce sous-système de mission est détaillée grâce à des ensembles organico-fonctionnels (Fig. 5.2). La température extérieure est matérialisée par un (EOF)-Ambiant situé en entrée, et l'impact du conditionnement sur la satisfaction du client (humain) est modélisé par un second (EOF)-Ambiant placé en sortie. Le conditionnement obtient son énergie d'une chaîne énergétique électrique (voir paragraphe suivant 5.2.2).

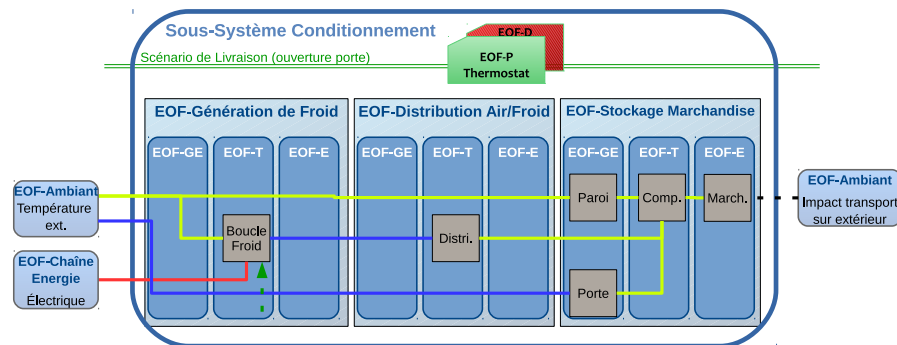


FIGURE 5.2 – Représentation (EOF) du sous-système de mission Conditionnement

En interne, le conditionnement contient un (EOF-GE) *boucle de froid*, un (EOF-T) *distribution d'air et de froid*, et un (EOF-E) *stockage de marchandise*. Ces trois (EOF) sont précisés par un second niveau de modélisation qui souligne six solutions organiques : la boucle de froid, le système de distribution (Distri.), une paroi, un compartiment de stockage (Comp.), une porte de livraison, et les marchandises. Sur la figure 5.2, les liens jaunes symbolisent une énergie thermique, les liens bleus une énergie fluide et les liens rouges une énergie électrique.

L'(EOF) de pilotage contient le thermostat assurant l'asservissement de la température du compartiment à une température cible (5.27).

### 5.2.2 Chaîne Énergétique

Par notre choix d'architecture, nous imposons de restreindre le contexte énergétique du camion à deux ressources : le carburant (i.e. diesel), et un potentiel électrique (i.e. cellule électrochimique).

La compréhension de l'exploitation et de la transformation de ces ressources se réalise par la construction de la chaînes énergétiques (voir *Définition 2.2*) dont la première étape est l'identification des (EOF-énergie), c'est à dire les chaînes d'(EOF) entre une ressource brute et une énergie utile qui compose notre camion-FHS.

Le processus d'exploitation et de transformation de la ressource électrochimique en énergie électrique utile est modélisé par l'(EOF-énergie) *bloc-batterie* (Fig. 5.3). La puissance primaire est générée par la batterie (Bat) et est transformée en puissance utile par un convertisseur (DC/DC). Celle-ci est mise à disposition des services sur un bus électrique (Bus Elec.).

La ressource carburant est de nature chimique, son exploitation comme source électrique requiert l'action d'un générateur de puissance et d'un transformateur. On modélise ce processus par l'(EOF-énergie) *électrogène* (Fig. 5.3). La solution organique de génération de puissance est un moteur thermique (Mth) et l'organe de transformation est une génératrice (Gen). L'énergie utile est mise à disposition sur le bus électrique commun à l'(EOF-énergie) bloc-batterie.

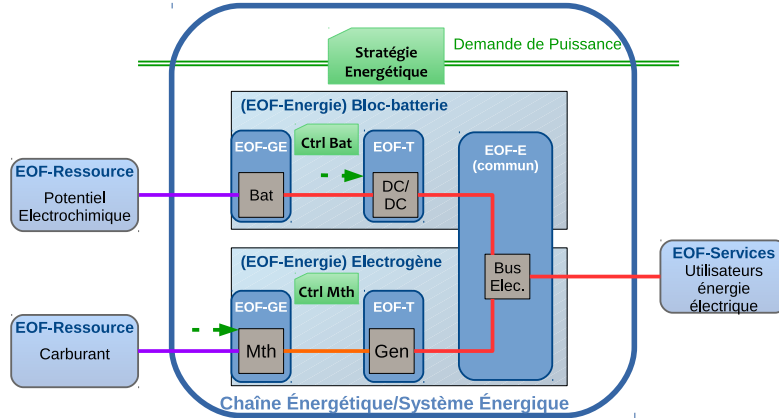


FIGURE 5.3 – Modélisation par (EOF-énergie) de la chaîne énergétique

Finalement, la chaîne énergétique concatène les deux (EOF-énergie) précédents, et sachant que le camion-FHS ne contient qu'une chaîne énergétique, celle-ci se représente aussi le système énergétique dans son intégralité.

### 5.2.3 Modélisation Organique

#### 5.2.3.1 Sous-Système Mobilité

Le véhicule contient les éléments organiques *machine électrique*, *boite de vitesse*, *freins*, *roues* et *chassis*, ainsi qu'un élément de pilotage, simplifié par le *conducteur virtuel*.

Nous supposons dans cet exemple académique que :

- la machine électrique ne contient pas de dynamiques,
- la boite de vitesse est à rapport fixe<sup>1</sup>,
- le véhicule peut s'apparenter à un solide ponctuel en translation longitudinal,
- les contacts au sol sont supposés sans glissement
- la totalité de la puissance du groupe motopropulseur est transmise à une seule roue équivalente virtuelle,
- de même que les freins seront modélisés par un seul frein équivalent,
- le conducteur est paramétré par un signal de restriction  $P_{mel}^{rest}(t)$  et un signal de référence  $v_{ref}(t)$ , que l'on définira au travers des configurations (voir section 5.3.1.1).

La modélisation de ces organes s'inspire des travaux académiques de KERMANI (2009), A. SCIARRETTA et GUZZELLA (2007) et MIRO PADOVANI et al. (2013). Les valeurs des paramètres utilisés sont regroupées dans le Tableau 4, disponible en **annexe C**.

**Machine électrique** La machine électrique et son onduleur sont modélisés que par leur rendement (Fig. 5.4) et sans dynamique. La consigne de couple  $\Gamma_{mel}^{cons}(t)$  (5.15) est directement donnée par le conducteur virtuel (5.15) (5.16).

Le couple  $\Gamma_{mel}(t)$  exercé sur l'axe de la boite de vitesse est donc égale à :

$$\Gamma_{mel}(t) = \Gamma_{mel}^{cons}(t) \quad (5.1)$$

La puissance électrique consommée sur le bus électrique (5.28) est calculée à partir des deux cartographies de rendement (Fig. 5.4a) et (Fig. 5.4b), distinguant respectivement le mode consommateur (i.e.  $\Gamma_{mel}(t) \geq 0$ ) et le mode régénérateur (i.e.  $\Gamma_{mel}(t) < 0$ ).

Ces deux cartographies sont notées :

$$\eta(\Gamma_{mel}(t), \omega_{bv}(t)) \quad (5.2)$$

avec  $\omega_{bv}(t)$  la vitesse de rotation de l'axe machine électrique/boite de vitesse (5.4).

On en déduit l'intensité prélevée sur le bus électrique  $I_{mel}(t)$  :

$$I_{mel}(t) = \frac{\Gamma_{mel}(t) \omega_{bv}(t)}{V_{bus}(t) \eta(\Gamma_{mel}(t), \omega_{bv}(t))} \quad (5.3)$$

où  $V_{bus}(t)$  la tension du bus électrique (5.28).

---

1. Cette hypothèse grossière nous permet ici de s'affranchir des variables discrètes.

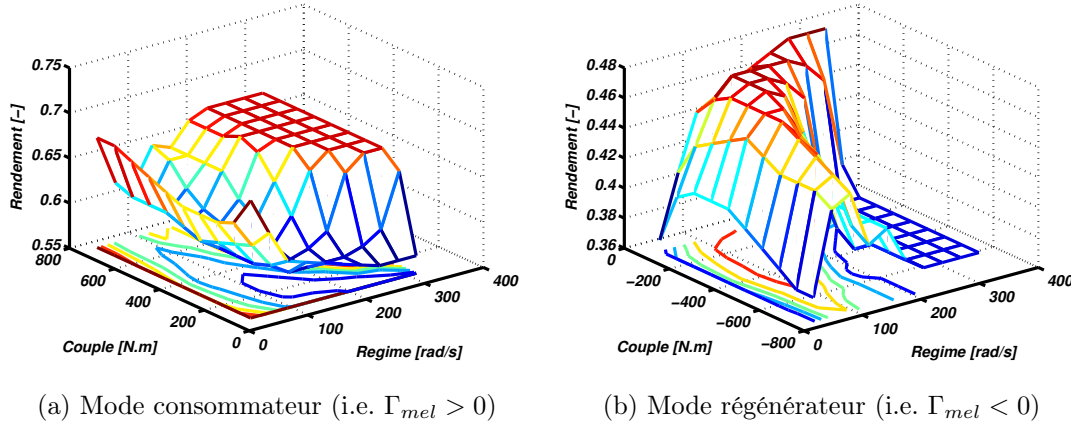


FIGURE 5.4 – Courbe de rendement de la machine électrique

**Boîte de Vitesse** La boîte de vitesse est ici simplifiée. On supposera que son rapport de réduction  $R_{bv}$  est fixe, et que la transfert de puissance est réalisé sans dynamique ni pertes.

La relation entre la vitesse angulaire de la machine électrique  $\omega_{mel}(t)$  et la vitesse angulaire de l'axe roue  $\omega_{roue}(t)$ , et la relation entre le couple de la boîte de vitesse  $\Gamma_{bv}(t)$  et le couple de la machine électrique  $\Gamma_{mel}$  sont respectivement modélisés par :

$$\omega_{mel}(t) = \frac{\omega_{roue}(t)}{R_{bv}} \quad (5.4)$$

$$\Gamma_{bv}(t) = R_{bv}\Gamma_{mel}(t) \quad (5.5)$$

**Frein Mécanique** Les freins sont modélisés comme un unique frein équivalent sans dynamique ni saturation de puissance. La relation entre la consigne de couple de freinage  $\Gamma_{fmeca}^{cons}(t)$  évaluée par le conducteur virtuel (5.18), et le couple de freinage exercé sur la roue  $\Gamma_{fmeca}(t)$  est donné par :

$$\Gamma_{fmeca}(t) = \frac{\Gamma_{fmeca}^{cons}(t)}{r} \quad (5.6)$$

**Roue Équivalente** Cet élément a l'unique vocation de faire le lien entre l'arbre de transmission, et la route. Les glissements sont négligés, de même que la déformation du pneu. On pose  $r$  le rayon de la roue et  $\omega_{roue}(t)$  sa vitesse angulaire. On distingue une

## CHAPITRE 5. CONCEPTION DE LA STRATÉGIE D'UN CAMION FRIGORIFIQUE HYBRIDE SÉRIE

force de propulsion positive  $F_{prop}(t)$  et une force de freinage négative  $F_{frein}(t)$  :

$$\omega_{roue}(t) = \frac{v_{veh}(t)}{r} \quad (5.7)$$

$$F_{prop}(t) = \frac{1}{r} \left( \max(0, \Gamma_{bv}(t)) \right) \quad (5.8)$$

$$F_{frein}(t) = \frac{1}{r} \left( \min(0, \Gamma_{bv}(t)) + \Gamma_{fmeca}(t) \right) \quad (5.9)$$

$$(5.10)$$

Avec  $v_{veh}(t)$  la vitesse du véhicule (5.14).

**Châssis** Les actions considérées sur le véhicule sont la force de propulsion  $F_{prop}(t)$  (5.8) et la force de freinage  $F_{frein}(t)$  (5.9) exercées sur l'axe roue, la force aérodynamique (frottement visqueux)  $F_{aero}(t)$  et la force de frottements secs  $F_{roul}$  supposée statique.

$$F_{roul} = m_{veh} g f_r \quad (5.11)$$

$$F_{aero}(t) = \frac{1}{2} \rho C_x S_f v_{veh}(t)^2 \quad (5.12)$$

Avec  $m_{veh}$  la masse du camion, intégrant la marchandise et les autres composants organiques,  $g$  la constante de gravité,  $f_r$  un coefficient statique de résistance entre la roue et le sol,  $C_x$  le coefficient de trainé,  $S_f$  la surface frontale,  $\rho$  la masse volumique de l'air.

On considère l'inertie de la roue virtuelle  $J_{roues}$ , et l'inertie de la machine électrique  $J_{mel}$  constante. Leur influence sur le véhicule est modélisée par une masse équivalente  $M_{tr}$ , tel que :

$$M_{tr} = \frac{1}{r^2} (J_{roues} + J_{th} R) \quad (5.13)$$

Enfin, par l'application du principe fondamental de la dynamique sur le châssis, on déduit le modèle non-linéaire du mouvement longitudinal du camion-FHS :

$$(m_{veh} + M_{tr}) \dot{v}_{veh}(t) = F_{prop}(t) + F_{frein}(t) - F_{roul}(t) - F_{aero}(t) \quad (5.14)$$

Ce système dynamique est non linéaire.

**Conducteur virtuel** Pour notre évaluation par simulation, le conducteur *réel* et modélisé par un conducteur *virtuel* dont les objectifs sont d'asservir le véhicule en vitesse selon les directives de la stratégie énergétique (section 5.3.1.1), et de distribuer la puissance de freinage entre le frein mécanique et la machine électrique, en favorisant le freinage électrique.

On suppose connus par le conducteur virtuel les signaux  $P_{mel}^{rest}(t)$  et  $v_{ref}(t)$  calculés par la stratégie énergétique (voir (5.55) et Tab. 5.1), et décrivant respectivement une puissance de restriction et une vitesse de référence.

Le couple à la roue nécessaire pour atteindre la vitesse  $v_{ref}(t)$  est noté  $\Gamma_{roue}^{cons}$ , et évalué par le contrôleur PI suivant :

$$\Gamma_{roue}^{cons}(t) = K_p(v_{ref}(t) - v_{veh}(t)) + K_i \int_0^t (v_{ref}(\tau) - v_{veh}(\tau)) d\tau \quad (5.15)$$

où  $K_p$  et  $K_i$  sont des paramètres de réglage déterminé pour satisfaire au mieux la vocation de la mobilité.

On note  $(P_{mel}^{min}(t), P_{mel}^{max}(t))$  les limites physiques de la machine électrique. En phase d'accélération, le couple demandée à la machine électrique correspond à  $\Gamma_{roue}^{cons}(t)$  modulé par le ratio de la boîte de vitesse  $R_{bv}$  et saturé par la limite physique haute et la restriction de puissance.

$$\Gamma_{mel}^{cons}(t) = \min \left( \frac{P_{mel}^{max}}{\omega_{mel}(t)}, \frac{P_{mel}^{rest}(t)}{\omega_{mel}(t)}, \frac{\Gamma_{roue}^{cons}(t)}{R_{bv}} \right) \quad (5.16)$$

En phase de décélération, le couple est distribué entre le frein  $\Gamma_{fmeca}^{cons}(t)$  et la machine électrique, en tenant compte de la limite physique basse de puissance.

$$\Gamma_{mel}^{cons}(t) = \max \left( \frac{P_{mel}^{min}}{\omega_{bv}(t)}, \frac{\Gamma_{roue}}{R_{bv}} \right) \quad (5.17)$$

$$\Gamma_{fmeca}^{cons}(t) = \min(0, \Gamma_{roue}^{cons}(t) - \Gamma_{mel}^{cons}(t) R_{bv}) \quad (5.18)$$

### 5.2.3.2 Sous-système conditionnement

Le conditionnement contient les éléments organiques *boucle froide*, *distribution*, *paroi*, *porte*, *compartiment*, *marchandise*, ainsi qu'un élément de pilotage *le thermostat*.

On suppose que :

- la boucle froid et la distribution sont modélisées par leurs flux de puissance,
- la marchandise sera modélisé comme un point centrale situé au centre du compartiment.

La modélisation de ces organes s'inspire des travaux académiques de [SHAFIEI et ALLEYNE \(2015\)](#). Les valeurs des paramètres utilisés sont regroupées dans le Tableau 5, disponible en **annexe C**.

**boucle froid et distribution** La boucle froid désigne le groupe organique qui transforme l'énergie électrique en énergie thermique, et la distribution désigne le processus de diffusion du froid dans le compartiment. Ces deux éléments sont approximés par un seul modèle de puissance supposé sans pertes ni dynamique. On note  $P_{bf}(t)$  la puissance thermique fournie au compartiment,  $I_{bf}(t)$  le courant électrique consommé.

## CHAPITRE 5. CONCEPTION DE LA STRATÉGIE D'UN CAMION FRIGORIFIQUE HYBRIDE SÉRIE

---

Le modèle de puissance s'écrit :

$$P_{bf}(t) = P_{bf}^{cons}(t) \quad (5.19)$$

$$I_{bf}(t) = \frac{K_{bf} \cdot P_{bf}^{cons}(t)}{V_{bus}} \quad (5.20)$$

Avec  $K_{bf}$  un coefficient statique de transfert,  $P_{bf}^{cons}(t)$  la consigne du thermostat (5.27) et  $V_{bus}$  la tension électrique du réseau (5.28).

**La paroi** La paroi modélise le transfert thermique entre l'extérieur du camion, et l'intérieur du compartiment. On note  $\dot{Q}_{paroi}$  le transfert de chaleur,  $T_{ext}$  la température extérieure et  $T_{cp}(t)$  la température intérieure du compartiment. Le modèle de la paroi s'écrit :

$$\dot{Q}_{paroi} = D_{paroi}(T_{cp}(t) - T_{ext}) \quad (5.21)$$

Avec , et  $D_{paroi}$  le coefficient de diffusion thermique défini par :

$$D_{paroi} = \frac{e}{\lambda_p S_{paroi}} \quad (5.22)$$

où  $\lambda_p$  est le coefficient de conductivité thermique de la paroi,  $e$  son épaisseur et  $S_{paroi}$  la surface d'échange.

**La porte** La porte est modélisée comme une seconde paroi dont le coefficient de diffusion  $D_{porte}(\epsilon_{porte})$  varie en fonction de l'état de la porte  $\epsilon_{porte}$  (i.e. ouverte = 1, fermée = 0) tel que :

$$D_{porte}(\epsilon_{porte}) = \begin{cases} D_{paroi} & \text{si } \epsilon_{porte} = 1 \\ D_{air} & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.23)$$

avec  $D_{air}$  le coefficient de diffusion thermique de l'air :

$$D_{air} = \frac{e}{\lambda_a S_{porte}} \quad (5.24)$$

où  $\lambda_a$  est le coefficient de conductivité thermique de l'air,  $e$  l'épaisseur de la porte (égale à l'épaisseur de la paroi) et  $S_{porte}$  la surface de la porte.

On en déduit le transfert de chaleur  $\dot{Q}_{porte}$  :

$$\dot{Q}_{porte} = D_{porte}(\epsilon_{porte}) (T_{cp}(t) - T_{ext}) \quad (5.25)$$

**Le compartiment et la marchandise** Le compartiment est refroidi par la distribution de froid et subit des pertes thermiques au travers de la porte et de ces parois.

A partir de l'équation de la chaleur, on modélise l'évolution de la température :

$$\frac{\partial T_{cp}(t)}{\partial t} = \dot{Q}_{porte} + \dot{Q}_{paroi} - \frac{P_{bf}(t)}{\rho c} \quad (5.26)$$

avec  $\rho$  la masse volumique de l'air,  $c$  la chaleur spécifique de l'air et  $P_{bf}(t)$  la puissance calorifique de la boucle froid (5.19).

**La marchandise** La température marchandise est évaluée comme la température de la paroi, soit  $T_m(t) = T_{cp}(t)$ .

**Le thermostat** L'asservissement en température du compartiment est réalisé par le thermostat. Ce dernier est modélisé comme un régulateur *PI*. On pose  $T_{ref}(t)$  une consigne de température pour le compartiment calculée par la stratégie énergétique (section 5.3.1.2).

La consigne de puissance pour la boucle froid  $P_{bf}^{cons}(t)$  est déterminée d'après :

$$P_{bf}^{cons}(t) = K_{p2}(T_{ref}(t) - T_m(t)) + K_{i2} \int_0^t (T_{ref}(t) - T_m(t)) d\tau \quad (5.27)$$

Avec  $K_{p2}$  et  $K_{i2}$  des paramètres de réglage.

### 5.2.3.3 (EOF)-énergie Bloc-batterie

Cette (EOF-énergie) contient les organes *batterie*, le convertisseur *DC/DC* et le bus électrique. Il possède un organe de pilotage *le contrôleur bloc batterie*.

Nous supposons que :

- la batterie peut être approximée par des cellules *résistance-capacité* (RC),
- le convertisseur est approximé par un modèle de premier ordre,
- la puissance de la batterie  $P_{bat}^f(t)$  et son courant de sortie  $I_{bat}(t)$  sont de même signe,
- la batterie se décharge si  $P_{bat}^f(t) < 0$ ,
- la batterie se recharge si  $P_{bat}^f(t) \geq 0$ ,
- le bus électrique répartie instantanément les flux d'énergie,
- le bus électrique ne possède pas d'accumulateur,
- le bus électrique a une tension fixe.

La modélisation de ces organes s'inspire des travaux académiques de [A. SCIARRETTA et GUZZELLA \(2007\)](#) et [MIRO PADOVANI et al. \(2013\)](#). Les valeurs des paramètres utilisés sont regroupées dans le Tableau 6, disponible en **annexe C**.



**Bus électrique** Le bus électrique est un organe de connexion pour les sous-systèmes de mission électrique. Il est partagé entre l'(EOF-énergie) électrogène et l'(EOF-énergie) bloc-batterie (voir Figure 5.3, section 5.2.3.4). Sa tension est constante, et notée  $V_{bus}$ . Il ne présente pas d'accumulation, la somme des intensités qui le traverse est donc nulle :

$$I_{dc}(t) + I_{gen}(t) = I_{mel}(t) + I_{hp}(t) \quad (5.28)$$

Avec  $I_{dc}(t)$  l'intensité traversant le convertisseur (5.35),  $I_{gen}(t)$  l'intensité de la génératrice (5.43),  $I_{mel}(t)$  l'intensité de la machine électrique (5.3), et  $I_{hp}(t)$  l'intensité du compresseur (5.20).

**La batterie** Une batterie est un élément non-linéaire très difficile à modéliser. Il est donc fréquent (A. SCARRETTA et GUZZELLA 2007; MIRO PADOVANI et al. 2013) de l'approximer par des cellules RC (cf. Fig. 5.5) assemblées en parallèle et en série. Le modèle dynamique de chaque cellule est donné par (5.29), avec  $Soc_{cell}(t)$  l'état de charge, et  $Q_{cell}$  la charge nominale de la cellule.

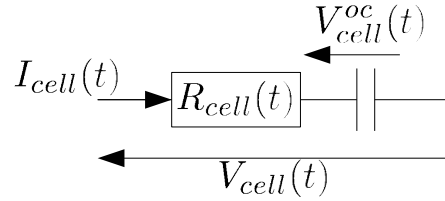


FIGURE 5.5 – Approximation de la batterie : cellule RC élémentaire

$$Soc_{cell}(t) = \frac{-1}{Q_{cell}} \int_0^t I_{cell}(\tau) d\tau \quad (5.29)$$

La résistance  $R_{cell}(t)$  et la tension  $V_{cell}^{oc}(t)$  sont déterminées à partir de cartographies dépendantes de la température  $T(t)$  et de l'état de charge  $Soc_{cell}(t)$ . Pour ce modèle on considérera une température constante  $T_{ext} = 30^\circ C$  (Fig. 5.6). On distinguera la résistance en phase de recharge, et la résistance en phase de décharge (Fig. 5.6a).

Le modèle de la cellule est déterminé par la loi de Kirchhoff

$$R_{cell}(t)I_{cell}(t) + V_{cell}^{oc}(t) = V_{cell}(t) \quad (5.30)$$

Finalement, on dimensionne la batterie comme un agencement de  $nb_{cell}^p$  cellules RC en parallèle et  $nb_{cell}^s$  cellule RC en série. On a alors :

$$I_{batt}(t) = nb_{cell}^p * I_{cell}(t), \quad V_{bat}^{oc} = nb_{cell}^s * V_{cell}^{oc}(t), \quad Q_{bat} = nb_{cell}^p * Q_{cell} \quad (5.31)$$

$$R_{bat}(t) = nb_{cell}^s * R_{cell}(t) \quad V_{bat}(t) = nb_{cell}^s * V_{cell}(t) \quad (5.32)$$

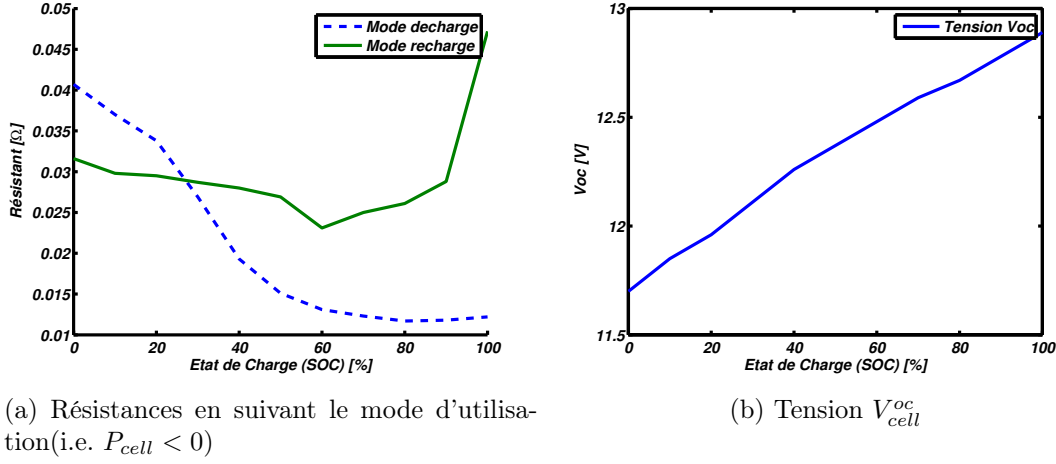


FIGURE 5.6 – Courbe d'évolution d'une cellule RC

Et à partir de (5.30) et (5.29) on déduit les équations du modèle batterie

$$I_{bat}(t) = \frac{1}{R_{bat}(t)} \left( V_{bat}(t) - V_{bat}^{oc}(t) \right) \quad (5.33)$$

$$Soc_{bat}(t) = \frac{-1}{Q_{bat}} \int_0^t I_{bat}(\tau) d\tau \quad (5.34)$$

**Convertisseur DC/DC** Notre objectif *in fine* n'étant pas le contrôle de la stabilité du réseau électrique, on adopte un modèle simplifié du convertisseur DC/DC, sans pertes ni accumulation. Celui-ci correspond à une fonction du premier ordre avec pour constante de temps  $\tau_{dc}$  :

$$\dot{I}_{dc}(t) = \frac{-1}{\tau_{dc}} I_{dc}(t) + I_{dc}^{cons}(t) \quad (5.35)$$

où  $I_{dc}^{cons}(t)$  est une consigne établie par le contrôleur du batterie (5.42).

On déduit du modèle dynamique la relation effort/flux entre le bus électrique et la batterie.

$$V_{bat}(t) = \frac{I_{dc}(t) V_{bus}}{I_{bat}(t)} \quad (5.36)$$

$$(5.37)$$

**Contrôleur Batterie** Le rôle du contrôleur est de calculer la consigne de courant du convertisseur  $I_{dc}^{cons}(t)$  pour produire une puissance  $P_{bus}^{cons}(t)$  demandée par le système énergétique, tout en s'adaptant aux contraintes de sécurité sur la batterie  $I_{bat}^{min}$  et  $I_{bat}^{max}$ .

## CHAPITRE 5. CONCEPTION DE LA STRATÉGIE D'UN CAMION FRIGORIFIQUE HYBRIDE SÉRIE

Pour réaliser ce contrôleur, on commence par déterminer l'expression de  $I_{bat}(t)$  en fonction de  $V_{bat}^{oc}(t)$ ,  $R_{bat}(t)$  et  $P_{bat}(t) = V_{bat}(t) I_{bat}(t)$ . A partir de (5.33), on déduit :

$$R_{bat}(t)I_{bat}^2(t) + V_{bat}^{oc}(t)I_{bat}(t) - P_{bat}(t) = 0 \quad (5.38)$$

Cette équation du second degré possède deux solutions. En croisant notre hypothèse sur le signe de  $I_{bat}(t)$  et  $P_{bat}(t)$ , et le bon sens physique, la solution retenue est :

$$I_{bat}(t) = \frac{-V_{bat}^{oc}(t) + \sqrt{V_{bat}^{oc^2}(t) + 4R_{bat}(t)P_{bat}(t)}}{2R_{bat}(t)} \quad (5.39)$$

on déduit des bornes sur l'amplitude de la puissance :

$$P_{bat}^{min}(t) = \frac{\left(2R_{bat}(t)I_{min} + V_{bat}^{oc}(t)\right)^2 - V_{bat}^{oc^2}(t)}{4R_{bat}(t)} \quad (5.40)$$

$$P_{bat}^{max}(t) = \frac{\left(2R_{bat}(t)I_{max} + V_{bat}^{oc}(t)\right)^2 - V_{bat}^{oc^2}(t)}{4R_{bat}(t)} \quad (5.41)$$

On choisit pour piloter le convertisseur (5.35) la loi de commande suivante :

$$I_{bus}^{cons}(t) = sat_{\Delta} \left( \frac{P_{bus}^{cons}(t)}{V_{bus}} \right) \quad (5.42)$$

Avec  $\Delta = \left( \frac{P_{bat}^{min}}{V_{bus}}, \frac{P_{bat}^{max}}{V_{bus}} \right)$  la puissance demandée par le contrôleur batterie.

### 5.2.3.4 (EOF)-énergie électrogène

Cette (EOF)-énergie contient les organes *moteur thermique*, *génératrice* et le bus électrique précédemment modélisé (5.28). Il contient un élément de pilotage le *contrôleur moteur*.

Nous supposons que :

- la génératrice est modélisée sans dynamique, ni pertes.

La modélisation de ces organes s'inspire des travaux académiques de Sébastien DELPRAT (2002) et KERMANI (2009). Les valeurs des paramètres utilisés sont regroupées dans le Tableau 7, disponible en **annexe C**.

**Génératrice** La génératrice est modélisée avec un rendement égale à 1, l'intensité transférée vers le bus électrique est noté  $I_{gen}(t)$ , et le couple imposé sur le moteur thermique  $\Gamma_{mth}(t)$ . On note  $K_{gen}$  le rapport de transformation constant de la génératrice entre l'énergie mécanique et électrique. Son modèle est :

$$I_{gen}(t) = K_{gen}\omega_{mth}(t) \quad (5.43)$$

$$\Gamma_{mth}(t) = K_{gen}V_{bus}(t) \quad (5.44)$$

Avec  $\omega_{th}(t)$  la vitesse angulaire du moteur thermique et  $V_{bus}(t)$  la tension du bus électrique.

Par la suite, nous supposons la tension du bus constante. En conséquence, le couple de la génératrice sera lui aussi constant, et noté  $\Gamma_{mth}$ .

**Moteur thermique** Le moteur est modélisé comme un système dynamique de premier ordre dont la sortie est son régime  $\omega_{mth}(t)$ .

$$\dot{\omega}_{mth}(t) = \frac{-1}{\tau_{mth}}\omega_{mth}(t) + \frac{1}{\tau_{mth}}\omega_{mth}^{cons}(t) \quad (5.45)$$

Avec  $\omega_{mth}^{cons}(t)$  la consigne du contrôleur (Fig. 5.8b).

Sa consommation en carburant en  $g/s$  se détermine à partir d'une cartographie indexée sur le régime  $\omega_{mth}(t)$  en  $rad/s$  et le couple  $\Gamma_{mth}^{cons}(t)$  (5.44) en  $N.m$  (Fig. 5.7a), que nous représenterons mathématiquement par la relation :

$$q_{carbu}((\omega_{gen}, \Gamma_{gen})) \quad (5.46)$$

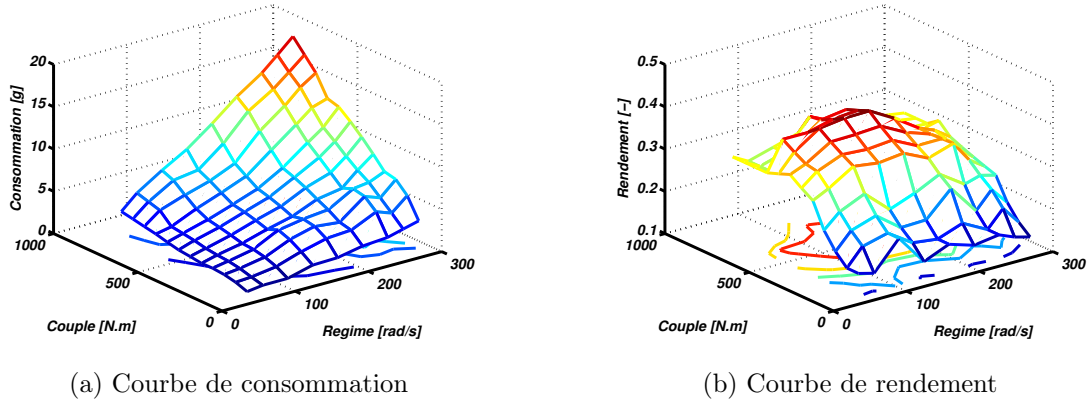


FIGURE 5.7 – Cartographies du moteur thermique

A partir de ces valeurs, on peut estimer le rendement du moteur (Fig. 5.7b) grâce à la relation (5.47), et en connaissant la valeur du pouvoir calorifique de combustion  $LHV$  (*Low Heat Value*). Dans le cas présent, les résultats sont obtenus pour  $LHV = 44 \times 10^3 [Jg^{-1}]$ .

$$\eta_{mth}(\omega_{gen}, \Gamma_{gen}) = LHV \cdot \frac{q_{carbu}(\omega_{gen}, \Gamma_{gen})}{\omega_{gen} \cdot \Gamma_{gen}} \quad (5.47)$$

**Contrôle Moteur-Génératrice** On souhaite réaliser le contrôle du moteur et de sa génératrice à partir d'un besoin en puissance. Pour cela, on utilise la cartographie de rendement (Fig. 5.7b) sur laquelle on détermine les points de fonctionnement optimaux.

## CHAPITRE 5. CONCEPTION DE LA STRATÉGIE D'UN CAMION FRIGORIFIQUE HYBRIDE SÉRIE

Ces derniers sont présentés sous la forme d'une courbe (Fig. 5.8a) avec le régime en abscisse. Notons tout d'abord que la fonction est strictement monotone sur la plage de régime  $[0 \text{ rad/s}; 209 \text{ rad/s}]$ , et décroît au-delà. Par simplification, l'usage moteur sera bridé à  $209 \text{ rad/s}$ .

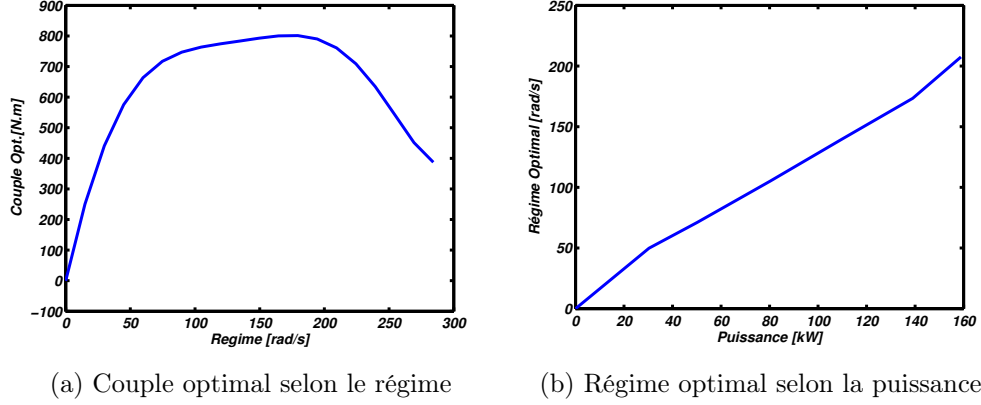


FIGURE 5.8 – Cartographie des points de fonctionnement optimaux du moteur thermique

Dernière étape, on dérive des points de fonctionnement optimaux une relation entre la puissance désirée et le régime moteur optimal (Fig. 5.8b). Cette courbe définit le comportement du contrôleur, et permet de calculer  $\omega_{mth}^{cons}(t)$ . Mathématiquement, on la représente par

$$\omega_{mth}^{cons}(t) = f_{mth}^*(P_{mth}^{cons}(t)) \quad (5.48)$$

Avec  $P_{mth}^{cons}(t)$  la puissance demandée par la stratégie énergétique (cf. **section 5.3.2.1**).

On en déduit du couple constant de la génératrice (5.44), de la cartographie de consommation (5.46) et du contrôleur moteur (5.48) la consommation de carburant selon la puissance :

$$q_{carbu}^*(t) = q_{ress}(P_{mth}^{cons}(t)) \quad (5.49)$$

### 5.3 Formalisation Modulaire du Système Énergétique

Les organes et les solutions de contrôle que nous venons de décrire sont agencés sous le formalisme modulaire défini dans le **chapitre 2**, et résumé dans l'**annexe A**.

La description débute par le client mobilité (indice *mob* dans les équations) puis le client conditionnement (indice *cond*), la source bloc-batterie (indice *bb*) et la source électrogène (indice *eg*).

Enfin, l'élément central, le module d'interconnexion énergétique (a.k.a. le nœud) est posé.

#### 5.3.1 Les Clients

Les clients sont composés d'une interface de communication et d'un jeu de configurations déduits de leurs sous-systèmes de mission. Ils reçoivent une disponibilité et émettent un besoin.

Pour rappel (*définition 2.10*), le besoin concatène les informations suivantes :

$$(b)_{c_i}^m := \begin{cases} P_{c_i}^{max}(t) & : \text{Puissance maximale échangeable} \\ P_{c_i}^{min}(t) & : \text{Puissance minimale échangeable} \\ P_{c_i}^b(t) & : \text{Puissance Demandée} \\ S_{c_i}(P_{c_i}^e(t)) & : \text{Satisfaction du client} \end{cases} \quad (5.50)$$

Dans le cas d'un contrôle par configuration,  $P_{c_i}^b(t)$  ne décrit plus un signal vectoriel mais un arbre de possibilité noté  $\mathcal{P}_{c_i}$ .

##### 5.3.1.1 Client Mobilité

Le client mobilité est un module actif constitué des différents organes précédemment modélisés (**section 5.2.3.1**), d'un jeu de configuration  $\mathcal{C}_{mob}$  et d'une interface de communication.

On définit  $P_{mob}^c(t)$  la puissance électrique consommée par le client mobilité avec :

$$P_{mob}^c(t) = I_{mel}(t) \times V_{bus}(t) \quad (5.51)$$

et,

$$v_{veh}(t) = f_{mob}(P_{mob}^c(t)) \quad (5.52)$$

la relation entre la puissance consommée et la vitesse du véhicule.

Celle-ci est estimée par inversion des modèles du sous-système mobilité, en négligeant l'action des freins, en linéarisant les coefficients aérodynamiques, et en inversant la cartographie de rendement selon la méthode décrite pour le contrôle moteur-génératrice (Fig. 5.8a).

## CHAPITRE 5. CONCEPTION DE LA STRATÉGIE D'UN CAMION FRIGORIFIQUE HYBRIDE SÉRIE

On peut alors déduire un indice de satisfaction du service de mobilité  $Q_{mob}$ , en fonction de la puissance consommée tel que :

$$Q_{mob}(P_{mob}^c(t)) = \int_0^t \left( v_{veh}(\tau) - v_{ref}(\tau) \right)^2 d\tau \quad (5.53)$$

$$= \int_0^t \left( f_{mob}(P_{mob}^c(\tau)) - v_{ref}(\tau) \right)^2 d\tau \quad (5.54)$$

Où  $v_{ref}(t)$  est la trajectoire de référence déterminée par la *configuration* de la mobilité (5.55).

**Configurations** Les configurations s'interfaçent avec le *conducteur virtuel* (5.16)(5.17) au travers des signaux de référence  $v_{ref}(t)$  (5.55), et  $P_{mel}^{rest}(t)$ , respectivement la vitesse de référence et une restriction sur la puissance consommée.

Plusieurs travaux traitent l'optimisation du signal  $v_{ref}(t)$  en temps réel selon les conditions de route, le confort, ou bien l'énergie disponible (LUU, NOUVELIERE et MAMMAR 2010 ; DIB et al. 2014).

Dans cette étude, le profil est déterministe et indexé selon la distance (Fig. 5.12). La cartographie équivalente est modélisée par la fonction  $f_{route}$  tel que :

$$v_{veh}(t) = f_{route}(x_{veh}(t)) \quad (5.55)$$

La construction de configuration non-similaire est réalisée à partir de la proposition 4.8, c'est-à-dire en modulant l'un des signaux de référence, ici  $P_{mel}^{rest}(t)$ .

On synthétise  $n_{C_{mob}} = 4$  configurations non similaires et ordonnées par coût énergétique et satisfaction décroissants, en diminuant progressivement la puissance de restriction. Ces données sont mathématiquement désignées par  $\mathcal{C}_{mob} = \{C_{mob}^n, C_{mob}^2, C_{mob}^1, C_{mob}^0\}$  et résumées dans le Tableau 5.1 avec  $P_{mel}^{max}$  la limite physique de la machine électrique.

Configuration	$P_{mel}^{rest}(t)$	Contrôleur	Vitesse de référence
$C_{mob}^n$ (nominale)	$P_{mel}^{max}$	(5.16)(5.17)	(5.55)
$C_{mob}^2$	60% $P_{mel}^{max}$	(5.16)(5.17)	(5.55)
$C_{mob}^1$	40% $P_{mel}^{max}$	(5.16)(5.17)	(5.55)
$C_{mob}^0$	20% $P_{mel}^{max}$	(5.16)(5.17)	(5.55)

TABLE 5.1 – Jeu de configurations pour la mobilité

On pose  $\Lambda_{mob} = \left( \{\lambda_{mob_i}\}_{i=1;N_a} \mid \lambda_{mob_i} \in \mathcal{C}_{mob} \right)$  l'ensemble des séquences de configurations possibles pour un horizon  $[t_0, t_0 + T_p]$ , avec  $N_a$  le nombre de séquences et  $\lambda_{mob} \in \Lambda_{mob}$  une séquence particulière.

On notera  $\lambda_{mob}^n = \{\mathcal{C}_{mob}^n\}_{i=1;N_\lambda}$  la séquence de configuration nominale, et  $\lambda_{mob}^0 = \{\mathcal{C}_{mob}^0\}_{i=1;N_\lambda}$  la séquence la plus dégradée.

**Puissance demandée** On remarque que pour une séquence  $\lambda_{mob} \in \Lambda$  et une mesure de la position et de la vitesse du véhicule  $(x_{veh}(t_0), v_{veh}(t_0))$  données, on peut déduire par simulation du sous-système mobilité la puissance qui sera consommée par la mobilité sur l'intervalle  $[t_0, t_0 + T_p]$ .

Notons  $P_{mob}^c((t|t_0), \lambda_{mob})$  un tel signal, et :

$$\mathcal{P}_{mob} = \left\{ P_{mob}^c(\lambda_{mob}, (t|t_0)) : \lambda_{mob} \in \Lambda_{mob} \right\} \quad (5.56)$$

l'arbre définissant l'ensemble des profils de puissance possibles suivant les choix de configuration. Cette arbre est identifié comme le signal de puissance demandé par le client mobilité et transmis au nœud par le signal de besoin.

**Satisfaction** A partir d'un changement de variable, l'indice de satisfaction (5.54) est réécrit comme une fonction dépendante de la séquence  $\lambda_{mob} : Q'_{mob}(\lambda_{mob}, (t|t_0))$ .

La satisfaction du client mobilité se déduit comme le ratio entre l'indice de satisfaction pour une séquence  $\lambda_{mob}$  quelconque, et l'indice de satisfaction atteint par la séquence nominale  $\lambda_{mob}^n$  :

$$S_{mob}(\lambda_{mob}, (t|t_0)) = \frac{Q'_{mob}(\lambda_{mob}, (t|t_0))}{Q'_{mob}(\lambda_{mob}^n, (t|t_0))} \quad (5.57)$$

A partir cette relation, et de l'arbre  $\mathcal{P}_{mob}$ , on construit un arbre de la satisfaction  $\mathcal{S}_{mob}$ , transmis au nœud par le signal de besoin.

**Amplitudes de puissance** Enfin, la puissance maximale et minimale de la mobilité découle directement des limitations physiques de la machine électrique, i.e.  $P_{mob}^{max}(t) = P_{mel}^{max}$  et  $P_{mob}^{min}(t) = P_{mel}^{min}$ .

### 5.3.1.2 Client Conditionnement

Le conditionnement est un client actif constitué des organes précédemment modélisés (section 5.2.3.2), d'un jeu de configurations  $\mathcal{C}_{cond}$  et d'une interface de communication.

On définit  $P_{cond}^c(t)$  la puissance électrique consommée par le client conditionnement comme la puissance consommée par la boucle de froid :

$$P_{cond}^c(t) = P_{hp}(t) \quad (5.58)$$

et, :

$$T_m(t) = f_{cond}(P_{cond}^c(t), \epsilon_{porte}(t)) \quad (5.59)$$

la relation entre la puissance consommée, l'état de la porte  $\epsilon_{porte}$  (5.23) et la température intérieure de la marchandise  $T_m(t)$ .

La fonction  $f_{cond}$  est estimée par inversion des modèles du sous-système conditionnement.



## CHAPITRE 5. CONCEPTION DE LA STRATÉGIE D'UN CAMION FRIGORIFIQUE HYBRIDE SÉRIE

On peut alors déduire un indice de satisfaction du service de conditionnement  $Q_{cond}$ , en fonction de la puissance consommée, tel que :

$$Q_{cond}(t) = \int_0^t \left( T_m(\tau) - T_{ref}(\tau) \right)^2 d\tau \quad (5.60)$$

$$= \int_0^t \left( f_{cond}(P_{cond}^c(t), \epsilon_{porte}(t)) - T_{ref}(\tau) \right)^2 d\tau \quad (5.61)$$

Où  $T_{ref}(t)$  est une trajectoire de référence pour le conditionnement des marchandises, déterminée par la *configuration*.

**Configurations** Les configurations s'interfaçent avec le contrôleur thermostat (5.27) au travers du signal de référence  $T_{ref}(t)$ .

Là encore, plusieurs étude s'intéressent à l'optimisation d'un tel signal, principalement dans le domaine de l'habitation (MOROŞAN et al. 2010 ; LAMOUDI 2012). Ici, nous nous supposons une température constante  $T_{ref}(t) = T_{ref}$  définie par un cahier des charges.

On synthétise à nouveau un jeu de configurations non-similaires et ordonnés par coût énergétique et satisfaction croissants selon la proposition 4.8.

Celui-ci contient  $n_{cond} = 4$  configurations obtenues en augmentant progressivement la consigne de température  $T_{ref}(t)$  transmise au thermostat. Ces données sont mathématiquement désignées par  $\mathcal{C}_{cond} = \{C_{cond}^0, C_{cond}^1, C_{cond}^2\}$  et résumées dans le Tableau 5.2.

Configuration	Contrôleur	$T_{ref}(t)$
$C_{cond}^n$ (nominale)	(5.27)	$T_{ref}$
$C_{cond}^2$	(5.27)	$T_{ref} - 2^\circ C$
$C_{cond}^1$	(5.27)	$T_{ref} - 4^\circ C$
$C_{cond}^0$	(5.27)	$T_{ref} - 6^\circ C$

TABLE 5.2 – Jeu de configurations pour le conditionnement

On pose  $\Lambda_{cond} = \left( \{\lambda_{cond_i}\}_{\llbracket 1; N_a \rrbracket} | \lambda_{cond_i} \in \mathcal{C}_{cond} \right)$  l'ensemble des séquences de configurations possibles, avec  $N_a$  le nombre de séquences et  $\lambda_{cond} \in \Lambda_{cond}$  une séquence particulière, tous les deux définis pour un intervalle  $[t_0, t_0 + T_p]$  fixé.

De même que précédemment, on notera  $\lambda_{cond}^n = \{\mathcal{C}_{cond}^n\}_{\llbracket 1; N_\lambda \rrbracket}$  la séquence de configuration nominale, et  $\lambda_{cond}^0 = \{\mathcal{C}_{cond}^0\}_{\llbracket 1; N_\lambda \rrbracket}$  la séquence la plus dégradée.

**Puissance demandée** Sachant une séquence de configurations  $\lambda_{cond} \in \Lambda$ , une mesure de la température  $T_m(t_0)$  et de l'état de la porte  $\epsilon_{porte}(t_0)$  donnée, on peut déduire

par simulation du sous-système conditionnement la puissance qui sera consommée sur l'intervalle  $[t_0, t_0 + T_p]$ .

Notons  $P_{cond}^c((t|t_0), \lambda_{cond})$  un tel signal, et

$$\mathcal{P}_{cond} = \left\{ P_{cond}^c((t|t_0), \lambda_{cond}) : \lambda_{mob} \in \Lambda_{mob} \right\} \quad (5.62)$$

l'arbre définissant l'ensemble des profils de puissance possibles suivant les choix de configuration. Cette arbre est identifié comme la puissance demandée par le client conditionnement et transmise par le biais du signal de besoin au nœud.

**Satisfaction** A partir d'un changement de variable, l'indice de satisfaction (5.59) est réécrit comme une fonction  $Q'_{cond}$  dépendante de la séquence  $\lambda_{cond}$  :

La satisfaction du client conditionnement se déduit comme le ratio entre l'indice de satisfaction pour une séquence  $\lambda_{cond}$  quelconque, et l'indice de satisfaction atteint par la séquence  $\lambda_{cond}^n$  :

$$S_{cond}((t|t_0), \lambda_{cond}) = \frac{Q'_{cond}((t|t_0), \lambda_{cond})}{Q'_{cond}((t|t_0), \lambda_{cond}^n)} \quad (5.63)$$

A partir cette relation, et de l'arbre  $\mathcal{P}_{cond}$ , on construit un arbre de la satisfaction  $\mathcal{S}_{cond}$ , transmis par le signal de besoin.

**Amplitudes de puissance** Enfin, la puissance maximale et minimale de la mobilité découle directement des limitations physiques de la boucle de froid, i.e.  $P_{cond}^{max}(t) = P_{hp}^{max}$  et  $P_{cond}^{min}(t) = P_{hp}^{min}$ .

### 5.3.2 Les Sources

Pour rappel, les sources sont conçues sur la base de leur (EOF-énergie) et d'une interface de communication (voir **chapitre 2**).

Leur disponibilité concatène les informations suivantes (*Définition 2.12*) :

$$(d)_{s_j}^m := \begin{cases} P_{s_j}^{max}(t) & : \text{Puissance maximale échangeable} \\ P_{s_j}^{min}(t) & : \text{Puissance minimale échangeable} \\ E_{s_j}^d(t_0) & : \text{Énergie Disponible sur l'horizon } [t_0, t_0 + T_p] \\ Ec_{s_j}(P_{s_j}^e(t)) & : \text{Coût de l'énergie,} \end{cases} \quad (5.64)$$

#### 5.3.2.1 Source Bloc-Batterie

La stratégie énergétique de la source bloc-batterie s'interface entre le signal de besoin  $(b)_N^{bb}$  transmis par le nœud (5.74), et la consigne de puissance  $P_{bat}^{cons}(t)$  attendue par le

contrôleur batterie (5.40).

Ici nous choisissons de transmettre directement la puissance demandée par le nœud  $P_N^b(t)$ , et laissé le contrôleur gérer les saturations, soit  $P_{bat}^{cons}(t) = P_N^b(t)$ .

**Energie disponible** Obtenir une mesure fine de l'énergie stockée dans la batterie est relativement compliqué du fait des non-linéarités. Nous nous appuyons sur l'état de charge  $Soc(t)$  (5.34), la capacité nominale  $Q_{bat}$  et un état minimal  $Soc_{min}$  équivalent à 40% de la charge totale.

$$E_{bb}^d(t_0) = Q_{bat} \cdot (Soc(t) - Soc_{min}) \quad (5.65)$$

**Coût de l'énergie** La source bloc-batterie est pénalisée par un coût constant  $p_{bb}$ . La fonction coût de l'énergie s'écrit alors :

$$Ec_{bb}(P_{bb}^f(t)) = p_{bb} \cdot (P_{bb}^f(t))^2 \quad (5.66)$$

**Amplitude de puissance** Enfin, les amplitudes de puissances sont définies à partir des limites de puissance de la batterie (5.40), soit :

$$P_{bb}^{min}(t) = P_{bat}^{min}(t) \quad (5.67)$$

$$P_{bb}^{max}(t) = P_{bat}^{max}(t) \quad (5.68)$$

### 5.3.2.2 Source Électrogène

La stratégie énergétique de la source électrogène s'interface entre le signal de besoin  $(b)_N^{eg}$  transmis par le nœud (5.74), et la consigne de puissance  $P_{mth}^{cons}(t)$  attendue par le contrôleur moteur (5.48).

Ici nous choisissons de transmettre directement la puissance demandée par le nœud  $P_N^b(t)$ , et laissé le contrôleur gérer les saturations, soit  $P_{mth}^{cons}(t) = P_N^b(t)$ .

**Énergie disponible** Notons  $\bar{\eta}_{mth}$ , le rendement moyen du moteur thermique, calculé à partir de la cartographie de rendement (Fig. 5.7b).

On déduit de la consommation optimisée  $q_{carbu}^*(t)$  (5.49), du pouvoir calorifique de combustion  $LVH$  et de  $\bar{\eta}_{mth}$ , l'énergie disponible dans la source électrogène :

$$E_{eg}^d(t_0) = \bar{\eta}_{mth} \cdot LVH \cdot \left( q_{carbu}^0 - \int_0^{t_0} q_{carbu}^*(P_{mth}^{cons}(\tau d\tau)) \right) \quad (5.69)$$

Avec  $q_{carbu}^0$  le carburant initialement présent.

**Coût de l'énergie** La source électrogène est pénalisée par un coût constant  $p_{eg}$ . La fonction coût de l'énergie s'écrit alors :

$$Ec_{eg}(P_{eg}^f(t)) = p_{eg} \cdot (P_{eg}^f(t))^2 \quad (5.70)$$

**Amplitude de puissance** Enfin, les amplitudes de puissances sont calculées d'après les limites physiques du générateur :

$$P_{eg}^{min}(t) = P_{gen}^{min} \quad (5.71)$$

$$P_{eg}^{max}(t) = P_{gen}^{max} \quad (5.72)$$

### 5.3.3 Le Nœud Global

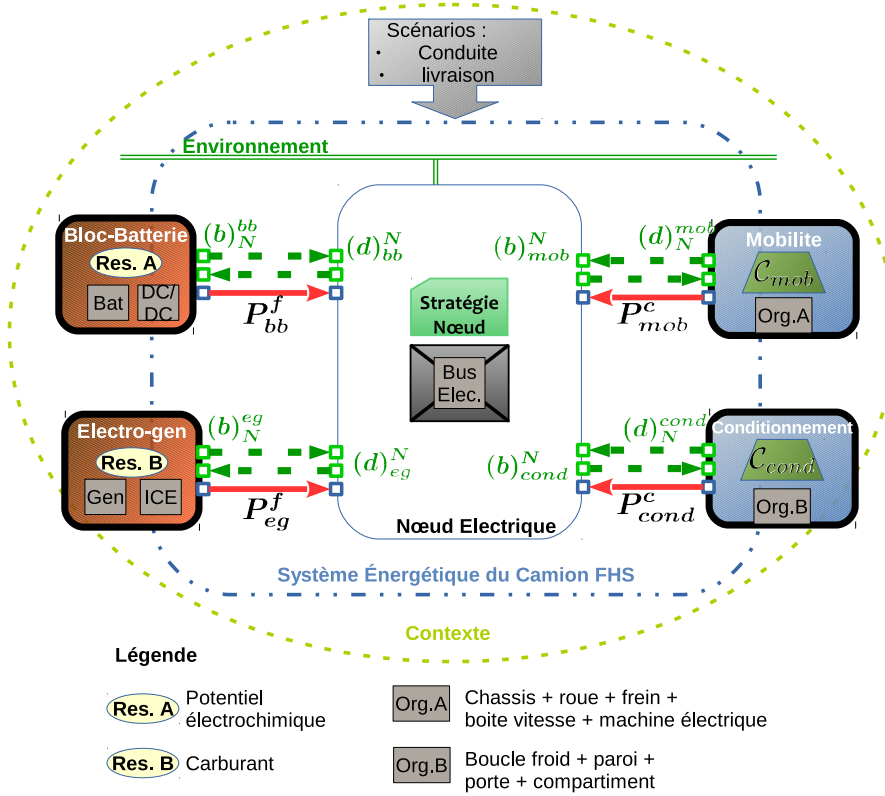


FIGURE 5.9 – Vision Modulaire du Camion Frigorifique avec Hybridation Série

Le nœud décrit la jonction entre les deux sources actives et les deux clients actifs. Sa structure organique dérive du modèle du bus électrique (5.28). Sachant que l'on a supposé ce dernier sans pertes ni accumulation, le modèle de la structure nœud est dans ce cas relativement trivial :

$$\Gamma_N : 0 = P_{bb}^f(t) + P_{eg}^f(t) - P_{mob}^c(t) - P_{cond}^c(t) \quad (5.73)$$

La stratégie énergétique est modélisée par :

$$\left[ (b)_N^{bb}, (b)_N^{eg}, (d)_N^{mob}, (d)_N^{cond} \right] = \Xi \left( (d)_N^{bb}, (d)_N^{eg}, (b)_N^{mob}, (b)_N^{cond} \right) \quad (5.74)$$

## CHAPITRE 5. CONCEPTION DE LA STRATÉGIE D'UN CAMION FRIGORIFIQUE HYBRIDE SÉRIE

Avec  $(d)_{s_j}^N$  et  $(b)_{c_i}^N$  les signaux de disponibilité et de besoin émis respectivement par les sources et les clients ;  $(b)_N^{s_j}$  et  $(d)_N^{c_i}$  les signaux de besoin et de disponibilité calculés par le nœud et transmis aux modules.

Comme il a été vu dans le **chapitre 3**, la conception de sa stratégie repose sur la construction des signaux de communication, et sur la résolution du problème d'optimisation  $\mathcal{P}'_N$  (ou son alternative multi-objectifs  $\mathcal{P}_N$ ).

Pour instancier ce problème, il est nécessaire de connaître un modèle dynamiques des sources et des clients (contraintes (3.4),(3.5)), et un modèle des stockages (contrainte (3.13)).

Dans le cas présent, la source électrogène est modélisée selon la dynamique de son moteur thermique (5.45), soit un premier ordre de constante de temps  $\tau_{mth}$ . De même, la source bloc batterie est modélisée selon la dynamique du convertisseur (5.35) soit un premier ordre de constante de temps  $\tau_{dc}$ . La dynamique du bloc-batterie sera considérée comme plus rapide que la dynamique de la source électrogène.

$$P_{bb}^f(t) = f_{bb}(\nu_{bb}(t)) := \begin{cases} \dot{x}_{bb}(t) &= \frac{-1}{\tau_{dc}}x_{bb}(t) + \frac{1}{\tau_{dc}}\nu_{bb}(t) \\ P_{bb}^f(t) &= x_{bb}(t) \end{cases} \quad (5.75)$$

$$P_{eg}^f(t) = f_{eg}(\nu_{eg}(t)) := \begin{cases} \dot{x}_{eg}(t) &= \frac{-1}{\tau_{mth}}x_{eg}(t) + \frac{1}{\tau_{mth}}\nu_{eg}(t) \\ P_{eg}^f(t) &= x_{eg}(t) \end{cases} \quad (5.76)$$

La dynamique discrète des modules clients est modélisée au travers des deux arbres  $\mathcal{P}_{mob}$  et  $\mathcal{P}_{cond}$ . La puissance consommée est obtenue par le parcours de l'arbre selon une séquence  $\lambda$  donnée. Ce procédé est formulé par les relations (5.77) qui remplacent les modèles dynamiques (3.5)

$$P_{mob}^c(t) = \tilde{g}_{mob}((t|t_0), \lambda_{mob}) \quad P_{cond}^c(t) = \tilde{g}_{cond}((t|t_0), \lambda_{cond}) \quad (5.77)$$

L'évolution de l'énergie stockée dans les sources est représentée par un intégrateur, soit :

$$E_{bb}^f(t) = f_{stk_{bb}}(\nu_{bb}(t)) := \begin{cases} \dot{x}_{stk_{bb}}(t) &= \nu_{bb}(t) \\ E_{bb}^f(t) &= x_{stk_{bb}}(t) \end{cases} \quad (5.78)$$

et,

$$E_{eg}^f(t) = f_{stk_{eg}}(\nu_{eg}(t)) := \begin{cases} \dot{x}_{stk_{eg}}(t) &= \nu_{eg}(t) \\ E_{eg}^f(t) &= x_{stk_{eg}}(t) \end{cases} \quad (5.79)$$

A partir de ces modèles, et sur la base des coûts énergétiques de la source bloc-batterie (5.66) (5.66), de la source électrogène (5.70), et de la satisfaction du client mobilité (5.57), et du client conditionnement (5.60), on déduit l'expression complète du problème  $\mathcal{P}'_N$  adressé au cas du camion FHS.

**Problème  $\mathcal{P}'_N$  pour le camion FHS**

$$\begin{aligned} \min_{\substack{\nu_{bb}(t), \nu_{eg}(t), \\ \lambda_{mob} \in \Lambda_{mob}, \\ \lambda_{cond} \in \Lambda_{cond}}} \int_{t_0}^{t_0+T_p} \left( \gamma_1 \left( \alpha_1 \bar{S}_{mob}(\lambda_{mob}, (t|t_0)) + \alpha_2 \bar{S}_{cond}(\lambda_{cond}, (t|t_0)) \right) \right. \\ \left. + \gamma_2 \left( \beta_1 p_{bb} \cdot (P_{bb}^f(t))^2 + \beta_2 p_{eg} \cdot (P_{eg}^f(t))^2 \right) \right) \quad (5.80) \end{aligned}$$

sous les contraintes

$$P_{bb}^f(t) = f_{bb}(\nu_{bb}(t)) \quad (5.80a)$$

$$P_{eg}^f(t) = f_{eg}(\nu_{eg}(t)) \quad (5.80b)$$

$$P_{mob}^c = \tilde{g}_{mob}((t|t_0), \lambda_{mob}) \quad (5.80c)$$

$$P_{cond}^c = \tilde{g}_{cond}((t|t_0), \lambda_{cond}) \quad (5.80d)$$

$$E_{bb}^f(t) = f_{stk_{bb}}(\nu_{bb}(t)) \quad (5.80e)$$

$$E_{eg}^f(t) = f_{stk_{eg}}(\nu_{eg}(t)) \quad (5.80f)$$

$$P_{bb}^c(t) \in \mathcal{P}_{bb}, \quad (5.80g)$$

$$P_{eg}^c(t) \in \mathcal{P}_{eg}, \quad (5.80h)$$

$$P_{mob}^c(t) \in \mathcal{P}_{mob}, \quad (5.80i)$$

$$P_{cond}^c(t) \in \mathcal{P}_{cond}, \quad (5.80j)$$

$$E_{bb}(t) \in \mathcal{E}_{bb}^d, \quad (5.80k)$$

$$E_{eg}(t) \in \mathcal{E}_{eg}^d, \quad (5.80l)$$

Les solutions optimales de ce problème sont notées :

$$\nu_c(t) = \{\nu_{mob}^*(t), \nu_{cond}^*(t)\}, \quad \nu_s(t) = \{\nu_{bb}^*(t), \nu_{eg}^*(t)\}, \quad (5.81)$$

Elles sont transmises vers le second niveau de la stratégie pour construire génériquement les signaux de communication par application des définitions de la **section 3.3.3**.

La résolution du problème  $\mathcal{P}'_N$  associé au camion est traitée par la décomposition introduite à la **section 3.7**, et grâce aux solutions algorithmiques du **chapitre 4**.

## 5.4 Conception de la Stratégie Énergétique

La méthodologie de décomposition introduite à la **section 3.7** est appliquée au cas du camion FHS. Le nœud général est décomposé selon un nœud d'hybridation, un nœud d'accumulation et un nœud de concurrence, selon la figure 5.10.

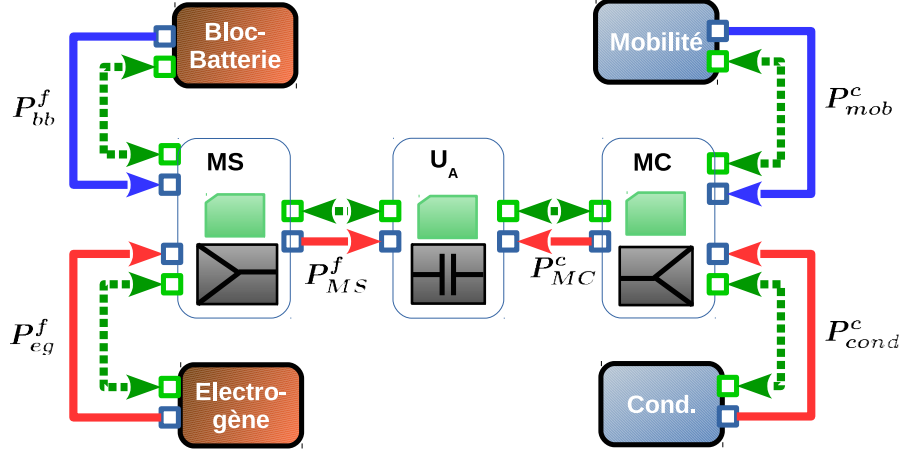


FIGURE 5.10 – Décomposition modulaire du Camion Frigorifique avec Hybridation Série

#### 5.4.1 Stratégie Nœud d'Accumulation

Le nœud d'accumulation est le module d'interconnexion situé entre les nœud d'hybridation et de concurrence. Son existence est justifiée par les règles de causalité fixées pour les autres nœuds.

A partir de la définition précédemment donnée (section 3.4.3) on déduit le modèle de sa structure et de sa stratégie :

$$x_{U_a}(t) = P_{MS}^f(t) + P_{MC}^c(t) \quad (5.82)$$

$$\left( (b)_{U_a}^{MS}(t), (d)_{U_a}^{MC}(t) \right) = \Xi_{U_a} \left( (d)_{MS}^{U_a}, (b)_{MC}^{U_a} \right) \quad (5.83)$$

Avec  $x_{U_a}(t)$  l'accumulation d'énergie,  $P_{MS}^f(t)$  la puissance en sortie du nœud d'hybridation,  $P_{MC}^c(t)$  la puissance en sortie du nœud de concurrence,  $(b)_{MC}^{U_a}$  le besoin et  $(d)_{MS}^{U_a}$  la disponibilité, respectivement émis par le nœud d'hybridation et le nœud de concurrence.

La formulation explicite de sa stratégie a déjà été discutée (voir (3.51)). En supposant les nœuds d'hybridation et de concurrence modélisés sans dynamique, on peut écrire la relation directe

$$\nu_{MS}^*(t) = P_{MC}^b(t) + x_{U_a}(t) \quad (5.84)$$

On en déduit alors la puissance demandée à la source :

$$P_{U_a}^b(t) = \nu_{MS}^*(t) \quad (5.85)$$

Et de là, la valeur de ses signaux de communications :

$$(b)_{U_a}^{MS} := \left\{ \begin{array}{ll} P_{U_a}^{max}(t) & = P_{MC}^{max}(t), \\ P_{U_a}^{min}(t) & = P_{MC}^{min}(t) \\ P_{U_a}^b(t) & = \nu_{MS}^*(t), \\ \bar{S}_{U_a}(P_{MS}^f(t)) & = z_{sat_{U_a}}^2(t) \end{array} \right\} \quad (5.86)$$

avec

$$\dot{z}_{sat_{U_a}}(t) = (P_{MS}^f(t) - P_{U_a}^b(t)) \quad (5.87)$$

Et,

$$(d)_{U_a}^{MC} := \left\{ \begin{array}{ll} P_{U_a}^{max}(t) & = P_{MC}^{max}(t), \\ P_{U_a}^{min}(t) & = P_{MC}^{min}(t), \\ E_{U_a}^d(t_0) & = E_{MS}^d(t_0) + x_{U_a}(t) - \int_{t_0}^{t_0+T_p} P_{MC}^b(t) dt, \\ Ec_{U_a}(P_{MC}^c(t)) & = \left( \frac{Ec_{MS}(\nu_{U_a}^*(t))}{\nu_{U_a}^*(t)} \right) (P_{MC}^c)^2(t) \end{array} \right\} \quad (5.88)$$

### 5.4.2 Stratégie Nœud d'Hybridation

Le nœud d'hybridation est le module d'interconnexion situé entre les modules sources et le nœud d'accumulation. Sa modélisation dans le cas général est défini à la **section 3.5**. Il contient deux relations représentant sa structure interne et sa stratégie :

$$P_{MS}^f(t) = P_{bat}^f(t) + P_{eg}^f(t) \quad (5.89)$$

$$\left( (b)_{MS}^{bb} (b)_{MS}^{eg}, (d)_{MS}^{U_a} \right) = \Xi_{MS} \left( (d)_{bb}^{MS}, (d)_{eg}^{MS}, (b)_{U_a}^{MS} \right) \quad (5.90)$$

où  $P_{bat}^f(t)$  désigne la puissance en sortie de la source batterie,  $P_{eg}^f(t)$  désigne la puissance de la source électrogène,  $(b)_{U_a}^{MS}$  est le besoin émis par le nœud d'accumulation, et  $(d)_{bb}^{MS}$  et  $(d)_{eg}^{MS}$  les disponibilités respectivement émises par la source bloc-batterie et la source électrogène.



**Problème  $\mathcal{P}_{MS}$  pour le camion FHS**

$$\min_{\nu_{bb}(t), \nu_{eg}(t)} \int_{t_0}^{t_0+T_p} \left( \gamma_1 \alpha_1 z_{sat_{U_a}}^2(t) + \gamma_2 \left( \beta_1 p_{bb} \cdot (P_{bb}^f(t))^2 + \beta_2 p_{eg} \cdot (P_{eg}^f(t))^2 \right) \right) dt \quad (5.91)$$

sous les contraintes :

$$\dot{z}_{sat_{U_a}}(t) = \frac{1}{P_{U_a}^b(t)} (P_{MS}^f(t) - P_{U_a}^b(t)) \quad (5.91a)$$

$$P_{bb}^f(t) = f_{bb}(\nu_{bb}(t)) \quad (5.91b)$$

$$P_{eg}^f(t) = f_{eg}(\nu_{eg}(t)) \quad (5.91c)$$

$$E_{bb}^f(t) = f_{stk_{bb}}(\nu_{bb}(t)) \quad (5.91d)$$

$$E_{eg}^f(t) = f_{stk_{eg}}(\nu_{eg}(t)) \quad (5.91e)$$

$$P_{U_a}^f(t) = P_{bb}^f(t) + P_{eg}^f(t), \quad (5.91f)$$

$$P_{bb}^f(t) \in \mathcal{P}_{bb}, \quad (5.91g)$$

$$P_{eg}^f(t) \in \mathcal{P}_{eg}, \quad (5.91h)$$

$$P_{U_a}^f(t) \in \mathcal{P}_{U_a}, \quad (5.91i)$$

$$E_{bb}(t) \in \mathcal{E}_{bb}^d, \quad (5.91j)$$

$$E_{eg}(t) \in \mathcal{E}_{eg}^d, \quad (5.91k)$$

Sa stratégie consiste en premier lieu à résoudre un problème d'optimisation de type  $\mathcal{P}_{MS}$ .

À partir des solutions optimales  $\nu_{eg}^*(t)$  et  $\nu_{bb}^*(t)$ , on évalue la puissance demandée à chaque source :

$$P_{bb}^b(t) = f_{bb}(\nu_{bb}^*(t)) \quad P_{eg}^b(t) = f_{eg}(\nu_{eg}^*(t)) \quad (5.92)$$

#### 5.4.2.1 Synthèse LPV-MPC

Pour résoudre en temps réel le problème  $\mathcal{P}_{MS}$  présenté ci-dessus, on propose d'utiliser ici le régulateur à deux niveaux détaillé dans le chapitre précédent ([section 4.3.3](#)).

#### Contrôleur (L1)

Le premier niveau de synthèse adresse un problème de commande type linéaire quadratique, dont la fonction objectif paramétré par un vecteur  $\theta$  dérive du critère initial ([5.91](#)).

On pose ici  $\theta \in \mathbb{R}$  scalaire et on définit le critère suivant

$$J_{MS}(\theta) = \int_{t_0}^{t_0+T_p} \left( \gamma_1 \alpha_1 z_{sat}^2(t) + \gamma_2 \left( \beta_1(\theta) p_{bb} \cdot (P_{bb}^f(t))^2 + \beta_2(\theta) p_{eg} \cdot (P_{eg}^f(t))^2 \right) \right) dt \quad (5.93)$$

avec  $\beta_1(\theta) = \beta_1 - \theta$  et  $\beta_2(\theta) = \beta_2 + \theta$ .

Lorsque  $\theta$  augmente, le coût d'utilisation de la source bloc-batterie augmente, et à l'inverse, le coût d'utilisation de la source électrogène diminue.

Un  $\theta$  petit conduit à une stratégie où la source bloc-batterie est utilisée comme la ressource principale. Il permet aussi une récupération de l'énergie au freinage. Un  $\theta$  proche de  $\theta_{max}$  tend vers l'arrêt de la source bloc-batterie.

Pour la synthèse du correcteur  $\Sigma_{MS}(\theta)$  (cf. **section 4.3.3**), on construit le problème d'optimisation paramétré (5.93) selon la méthode précédemment présentée, et en choisissant pour pondérations :  $\alpha_1 = 8$ ,  $\beta_1 = 4$ ,  $\beta_2 = 0.1$ ,  $\gamma_1 = 1$  et  $\gamma_2 = 1$ , afin de privilégier le conditionnement face à la mobilité lors des phases de délestage.

**Problème  $\mathcal{P}_{MS}^{L_1}$  pour le camion FHS**

$$\min_{\nu_{bb}(t), \nu_{eg}(t)} J_{MS}(\theta) \quad (5.94)$$

sous les contraintes :

$$\dot{z}_{sat}(t) = (P_{MS}^f(t) - P_{U_a}^b(t)) \quad (5.94a)$$

$$P_{bb}^f(t) = f_{bb}(\nu_{bb}(t)) \quad (5.94b)$$

$$P_{eg}^f(t) = f_{eg}(\nu_{eg}(t)) \quad (5.94c)$$

$$E_{bb}^f(t) = f_{stk_{bb}}(\nu_{bb}(t)) \quad (5.94d)$$

$$E_{eg}^f(t) = f_{stk_{eg}}(\nu_{eg}(t)) \quad (5.94e)$$

$$P_{U_a}^f(t) = P_{bb}^f(t) + P_{eg}^f(t), \quad (5.94f)$$

$$(5.95)$$

$\Sigma_{MS}(\theta)$  est obtenu par une synthèse par séquençement de gains impliquant une interpolation polynomiale d'ordre 4, pour  $\theta \in [0, 15]$  :

$$\nu_s(t) = \begin{bmatrix} K_{11}(\theta) & K_{12}(\theta) & K_{13}(\theta) \\ K_{21}(\theta) & K_{22}(\theta) & K_{23}(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{sat}(t) \\ x_{bb}(t) \\ x_{eg}(t) \end{bmatrix} \quad (5.96)$$

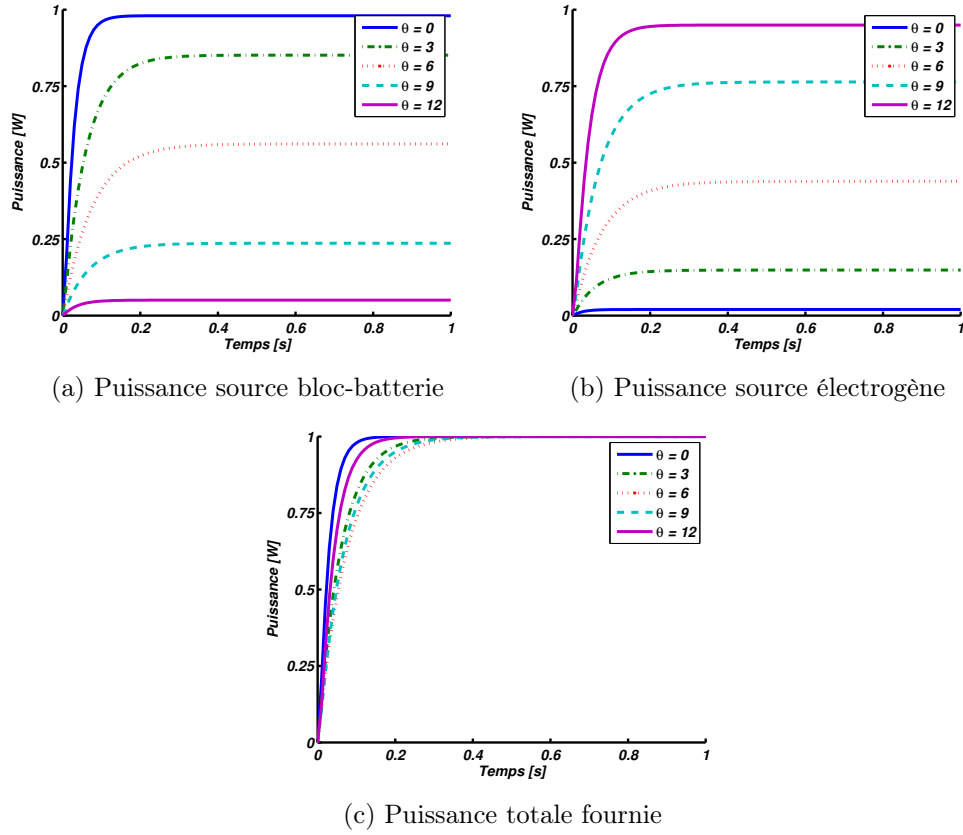


FIGURE 5.11 – Étude de la réponse indicielle du régulateur paramétré  $\Sigma_{MS}(\theta)$

La Figure 5.11 montre les réponses indicielles obtenues pour plusieurs valeurs de  $\theta$ . Le comportement du régulateur correspond à nos attentes : la source bloc-batterie fournit la quasi totalité de la puissance demandée pour  $\theta \rightarrow \theta_{min}$ , et inversement quand  $\theta \rightarrow \theta_{max}$ . La mise en commun des deux sources (Fig. 5.11c) satisfait la demande pour un temps de réponse inférieur 0.3s.

Les polynômes du régulateurs sont :

$$K_{11}(\theta) = 71.6 \times \theta^4 + 329 \times \theta^3 - 440 \times \theta^2 - 3020 \times \theta + 5030 \quad (5.97)$$

$$K_{12}(\theta) = -1.04 \times \theta^4 + 1.73 \times \theta^3 - 1.20 \times \theta^2 - 434 \times \theta - 955 \quad (5.98)$$

$$K_{13}(\theta) = -0.155 \times \theta^4 - 0.128 \times \theta^3 + 1.52 \times \theta^2 + 0.66 \times \theta - 13.0 \quad (5.99)$$

$$K_{21}(\theta) = 101 \times \theta^4 - 170 \times \theta^3 - 852 \times \theta^2 + 247 \times \theta + 622 \quad (5.100)$$

$$K_{22}(\theta) = -0.08 \times \theta^4 - 0.06 \times \theta^3 + 0.76 \times \theta^2 - 6.51 \times \theta - 0.03 \quad (5.101)$$

$$K_{33}(\theta) = -8.51 \times \theta^4 - 13.1 \times \theta^3 + 1.46 \times \theta^2 + 431 \times \theta - 768 \quad (5.102)$$

### Contrôleur (L2)

Le second niveau de la stratégie adresse la problématique de l'optimisation de  $\theta$  suivant les contraintes (5.91g)-(5.91k).

Posons  $G_{L1}^{bf}$  le modèle de la boucle fermée constituée par  $\bar{\Sigma}_{MS}$  la composante invariante du régulateur paramétré (cf. forme LFT (4.9)).

On a alors :

$$X_{L1}^{bf}(t) = [z_{sat}(t) \quad x_{bb}(t) \quad x_{eg}(t)] \quad (5.103)$$

Le correcteur (L2) est calculé en ligne par optimisation du problème (5.104) formulé à temps discret. On choisit pour cette illustration  $\theta(t)$  continu par morceaux avec  $t_k$  les instants de saut et  $T_\theta = \frac{T_p}{N_\theta}$  une période d'actualisation, tel que  $t_k = t_0 + kT_\theta$  pour  $k \in \llbracket 1; N_\theta \rrbracket$ , et  $\theta(\tau) = \theta_k$  pour  $\tau \in [t_{k-1}, t_k]$ . Dans le cadre de cet exemple on posera  $N_\theta = 4$ .

#### Problème $\mathcal{P}_{MS}^{L2}$ pour le camion FHS

$$\min_{\theta_k} J_\theta = T_\theta \sum_{k=1}^{N_\theta} \theta_k^2 \quad (5.104)$$

sous les contraintes :

$$\forall k \in \llbracket 1; N_\theta \rrbracket, \tau \in [t_{k-1}, t_k], \quad (5.105)$$

$$Y(\tau|t_0) = G_{L1}^{bf}(X_{L1}^{bf}(t_0), u_\theta(\tau|t_0), P_{U_a}^b(\tau)) \quad (5.105a)$$

$$u_\theta(\tau|t_0) = \Delta_k(\theta_k) \times y_\theta(\tau|t_0) \quad (5.105b)$$

$$0 \leq \theta_{k1} \leq 15, \quad (5.105c)$$

$$P_{U_a}^f(\tau|t_0) \in \mathcal{P}_{U_a}, \quad (5.105d)$$

$$P_{bb}^f(\tau|t_0) \in \mathcal{P}_{bb}, \quad (5.105e)$$

$$P_{eg}^f(\tau|t_0) \in \mathcal{P}_{eg}, \quad (5.105f)$$

$$E_{bb}(\tau|t_0) \in \mathcal{E}_{bb}^d, \quad (5.105g)$$

$$E_{eg}(\tau|t_0) \in \mathcal{E}_{eg}^d, \quad (5.105h)$$

Ce problème non-linéaire est résolu par une méthode d'optimisation type « sequential quadratic programming » via la fonction `fmincon` de Matlab. Dans l'esprit d'une commande sur horizon glissant (e.g. MPC), seule la première valeur de la solution optimale (i.e.  $\theta_1$ ) est appliquée comme commande sur (L1) pour une durée  $T_\theta$ .

### 5.4.3 Stratégie Nœud de Concurrency

Le nœud de concurrence est le module d'interconnexion situé entre les modules clients et le nœud d'accumulation. A partir de la définition précédemment donnée (section 3.6)

on déduit le modèle de sa structure :

$$P_{MC}^c(t) = P_{mob}^c(t) + P_{cond}^c(t) \quad (5.106)$$

Avec  $P_{mob}^c(t)$  la puissance consommée par la mobilité, et  $P_{cond}^c(t)$  la puissance consommée par le conditionnement (5.77).

**Problème  $\mathcal{P}_{MC}$  pour le camion FHS**

$$\min_{\substack{\lambda_{mob} \in \Lambda_{mob}, \\ \lambda_{cond} \in \Lambda_{cond}}} \int_{t_0}^{t_0+T_p} \left( \gamma_1 \left( \alpha_1 \bar{S}_{mob}(\lambda_{mob}, (t|t_0)) + \alpha_2 \bar{S}_{cond}(\lambda_{cond}, (t|t_0)) \right) + \gamma_2 \beta_{s_1} EC_{U_a}(P_{U_a}^c(t)) \right) dt \quad (5.107)$$

sous les contraintes :

$$P_{mob}^c(t) = \tilde{g}_{mob}((t|t_0), \lambda_{mob}) \quad (5.107a)$$

$$P_{cond}^c(t) = \tilde{g}_{cond}((t|t_0), \lambda_{cond}) \quad (5.107b)$$

$$P_{MC}^c(t) = P_{mob}^c(t) + P_{cond}^c(t), \quad (5.107c)$$

$$E_{MC}(t) = \int_0^t P_{U_a}^c(\tau) d\tau, \quad (5.107d)$$

$$P_{MC}^c(t) \in \mathcal{P}_{U_a}, \quad (5.107e)$$

$$P_{mob}^c(t) \in \mathcal{P}_{mob}, \quad (5.107f)$$

$$P_{cond}^c(t) \in \mathcal{P}_{cond}, \quad (5.107g)$$

$$E_{MC}(t) \in \mathcal{E}_{U_a}^d, \quad (5.107h)$$

Les solutions optimales de ce problème sont notées :

$$\lambda_{mob}^* = \{\lambda_{mob_i}\}_{\llbracket 1; N_\lambda \rrbracket}, \quad \lambda_{cond}^* = \{\lambda_{cond_i}\}_{\llbracket 1; N_\lambda \rrbracket}, \quad (5.108)$$

sont transmises vers le second niveau de la stratégie pour construire génériquement les signaux de communication par application des définitions de la **section 3.3.3**.

## 5.5 Simulation et Résultats

### 5.5.1 Scénario

Le camion FHS et sa stratégie énergétique déduite de la méthodologie de décomposition, sont simulés pour le scénario de livraison représenté par la Figure 5.12. La température de référence nominale est  $T_{ref} = -18^\circ C$  avec  $T_{ext} = 30^\circ C$ .

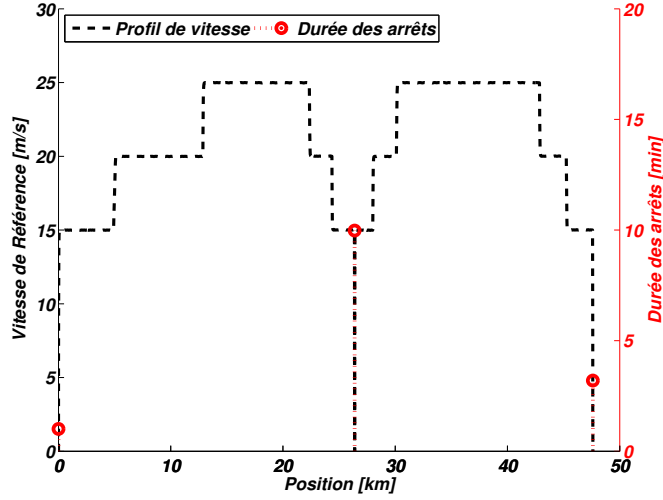


FIGURE 5.12 – Scénario de livraison : *vitesse de référence et temps de pause* ; au second arrêt la porte du compartiment est ouverte pendant 200s

La source bloc-batterie est initialisée avec un état de charge à 67%, et la source électrogène dispose de 2.9L de carburant. Le problème  $\mathcal{P}_{MS}^{L2}$  est actualisé selon une période  $T_\theta = 4s$ , et est évalué sur un horizon de prédiction  $T_{pMS} = 10s$ . Le problème  $\mathcal{P}_{MC}$  est actualisé selon une période  $T_{pMC} = 1000s$ , et est évalué sur un horizon de prédiction  $T_\lambda = 250s$ .

Ces données sont résumées dans le tableau 5.3.

Paramètre	Description	Valeur
$dt$	Pas de simulation	0.05s
$T_{ref}$	Température de référence	$-18^\circ C$
$T_{ext}$	Température extérieure	$30^\circ C$
$Soc_i$	Etat de charge initial pour la source bloc batterie	67%
$q_{carbu}^0$	Quantité de carburant initiale	2.9L
$T_{pMC}$	Horizon de prédiction pour le problème de concurrence	1000s
$T_{pMS}$	Horizon de prédiction pour le problème d'hybridation	20s
$T_\lambda$	Période d'actualisation pour le problème de concurrence	250s
$T_\theta$	Période d'actualisation pour le problème d'hybridation	4s

TABLE 5.3 – Paramètres de simulation

### 5.5.2 Résultats

Les conditions initiales du système et le choix du scénario nous permettent d'illustrer deux phases distinctes :

**Phase 1** ( $t < 1800s$ ) : L'état de charge de la batterie est supérieur à 40%, limite imposée lors de la conception du module. La source bloc-batterie intervient comme une source principale à faible coût.

**Phase 2** ( $t \geq 1800s$ ) : L'état de charge de la batterie est inférieur à 40% la source électrogène supporte seule les besoins des clients. Son énergie disponible et son amplitude maximale, sont les facteurs limitants du problème de concurrence.

Les résultats sont analysés phase par phase.

#### 5.5.2.1 Phase 1 : Déchargement du bloc-batterie(Fig. 5.16)

La coopération des deux sources, par le biais du nœud d'hybridation, apporte une énergie et une amplitude de puissance suffisante pour maintenir les clients dans leur configuration nominale (Fig. 5.15), défini sur les figures par l'indice  $\lambda_{c_i} = 3$ .

Les résultats pour le client mobilité (Fig. 5.13a) montrent que la puissance est mise à profit pour maximiser la satisfaction du service, le suivi de la trajectoire de référence. La puissance de restriction  $P_{mel}^{rest}(t)$  (cf. Tab. 5.1) intervient comme une limite à l'accélération.

Pour le client conditionnement (Fig. 5.13b), la température est régulée par le thermostat pour se maintenir à la température prévue par la configuration  $T_{ref} = -18^\circ C$  (cf. Tab. 5.2).

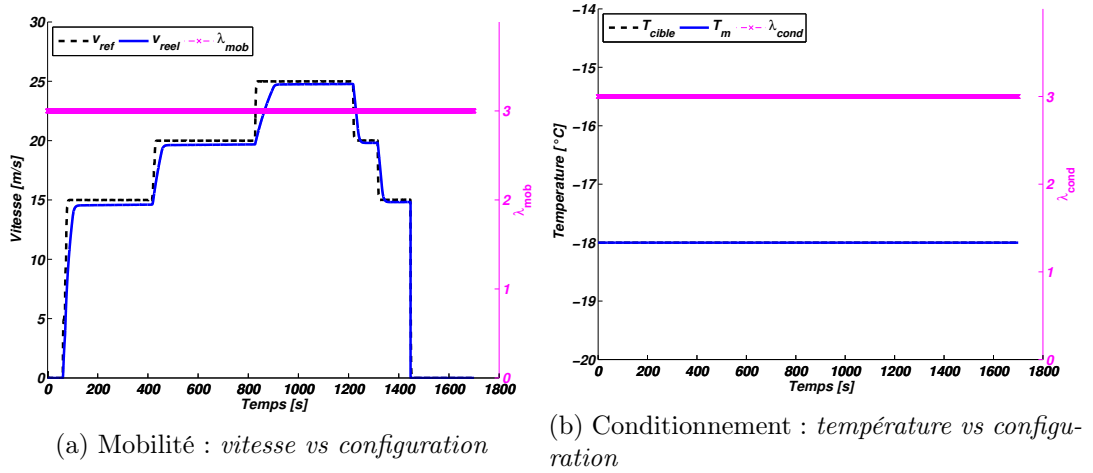


FIGURE 5.13 – Résultats pour les clients pour la phase 1

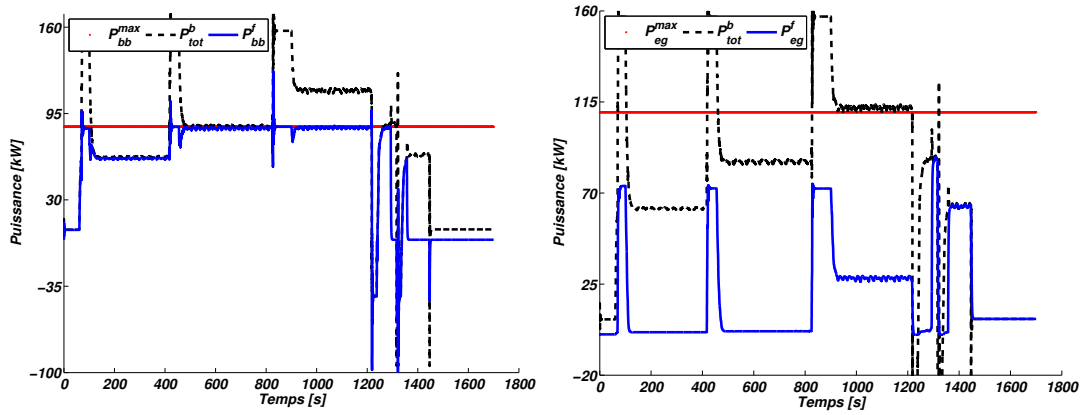
Du côté des sources, le contrôleur L1 est initialisé à son paramètre nominal  $\theta = 0$ . Son comportement se résume alors à prélever sur la source bloc-batterie la puissance totale

demandée (cf. réponse indicielle, Fig. 5.11). On observe sur la Figure 5.14a que lors des phases d'accélération la puissance demandée dépasse la limite physique du bloc-batterie,  $P_{bb}^{max} = 85kW$ , par exemple à  $t = 70s$ ,  $t = 400s$  et  $t = 800s$ .

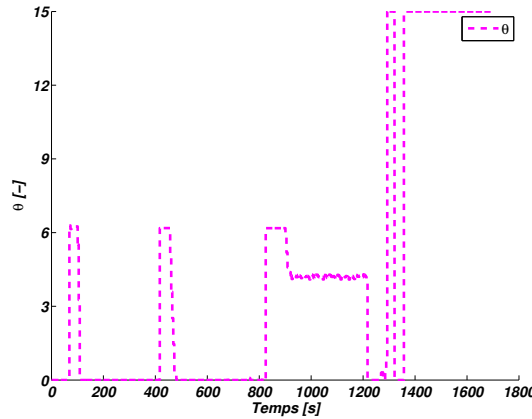
Pour prendre en compte cette contrainte, le contrôleur (L2) calcule un nouvel optimum, en l'occurrence  $\theta(t) = 6.24$  (Fig. 5.14c). Sous ce paramètre, la stratégie de contrôle de (L1) repose sur le régulateur LQ défini à partir du critère  $J_{MS}(\theta = 6.24)$ . Il s'agit alors de distribuer la puissance demandée entre les deux sources tel que la contrainte d'amplitude du bloc-batterie soit active mais non violée (Fig. 5.14a).

Une fois l'accélération terminée, la puissance en régime établie est inférieure aux limites du bloc-batterie. Le paramètre  $\theta$  évolue à nouveau vers sa valeur nominale.

Bien que non-visible sur ces courbes, les évolutions du paramètre sont progressives.



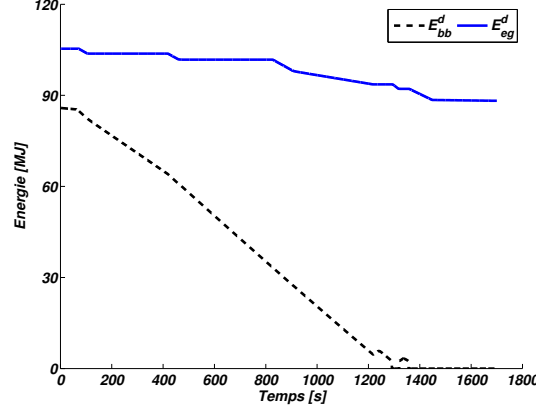
(a) Bloc-batterie : puissance fournie vs de- (b) Electrogène : puissance fournie vs de-  
mande mande



(c) Paramètre  $\theta$

FIGURE 5.14 – Résultats pour les sources et paramètre  $\theta$





(a) Energies disponibles

FIGURE 5.15 – Résultats pour le scénario 1 : *Source bloc-batterie disponible*

Sur l'intervalle  $[970s; 1210s]$ , le camion circule à son allure maximale ( $25m.s^{-1}$ ). La puissance en régime établi est supérieure à la limite physique de la source bloc-batterie. Le contrôleur (L2) calcule un nouvel optimum  $\theta = 4.26$ , conservé sur la durée de la période.

Enfin, à  $t = 1300s$ , la source bloc-batterie a complètement épuisé son énergie (Fig. 5.15a). Le paramètre  $\theta$  est mis à jour à sa valeur maximale (i.e.  $\theta = 15$ ). La totalité de la puissance est alors fournie par la source électrogène.

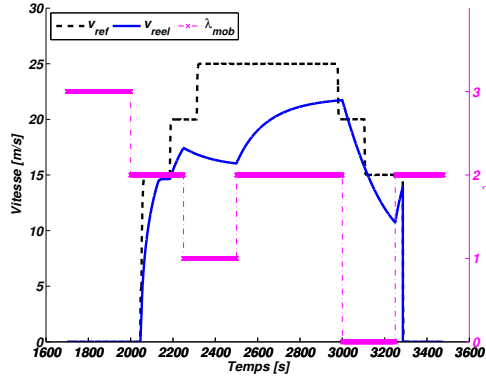
### 5.5.2.2 Phase 2 : Délestage des clients (Fig. 5.16)

Dans cette seconde phase la source électrogène supporte seule les demandes (i.e.  $\theta = \theta_{max}$ ). A  $t = 1800s$ , la porte du compartiment est ouverte pour simuler une livraison. La température interne s'élève avant d'être ramenée à son point de consigne par le thermostat (Fig. 5.16c).

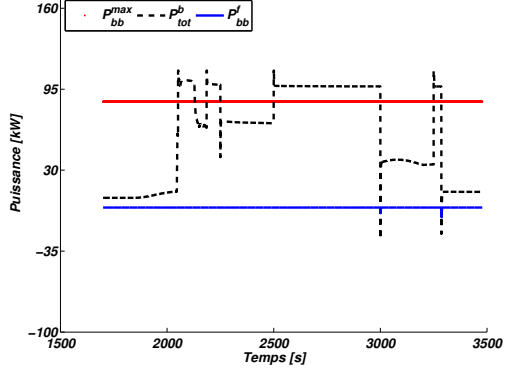
A  $t = 2000s$ , en raison de la nouvelle limite de puissance imposée par l'arrêt du bloc-batterie (i.e.  $P_{U_a}^{max} = P_{gen}^{max} = 110kW$ ), la stratégie de concurrence dégrade la configuration de la mobilité à  $C_{mob}^2$  (Fig. 5.16a). Dans ce mode, l'accélération du camion est limitée, de même que la vitesse maximale à  $22m.s^{-1}$ . Le camion est donc dans l'incapacité d'atteindre la vitesse de référence de  $25m.s^{-1}$ , la satisfaction du service diminue.

A  $t = 2200s$  la stratégie de concurrence détecte une pénurie d'énergie au terme de sa prédiction, et dégrade pendant une période le client mobilité à  $C_{mob}^1$ , avant de revenir à  $C_{mob}^1$ . A  $t = 3000s$ , la mobilité est dégradée à  $C_{mob}^0$ . Cet acte est assez surprenant étant donné que le véhicule décélère. A ce jour, nous l'analysons comme une erreur numérique très certainement liée à une mauvaise estimation de la fin du scénario.

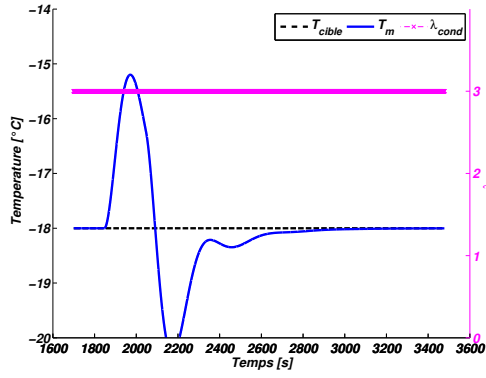
En cohérence avec notre choix de pondération, le conditionnement est maintenu à sa configuration nominale, et le scénario de livraison se termine avec une quantité de carburant tout juste positive (Fig. 5.16e).



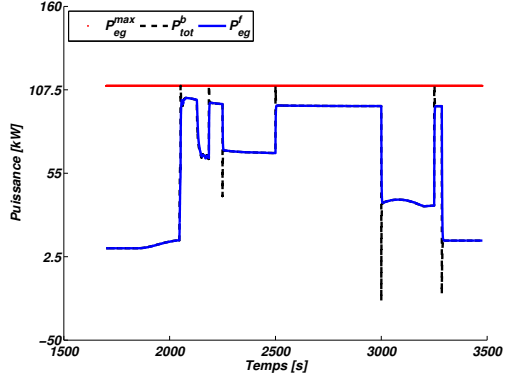
(a) Mobilité : vitesse vs configuration



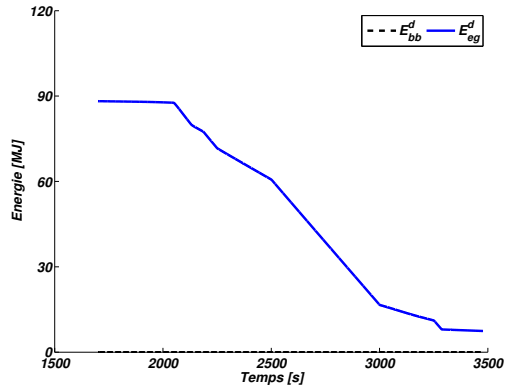
(b) Bloc-batterie : puissance fournie vs demande



(c) Conditionnement : température vs configuration



(d) Electrogène : puissance fournie vs demande



(e) Energies disponibles

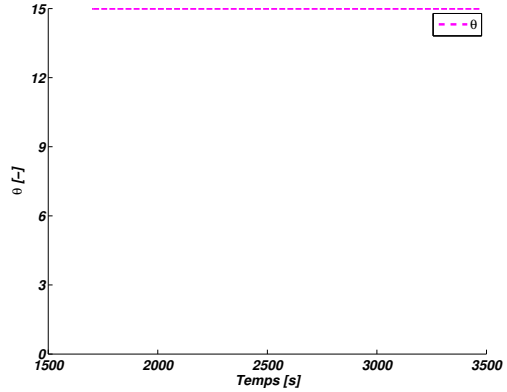

 (f) Paramètre  $\theta$ 

FIGURE 5.16 – Résultats pour la phase 2

## 5.6 Conclusion du chapitre

Cette illustration sur un cas d'étude concret met en perspective la méthodologie de représentation modulaire des systèmes énergétiques. Elle démontre que l'objectif fixé d'une continuité méthodologique entre les outils de la conception systémique, et les outils analytiques de la commande optimale, est bien atteint.

La compréhension du système par la systémique, puis sa formalisation par les modules énergétiques aboutissent à l'élaboration d'une stratégie énergétiques que nous simplifions par décomposition. Les outils algorithmiques précédemment introduits sont déployés et nous permettent de traiter simplement les problématiques.

La simulation vérifie la faisabilité numérique de l'approche globale, et souligne la cohérence des résultats avec ce qui est empiriquement attendu. Face à des situations complexes, les performances numériques des algorithmiques se montrent honorables.

Le problème  $\mathcal{P}_{MS}^{L2}$ , résolu par une méthode de *sequential quadratic programming*, converge vers une solution dans un temps inférieur à 1s pour 98,2% de ses occurrences (Fig. 5.17a). Cela signifie que le calcul se termine bien dans l'intervalle d'actualisation  $T_\theta$ .

Les 1.8% d'occurrences restantes (non-visible à l'échelle de l'histogramme) sont majorées par 10.2s et correspondent aux situations où le solveur nécessite une seconde exécution avec un point initial différent.

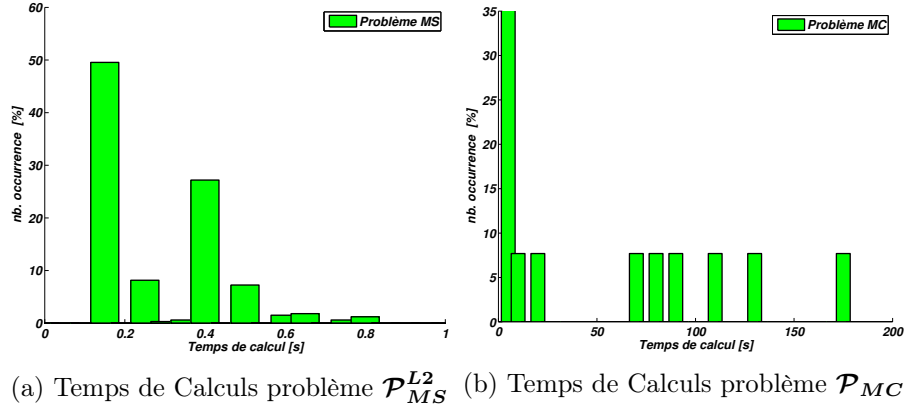
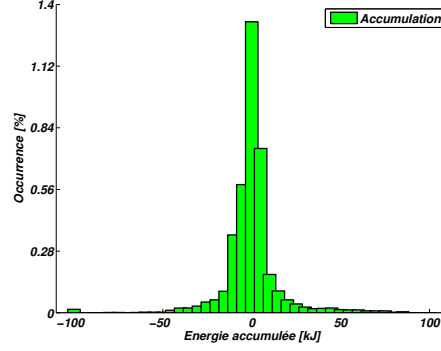


FIGURE 5.17 – Distribution des temps de calcul des algorithmes

L'algorithme de Branch and Bound, développé spécifiquement pour le besoin de cette thèse, converge pour 100% des occurrences sous le seuil de temps  $T_\lambda = 250s$ . De plus, ces performances peuvent être améliorée, notamment par une meilleure optimisation de la base de donnée sous-jacente à l'algorithme, ou l'utilisation d'un solveur du commerce.

L'accumulation d'énergie, qui correspond à une forme de sous-optimalité, est maîtrisée. Sa distribution pour des pics supérieure à 100J est donnée par la Figure 5.18a. Au total, moins de 4% des occurrences dépassent ce seuil, et la majorité (i.e. les occurrences



(a) Accumulation d'énergie sur le nœud  $U_a$

FIGURE 5.18 – Distribution des facteurs de sous-optimalité

supérieures à 0.28%) est contenue dans l'intervalle  $[-10kJ; 10kJ]$ .

En ce qui concerne la solution LPV-MPC, son rôle de contrôleur robuste s'auto-ajustant aux contraintes actives est parfaitement rempli, et les performances atteintes plutôt intéressantes. En revanche, lors de la phase 2, des ajustements sont nécessaires pour conserver la faisabilité du problème  $\mathcal{P}_{MS}^{L2}$ . En effet, quelle que soit la valeur des bornes du paramètre, le contrôleur (L1) est, par sa nature LQ, incapable de reproduire l'arrêt complet de l'une des sources. Une composante très faible subsiste et suffit à décharger la batterie. Pour de grands intervalles de temps comme dans notre exemple, cet effet conduit inexorablement à franchir la contrainte sur l'énergie disponible (5.105g). Le problème d'optimisation devient alors infaisable.

Une première piste de recherche pour obtenir un arrêt du bloc-batterie net est d'introduire une variable discrète dans le coût de l'énergie, et par conséquent de formuler le problème  $\mathcal{P}_{MS}$  comme un problème d'optimisation mixte. Ce type de problème est délicat à résoudre et nécessiterait de nouveaux outils.

Une seconde idée est de profiter de la fonction *coût de l'énergie* pour introduire une contrainte douce sur l'énergie consommée. Cette approche rejoint les approches de gestion énergétique traditionnelles (KEULEN, JAGER et STEINBUCH 2008 ; a. SCIARRETTA et al. 2014).

Son principale défaut est qu'elle nécessite l'optimisation en amont d'un niveau d'énergie de référence, qui le plus souvent dépend du scénario.

Plus généralement, cette difficulté pose la question de la modélisation des éléments fonctionnels de type *accumulateur*, doivent-ils être traités comme un module énergétique source, ou bien comme un composite de source et d'un nouveau module qu'il faudrait introduire ?



# Conclusion Générale

## Conclusion

Les systèmes énergétiques forment une classe de systèmes dont les spécificités structurales et fonctionnelles posent la question de la distribution en temps réel de l'énergie pour satisfaire des services. Leur complexité motive d'une part l'élaboration de méthodologies systémiques pour définir les stratégies énergétiques qu'ils devront embarquer, et d'autre part à identifier des solutions algorithmiques pertinentes pour assurer l'implémentation de ces stratégies.

Le **chapitre 1** a été consacré à l'étude de la littérature sur les systèmes énergétiques selon trois points de vue : la systémique, la modélisation multi-physique et le contrôle commande. Il a été montré qu'une description générique de ces systèmes pouvait être réalisée en s'appuyant sur les composantes du paradigme systémique : environnement, activité, finalité, structure et évolution. Les systèmes énergétiques peuvent être vus comme une infrastructure physique mettant en interaction des ressources et des services, et embarquant un système décisionnel cherchant à assurer le meilleur compromis entre le coût énergétique et la satisfaction des services.

Une étude approfondie de la littérature met en lumière une classification des problématiques selon la nature de l'architecture et de la mission. Il nous est apparu que les deux problèmes fondamentaux suivants sont traités séparément : l'hybridation des sources d'une part, et la concurrence énergétique entre plusieurs consommateurs d'autre part. Ce chapitre conclut ainsi sur le manque d'approches pour traiter la problématique complète multi-sources multi-clients avec comme objectifs l'optimalité et l'opérationnalité.

Dans le **chapitre 2**, nous avons recourt à un référentiel systémique créé par notre partenaire industriel Sherpa Engineering, pour caractériser les systèmes énergétiques selon une représentation par des *Ensembles Organico-Fonctionnels* (EOF). Par ce dernier, nous soulignons les frontières du système énergétique et posons les bases d'une approche modulaire, autour des deux modules fondamentaux : que sont le client et la source. Définis selon une trame précise, leurs échanges physiques et informationnels sont modélisés selon un formalisme précis. Il est remarqué que leur causalité de pilotage (i.e. la réponse à la question « contrôlent-ils leur échanges d'énergie ? » ) agit sur leurs compatibilités.

## CHAPITRE 5. CONCEPTION DE LA STRATÉGIE D'UN CAMION FRIGORIFIQUE HYBRIDE SÉRIE

---

Dans le contexte multi-clients ou multi-sources, nous proposons de représenter l'interaction de ces modules par le biais de nœuds, formalisant à la fois les interactions physiques et la mise en œuvre des stratégies énergétiques.

Le **chapitre 3** formalise la stratégie énergétique dans le cas général multi-clients et multi-sources en posant un problème d'optimisation contraint générique qui s'appuie sur les signaux échangés par les modules. Une seconde contribution de ce chapitre est de simplifier le problème global en décomposant le nœud général selon les nœuds d'hybridation et de concurrence. Ce procédé permet de faire le lien avec les problématiques identifiées dans la littérature. Une première analyse de la sous-optimalité engendrée par cette simplification est proposée sur la base d'un exemple, et l'observation en particulier de l'accumulation d'énergie entre les deux nouveaux nœuds multi-sources et multi-clients.

Un état de l'art sur les stratégies de commandes optimales et prédictives est réalisé dans le **chapitre 4**, en soulignant les solutions algorithmiques pour une résolution en temps réel. Il conclut que : 1) l'optimisation selon un critère quadratique ouvre l'accès à plusieurs solutions explicites intéressantes dont un contrôleur linéaire affine par morceaux, dans le cas contraint ; 2) le verrou historiquement lié à la complexité numérique des méthodes MPC tend à disparaître sous l'influence en particulier de nouveaux solveurs. Sur ce constat, la satisfaction et le coût des dépenses énergétiques sont spécifiés par des fonctions quadratiques conduisant ainsi à formuler la stratégie d'hybridation de source comme un problème linéaire quadratique à horizon fini, et contraint par l'état. Un principe novateur de contrôle selon deux niveaux est proposé dont l'objectif est de garantir des propriétés de robustesse et de stabilité par un premier régulateur paramétré, puis de piloter ces paramètres au regard des contraintes à l'aide d'une méthode type MPC. Sa mise en œuvre sur un premier exemple illustre les intérêts de cette loi. Enfin pour le problème de concurrence entre services, il est postulé que les clients sont autonomes et disposent d'un nombre fini de modes de fonctionnement appelés configurations, générant leur demande en fonctions de leur activité. Le problème d'optimisation qui en résulte est de nature combinatoire. Une méthode de recherche opérationnel *Branch and Bound* est suggérée ainsi que des pistes pour améliorer la recherche de bornes.

Le **chapitre 5** valide par la simulation les trois contributions de cette thèse : conception modulaire de la stratégie ; simplification par décomposition ; résolution par des algorithmes robustes et prédictifs, ou combinatoire. L'exemple multi-clients et multi-sources traité est celui d'un véhicule frigorifique dont l'architecture énergétique est de nature hybride série.

## Perspectives

Les perspectives de ce travail sont multiples et concernent à la fois les aspects méthodologiques et algorithmiques.

Premièrement, au-delà des résultats numériques présentés dans les **chapitres 3, 4**, et **5** se pose la question de l’optimalité de la décomposition et des solutions algorithmiques. Notre décomposition introduit retards et contraintes dans les échanges qui se traduisent a minima par une accumulation transitoire d’énergie entre les nœuds. Il serait intéressant de caractériser cet effet en termes de sous-optimalité et d’instabilité du système.

Répondre à cette problématique serait un premier pas vers une seconde perspective, celle de la généralisation de la décomposition de la stratégie énergétique pour des systèmes très complexes, i.e. présentant plusieurs chaînes énergétiques en interactions. Une première recherche dans cette direction est donnée au travers d’une procédure systématique de décomposition, démontrant les possibilités techniques de ce principe (voir **annexe D**). Cependant, elle se heurte à ce jour aux verrous suivants : la sous-optimalité intrinsèque de la décomposition nous fait craindre qu’accroître le nombre de sous-problèmes d’optimisation interconnectés aboutissent finalement à de piètres performances, voire à une instabilité du système. Il est donc nécessaire de mieux comprendre et caractériser la sous-optimalité engendrée par notre méthodologie de décomposition, afin de pouvoir assurer la stabilité globale par notre loi de commande distribuée. Celle-ci dépendra certainement de la synchronisation entre les nœuds, et de la pertinence des informations échangées entre eux. La mise en place d’un superviseur afin de suppléer ces contraintes structurelles de communication pourrait s’avérer utile.

Une troisième perspective méthodologique concerne la modélisation des sources réversibles (e.g. une batterie) ou des clients avec stockage interne (e.g. la mobilité avec freinage régénératif). Une piste de recherche est de les modéliser par un module quadripôle aux propriétés partagées entre sources et clients. Cette représentation devra être accompagnée de règles d’utilisation précises, afin d’éviter d’éventuels problèmes de bouclage sur l’organe lui-même.

Une dernière perspective importante cible les aspects algorithmiques. Outre certains outils déjà disponibles dans la littérature pour résoudre le problème d’hybridation, notre choix s’est porté dans le **chapitre 4** vers une architecture à deux niveaux. Les performances atteignables par le régulateur bas niveau pourraient être améliorées grâce à une stratégie Linéaire Quadratique avec anticipation (cf. **annexe B**). Cela nécessiterait au préalable d’étendre les résultats connus du LQ avec anticipation au cas d’un critère paramétré. Une seconde piste d’amélioration concerne le contrôle du niveau supérieur. Il serait judicieux de confronter certains des outils de commande NMPC à nos propres méthodes. Concernant la problématique de concurrence inter-clients, un premier algorithme, rudimentaire, de Branch and Bound a été mis-en-œuvre afin de valider la stratégie proposée. L’emploi d’un outil logiciel expert serait certainement préférable.





# Annexes



## A Résumé du Formalisme Modulaire

Cette annexe résume la méthodologie de formalisation modulaire pour les systèmes énergétiques décrite dans le **chapitre 2**.

### Source (p. 44)

Module énergétique associé à une ressource du système. Elle a pour fonction de mettre à disposition une énergie en réponse à une demande, pour un coût minimal et dans la limite de sa capacité.

### Client (p. 44)

Module énergétique assujéti à l'un des services du système de missions. Il a pour fonction de maximiser la satisfaction de service en consommant au mieux une énergie disponible.

### Signal de Besoin (p. 44)

Concatène les informations suivantes :

$$(b)_{c_i}^m := \begin{cases} \text{la puissance max. échangeable,} \\ \text{la puissance min. échangeable,} \\ \text{la puissance nominale désirée,} \\ \text{sa satisfaction} \end{cases}$$

### Signal de Disponibilité (p. 45)

Concatène les informations suivantes :

$$(d)_{s_j}^m := \begin{cases} \text{Puissance max. échangeable} \\ \text{Puissance mini. échangeable} \\ \text{Énergie disponible} \\ \text{Coût de l'énergie.} \end{cases} \quad (109)$$

### Stratégie énergétique

$$\left( (b)_N^s, (d)_N^c, \delta(t) \right) = \Xi \left( (d)_s^N, (b)_c^N \right) \quad (110)$$

Avec :

- $(b)_N^s$ , la liste des besoins  $(b)_N^{s_j}$  calculés par le nœud et demandés aux sources,

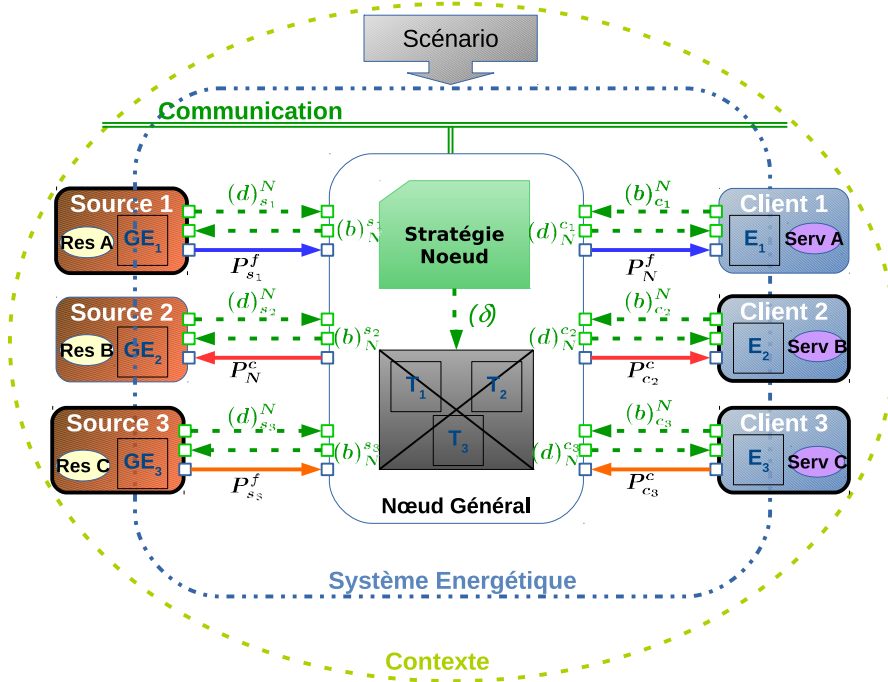


FIGURE 19 – Vision modulaire nœud générique : trois sources et trois clients

- $(d)_N^c$ , la liste des disponibilités  $(d)_N^{c_i}$  calculées par le nœud et proposées pour les clients,
- $(d)_s^N$ , la liste des disponibilités  $(d)_{s_j}^N$  proposées par les sources au nœud,
- $(b)_c^N$ , la liste des besoins  $(b)_{c_i}^N$  demandés par les clients au nœud.

### Groupe Organique

$$\left( P_s^c(t), P_c^f(t) \right) = \Gamma_N \left( P_s^f(t), P_c^c(t), \delta(t) \right) \quad (111)$$

décomposé en trois équations :

$$\Gamma_N : \begin{cases} x_a(t) = \xi_N \left( P_s^f(t), P_c^c(t), \delta(t) \right) \\ \kappa(t) = \eta_N \left( P_s^f(t), P_c^c(t), \delta(t) \right) \\ \left( P_s^c(t), P_c^f(t) \right) = \Phi_N \left( P_s^f(t), P_c^c(t), \delta(t) \right) \end{cases} \quad (112)$$

avec :

- $P_s^c(t)$ , la liste des puissances  $P_{s_j}^c(t)$  calculées par le nœud et consommées sur les sources,
- $P_c^f(t)$ , la liste des puissances  $P_{c_i}^f(t)$  calculées par le nœud et fournies aux clients,

- $P_s^f(t)$ , la liste des puissances  $P_{s_j}^f(t)$  fournies par les sources au nœud,
- $P_c^c(t)$ , la liste des puissances  $P_{c_i}^c(t)$  consommées par les clients au nœud.

---

## B État de l'art sur la synthèse $H_2/LQ$

Cette annexe résume des résultats importants sur la synthèse  $H_2/LQ$ , employés dans les chapitres 4 et 5.

### B.1 Rappels Généraux

#### B.1.1 Norme-2

Soit  $L_2^n$  l'espace des signaux de carrée intégrable sur  $[0, \infty]$  et à valeur dans  $\mathbb{R}^n$ . Celui-ci se définit comme un espace d'Hilbert et à ce titre, est pourvu d'un produit scalaire et d'une norme :

$$\langle w, z \rangle = \int_0^\infty w(t)^\top z(t) dt, \quad \|z\|_2 = \left( \int_0^\infty z(t)^\top z(t) dt \right)^{1/2} \quad (113)$$

A l'espace  $L_2^n$ , la transformée de Laplace associe un espace de Hardy, noté  $H_2^n$ , contenant des fonctions analytiques dans  $\Re(s) \leq 0$  de carrée intégrables. Soit  $Z(s) \in H_2^n$ , la transformée de Laplace de  $z(t)$ , la norme  $H_2$  est définie comme :

$$\|Z\|_2 = \left( \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{trace} \left( Z^*(j\omega) Z(j\omega) \right) d\omega \right)^{1/2} \quad (114)$$

Le théorème de Parseval fait le lien entre le domaine continu et le domaine fréquentiel. Entre autre, on en déduit le corollaire suivant :

**Corollaire .1.** *Soit un signal  $z(t) \in L_2^n$  dont la transformée de Laplace est  $Z(j\omega) \in H_2^n$ . Alors, le théorème de Parseval démontre que :*

$$\|z(t)\|_2 = \|Z(j\omega)\|_2 \quad (115)$$

On pose  $H_2^{p \times m}$  l'espace de Hardy contenant les matrices de transfert à valeur dans  $\mathbb{C}_+^{p \times m}$ . Soit  $G(s)$  la matrice de transfert correspondant à un système multivariable, dont la norme  $H_2$  se définit comme :

$$\|G(s)\|_2 = \left( \frac{1}{2\pi} \text{trace} \int_{-\infty}^{+\infty} G^H(j\omega) G(j\omega) d\omega \right)^{1/2} \quad (116)$$

Il existe une variété de moyen pour le calcul de la norme  $H_2$ .

#### Calcul de la Norme $H_2$

Dans le cas où  $G(s)$  est une matrice de transfert rationnelle (propre et stable), sa norme  $H_2$  peut se déduire à partir de l'une de ces représentations d'état. Supposons  $G(s) = C(sI - A) - 1B + D$ , avec  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ ,  $D \in \mathbb{R}^{p \times m}$  et définissons les signaux d'entrée  $u(t)$ , l'état  $x(t)$  et la sortie  $z(t)$  selon :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \quad (117)$$



Dès lors que  $G(s)$  est strictement propre, un second moyen de calculer la norme  $H_2$  est d'utiliser les gramien (LARMINAT 2000 ; CHEVREL 2002).

$$\|G(s)\|_2^2 = \text{trace}(B^t G_o(T) B) = \text{trace}(C_c^G(T) C t) \quad (118)$$

Où  $G_o(T)$  et  $G_c(T)$  désignent respectivement le gramien d'observabilité et le gramien de contrôlabilité, tout les deux définis sur l'intervalle  $0, T$  :

$$\begin{cases} G_o(T) &= \int_0^T e^{A\tau} B B^T e^{A^T \tau} d\tau \\ G_c(T) &= \int_0^T e^{A\tau} C^T C e^{A^T \tau} d\tau \end{cases} \quad (119)$$

### B.1.2 Le problème $H_2$

En automatique, la norme  $H_2$  a une double fonctionnalité, celle d'un outils d'analyse, e.g. pour évaluer a posteriori la performance d'un asservissement ; et celle d'un outils de conception pour les régulateurs.

Soit  $G(s)$  un quadripôle dont les entrées sont :

- $w \in \mathbb{R}^{m_1}$ , un signal exogène impactant le système  $G(s)$ ,
- $u \in \mathbb{R}^{m_2}$  un signal de commande,
- $z \in \mathbb{R}^{p_1}$  un signal de performance, et
- $y \in \mathbb{R}^{p_2}$  une mesure (e.g. états, sortie de processus).

Une représentation d'état est donnée par (120) avec  $x \in \mathbb{R}^n$  l'état.

$$\begin{aligned} G(s) &= \begin{pmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{pmatrix} \\ &\triangleq \left[ \begin{array}{c|cc} A & B_1 & B_2 \\ \hline C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{array} \right] \iff \begin{pmatrix} \dot{x} \\ z \\ y \end{pmatrix} \left[ \begin{array}{c|cc} A & B_1 & B_2 \\ \hline C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{array} \right] \begin{pmatrix} x \\ w \\ u \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (120)$$

On nomme problème d'asservissement, la problématique consistant à calculer les coefficients de la rétro-action  $K(s)$  (i.e. entre  $y$  et  $u$ ), modélisé par (121), tel que le système en boucle fermé valide des objectifs de conception (stabilité, robustesse, performance, ...) donnés.

$$K(s) = D_k + C_k (sI - A_k) B_k \quad (121)$$

On note  $T_{zw}$  la boucle fermé entre l'entrée  $w$  et la sortie  $z$ , tel que :

$$\begin{aligned} T_{zw}(s) &= \mathcal{F}_l(G(s), K(s)) \\ &\triangleq G_{11}(s) + G_{12}(s) K(s) (I - G_{22}(s))^{-1} G_{21}(s) \end{aligned} \quad (122)$$

On appelle communément *problème d'optimisation*  $H_2$ , le problème consistant à trouver  $K_{H_2}$  qui assure :

- la stabilité interne du système bouclé  $T_{zw} = \mathcal{F}_l(G(s), K(s))$ ,
- la minimalité, du critère  $J_{H_2}(K_{H_2}) = \|T_{zw}\|$

**Solution dans le cas d'un retour d'état** L'optimum du critère  $H_2$  dans le cas du retour d'état, à la particularité de pouvoir être obtenue par une rétroaction statique :

**Théorème .2** (Commande  $H_2$  par retour d'état). *Soit le système  $G(s)$  défini par (120), tel que  $C_2 = I_{n \times n}$  et  $D_{21} = D_{22} = 0$  (cas du retour d'état). On suppose que :*

- *La paire  $(A, B_2)$  est stabilisable*
- *$D_{11} = 0$ , ce qui assure la stricte propriété de  $T_{zw}$  et donc l'existence de la norme*
- *$D_{12}$  doit être de rang plein (par les colonnes) pour assurer l'inversabilité de  $D_{12}^T D_{12}$ . De même que les zéros invariants de  $G_{12}(s)$  ne doivent pas se trouver sur l'axe imaginaire.*

*Alors, le problème de commande  $H_2$  admet une solution donnée par :*

$$K_{RE_{H_2}}(s) = D_k = -(D_{12}^T D_{12})^{-1} (B_2^T P + D_{12}^T C_1)$$

$$\text{avec : } \begin{cases} P \leq 0 & (P \text{ semi-définie positive}) \\ A^T P + P A - (P B_2 + C_1^T D_{12}) (D_{12}^T D_{12})^{-1} (B_2^T P + D_{12}^T C_1) + C_1^T C_1 = 0 \end{cases} \quad (123)$$

**Solution dans le cas Général** Le principe de séparation (B. D. O. ANDERSON et MOORE 1989) offre la possibilité de construire explicitement la solution du problème  $H_2$  général comme une mutualisation des résultats obtenus pour le cas d'un retour d'état, et d'une injection de sortie. Son existence est garantie si :

- $(A, B_2)$  stabilisable et  $(C_2, A)$  détectable
- $T_{zw}$  doit être strictement propre (i.e.  $D_{11} = 0$ )
- $D_{12}$  doit être de rang plein par les colonnes et  $D_{21}$  de rang plein par les lignes. De plus, les zéros invariants de  $G_{12}(s)$  et  $G_{21}(s)$  ne doivent pas se trouver sur l'axe imaginaire.

### B.1.3 Le problème LQ

Soit un système  $(\Sigma)$ , et sa condition initial  $x_0$  :

$$(\Sigma) \begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ z_2(t) &= C_z x(t) \\ y_2(t) &= x(t) \end{cases} \quad x(0) = x_0 \quad (124)$$

On appelle communément problème de commande Linéaire Quadratique (LQ) le problème de commande consistant à trouver un gain de retour d'état  $K_{lq} \in \mathbb{R}^{m \times n}$  pour une condition initiale  $x_0$ , qui assure :

- la stabilité interne du système bouclé (valeurs propres de  $(A - BK)$  à partie réelle négative)

- la minimalité du critère quadratique  $J_{LQ}(K) = \int_0^\infty z^\top(t)Qz(t) + u^\top(t)Ru(t)dt$  ou de manière équivalente

$$J_{LQ}(K) = \int_0^\infty x^\top(t)Q_x x(t) + u^\top(t)Ru(t)dt \quad (\text{si } u(t) = -Kx(t)) \quad (125)$$

Les matrices de pondération définissant le critère LQ sont telles que :

$$Q = Q^\top \leq 0 \quad Q_x = C_z^\top Q C_z, \quad R = R^\top \quad (126)$$

Les résultats suivant ont été obtenus par Kalman au début des années 60. Ils sont une conséquence directe des résultats de la norme  $H_2$ .

**Lemme .3.** *On suppose que  $R > 0$  et  $Q_x = Q_x^\top \leq 0$ . L'équation algébrique de Riccati  $A^\top P + PA - PBR^{-1}B^\top P + Q_x = 0$  admet une unique solution  $P \leq 0$  si le triplet  $(Q_x, A, B)$  est stabilisable et détectable.*

En s'appuyant sur ce lemme, Kalman propose le théorème suivant :

**Théorème .4** (Solution du Problème LQ).

*Sous les hypothèses du lemme, la loi de commande par retour d'état  $u(t) = -Kx(t)$  solution du problème de commande linéaire quadratique est obtenue pour*

$$K = K_{LQ} = R^{-1}(B^\top P + S^\top) \quad (127)$$

si  $P$  obéit à l'équation algébrique de Riccati et  $P \leq 0$ . On a alors :

$$J_{LQ}(K_{LQ}) = x_0^\top P x_0 \quad (128)$$

#### B.1.4 Equivalence entre $H_2$ et LQ

Posons  $G(s)$  une matrice de transfert rationnelle (propre et stable), définie par  $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ , avec  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ ,  $D \in \mathbb{R}^{p \times m}$  et définissons les signaux d'entrée  $u(t)$ , l'état  $x(t)$  et la sortie  $z(t)$  selon :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \quad (129)$$

Un point qui nous intéresse particulièrement concerne les multiples interprétation de la norme  $H_2$  (CHEVREL 2002). Dans le domaine fréquentiel, on qualifie le carré de la norme-2 d'un système comme la somme de l'énergie de ces réponses impulsionnelles  $g_{ij}(s)$  (voir (130)). Dans le domaine temporelle, ce rapprochement s'opère aussi entre l'énergie d'un signal et sa norme-2.

$$\|G(s)\|_2^2 = \sum_{i,j} \|G_{i,j}(s)\|_2^2 = \sum_{i,j} \|g_{i,j}(t)\|_2^2 \quad (130)$$

Une seconde possibilité est d'interpréter la norme-2 comme une fonction quadratique. Prenons à nouveau le système d'état (129) et posons la fonction quadratique (131) où  $x_0$  définit l'état initial de  $G(s)$ .

$$\int_0^\infty x^\top(t)Qx(t) + 2x^\top(t)Su(t) + u^\top(t)Ru(t) \quad (131)$$

Sous condition de semi-positivité de  $Q$  et de stricte positivité de  $R$ , la fonction est convexe. En automatique, on nomme *problème Linéaire Quadratique*, le problème correspondant à trouver la commande  $u(t)$  qui minimise (131).

Remarquons alors qu'en posant  $Q = C^\top C$ ,  $S = C^\top D$  et  $R = D^\top D$  et en nous appuyant sur le **corollaire .1**, on obtient une équivalence entre la norme-2 du système, et le critère linéaire quadratique :

$$\|G(s)\|_2^2 = \int_0^\infty x^\top(t)C^\top Cx(t) + 2x^\top(t)C^\top Du(t) + u^\top(t)D^\top Du(t) \quad (132)$$

Cette équivalence est un avantage car elle permet de lier les méthodologies de formulation des problèmes  $H_2$  aux outils de résolution des problèmes LQ, que nous présentons dans les paragraphes suivants.

**En Résumé** Ces deux approches ont initialement été développées pour des objectifs différents, la première pour répondre à une problématique d'asservissement, la seconde pour résoudre un problème de condition initiale. Toutefois, dans un contexte énergétique ces formulations font toutes deux sens pour la construction d'un compromis énergie/performance.

Enfin, notons que la difficulté de ces formulations réside dans le paramétrage et la transcription « signal » d'une performance. Le paragraphe suivant revoit certaines techniques pour enrichir cette formulation.

## B.2 Etude des méthodes de synthèse pour les problèmes $H_2$ /LQ

### B.2.1 Formalisation du problème de synthèse

Traduire un cahier des charges sous la forme d'un critère algébrique ou bien d'un système dynamique est une tâche laborieuse et parfois peu intuitive. Une première solution inspirée de la philosophie  $H_\infty$  est de s'appuyer sur les signaux classiques de l'analyse (fonction de sensibilité, écart, etc.). Toutefois, pour ne pas restreindre la synthèse à ces seules informations, plusieurs travaux explorent la voie d'un modèle standard enrichi (LARMINAT 2000).

L'approche dite de *pondération en aval* (du processus) consiste à composer de nouveaux signaux de performance, par le biais de filtres fréquentielles. Par exemple, pour pénaliser des bandes de fréquences particulière d'un système, ou bien pour réaliser un

---

suivi de trajectoire avec une pénalité intégrale de l'erreur (voir synthèse LQI).

Une *pondération en amont* désigne un dual du principe précédent. Cette fois-ci, on recherche l'enrichissement du modèle standard par une pénalisation fréquentiel en amont du processus. La modélisation de signaux exogènes (perturbations, références) par un système dynamique est un complément d'information utile à la synthèse de commande (KWATNY et KALNITSKY 1978 ; B. D. O. ANDERSON et MOORE 1989 ; SIEVERS et FLOWTOW 1989). Dans le contexte  $H_2$  ou  $H_\infty$ , cette vision est similaire à une pondération fréquentielle amont (CHEVREL 2002). L'un des avantages notables de ce cas de figure est la possibilité de synthétiser un observateur non-biaisé, grâce à une reconstruction simultanée de l'état du processus et du signal exogène.

Attention toutefois, l'inclusion d'état non-contrôlables dans le modèle du problème n'est pas sans incidence. Spécialement si ces derniers modélisent une perturbation non-dissipative. Dans ce cas, les signaux associés se doivent d'être inobservable par le critère, autrement le problème d'optimisation (e.g. LQ  $H_2$ ,  $H_\infty$ ) n'admet pas de solution. Concrètement, le problème doit être bien-posé tel qu'il existe un régulateur capable d'occulter la part incontrôlable du système exogène. Plusieurs travaux traitent d'une généralisation de l'optimisation  $H_2/H_\infty$  dans le cas d'un modèle standard non stabilisable (LIU, ZHANG et MITA 1997 ; CHEVREL 2002 ; FENG, YAGOUBI et CHEVREL 2012). L'idée principale est de construire sur la base du modèle exogène une trajectoire de référence pour l'état et la commande, puis de construire le problème comme un rejet asymptotique de la perturbation. L'obtention du régulateur est séquentielle, deux équations de Sylvester sont résolues pour obtenir les trajectoires, puis un régulateur est calculé sur la base d'un critère LQ. Une généralisation méthodologique, unifiant la conception pour les systèmes exogènes stables ou instables, est proposée dans (FAUVEL, CLAVEAU et CHEVREL 2013). La solution est un régulateur structuré dont les coefficients s'obtiennent la résolution d'un critère quadratique dit *occultant*. Cette proposition est mise en œuvre par l'emploi d'un algorithme non-lisse et est illustrée sur l'exemple d'un suivi de trajectoire.

### B.2.2 Stabilité et Robustesse

Le principale avantage, déjà évoqué, est très certainement l'expérience affichée par la commande LQ et  $H_2$ . Comme le notent GOODWIN, GRAEBE et SALGADO (2001), ce succès se mesure par plusieurs applications et brevets dans des domaines variés (automobile, processus industriels, etc.).

Un second point concerne les garanties de stabilité ou robustesse. La commande LQ permet d'engendrer systématiquement (y compris dans le cas MIMO) des lois de commande stabilisantes. De plus, il est connu de longue date qu'elle confère au système bouclé des propriétés de robustesse en entrée enviables (M. SAFONOV et Michael ATHANS 1977)<sup>2</sup>. Dans le cas général (i.e. LQR ou synthèse  $H_2$ ) ces propriétés peuvent être per-

---

2. L'extériorité du lieu de Nyquist au cercle de Kalman garantit de bonnes marges de gain, de phase,

due (voir exemple de J. DOYLE (1978)). Toutefois, des méthodes comme la technique du LTR (*loop transfert recovery* (G. STEIN et M. ATHANS 1987 ; Jan Marian MACIEJOWSKI 1989)), permettent de récupérer ces propriétés, notamment par un choix approprié de pondération.

### B.2.3 Commande par Anticipation

Dans le cas des systèmes homogènes continus, la solution au problème LQ à horizon fini est connue depuis relativement longtemps (B. D. ANDERSON et MOORE 1971 ; LEWIS 1992). Le cas d'un système non-homogène est résolu plus tardivement, tout d'abord pour un horizon infini par HAMPTON, KNOSPE et TOWNSEND (1996), en supposons les signaux exogènes bornés, puis, dans le cas d'un horizon fini par SLIMEN (2011) en s'appuyant sur le raisonnement de HAMPTON, KNOSPE et TOWNSEND (1996) et les résultats préliminaires de BORNE et al. (1990).

Un cas d'intérêt majeur est de considérer la connaissance a priori du signal exogène sur un horizon futur limité mais inférieur à l'horizon d'optimisation. Les problèmes de commande qui résultent de cette hypothèse sont couramment appelés *problème de commande avec anticipation* (*optimal preview control problem*, (KOJIMA et ISHIJIMA 1999)). Dans le contexte d'un problème LQ avec anticipation (LQ-preview), plusieurs voies ont été explorées. Une contribution pionnière est proposée par HAYASE et ICHIKAWA (1969), au travers d'une réécriture du problème initial comme un problème de commande déterministe. D'autres approches sont à relever : (TOMIZUKA et WHITNEY 1975), pour une formalisation mixte (stochastique et déterministe) ; (SHAKED et SOUZA 1995), pour une résolution par la théorie des jeux ; et (KOJIMA et ISHIJIMA 1999) pour la formulation d'un problème au écart, puis la résolution d'une équation de Riccati.

Dans le contexte  $H_2$  avec anticipation ( $H_2$ -preview), MARRO, LORENZO NTOGRAMATZIDIS et ZATTONI (2004) résout le problème de découplage pour un système stable par une approche géométrique. FERRANTE, MARRO et L. NTOGRAMATZIDIS (2007) propose une solution pour la problématique  $H_2$  *full-information* ( $H_2$ -FI) qui s'obtient par la résolution d'une équation de Riccati. Grâce à une paramétrisation de l'Hamiltonien il en démontre l'optimalité. Enfin, SALEH, CHEVREL et LAFAY (2012) réexamine le problème ( $H_2$ -FI) en supposant un modèle des signaux exogènes. La commande optimale qui en résulte se compose de quatre termes, les trois premiers sont similaires aux résultats de FERRANTE, MARRO et L. NTOGRAMATZIDIS (2007), le dernier, appelée *compensation prédictive* assure le rejet asymptotique du signal de perturbation au delà de l'horizon d'anticipation. Il s'obtient par la résolution d'une équation de Sylvester.

Au lecteur qui souhaiterait approfondir la thématique  $H_2$ /LQ avec anticipation, il est conseillé de consulter (SLIMEN 2011, chap. 2).

---

ainsi qu'une bonne robustesse vis-à-vis de non-linéarité statiques (M. G. SAFONOV 1980)

---

#### **B.2.4 Restrictions**

Malgré ces avantages notoires, ces méthodes sont limitantes vis-à-vis de nos objectifs initiaux. Tout d'abord, elle concerne uniquement les systèmes LTI et ne s'étendent pas aux systèmes non-linéaires ou paramétriques.

Seconde critique, la formulation  $H_2/LQ$  n'intègre pas la gestion de contraintes sur l'état ou la sortie.

## C Paramètres du Camion-FHS

Cette annexe résume les paramètres du modèle du camion frigorifique avec une architecture hybride série, introduit au **chapitre 5**.

Paramètre	Description	Valeur	Unité
$r$	Rayon de la roue	0.28	$m$
$m_{veh}$	Masse camion	$20 \times 10^3$	$kg$
$g$	Coefficient de gravité	9.81	$kg.s^{-1}$
$f_r$	Coefficient de frottement sec	$9 \times 10^{-3}$	—
$\rho$	Masse Volumique de l'air	1.2	$kg.m^{-3}$
$C_x$	Coefficient de trainée	0.45	—
$m_{veh}$	Masse camion	$20 \times 10^3$	$kg$
$J_{roues}$	Inertie roue virtuelle	3.26	$kg.m^2$
$J_{th}$	Inertie axe moteur électrique	0.19	$kg.m^2$
$R_{bv}$	Rapport boîte de vitesse	6.67	—
$v_{min}$	Vitesse minimale	0	$m.s^{-1}$
$v_{max}$	Vitesse maximale	40	$m.s^{-1}$
$P_{mel}^{min}$	Puissance minimale machine électrique	$-89 \times 10^3$	$W$
$P_{mel}^{max}$	Puissance maximale machine électrique	$160 \times 10^3$	$W$

TABLE 4 – Sous-Système Mobilité



---

Paramètre	Description	Valeur	Unité
$K_{hp}$	Gain de la boucle froid	1	—
$T_{ext}$	Température Extérieure	30	$^{\circ}C$
$T_{cible}$	Température ciblé pour le com- partiment	-18	$^{\circ}C$
$\rho$	Masse Volumique de l'air	1.2	$kg.m^{-3}$
$c_p$	Capacité thermique de l'air	1004	$J.(kg.K)^{-1}$
$\lambda_{paroi}$	Conductivité thermique de la paroi	0.025	$W.(m.K)^{-1}$
$\lambda_{air}$	Conductivité thermique de la paroi	0.026	$W.(m.K)^{-1}$
$S_{paroi}$	Surface totale de la paroi	30	$m^2$
$S_{porte}$	Surface totale de la porte	4	$m^2$
$L$	Largeur du compartiment	2.5	$m$
$l$	Longueur du compartiment	5	$m$
$H$	Hauteur du compartiment	2.5	$m$
$e$	Épaisseur de la paroi/porte	0.12	$m$

---

TABLE 5 – Sous-Système Conditionnement

Paramètre	Description	Valeur	Unité
$I_{cell}$	Charge Nominale	33	$A.h$
$nb_{cell}^p$	Nombre de cellules RC en parallèle	5	—
$nb_{cell}^s$	Nombre de cellules RC en série	40	—
$I_{bat}^{max}$	Intensité maximale décharge	300	$A$
$I_{bat}^{min}$	Intensité maximale recharge	-117	$A$
$\tau_{dc}$	Constante de temps du convertisseur	0.05	$s$

---

TABLE 6 – (EOF-energie) Bloc-batterie

Paramètre	Description	Valeur	Unité
$K_{gen}$	Charge Nominale	1	—
$LHV$	Pouvoir calorifique	$44 \times 10^3$	$J.g^{-1}$
$\tau_{mth}$	Constante de temps moteur	0.1	$s$

---

TABLE 7 – (EOF-energie) Electrogène

## D Aperçu d'un procédé de décomposition généralisé

Cette annexe explore une généralisation de la méthode de décomposition introduite au **chapitre 3**. Ce procédé fait office d'une perspective de recherche.

Les directives de la méthode de décomposition sont résumées en 5 étapes.

### Étape 0 : Identification du Système Énergétique

Soit un système dont le système énergétique se compose de  $n_c^{tot}$  services et  $n_s^{tot}$  ressources. Ses interactions sont représentées par des schémas (EOF), faisant apparaître les chaînes énergétiques (Fig. 20a).

### Étape 1 : Représentation Modulaire

Les principes de modélisation exposés dans le chapitre précédent sont appliqués. Les clients et les sources sont formalisés, tenant compte des causalités de pilotages. Le nœud est défini dans un premier temps comme une boîte noire (Fig. 20b).

### Étape 2 : Décomposition du Nœud Général

Le nœud général est détaillé tenant compte de notre connaissance de la structure énergétique. Dans la continuité du référentiel, on privilégie une décomposition par (EOF-T). Chaque interaction physique traduit une ligne de puissance partielle. Les points de jonction et de bifurcation sont désignés par le symbole J.

### Étape 3 : Positionnement des Nœuds $U_T$ et $U_D$

Les nœuds unitaires ont deux fonctions dans la décomposition : modéliser les transferts d'énergie et figer la causalité. Dans un premier temps, on cherche uniquement à identifier les nœuds de transformation et de distribution. On constate qu'un (EOF-T) portant une entrée de consigne pour l'énergie à échanger aura une influence active sur ses ports physiques. Nous proposons que :

**Proposition .5.** *Tout (EOF-T) contrôlable en puissance équivaut à un nœud de distribution ( $U_D$ ).*

Les (EOF-T) sans entrée de pilotage sont identifiés comme des nœuds de transfert ( $U_T$ ). Lorsqu'ils ont une interaction directe avec un module actif, leur causalité est évidente et peut être statuée dès-à-présent (Fig. 20d). Sinon, il faudra attendre l'étape 5.

*Remarque .6.*

A cette étape, la stratégie est partiellement décentralisée dans les nœuds unitaires. Cependant, la communication reste centralisée sous la forme d'une stratégie partielle.

### Étape 4 : Positionnement des Nœuds Mono/Multi

Dans cette dernière étape, nous allons remplacer les jonctions et les (EOF-T) par les nœuds mono/multi qui leur correspondent. Cette étape nécessite de comparer des sous-ensembles de la chaîne énergétique à des modules de nature sources ou clients. On procède ainsi :

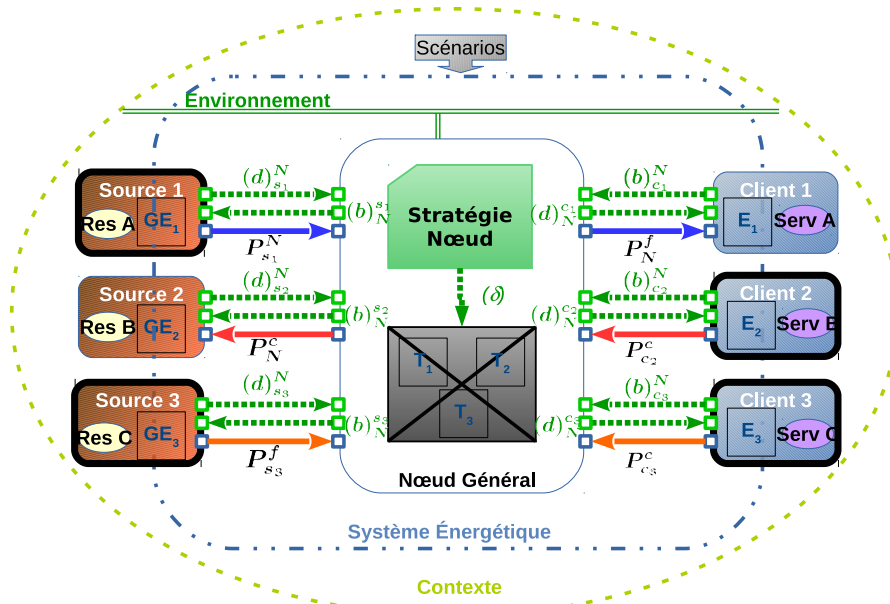
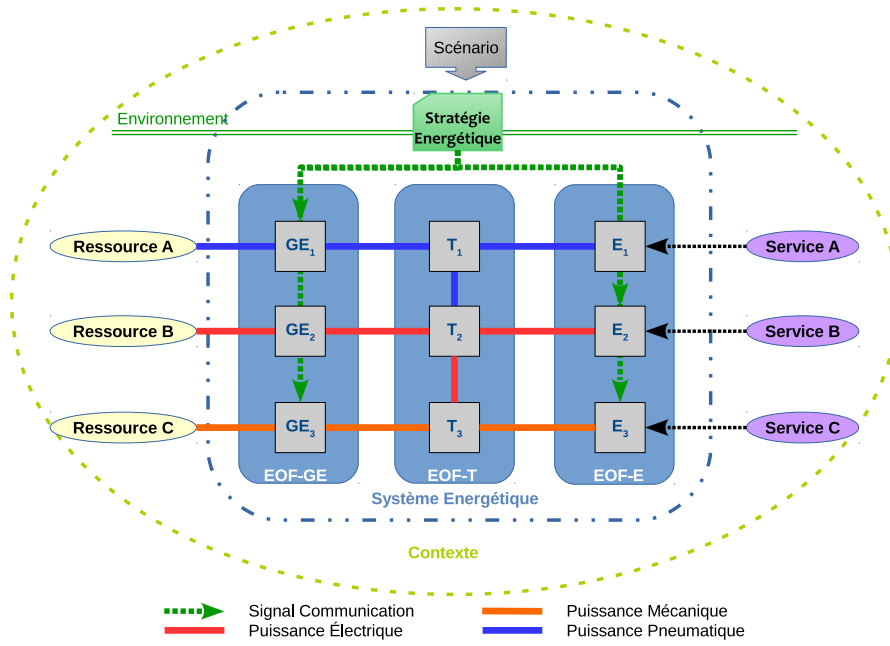
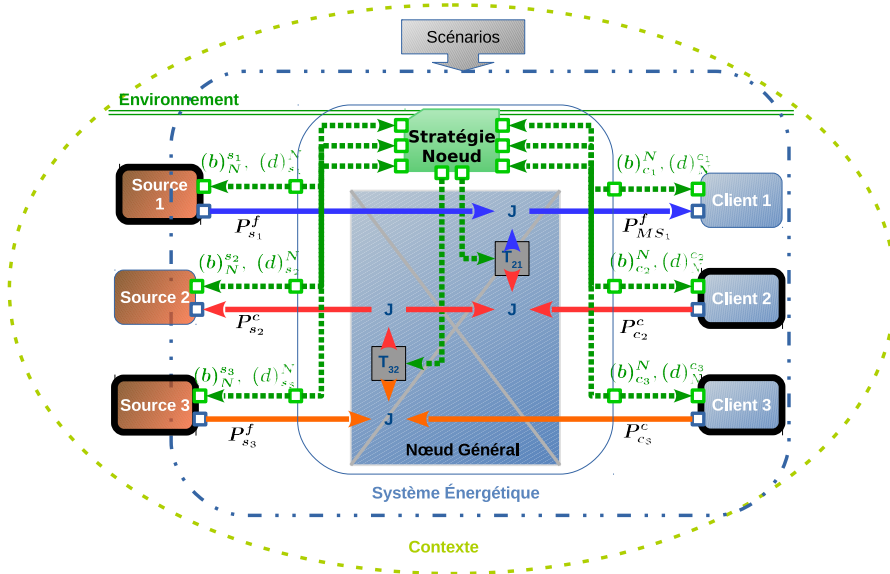
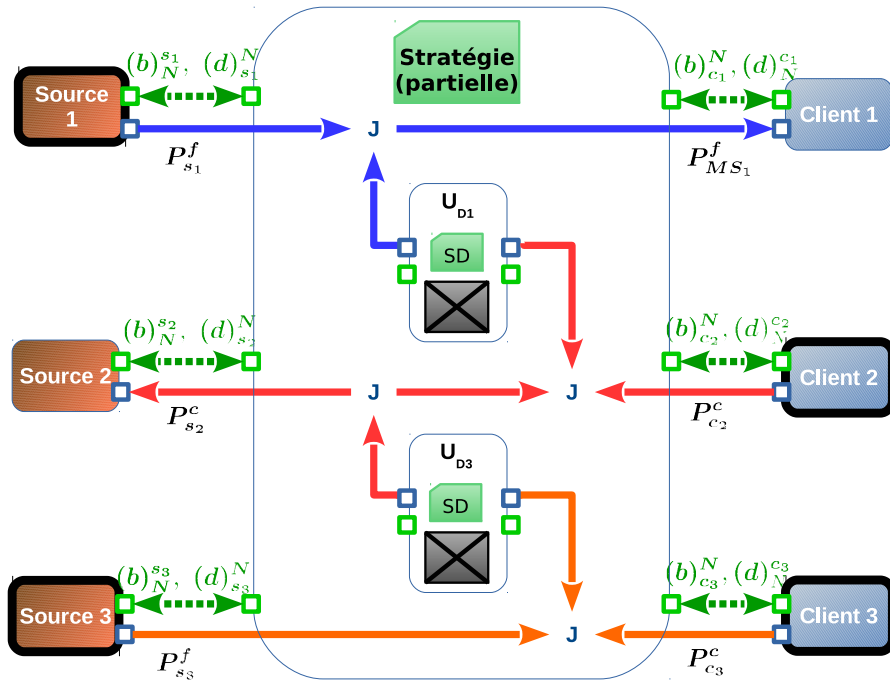


FIGURE 20 – Procédure de décomposition générale (1/3)



(c) Vision Modulaire du Système Énergétique et Structure du Nœud



(d) Placement des Nœuds Unitaires de Distribution ( $U_D$ )

FIGURE 20 – Procédure de décomposition générale (2/3)

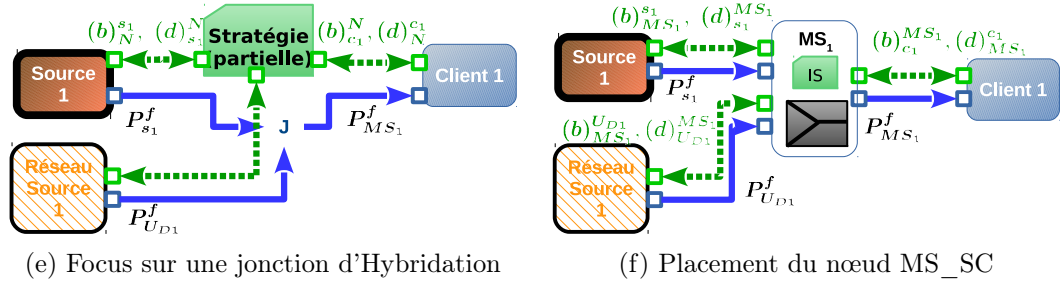


FIGURE 20 – Procédure de décomposition générale (3/3)

1. On se focalise sur une jonction et les modules interagissant en ce point (Fig. 20e), e.g. clients, sources et (EOF-T) .
2. On analyse les (EOF-T) en termes de clients ou de sources. Pour cela, il faut étudier la partie du système située au-delà de l'(EOF-T) et statuer sur sa nature : source ou client.
3. La nature des modules étant définie, on remplace la jonction par le nœud correspondant : concurrence, hybride ou général
4. On substitue les nœuds MS\_SC aux jonctions d'hybridations, et les nœuds SS\_MC aux jonctions de concurrence (Fig. 20f). On impose la causalité sources.
5. Si la jonction est générale, il faut à nouveau exécuter l'étape 3.
6. On inclut les nœuds unitaires de transfert  $U_T$  dans la modélisation des nœuds multi/mono. Cette étape permet de simplifier le nombre de nœuds total. Elle est réalisable uniquement avec les nœuds de transferts en interaction directe avec la jonction.

Lorsqu'il y a ambiguïté sur la nature d'un (EOF-T), il est conseillé de s'aider des lignes de puissance telle qu'elles sont définies en Bond Graph (S.-T. WU et YUCEFTOUMI 1995 ; Eric BIDEAUX et al. 2006). Dans le cadre de notre modélisation, nous proposons :

**Proposition .7.** *Une ligne de puissance entrant dans la jonction provient d'un (EOF-T) assimilable à une source. A l'inverse, une ligne de puissance sortante de la jonction se dirigera vers un module analogue à un client.*

### Étape 5 : Résolution de la Causalité

Dernière étape, la causalité de la chaîne énergétique est à analyser, et les nœuds d'accumulation sont à placer là où ils sont nécessaires (Fig. 21). On note que les étapes précédentes, et notamment le choix arbitraire de la causalité source pour les nœuds multi/mono (*Hypothèse 3.7*), imposent des contraintes sur la causalité des modules adjacents. Celles-ci se propagent le long des liens de puissances à la manière d'une ligne de modulation. On analyse deux cas de figures :

1. Un (EOF-T) est lié à deux modules actifs, il est remplacé par un nœud d'accumulation.

2. Un nœud multi/mono est en conflit de causalité avec l'un des modules (ou des nœuds) adjacents. Un nœud d'accumulation ou de distribution est simulé entre les deux parties, pour résoudre le conflit.

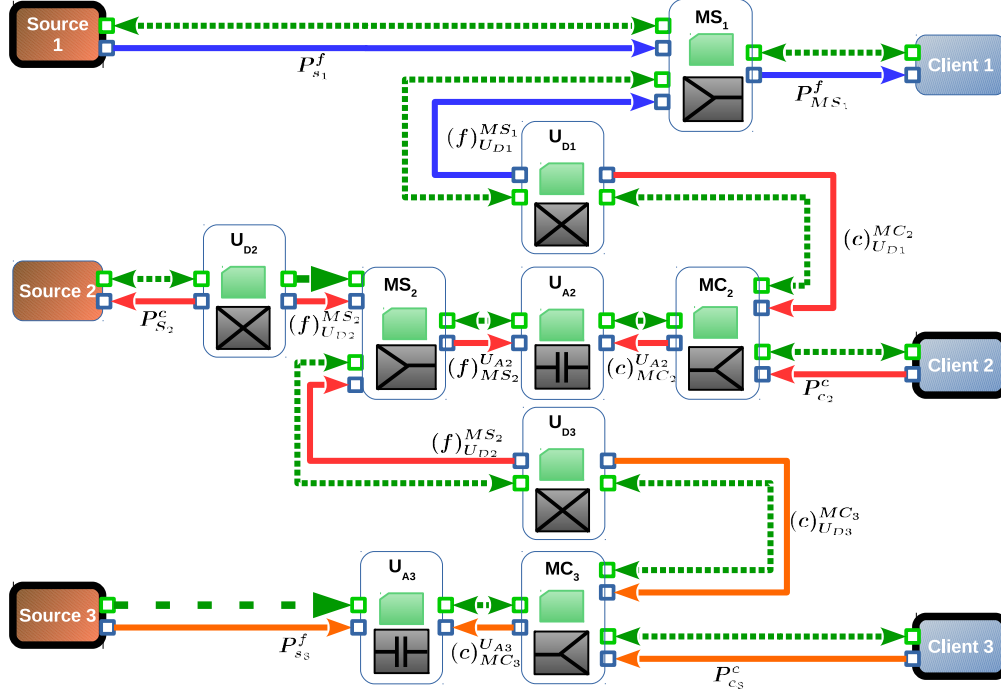


FIGURE 21

### En résumé

Ces cinq étapes doivent aboutir à une vision décomposée de la chaîne énergétique, faisant apparaître uniquement des clients, des sources, et les nœuds présentés en début de chapitre. Nos conventions sur la causalité des nœuds et l'introduction de nœuds d'accumulation ou de nœuds de distribution supplémentaires garantissent la continuité de la causalité sur chacune des lignes de puissance.

De cette décomposition, on peut constater trois règles élémentaires :

1. Un nœud MS\_SC et un nœud SS\_MC liés par leur face « multi » sont séparés par un nœud de distribution.
2. Un nœud MS\_SC et un nœud SS\_MC liés par leur face « mono » sont séparés par un nœud d'accumulation.
3. Un client passif ou une source passive est séparé d'un nœud SS\_MC par un nœud de distribution.

---

# Bibliographie

- ABRAS, Shadi (2009). « Système domotique Multi-Agents pour la gestion de l' énergie dans l'habitat ». Thèse de doct. Thèse de l'Institut Polytechnique de Grenoble. (Voir pp. [21](#), [23](#), [28](#), [43](#)).
- ALLISON, James, David WALSH, Michael KOKKOLARAS, Panos Y PAPALAMBROS et Matthew CARTMELL (2006). « Analytical target cascading in aircraft design ». In : *44th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit*. p. 9–12. (Voir p. [33](#)).
- ANDERSON, Brian D O et John B MOORE (1989). *Optimal Control : Linear Quadratic Methods*. Sous la dir. de Kailath THOMAS. Prentice-H. (Voir pp. [173](#), [176](#)).
- ANDERSON, Brian DO et John B MOORE (1971). *Linear optimal control*. T. 197. 1. Prentice-hall Englewood Cliffs. (Voir p. [177](#)).
- APKARIAN, Pierre, Pascal GAHINET et Greg BECKER (1995). « Self-scheduled  $H_{\infty}$  control of linear parameter-varying systems : a design example ». *Automatica* 31, p. 1251–1261, 1995. DOI : [10.1016/0005-1098\(95\)00038-X](#). (Voir p. [102](#)).
- ARNAL, Etienne (2013). « Modélisation et commande hiérarchisées du bâtiment pour l'amélioration des performances énergétiques, thermiques et optiques ». 2013. (Voir pp. [32](#), [34](#), [37](#)).
- ARNAL, Etienne et Cédric ANTHIERENS (2011). « Consideration of glare from daylight in the control of the luminous atmosphere in buildings ». In : *Advanced Intelligent Mechatronics*. 3-7 July 2011. Budapest. p. 1070–1075. (Voir pp. [23](#), [28](#), [36](#)).
- BEMPORAD, Alberto, Manfred MORARI, Vivek DUA et Efstratios N. PISTIKOPOULOS (2002). « The explicit linear quadratic regulator for constrained systems ». *Automatica* 38, p. 3–20, 2002. DOI : [10.1016/S0005-1098\(01\)00174-1](#). (Voir pp. [93–95](#)).
- BERNARD, J., S. DELPRAT, T.M. GUERRA et F.N. BÜCHI (2010). « Fuel efficient power management strategy for fuel cell hybrid powertrains ». *Control Engineering Practice* 18, p. 408–417, 2010. DOI : [10.1016/j.conengprac.2009.12.009](#). (Voir pp. [25](#), [28](#)).
- BIDEAUX, E, M SMAOUI, X BRUN et D THOMASSET (2003). « Design of a compliant positioning control using an inverse method ». In : *Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control*. p. 147–164. (Voir p. [14](#)).



## BIBLIOGRAPHIE

---

- BIDEAUX, Eric, Jérôme LAFFITE, Wilfrid MARQUIS-FAVRE, Serge SCAVARDA et Franck GUILLEMARD (2006). « System design using an inverse approach Application to the hybrid vehicle powertrain ». *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 40, p. 269–290, 2006. DOI : [10.3166/jesa.40.269-290](https://doi.org/10.3166/jesa.40.269-290). (Voir pp. [1](#), [13](#), [14](#), [16](#), [17](#), [20](#), [184](#)).
- BORNE, P, G DAUPHIN-TANGUY, JP RICHARD et F ROTELLA (1990). *Commande et optimisation des processus*. Editions T. Paris : Méthodes et techniques de l'ingénieur. p. 2012. (Voir pp. [25](#), [177](#)).
- BORSENBERGER, Henri, Philippe DESSANTE, Marc PETIT et Guillaume SANDOU (2012). « Optimisation technico économique des réseaux d'énergie électrique ». In : *Conception systémique pour la conversion d'énergie électrique 1 : gestion, analyse et synthèse*. Sous la dir. de Xavier Roboam (EDS.) Hermès Science Publications. Chap. 6, p. 253–288. (Voir p. [49](#)).
- BOUALI, Anis, Mohamed YAGOUBI et Philippe CHEVREL (2008). « Gain Scheduled Observer State Feedback Controllers for Rational LPV Systems ». In : *7th IFAC World Congress*, sous la dir. de Chung MYUNG. COEX, Korea, South. p. 4922–4927. DOI : [10.3182/20080706-5-KR-1001.00827](https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00827). (Voir p. [102](#)).
- BOUSCAYROL, A et Ph DELARUE (2002). « Simplifications of the Maximum Control Structure of a wind energy conversion system with an induction generator ». *International Journal of Renewable Energy Engineering* 4, p. 479–485, 2002. (Voir p. [16](#)).
- BOUSCAYROL, A, Ph DELARUE et X GUILLAUD (2005). « Power strategies for maximum control structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine ». *Renewable Energy* 30, p. 2273–2288, 2005. (Voir p. [15](#)).
- BOUSCAYROL, Alain (2003). « Formalismes de représentation et de commande appliqués aus systèmes électromécaniques multimachines multiconvertisseurs ». Thèse de doct. (Voir pp. [15](#), [16](#)).
- BOUSCAYROL, Alain, Xavier GUILLAUD, Jean-Paul HAUTIER et Philippe DELARUE (2000). « Macro-modélisation pour les conversions électromécaniques : application à la commande des machines électriques ». *Revue Internationale de Génie Electrique* 3, p. 257–282, 2000. (Voir pp. [2](#), [13](#), [15](#)).
- CHEN, H. et F. ALLGÖWER (1998). « A Quasi-Infinite Horizon Nonlinear Model Predictive Control Scheme with Guaranteed Stability ». *Automatica* 34, p. 1205–1217, 1998. DOI : [10.1016/S0005-1098\(98\)00073-9](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(98)00073-9). (Voir p. [95](#)).
- CHEN, Lijun, Na LI, Steven H. LOW et John C. DOYLE (2010). « Two Market Models for Demand Response in Power Networks ». In : *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*. p. 397–402. DOI : [10.1109/SMARTGRID.2010.5622076](https://doi.org/10.1109/SMARTGRID.2010.5622076). (Voir p. [21](#)).

- CHEN, Yan et Junmin WANG (2014). « Adaptive Energy-Efficient Control Allocation for Planar Motion Control of Over-Actuated Electric Ground Vehicles ». *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 22, p. 1362–1373, 2014. DOI : [10.1109/TCST.2013.2287560](https://doi.org/10.1109/TCST.2013.2287560). (Voir pp. 21, 28).
- CHEVREL, Philippe (2002). « Méthodologie de la commande par approche d'état ». In : *Commande des systèmes linéaires*. Sous la dir. de Philippe (SOUS LA DIRECTION DE) LARMINAT. Traité IC2. Paris : Hermes Science. Chap. 5, p. 288. (Voir pp. 172, 174, 176).
- (2007). « Tutoriel sur les approches LPV en commande ». In : *GT Méthodes et Outils pour la Synthèse et l'Analyse en Robustesse, MOSAR*. GdR CNRS-MACS. (Voir p. 102).
- CHMIELEWSKI, D.J. et V. MANOUSIOUTHAKIS (1996). « On constrained infinite-time linear quadratic optimal control ». *Systems & Control Letters* 29, p. 121–129, 1996. DOI : [10.1016/S0167-6911\(96\)00057-6](https://doi.org/10.1016/S0167-6911(96)00057-6). (Voir p. 96).
- DAUPHIN-TANGUY, Geneviève (1999). « Les bond graphs et leur application en mécanique ». *Techniques de l'ingénieur. Informatique industrielle* 9, p. 1–24, 1999. (Voir pp. 13, 14).
- DELARUE, Ph, A BOUSCAYROL, A TOUNZI, X GUILLAUD et G LANCIGU (2003). « Modeling, control and simulation of an overall wind energy conversion system ». *Renewable Energy* 28, p. 1169–1185, 2003. (Voir p. 15).
- DELPRAT, S., J. LAUBER, T.M. GUERRA et J. RIMAU (2004). « Control of a parallel hybrid powertrain : optimal control ». *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 53, 2004. DOI : [10.1109/TVT.2004.827161](https://doi.org/10.1109/TVT.2004.827161). (Voir p. 25).
- DELPRAT, Sébastien (2002). « Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles ». Thèse de doct. Thèse de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis. (Voir pp. 11, 21, 25, 26, 28, 91, 134).
- DESCARTES, René (1637). *Discours De La Méthode Pour Bien Conduire Sa Raison*. Ian Maire. (Voir p. 7).
- DIB, Wissam, Alexandre CHASSE, Philippe MOULIN, Antonio SCARRETTA et Gilles CORDE (2014). « Optimal energy management for an electric vehicle in eco-driving applications ». *Control Engineering Practice* 29, p. 299–307, 2014. DOI : [10.1016/j.conengprac.2014.01.005](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.01.005). (Voir pp. 21, 28, 138).
- DOMAHIDI, A., A.U. ZGRAGGEN, M.N. ZEILINGER, M. MORARI et C.N. JONES (2012). « Efficient interior point methods for multistage problems arising in receding horizon control ». In : *Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51<sup>st</sup> Annual Conference on*. p. 668–674. DOI : [10.1109/CDC.2012.6426855](https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6426855). (Voir p. 95).

- DONNADIEU, Gérard, Daniel DURAND, Danièle NEEL, Emmanuel NUNEZ et Lionel SAINT-PAUL (2003). « L'Approche systémique : de quoi s'agit-il ». *Synthèse des travaux du Groupe AFSCET " Diffusion de la pensée systémique "*, Paris, Association Française de Science des Systèmes Cybernétiques, Cognitifs et Techniques, 2003. (Voir p. 8).
- DOYLE, J. (1978). « Guaranteed margins for LQG regulators ». *IEEE Transactions on Automatic Control* 23, p. 756–757, 1978. DOI : [10.1109/TAC.1978.1101812](#). (Voir p. 177).
- DUPRIEZ-ROBIN, F., L. LORON, F. CLAVEAU et P. CHEVREL (2009). « Design and optimization of an hybrid sailboat by a power modeling approach ». In : *Electric Ship Technologies Symposium, 2009. ESTS 2009. IEEE*. p. 270–277. DOI : [10.1109/ESTS.2009.4906525](#). (Voir p. 15).
- DUPRIEZ-ROBIN, Florian (2010). « Dimensionnement d'une propulsion hybride de voilier, base sur la modélisation par les flux de puissance ». Thèse de doct. Thèse de l'Ecole Polytechnique de l'université de Nantes. (Voir pp. 20, 28).
- EL FEKI, Mariem, Audrey JARDIN, Wilfrid MARQUIS-FAVRE, Laurent KRÄHENBÜHL, Eric BIDEAUX et Daniel THOMASSET (2012). « Determination of Essential Orders From a Bond Graph Model ». *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 134, p. 061006, 2012. DOI : [10.1115/1.4004772](#). (Voir p. 16).
- ERIKSSON, Darek M. (1997). « A principal exposition of Jean-Louis Le Moigne's systemic theory ». *Cybernetics & Human Knowing* 4, p. 2–3, 1997. (Voir pp. 6, 8).
- EXPERTS ETI, Auteurs et (2015). *Physique énergétique*. Sous la dir. de Techniques de L'INGÉNIEUR. T. base documentaire : ti201. Editions T.I. eprint : [Physique\ 'e}nerg\ 'e}tique](#). (Voir p. 10).
- FAUVEL, Clément, Fabien CLAVEAU et Philippe CHEVREL (2013). « A generically well-posed H2 control problem for a one shot feedforward and feedback synthesis ». In : *2013 17<sup>th</sup> International Conference on System Theory, Control and Computing*. IEEE. p. 201–206. (Voir pp. 120, 176).
- (2014). « Energy Management in Multi-Consumers Multi-Sources System : A Practical Framework ». In : *19th IFAC World Congress*. Cape Town, South Africa.
- (2015a). « A Two-Layer LPV Based Control Strategy for Input and State Constrained Problem : Application to Energy Management ». In : *14th European Control Conference (ECC)*. Linz, Autralia. (Voir pp. 98, 99).
- (2015b). « System and exogeneous signals state feedback and feedforward : about consistency of the related H2 problem ». *Journal of the Franklin Institute (soumis)*, 2015.
- FELLINI, Ryan, Nestor MICHELENA, Panos PAPALAMBROS et Michael SASENA (1999). « Optimal design of automotive hybrid powertrain systems ». In : *Environmentally*

- Conscious Design and Inverse Manufacturing, 1999. Proceedings. EcoDesign'99 : First International Symposium On.* IEEE. p. 400–405. (Voir pp. 20, 28, 32).
- FENG, Yu, Mohamed YAGOUBI et Philippe CHEVREL (2012). « Control with unstable and nonproper weights for descriptor systems ». *Automatica* 48, p. 991–994, 2012. DOI : [10.1016/j.automatica.2012.02.036](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.02.036). (Voir p. 176).
- FERRANTE, A., G. MARRO et L. NTOGRAMATZIDIS (2007). « A Hamiltonian approach to the H2 decoupling of previewed input signals ». In : *Control Conference (ECC), 2007 European*. p. 1149–1154. (Voir p. 177).
- FERREAU, Hans Joachim, Christian KIRCHES, Andreas POTSCHKA, Hans Georg BOCK et Moritz DIEHL (2014). « qpOASES : a parametric active-set algorithm for quadratic programming ». *Mathematical Programming Computation* 6, p. 327–363, 2014. DOI : [10.1007/s12532-014-0071-1](https://doi.org/10.1007/s12532-014-0071-1). (Voir p. 95).
- FINDEISEN, W., F.N. BAILEY, M. BRDYŚ, K. MALINOWSKI, P. TATJEWSKI et A. WOŹNIAK (1980). *Control and Coordination in Hierarchical Systems*. International Series on Applied Systems Analysis. J. Wiley. (Voir pp. 22, 98).
- FOTSU NGWOMPO, Roger (1997). « Contribution au dimensionnement des systèmes sur des critères dynamiques et énergétiques. Approche par bond graph. » Thèse de doct. (Voir p. 14).
- FRISON, Gianluca et John Bagterp JØRGENSEN (2015). In : « MPC Related Computational Capabilities of ARMv7A Processors ». « MPC Related Computational Capabilities of ARMv7A Processors » (2015). p. 3419–3426. (Voir pp. 94, 95).
- FRISON, Gianluca, Hans Henrik Brandenborg SORENSEN, Bernd DAMMANN et John Bagterp JØRGENSEN (2014). « High-performance small-scale solvers for linear Model Predictive Control ». In : *2014 European Control Conference (ECC)*. IEEE. p. 128–133. DOI : [10.1109/ECC.2014.6862490](https://doi.org/10.1109/ECC.2014.6862490). HPMPC Toolbox available : <https://github.com/giaf/hpmc>. (Voir p. 95).
- GAO, David Wenzhong, Chris MI et Ali EMADI (2007). « Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles ». *Proceedings of the IEEE* 95, p. 729–745, 2007. (Voir p. 20).
- GOODWIN, Graham Clifford, Stefan F GRAEBE et Mario E SALGADO (2001). *Control system design*. T. 240. Prentice Hall New Jersey. (Voir p. 176).
- GROSSARD, M., S. KACHROUDI et N. ABROUG (2012). « An optimal energy-based approach for driving guidance of full Electric Vehicles ». In : *Industrial Electronics (ISIE), 2012 IEEE International Symposium on*. p. 1708–1713. DOI : [10.1109/ISIE.2012.6237348](https://doi.org/10.1109/ISIE.2012.6237348). (Voir pp. 21, 26, 28).

- GUILLEMARD, Franck (1996). « Présentation d'une méthodologie générale pour l'analyse et la commande des systèmes physiques : application au cas de la suspension oléopneumatique active ». Thèse de doct. (Voir p. 13).
- HA, Duy Long, Stephane PLOIX, Eric ZAMAI et Mireille JACOMINO (2006). « A home automation system to improve household energy control ». In : *INCOM2006 12<sup>th</sup> IFAC symposium on information control problems in manufacturing*. (Voir p. 22).
- HAMPTON, R. D., C. R. KNOSPE et M. A. TOWNSEND (1996). « A Practical Solution to the Deterministic Nonhomogeneous LQR Problem ». *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 118, p. 354, 1996. DOI : [10.1115/1.2802329](#). (Voir p. 177).
- HAUTIER, Jean-Paul, Jean FAUCHER et Jean-Pierre CARON (1999). « Le Graphe Informationnel Causal, Un outil pour analyser, comprendre, représenter ». *Journées 3EI, Cachan*, p. 308, 1999. (Voir p. 15).
- HAYASE, Minoru et Kunihiko ICHIKAWA (1969). « Optimal Servosystem Utilizing Future Value of Desired Function ». *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers* 5, p. 86–94, 1969. DOI : [10.9746/sicetr1965.5.86](#). (Voir p. 177).
- HOFMAN, Theo, Roell van DRUTEN, Alex SERRARENS et Janneke van BAALEN (2005). « A fundamental case study on the Prius and IMA drivetrain concepts ». *EVS 21, Monaco*, 2005. (Voir pp. 20, 28).
- HOFMAN, Theo, Maarten STEINBUCH, Roell VAN DRUTEN et Alex SERRARENS (2007). « Rule-based energy management strategies for hybrid vehicles ». *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles* 1, p. 71–94, 2007. (Voir p. 26).
- HOUSKA, Boris, Hans Joachim FERREAU et Moritz DIEHL (2011). « ACADO toolkit—An open-source framework for automatic control and dynamic optimization ». *Optimal Control Applications and Methods* 32, p. 298–312, 2011. DOI : [10.1002/oca.939](#). (Voir p. 94).
- JAAFAR, A, B SARENI et X ROBOAM (2010). « Clustering analysis of railway driving missions with niching genetic algorithms ». In : *11th International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism*. (Voir p. 11).
- JAMONT, Jean-Paul, Eduardo MENDES et Michel OCCELLO (2011). « A framework to simulate and support the design of distributed automation and decentralized control systems : Application to control of indoor building comfort ». In : *Computational Intelligence in Control and Automation (CICA)*. IEEE. p. 80–87. DOI : [10.1109/CICA.2011.5945762](#). (Voir pp. 23, 28).
- JARDIN, Audrey (2010). « Contribution to a sizing methodology for mechatronic systems : structural analysis and coupling with dynamic optimization ». Theses. INSA de Lyon. (Voir p. 16).

- JEREZ, Juan L., Paul J. GOULART, Stefan RICHTER, George A. CONSTANTINIDES, Eric C. KERRIGAN et Manfred MORARI (2014). « Embedded Online Optimization for Model Predictive Control at Megahertz Rates ». *IEEE Transactions on Automatic Control* 59, p. 3238–3251, 2014. DOI : [10.1109/TAC.2014.2351991](https://doi.org/10.1109/TAC.2014.2351991). (Voir pp. 94, 95).
- JOHANSEN, Tor A., Idar PETERSEN et Olav SLUPPHAUG (2002). « Explicit sub-optimal linear quadratic regulation with state and input constraints ». *Automatica* 38, p. 1099–1111, 2002. DOI : [10.1016/S0005-1098\(02\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(02)00004-3). (Voir pp. 93, 95).
- KACHROUDI, S., M. GROSSARD et N. ABROUG (2012). « Predictive Driving Guidance of Full Electric Vehicles using Particle Swarm Optimization ». *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 61, p. 1–1, 2012. DOI : [10.1109/TVT.2012.2212735](https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2212735). (Voir pp. 28, 32).
- KAMAL, MAS, M MUKAI et J MURATA (2011). « Ecological Driving Based on Preceding Vehicle Prediction Using MPC ». In : *IFAC World Congress*. Milano, Italy. p. 3843–3848. (Voir pp. 21, 28).
- KARNOPP, Dean et Roland ROSENBERG (1983). « Introduction to physical system dynamics ». 1983. (Voir pp. 1, 13).
- KERMANI, Saida (2009). « Gestion énergétique des véhicules hybrides : de la simulation à la commande temps réel. » Thèse de doct. Thèse de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis. (Voir pp. 25, 126, 134).
- KEULEN, Thijs Van, Bram De JAGER et Maarten STEINBUCH (2008). « An Adaptive Sub-Optimal Energy Management Strategy for Hybrid ». p. 102–107, 2008. (Voir pp. 24, 159).
- KIM, Hyung Min, Nestor F. MICHELENA, Panos Y. PAPALAMBROS et Tao JIANG (2003). « Target Cascading in Optimal System Design ». *Journal of Mechanical Design* 125, p. 474, 2003. DOI : [10.1115/1.1582501](https://doi.org/10.1115/1.1582501). (Voir p. 33).
- KIM, Hyung Min, D. Geoff RIDEOUT, Panos Y. PAPALAMBROS et Jeffrey L. STEIN (2003). « Analytical Target Cascading in Automotive Vehicle Design ». *Journal of Mechanical Design* 125, p. 481, 2003. DOI : [10.1115/1.1586308](https://doi.org/10.1115/1.1586308). (Voir p. 33).
- KIM, Namwook, Suk Won CHA et Huei PENG (2012). « Optimal Equivalent Fuel Consumption for Hybrid Electric Vehicles ». *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 20, p. 817–825, 2012. DOI : [10.1109/TCST.2011.2123099](https://doi.org/10.1109/TCST.2011.2123099). (Voir p. 26).
- KIM, Namwook, Sukwon CHA et Huei PENG (2010). « Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle ». *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 19, p. 1–9, 2010. DOI : [10.1109/TCST.2010.2061232](https://doi.org/10.1109/TCST.2010.2061232). (Voir p. 25).



- KLEIMAIER, Alexander et D SCHRODER (2002). « An approach for the online optimized control of a hybrid powertrain ». In : *Advanced Motion Control, 2002. 7<sup>th</sup> International Workshop on*. IEEE. p. 215–220. (Voir p. 24).
- KOJIMA, A. et S. ISHIJIMA (1999). « LQ preview synthesis : optimal control and worst case analysis ». *IEEE Transactions on Automatic Control* 44, p. 352–357, 1999. DOI : [10.1109/9.746265](#). (Voir p. 177).
- KOOT, Michiel, John T. B. A. KESSELS, Bram de JAGER, W. P. M. H. HEEMELS, Paul P. J. van den BOSCH et Maarten STEINBUCH (2005). « Energy Management Strategies for Vehicular Electric Power Systems ». *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 54, p. 771–782, 2005. (Voir p. 24).
- KUFOALAR, D.K.M., B.J.T. BINDER, H.J. FERREAU, L. IMSALND, T.A. JOHANSEN et M. DIEHL (2015). « Automatic deployment of industrial embedded Model Predictive Control using qpOASES ». In : *14th, European Control Conference (ECC)*. Linz, Austria. (Voir p. 95).
- KVASNICA, M., J. HOLAZA, B. TAKÁCS et D. INGOLE (2015). « Design and verification of low-complexity explicit MPC controllers in MPT3 ». In : *14th, European Control Conference (ECC)*. Linz, Austria.  
MPT Toolbox available : <http://control.ee.ethz.ch/~mpt/3/Main/HomePage>. (Voir p. 94).
- KWATNY, H. et K. KALNITSKY (1978). « On alternative methodologies for the design of robust linear multivariable regulators ». *IEEE Transactions on Automatic Control* 23, p. 930–933, 1978. DOI : [10.1109/TAC.1978.1101847](#). (Voir p. 176).
- LAFFITE, J (2004). « Aide à la conception et au dimensionnement énergétique et dynamique de systèmes mécatroniques par une approche inverse : application aux chaînes de transmission automobiles ». Thèse de doct. Thèse, INSA de Lyon, Villeurbanne, France. (Voir p. 14).
- LAMOUDI, Mohamed (2012). « Model Predictive Control for Energy Management in Buildings. Part 1 : Zone Model Predictive Control ». In : *4th IFAC Nonlinear Model Predictive Control Conferences*. Sous la dir. de Lazar MIRCEA. T. 4. p. 21–26. DOI : [10.3182/20120823-5-NL-3013.00035](#). (Voir p. 140).
- LARMINAT, Philippe de (2000). *Contrôle d'état standard*. Hermès Science Publications. (Voir pp. 172, 175).
- LEFORT, Antoine, Romain BOURDAIS, Guillaume ANSANAY-ALEX et Hervé GUÉGUEN (2013). « Hierarchical control method applied to energy management of a residential house ». *Energy and Buildings* 64, p. 53–61, 2013. DOI : [10.1016/j.enbuild.2013.04.010](#). (Voir pp. 22, 28).

- LEWIS, Frank L (1992). *Applied optimal control and estimation*. Prentice Hall PTR. (Voir p. 177).
- LHOMME, W, A BOUSCAYROL et P BARRADE (2004). « Simulation of a series hybrid electric vehicle based on energetic macroscopic representation ». In : *Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on*. T. 2. IEEE. p. 1525–1530. (Voir p. 15).
- LHOMME, Walter (2007). « Gestion D'énergie De Véhicules Électriques Hybrides Basée Sur La Représentation Énergétique Macroscopique ». Thèse de doct. Thèse de l'école Centrale de Lille. (Voir pp. 13, 21).
- LIMON, D., T. ALAMO, F. SALAS et Eduardo F. CAMACHO (2006). « On the stability of constrained MPC without terminal constraint ». *IEEE Transactions on Automatic Control* 51, p. 832–836, 2006. DOI : [10.1109/TAC.2006.875014](https://doi.org/10.1109/TAC.2006.875014). (Voir p. 96).
- LIN, Chan-Chiao, Huei PENG, Jessy W GRIZZLE et Jun-Mo KANG (2003). « Power management strategy for a parallel hybrid electric truck ». *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* 11, p. 839–849, 2003. (Voir p. 25).
- LIU, Kang-Zhi, Hui ZHANG et Tsutomu MITA (1997). « Solution to nonsingular H2 optimal control problem with unstable weights ». *Systems & Control Letters* 32, p. 1–10, 1997. DOI : [10.1016/S0167-6911\(97\)00060-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6911(97)00060-1). (Voir p. 176).
- LOUCA, Loucas S et Jeffrey L STEIN (1999). « Energy-based model reduction of linear systems ». In : *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Vienna International Conference on Mathematical Modelling*. p. 629–639. (Voir p. 14).
- LUU, Hong Tu (2011). « Développement de méthodes de réduction de la consommation en carburant d'un véhicule dans un contexte de sécurité et de confort : un compromis entre économie et écologie ». Thèse de doct. Thèse de l'Université d'Evry-Val-d'Essonne. (Voir p. 20).
- LUU, Hong Tu, Lydie NOUVELIERE et Said MAMMAR (2010). « Ecological and safe driving assistance system : Design and strategy ». In : *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE. p. 129–134. DOI : [10.1109/IVS.2010.5548012](https://doi.org/10.1109/IVS.2010.5548012). (Voir pp. 20, 21, 28, 32, 138).
- MACIEJOWSKI, J M (2002). *Predictive Control with Constraints*. T. 63. Harlow, England : Person Education. p. 331. DOI : [10.1016/j.compag.2008.03.003](https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.03.003). (Voir p. 94).
- MACIEJOWSKI, Jan Marian (1989). « Multivariable feedback design ». *Electronic Systems Engineering Series, Wokingham, England : Addison-Wesley, c1989* 1, 1989. (Voir p. 177).
- MARE, José B. et José A. DE DONÁ (2007). « Solution of the input-constrained LQR problem using dynamic programming ». *Systems & Control Letters* 56, p. 342–348, 2007. DOI : [10.1016/j.sysconle.2006.10.018](https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2006.10.018). (Voir p. 94).



- MARRO, G., Lorenzo NTOGRAMATZIDIS et E. ZATTONI (2004). « H<sub>2</sub>-optimal decoupling of previewed signals in the continuous-time domain ». In : *American Control Conference, 2004. Proceedings of the 2004*. T. 3. 2717–2722vol.3. (Voir p. 177).
- MATTINGLEY, Jacob et Stephen BOYD (2012). « CVXGEN : a code generator for embedded convex optimization ». *Optimization and Engineering* 13, p. 1–27, 2012. DOI : [10.1007/s11081-011-9176-9](https://doi.org/10.1007/s11081-011-9176-9). (Voir pp. 94, 95).
- MAYNE, D.Q., J.B. RAWLINGS, C.V. RAO et P.O.M. SOKKAERT (2000). « Constrained model predictive control : Stability and optimality ». *Automatica* 36, p. 789–814, 2000. DOI : [10.1016/S0005-1098\(99\)00214-9](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(99)00214-9). (Voir p. 96).
- MENSING, Felicitas, Eric BIDEAUX, Rochdi TRIGUI et Helene TATTEGRAIN (2013). « Trajectory optimization for eco-driving taking into account traffic constraints ». *Transportation Research Part D : Transport and Environment* 18, p. 55–61, 2013. DOI : [10.1016/j.trd.2012.10.003](https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.10.003). (Voir pp. 21, 28).
- MESAROVIĆ, M.D., D. MACKO et Y. TAKAHARA (1970). *Theory of Hierarchical, Multi-level Systems*. Mathematics in science and engineering. Academic Press. (Voir p. 22).
- MICHALSKA, H et D Q MAYNE (1993). « Robust Receding Horizon Control of Constrained Nonlinear-Systems ». *Ieee Transactions on Automatic Control* 38, p. 1623–1633, 1993. DOI : [Doi10.1109/9.262032](https://doi.org/10.1109/9.262032). (Voir p. 95).
- MIRO PADOVANI, Thomas, Maxime DEBERT, Guillaume COLIN et Yann CHAMAILLARD (2013). « Optimal Energy Management Strategy Including Battery Health through Thermal Management for Hybrid Vehicles ». In : *Advances in Automotive Control*. Sous la dir. de Kawabe TAKETOSHI. Tokyo, Japan. p. 384–389. DOI : [10.3182/20130904-4-JP-2042.00137](https://doi.org/10.3182/20130904-4-JP-2042.00137). (Voir pp. 126, 131, 132).
- MOIGNE, J.L.L. (1994). *La théorie du système général : théorie de la modélisation*. Systèmes, décisions. Presses universitaires de France. (Voir pp. 6–8).
- MOROȘAN, Petru-Daniel, Romain BOURDAIS, Didier DUMUR et Jean BUISSON (2010). « Building temperature regulation using a distributed model predictive control ». *Energy and Buildings* 42, p. 1445–1452, 2010. DOI : [10.1016/j.enbuild.2010.03.014](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.014). (Voir pp. 23, 28, 140).
- MOUHIB, Omar, Audrey JARDIN, Wilfrid MARQUIS-FAVRE, Eric BIDEAUX et Daniel THOMASSET (2009). « Optimal control problem in bond graph formalism ». *Simulation Modelling Practice and Theory* 17, p. 240–256, 2009. DOI : [10.1016/j.simpat.2008.04.011](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2008.04.011). (Voir pp. 14, 19).
- NGWOMPO, RF et E BIDEAUX (2005). « On the role of power lines and causal paths in bond graph ? based model inversion ». In : *Proceedings of the Int. Conf. on Bond Graph Modeling and Simulation*. University of Bath. p. 5–10. (Voir p. 16).

- OHTSUKA, T. (2015). « A tutorial on C/GMRES and automatic code generation for nonlinear Model Predictive Control ». In : *14th, European Control Conference (ECC)*. Linz, Austria. (Voir p. 94).
- OPPENHEIMER, Michael W., David B. DOMAN et Michael a. BOLENDER (2006). « Control Allocation for Over-actuated Systems ». *2006 14th Mediterranean Conference on Control and Automation*, p. 1–6, 2006. DOI : [10.1109/MED.2006.328750](https://doi.org/10.1109/MED.2006.328750). (Voir p. 21).
- PAGANELLI, G, TM GUERRA, S DELPRAT, JJ SANTIN, M DELHOM et E COMBES (2000). « Simulation and assessment of power control strategies for a parallel hybrid car ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D : Journal of Automobile Engineering* 214, p. 705–717, 2000. (Voir pp. 24, 28).
- PAYMAN, Alireza (2009). « Contribution à la Gestion de l’Energie dans les Systèmes Hybrides Multi-sources Multi-charges ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Lorraine. (Voir pp. 21, 22).
- PEREZ, L, G BOSSIO, D MOITRE et G GARCIA (2006). « Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming ». *Mathematics and Computers in Simulation* 73, p. 244–254, 2006. DOI : [10.1016/j.matcom.2006.06.016](https://doi.org/10.1016/j.matcom.2006.06.016). (Voir pp. 13, 14).
- PRIMBS, James a. et Vesna NEVISTIĆ (2000). « Feasibility and stability of constrained finite receding horizon control ». *Automatica* 36, p. 965–971, 2000. DOI : [10.1016/S0005-1098\(00\)00004-2](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(00)00004-2). (Voir p. 96).
- QIN, S Joe et Thomas A BADGWELL (2003). « A survey of industrial model predictive control technology ». *Control Engineering Practice* 11, p. 733–764, 2003. DOI : [10.1016/S0967-0661\(02\)00186-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00186-7). (Voir p. 94).
- RAWLINGS, James B. et David Q. MAYNE (2009). *Model Predictive Control : Theory and Design*. Madison : Nob Hill Publishing, LLC. p. 282. (Voir p. 96).
- RICHALET, Jacques (1993). « Pratique de la Commande Prédictive ». 1993. (Voir pp. 22, 23, 94).
- RIPACCIOLI, G, D BERNARDINI, S Di CAIRANO, A BEMPORAD et I V KOLMANOVSKY (2010). « A stochastic model predictive control approach for series hybrid electric vehicle power management ». In : *2010 American Control Conference*. Baltimore, MD. p. 5844–5849. (Voir pp. 28, 91).
- ROBOAM, X., E. BIDEAUX, Geneviève DAUPHIN-TANGUY, B. SARENI et S. ASTIER (2012). « Le formalisme Bond Graph pour une approche énergétique et dynamique de l’analyse et la synthèse des systèmes multiphysiques ». In : *Conception systémique pour la conversion d’énergie électrique, gestion, analyse et synthèse*. chapitre du vo-

- lume 1 de l'ouvrage collectif dirigé par X. Roboam. Hermès. Chap. 2, p. 374. (Voir p. 14).
- ROBOAM, Xavier (2012). *Conception systémique pour la conversion d'énergie électrique 1 : Gestion, analyse et synthèse*. Sous la dir. de LAVOISIER. 1ere Edition. Hermes Science Publication. (Voir pp. 6, 8, 9, 13).
- ROSARIO, Leon, Patrick CHI, Kwong LUK et Patrick Chi Kwong LUK (2007). « Applying Management Methodology to Electric Vehicles with Multiple Energy Storage Systems ». In : *2007 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. T. 7. August. IEEE. p. 4223–4230. DOI : [10.1109/ICMLC.2007.4370888](https://doi.org/10.1109/ICMLC.2007.4370888). (Voir pp. 22, 23).
- SAAD, Walid, Zhu HAN, H. POOR et Tamer BASAR (2012). « Game-Theoretic Methods for the Smart Grid : An Overview of Microgrid Systems, Demand-Side Management, and Smart Grid Communications ». *IEEE Signal Processing Magazine* 29, p. 86–105, 2012. DOI : [10.1109/MSP.2012.2186410](https://doi.org/10.1109/MSP.2012.2186410). arXiv : [1202.0452](https://arxiv.org/abs/1202.0452). (Voir pp. 21, 28, 92, 109, 120).
- SAFONOV, Michael George (1980). *Stability and robustness of multivariable feedback systems*. MIT press. (Voir p. 177).
- SAFONOV, Michael et Michael ATHANS (1977). « Gain and phase margin for multiloop LQG regulators ». *IEEE Transactions on Automatic Control* 22, p. 173–179, 1977. DOI : [10.1109/CDC.1976.267760](https://doi.org/10.1109/CDC.1976.267760). (Voir p. 176).
- SALEH, Louay, Philippe CHEVREL et Jean-François LAFAY (2012). « Optimal Control with Preview for Lateral Steering of a Passenger Car : Design and Test on a Driving Simulator ». English. In : *Time Delay Systems : Methods, Applications and New Trends*. Sous la dir. de Rifat SIPAHI, Tomáš VYHLÍDAL, Silviu-Iulian NICULESCU et Pierdomenico PEPE. T. 423. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer Berlin Heidelberg. Chap. 13, p. 173–185. DOI : [10.1007/978-3-642-25221-1\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-25221-1_13). (Voir p. 177).
- SALMASI, Farzad Rajaei (2007). « Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles : Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends ». *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 56, p. 2393–2404, 2007. DOI : [10.1109/TVT.2007.899933](https://doi.org/10.1109/TVT.2007.899933). (Voir p. 25).
- SCHOUTEN, Niels J, Mutasim A SALMAN et Naim A KHEIR (2003). « Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic ». *Control Engineering Practice* 11, p. 171–177, 2003. DOI : [10.1016/S0967-0661\(02\)00072-2](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00072-2). (Voir p. 25).
- SCIARRETTA, A. et L. GUZZELLA (2007). « Control of hybrid electric vehicles ». *Control Systems, IEEE* 27, p. 60–70, 2007. DOI : [10.1109/MCS.2007.338280](https://doi.org/10.1109/MCS.2007.338280). (Voir pp. 21, 24, 25, 126, 131, 132).

- SCIARRETTA, a., L. SERRAO, P.C. DEWANGAN, P. TONA, E.N.D. BERGSHOEFF, C. BORDONS, L. CHARMPA, Ph. ELBERT, L. ERIKSSON, T. HOFMAN, M. HUBACHER, P. ISENEGGER, F. LACANDIA, a. LAVEAU, H. LI, D. MARCOS, T. NÜESCH, S. ONORI, P. PISU, J. RIOS, E. SILVAS, M. SIVERTSSON, L. TRIBIOLI, a.-J. van der HOEVEN et M. WU (2014). « A control benchmark on the energy management of a plug-in hybrid electric vehicle ». *Control Engineering Practice* 29, p. 287–298, 2014. DOI : [10.1016/j.conengprac.2013.11.020](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.11.020). (Voir pp. 1, 91, 159).
- SCORDIA, Julien (2004). « Approche systématique de l’optimisation du dimensionnement et de l’élaboration de lois de gestion d’énergie de véhicules hybrides ». Thèse de doct. Thèse de l’Université Henri Poincaré, Nancy. (Voir p. 24).
- SEILER, Jakob et D SCHRÖDER (1998). « Hybrid vehicle operating strategies ». In : *Proc. Electric Vehicle Symposium, EVS15*. (Voir p. 24).
- SERRAO, Lorenzo et Giorgio RIZZONI (2008). « Optimal control of power split for a hybrid electric refuse vehicle ». In : *Proceedings of the American Control Conference*. p. 4498–4503. DOI : [10.1109/ACC.2008.4587204](https://doi.org/10.1109/ACC.2008.4587204). (Voir p. 14).
- SHAFIEI, Seyed Ehsan et Andrew ALLEYNE (2015). « Model predictive control of hybrid thermal energy systems in transport refrigeration ». *Applied Thermal Engineering* 82, p. 264–280, 2015. DOI : [10.1016/j.applthermaleng.2015.02.053](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.053). (Voir p. 129).
- SHAKED, U. et C.E. de SOUZA (1995). « Continuous-time tracking problems in an H/sub  $\infty$ / setting : a game theory approach ». *IEEE Transactions on Automatic Control* 40, p. 841–852, 1995. DOI : [10.1109/9.384218](https://doi.org/10.1109/9.384218). (Voir p. 177).
- SHAMMA, Jeff S. (2012). « An Overview of LPV Systems ». In : *Control of Linear Parameter Varying Systems with Applications*. Boston, MA : Springer US. p. 3–26. DOI : [10.1007/978-1-4614-1833-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1833-7_1). (Voir p. 102).
- SHERPA ENGINEERING (2013). *Engineering System Company*. Paris, France (voir pp. 2, 6, 33).
- SIEVERS, L.A. et A.H. von FLOTOW (1989). « Comparison of two LQG-based methods for disturbance rejection ». In : *Proceedings of the 28<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE. p. 483–485. DOI : [10.1109/CDC.1989.70161](https://doi.org/10.1109/CDC.1989.70161). (Voir p. 176).
- SILJAK, D.D. (1991). *Decentralized Control of Complex Systems*. Mathematics in science and engineering. Academic Press. (Voir p. 22).
- SILVAS, Emilia, Theo HOFMAN et Maarten STEINBUCH (2012). « Review of Optimal Design Strategies for Hybrid Electric Vehicles ». In : *2012 Workshop on Engine and Powertrain Control*. Sous la dir. de Tona PAOLINO. IFP Energies nouvelles, France. p. 57–64. DOI : [10.3182/20121023-3-FR-4025.00054](https://doi.org/10.3182/20121023-3-FR-4025.00054). (Voir pp. 20, 21, 28).
- SINGH, Madan G (1980). *Dynamical hierarchical control*. North Holland. (Voir p. 22).

- SINOQUET, Delphine, Gregory ROUSSEAU et Yohan MILHAU (2011). « Design optimization and optimal control for hybrid vehicles ». *Optimization and Engineering* 12, p. 199–213, 2011. (Voir pp. 20, 28).
- SLIMEN, B Ben (2011). « Conception de lois de commande structurées (hiérarchisées, décentralisées) pour les chaînes de traction pilotées ». Thèse de doct. Thèse de l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. (Voir p. 177).
- SOUFFRAN, Gwenaëlle, Laurence MIÈGEVILLE et Patrick GUÉRIN (2011). « Simulation of real-world vehicle missions using a stochastic Markov model for optimal design purposes ». *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE*, 2011. (Voir pp. 11, 20, 28).
- STEIN, G. et M. ATHANS (1987). « The LQG/LTR procedure for multivariable feedback control design ». *IEEE Transactions on Automatic Control* 32, p. 105–114, 1987. DOI : [10.1109/TAC.1987.1104550](https://doi.org/10.1109/TAC.1987.1104550). (Voir p. 177).
- STEPHENS, Edward R, David B SMITH et Anirban MAHANTI (2015). « Game Theoretic Model Predictive Control for Distributed Energy Demand-Side Management ». *IEEE Transactions on Smart Grid* 6, p. 1394–1402, 2015. DOI : [10.1109/TSG.2014.2377292](https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2377292). (Voir pp. 21, 28, 92).
- SUEUR, C et G DAUPHIN-TANGUY (1991). « Bond graph approach to multi-time scale systems analysis ». *Journal of the Franklin Institute* 328, p. 1005–1026, 1991. (Voir p. 14).
- TOMIZUKA, M et D. E. WHITNEY (1975). « Optimal Discrete Finite Preview Problems (Why and How Is Future Information Important ?) ». *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 97, p. 319, 1975. DOI : [10.1115/1.3426946](https://doi.org/10.1115/1.3426946). (Voir p. 177).
- ULLMANN, F. et S. RICHTER (2013). *FiOrdOs : code generation for first-order methods* (voir pp. 94, 95).
- VERHILLE, JN, A BOUSCAYROL, P-J BARRE, JC MERDIECA, JP HAUTIER et E SEMAIL (2004). « Torque tracking strategy for antislip control in railway traction systems with common supplies ». In : *Industry Applications Conference, 2004. 39<sup>th</sup> IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE*. T. 4. IEEE. p. 2738–2745. (Voir p. 15).
- VERMILLION, Chris, Jing SUN et Ken BUTTS (2007). « Model predictive control allocation for overactuated systems - stability and performance ». In : *2007 46<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, LA : IEEE. p. 1251–1256. DOI : [10.1109/CDC.2007.4434722](https://doi.org/10.1109/CDC.2007.4434722). (Voir p. 21).
- VON BERTALANFFY, Ludwig (1956). « General system theory ». *General systems* 1, p. 11–17, 1956. (Voir pp. 6, 7).
- WANG, Liuping (2009). *Model predictive control system design and implementation using MATLAB*. Springer-V. London : Springer Verlag. (Voir p. 94).

- WANG, Yang et Stephen BOYD (2010). « Fast Model Predictive Control Using Online Optimization ». *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 18, p. 267–278, 2010. DOI : [10.1109/TCST.2009.2017934](https://doi.org/10.1109/TCST.2009.2017934). (Voir pp. [94](#), [95](#)).
- WIRASINGHA, SG et Ali EMADI (2011). « Classification and review of control strategies for plug-in hybrid electric vehicles ». *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 60, p. 111–122, 2011. (Voir pp. [21](#), [25](#)).
- WOLSEY, L.A. (1998). *Integer Programming*. Wiley Series in Discrete Mathematics and Optimization. Wiley. (Voir pp. [93](#), [111](#), [114](#), [120](#)).
- WU, Bin, Chan-Chiao LIN, Zoran FILIPI, Huei PENG et Dennis ASSANIS (2004). « Optimal power management for a hydraulic hybrid delivery truck ». *Vehicle System Dynamics* 42, p. 23–40, 2004. (Voir p. [25](#)).
- WU, S-T et K YUCEF-TOUMI (1995). « On relative degrees and zero dynamics from physical system modeling ». *Journal of dynamic systems, measurement, and control* 117, p. 205–217, 1995. (Voir pp. [16](#), [184](#)).
- ZARATE FLOREZ, Jennifer (2012). « Etudes de commande par décomposition coordination pour l’optimisation de la conduite de vallées hydroélectriques ». Thèse de doct. Thèse de l’Université de Grenoble. (Voir p. [22](#)).
- ZHOU, K., J.C. DOYLE et K. GLOVER (1996). *Robust and optimal control*. T. 40. Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall. (Voir p. [102](#)).
- ZOBRIST, Jean-François (2014). *La Belle Histoire De Favi : L’entreprise Qui Croit Que L’homme Est Bon*. T. 1&2. Lulu. com. Chap. Fiche 22 : Système Complexe/Système Compliqué. (Voir p. [7](#)).







# Thèse de Doctorat

**Clément FAUVEL**

**Approche modulaire de l'optimisation des flux de puissance multi-sources et multi-clients, à visée temps réel**

**Modular approach for real-time optimization of the multi-sources and multi-clients power flows**

## Résumé

Les systèmes énergétiques désignent une classe de systèmes dont les spécificités structurelles et fonctionnelles posent la question de la distribution de l'énergie, en temps réel, pour satisfaire des services. Cette problématique multi-objectifs, nommée énergétique, a pour solution une stratégie de gestion, dont la conception représente un problème ouvert. Les verrous étudiés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre d'un partenariat industriel et en particulier celui des démarches de conception systémique. Trois contributions sont apportées. La première est une méthodologie de conception modulaire et générique de la stratégie énergétique, pour les systèmes multi-clients et multi-sources. Elle définit deux types d'éléments fonctionnels : les clients et les sources, interagissant par le biais d'un nœud, porteur de la stratégie. La seconde traite la simplification de la stratégie par une décomposition selon deux problématiques déjà connues de la littérature : l'hybridation de sources et la concurrence de clients. La troisième porte sur la sélection d'algorithmes novateurs ou existants, compatibles avec une cible temps réel, pour exécuter la stratégie. Enfin, la stratégie énergétique d'un camion frigorifique disposant d'une architecture énergétique hybride série est conçue par notre approche modulaire, et la faisabilité algorithmique est validée en simulation.

## Mots clés

systèmes énergétiques, stratégie énergétique, conception systémique, commande robuste, commande prédictive.

## Abstract

The energy systems describe a class of systems whose from structural and functional characteristics raise the problem of the energy distribution to satisfy the services in real time. The solution of this multi-objectives problem, namely energetic, is the energy management strategy, whose design is still an open problem. The solutions studied in this thesis are incorporated in the framework of an industrial partnership and particularly in those systemic design approaches. The first contribution is a methodology of modular and generic design of the energy management strategy, for the multi-clients and multi-sources systems. It defines two types of functional elements: the clients and the sources, interacting through a node, which is the carrier of the strategy. The second contribution deals with the generic formulation of the strategy and its simplification by means of decomposition in accordance with two problems: the hybridization of sources and the competition of clients, which are already known in the literature. The third contribution is partial to the selection of innovative or existing algorithms, which are compatible with a real-time target to execute the strategy. Finally, the energy strategy of a refrigerated truck with a hybrid energy architecture is designed by the proposed modular approach, and the algorithm feasibility is validated by the simulation.

## Key Words

energy systems, energy management strategy, systemic design, robust control, predictive control.