



**HAL**  
open science

# Formulations de problèmes d'optimisation multiniveaux pour la conception de réseaux de bord électriques en aéronautique

Djamel Hadbi

► **To cite this version:**

Djamel Hadbi. Formulations de problèmes d'optimisation multiniveaux pour la conception de réseaux de bord électriques en aéronautique. Energie électrique. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. NNT : 2015GREAT115 . tel-01267715

**HAL Id: tel-01267715**

**<https://theses.hal.science/tel-01267715v1>**

Submitted on 15 Oct 2016

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

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

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Génie Electrique**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

« **Djamel HADBI** »

Thèse dirigée par « **Nicolas RETIERE** » et  
Codirigée par « **Xavier ROBOAM** »

préparée au sein du **G2ELab (Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble )**

dans l'École Doctorale « **Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications, Signal** »

# Formulations de problèmes d'optimisation multiniveaux pour la conception de réseaux de bord électriques en aéronautique

Thèse soutenue publiquement le « **14/12/2015** »,  
Devant le jury composé de :

**M, Mohamed, MACHMOUM**

Professeur à Polytech Nantes, Président

**M, Serge, PIERFEDERICI**

Professeur à l'Université de Lorraine, Directeur de thèse, Rapporteur

**M, Frédéric, GILLON**

Maitre de conférences-HDR à l'École Centrale de Lille, Rapporteur

**M, Jérôme, FAUCHER**

Docteur-ingénieur à Airbus Operations SAS, Invité

**M, Nicolas, RETIERE**

Professeur à l'Université Grenoble Alpes, Directeur de thèse

**M, Xavier, ROBOAM**

Directeur de Recherches CNRS, Co-directeur de thèse

**M, Bruno, SARENI**

Professeur à l'INPT ENSEEIHT, Co-encadrant de thèse

**M, Frédéric, WURTZ**

Directeur de Recherches CNRS, Co-encadrant de thèse





# **Résumé**

Dans le contexte de l'avion plus électrique, les réseaux électriques aéronautiques sont en pleine évolution. Cette évolution est poussée par le besoin d'une intégration à forte densité énergétique ce qui pose des défis aux concepteurs en termes d'architectures, de systèmes et de méthodes de dimensionnement.

Un réseau de bord est composé d'un ensemble de systèmes électriques multidisciplinaires qui proviennent de différents fournisseurs et dont le design est actuellement effectué en répondant à des standards de qualité spécifiés par l'avionneur. L'objectif de la thèse est de proposer de nouvelles approches intégrées qui permettent de gérer la complexité des réseaux électriques tout en convergeant vers un résultat optimal, offrant des gains de masses en référence à un design par des « approches mécanistes » reposant sur un agrégat de boucles d'optimisation locales.

Une approche multiniveau a été développée en s'inspirant des travaux sur la MDO « Multidisciplinary Design Optimization ». L'élaboration de cette approche a été le résultat d'une expertise accumulée en appliquant différentes méthodes disponibles dans la bibliographie. L'optimisation porte plus spécifiquement sur les filtres d'entrée des charges du réseau ainsi que sur le filtre de sortie du canal de génération du réseau électrique embarqué. L'optimisation multiniveau vise, dans un contexte collaboratif, à itérer entre le niveau intégrateur (le réseau de l'avion) et le niveau équipementier (charges et source du réseau). L'utilisation d'une formulation agrégée au niveau réseau et le respect des causalités au niveau des sous-problèmes sont les principaux atouts de cette approche qui conduit à des solutions proches de l'optimum global de masse des filtres.

## **Mots clés :**

Formulation de Problèmes d'Optimisation, Avion plus électrique, Optimisation Multiniveau, Qualité de l'énergie, Réseaux Electriques Embarqués.

# **Abstract**

Within more electric aircraft context, electric systems and networks have to evolve. High energy density integration pushes designers to reconsider their systems, architectures and tools.

An aircraft network contains a large number of multidisciplinary systems which come from different manufacturers. Each manufacturer designs its system separately following quality standards specified by the aggregator. The goal of this thesis is to provide system approaches which could deal with the high-level of complexity of the network while reaching the optimal design of all the system and so reduce the total weight in comparison with mechanistic approaches based on independent optimization loops for the different subsystems.

Consulting MDO "Multidisciplinary Design Optimization" researches, we have developed a multilevel approach based on our previous studies and conclusions on classical approaches used in the design of electrical systems. The optimization concerns the input filters of the loads connected to the HVDC bus and the output filter of the generating channel which supply the electric power. The multilevel collaborative optimization allows an automated exchange of data between the aggregator (system level) and manufacturers (sub-system level) and thanks to that, the optimal design of all the system is joined. The strong points of this approach are the aggregated formulation and causality connections between sub-systems.

## **Key words:**

Optimization Problem Setting, More Electric Aircraft, Multilevel Optimization, Power Quality, Embedded Electrical System.

# **Remerciements**

Cette thèse s'est déroulée au Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2ELab) et le Laboratoire de PLAsma et Conversion d'Energie de Toulouse (LAPLACE) en collaboration entre AIRBUS-Toulouse.

Je tiens sincèrement à remercier :

- Monsieur Mohamed MACHMOUM, Professeur à Polytech Nantes, d'avoir accepté d'être le président du Jury.
- Monsieur Serge PIERFEDERICI, professeur à Université de Lorraine, d'avoir été intéressé à ces recherches en tant que rapporteur.
- Monsieur Frédéric GILLON, maître de conférences Habilité à diriger des recherches à l'Ecole Centrale de, d'avoir participé à l'évaluation de ma thèse en tant que rapporteur.
- Monsieur Jérôme FAUCHER, docteur-ingénieur à Airbus Operations SAS de participer au jury de ma thèse en tant qu'examineur.

-

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à mes deux directeurs de thèse, Nicolas RETIERE et Xavier ROBOAM, d'abord pour l'opportunité de vivre cette expérience au sein de deux laboratoires de renom, je les remercie pour leur encadrement, leur disponibilité, leurs conseils avisés, leur suivi et leur patience. Sans leur expérience, leurs critiques je serai peut-être encore dans le labyrinthe de formulations où je me suis retrouvé à plusieurs fois.

Je remercie avec la même gratitude mes co-encadrants, Bruno Sareni et Frédéric WURTZ pour leurs conseils avisés particulièrement dans le domaine de l'optimisation, pour leur disponibilité, leur encadrement tout le long de ma thèse.

Je remercie également l'ensemble des collaborateurs chez AIRBUS qui ont participé aux discussions autour de ma thèse, leurs retours nous ont été d'une grande aide pour pousser notre réflexion

Je remercie également l'ensemble de l'équipe VESTA SYSTEM pour les outils mis à notre disposition pour résoudre les problèmes d'optimisation divers.

Durant mes séjours dans les deux laboratoires, j'ai eu la chance d'être entouré par des personnes formidables, merci pour leur gentillesse et pour leur soutien Je garderai de très bons souvenirs de cette période de ma vie, de l'excellente ambiance de travail, des échanges, des débats parfois passionnés mais toujours enrichissants. Je leur

souhaite toute la réussite dans leurs projets futurs et j'espère que les occasions pour se revoir ne manqueront pas

Mes derniers remerciements vont à mes parents, ma femme, ma famille. et tous mes amis, merci à eux de m'avoir soutenu, encouragé et su me motiver chaque jour pour mener à bien ces travaux.

*À mes parents*



# **Table des matières**

<b>Résumé .....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>IV</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>V</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Abréviations.....</b>	<b>XIV</b>
<b>Table des figures.....</b>	<b>XV</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>XIX</b>
<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 Approches pour la conception des réseaux électriques en aéronautique.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Introduction .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 Evolution des réseaux électriques de bord dans le cadre de l’avion plus électrique .....</b>	<b>7</b>
<b>1.3 Problématique de conception d’un réseau électrique de bord.....</b>	<b>9</b>
1.3.1 Le processus de conception.....	9
1.3.1.1 Cycle de conception d’un réseau de bord .....	9
1.3.1.2 Avènement de la conception par optimisation.....	11
1.3.2 Les principaux verrous méthodologiques.....	12
1.3.2.1 La complexité des systèmes étudiés.....	12
1.3.2.2 La difficulté voir l’impossibilité de trouver des modèles.....	13
1.3.2.3 Notion de problème mal posé.....	13
1.3.2.4 Des systèmes multiéléments multidisciplinaires.....	14
1.3.3 Les contraintes industrielles .....	15
1.3.3.1 Les procédés d’intégration .....	15
1.3.3.2 Les contraintes de confidentialité.....	15
1.3.3.3 Les temps de développement.....	16
1.3.3.4 Nos problématiques .....	16
<b>1.4 Approches de conception proposées pour la conception de réseaux électriques aéronautiques .....</b>	<b>17</b>

1.4.1	Les approches normatives ou mécanistes.....	18
1.4.2	L'approche globale.....	19
1.4.3	La méthode des Fronts de Pareto étendus (MFPE).....	20
1.4.4	L'approche « collaborative séquentielle ».....	22
1.4.5	Les approches multiniveaux.....	24
1.4.5.1	État de l'art.....	24
1.4.5.2	Le problème de la décomposition d'un système.....	25
1.4.5.3	Formulation de sous-problèmes d'optimisation.....	27
<b>1.5</b>	<b>Une vue sur les outils utilisés.....</b>	<b>29</b>
1.5.1	Les logiciels de calcul et de simulation.....	29
1.5.2	Les logiciels de dimensionnement.....	30
<b>1.6</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>30</b>

## **Chapitre 2 Problématique de dimensionnement optimal d'un réseau électrique de bord.....31**

<b>2.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>32</b>
<b>2.2</b>	<b>Cas d'étude simplifié mais typiques des réseaux électriques en aéronautiques.....</b>	<b>33</b>
2.2.1	Architecture du réseau et topologies des filtres.....	33
2.2.2	Cahier des charges.....	34
2.2.2.1	Ondulation de tension en mode différentiel.....	35
2.2.2.2	Ondulation de courant en mode différentiel.....	36
2.2.3	Description fréquentielle simplifiée du problème.....	38
2.2.4	Modèles électriques et modèles de dimensionnement.....	39
2.2.4.1	Modélisation électrique du filtre capacitif de la source.....	40
2.2.4.2	Modélisation électrique du filtre de la charge.....	40
2.2.4.3	Modélisation électrique du système constitué des deux filtres.....	41
2.2.4.4	Modèles de dimensionnement des éléments passifs.....	41
<b>2.3</b>	<b>Formulation et résolution du problèmes d'optimisation par les approches classiques.....</b>	<b>44</b>
2.3.1	L'approche mécaniste.....	44
2.3.1.1	Optimisation mécaniste du filtre de la source.....	44
2.3.1.2	Optimisation mécaniste du filtre de la charge.....	46
2.3.1.3	Analyse des résultats et des couplages systèmes.....	48

2.3.1.4	Conclusion sur l'approche mécaniste .....	52
2.3.2	L'approche globale .....	52
2.3.2.1	Formulation du problème d'optimisation .....	52
2.3.2.2	Analyse des résultats et des couplages système .....	55
2.3.3	La méthode des fronts de Pareto étendus (MFPE).....	56
2.3.3.1	Analyse comparative des couplages entre l'approche globale et l'approche mécaniste et principe de la MFPE .....	56
2.3.3.2	Espace des solutions de la source .....	57
2.3.3.3	Espace des solutions de la charge.....	58
2.3.3.4	Couples de solutions cohérentes et résultat système .....	58
2.3.4	L'approche collaborative séquentielle.....	59
2.3.4.1	Formulation de l'approche .....	59
2.3.4.2	Convergence et solution optimale .....	60
<b>2.4</b>	<b>Bilan des approches classiques et critères de construction d'une approche réaliste et efficace .....</b>	<b>61</b>
2.4.1	Masse optimale.....	61
2.4.2	Coût de calcul .....	61
2.4.2.1	Coût de calcul de l'approche mécaniste .....	62
2.4.2.2	Coût de calcul de l'approche globale .....	62
2.4.2.3	Méthode des fronts de Pareto étendus.....	63
2.4.2.4	Le coût de calcul de l'approche collaborative .....	64
2.4.2.5	Comparaison.....	64
2.4.3	Le niveau de collaboration.....	64
2.4.4	Résumé du bilan et recommandations pour l'élaboration d'une approche efficace et faisable.....	66

## **Chapitre 3 Approche multiniveau agrégée et causale pour l'optimisation d'un réseau électrique aéronautique .....67**

<b>3.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>68</b>
<b>3.2</b>	<b>Formulation multiniveau basée sur l'ATC.....</b>	<b>69</b>
3.2.1	Principe .....	69
3.2.2	Problème d'optimisation au niveau système .....	71
3.2.3	Problèmes d'optimisation au niveau sous-système .....	73
3.2.3.1	Le sous-problème d'optimisation de la source .....	73
3.2.3.2	Le sous-problème d'optimisation de la charge <sub>i</sub> .....	74

3.2.4	Discussion sur la formulation du problème et sa complexité .....	75
3.2.4.1	Nombre de variables de décision système .....	75
3.2.4.2	Position des contraintes de cohérence dans l'architecture et leur nombre	75
3.2.4.3	Nature des problèmes d'optimisation .....	76
<b>3.3</b>	<b>Formulation basée sur l'encapsulation.....</b>	<b>77</b>
3.3.1	Le concept d'encapsulation.....	77
3.3.2	Problème d'optimisation au niveau système .....	78
3.3.3	Problèmes d'optimisation au niveau sous-système .....	79
3.3.3.1	Sous-problème d'optimisation de la source .....	79
3.3.3.2	Sous-problème d'optimisation de la charge .....	80
3.3.4	Discussion sur la formulation du problème et sa complexité .....	81
3.3.4.1	Position des contraintes de cohérence dans l'architecture multiniveau et leur nombre .....	81
3.3.4.2	Nature des problèmes d'optimisation .....	81
<b>3.4</b>	<b>Formulation multiniveau causale et agrégée .....</b>	<b>82</b>
3.4.1	Agrégation et liens de causalité .....	82
3.4.2	Problème d'optimisation au niveau système .....	84
3.4.3	Problèmes d'optimisation au niveau sous-système .....	84
3.4.3.1	Sous-problème d'optimisation de la source .....	85
3.4.3.2	Sous-problème d'optimisation de la charge .....	85
3.4.4	Discussion sur la formulation du problème et sa complexité .....	86
3.4.4.1	Nombre de variables de décision .....	86
3.4.4.2	Position des contraintes de cohérence dans l'architecture multiniveau et leur nombre .....	87
3.4.4.3	Nature des problèmes d'optimisation .....	87
3.4.5	Résolution multiniveau du problème d'optimisation .....	87
3.4.5.1	Problème d'optimisation au niveau système .....	87
3.4.5.2	Processus itératif et critère d'arrêt .....	88
3.4.5.3	Convergence vers la solution système .....	88
3.4.5.4	Réglage de la tolérance .....	90
<b>3.5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>90</b>

## **Chapitre 4 Optimisation des filtres d'un réseau électrique aéronautique.....92**

<b>4.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>93</b>
------------	---------------------------	-----------

<b>4.2</b>	<b>Cas d'étude « plus réaliste » .....</b>	<b>94</b>
4.2.1	Le sous-système source : canal de génération.....	95
4.2.2	Système de conditionnement d'air « ECS » et système à cycle à vapeur « VCS ».....	95
4.2.3	La charge fantôme.....	96
4.2.4	Résumé.....	96
<b>4.3</b>	<b>Concept d'éclaircissement des spectres.....</b>	<b>97</b>
4.3.1	Éclaircissement du spectre du courant du redresseur.....	98
4.3.1.1	Étape 1 : données à disposition de la source.....	98
4.3.1.2	Étape 2 : réduction des fréquences critiques en se basant sur une optimisation mécaniste de la source.....	99
4.3.1.3	Étape 3 : vérification par l'optimisation mécaniste de la source après éclaircissement.....	102
4.3.2	Éclaircissement des fréquences du courant de l'onduleur du VCS .....	104
4.3.2.1	Étape 1 : données à disposition de l'équipementier VCS .....	104
4.3.2.2	Étape 2 : réduction des fréquences critiques pour le dimensionnement du filtre du VCS.....	104
4.3.2.3	Étape 3 : vérification par l'optimisation mécaniste du VCS après éclaircissement.....	109
4.3.3	Éclaircissement des fréquences du courant de l'onduleur de l'ECS .....	111
4.3.3.1	Étape 2 : réduction des fréquences critiques pour le dimensionnement du filtre de l'ECS .....	111
4.3.3.2	Étape 3 : vérification par l'optimisation mécaniste de l'ECS après éclaircissement.....	114
4.3.4	Vérification des critères d'éclaircissement dans l'approche globale .....	116
<b>4.4</b>	<b>Dimensionnement optimal des filtres par l'approche mult niveau utilisant la formulation agrégée et causale .....</b>	<b>119</b>
4.4.1	Résultats en termes de dimensionnement .....	119
4.4.2	Convergence vers la solution optimale.....	120
<b>4.5</b>	<b>Analyses et études supplémentaires.....</b>	<b>121</b>
4.5.1	Impact du relâchement de la norme en courant.....	121
4.5.2	Une seule norme en courant pour tous les équipementiers.....	122
4.5.3	Modification des contraintes d'intégration.....	126
<b>4.6</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>127</b>

<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>129</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>133</b>
<b>Références .....</b>	<b>150</b>

# **Abréviations**

CORAC	COncil pour la Recherche Aéronautique
ACARE	Advisory Council for Aeronautical Research in Europe
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile
GIFAS	Groupement des Industriels Français Aéronautiques et Spatiales
ONERA	Office Nationale d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
GENOME	GEstioN OptiMisée de l'Energie
ECS	Environmental conditioning system
WIPS	Wing Ice Protection System
MDO	Multidisciplinary design dptimization
HVDC	High Voltage Direct Current
HVAC	High Voltage Alternative Current
ATRU	Auto Transformer Rectifier Unit
RU	Rectifier Unit
ASVR	Aircraft Systems Validation Rig
MFPE	Méthode des fronts de Pareto étendus
CO	collaborative Optimization
ATC	Analytical Target Cascading
FDT	functional dependence table
AM	adjacency matrix
DSM	Direct Structure Matrix
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
CEM	Compatibilité ElectroMagnétique
SQP	Sequential Quadratic Programming
ECS	Environmental Conditioning System
VCS	Vapor Cycle System

# Table des figures

Figure		Page
Chapitre 1		
Fig I. 1	Procédure de conception à trois niveaux : avion, systèmes, composants	6
Fig I. 2	Évolution de la puissance électrique embarquée dans un avion	8
Fig I. 3	Évolution des organes de conversion HVAC/HVDC	9
Fig I. 4	Le cycle de conception, un procédé itératif intégrateur-équipementier	10
Fig I. 5	Dualité « synthèse-Analyse »	12
Fig I. 6	Exemples de décomposition MDO	15
Fig I. 7	Conception d'un équipement par l'approche mécaniste « <i>normative</i> »	19
Fig I. 8	Conception d'un système par l'approche globale	20
Fig I. 9	Principe de la méthode des fronts de Pareto Etendus [NGU 08b]	21
Fig I. 10	Construction du front de Pareto système [NGU 08b]	22
Fig I. 11	Principe de l'approche séquentielle collaborative	23
Fig I. 12	Décomposition du système de traction ferroviaire en blocs physiques [MOU 09]	25
Fig I. 13	Décomposition physique d'une architecture automobile [TOS 04]	25
Fig I. 14	Différentes stratégies de coordination pour un problème à trois niveaux	27
Fig I. 15	Les variables d'un sous-problème dans la méthode ATC	28
Fig I. 16	Le processus de conception utilisant des logiciels de calcul [MAG 04]	29
Chapitre 2		
Fig II. 1	Exemple d'un réseau électrique aéronautique	33
Fig II. 2	Topologies des filtres utilisés	34
Fig II. 3	Entrée/sorties du filtre capacitif de la source	35
Fig II. 4	Norme imposée aux équipements de type « source »	36
Fig II. 5	Entrées/sorties du filtre de la charge	37
Fig II. 6	Norme imposée aux équipements de type « charge »	37
Fig II. 7	Comparaison entre la norme en courant spécifiée aux équipements de type « source » et celle spécifiée aux équipements de type « charge »	38
Fig II. 8	Modèle circuit considéré pour le calcul de la contrainte sur le taux de distorsion global en tension	40



Fig II. 9	Caractéristiques constructeur des capacités utilisées [AVX]	42
Fig II. 10	Géométrie de l'inductance	42
Fig II. 11	Description schématique du problème d'optimisation mécaniste de la source	45
Fig II. 12	Harmoniques de courant et de tension vus par le filtre de la source	46
Fig II. 13	Description schématique du problème de d'optimisation mécaniste de la charge	47
Fig II. 14	Harmoniques de courant et de tension vus par le filtre de la charge	48
Fig II. 15	Valeurs réelles de la tension et du courant obtenu dans la simulation système	50
Fig II. 16	Multiplés valeurs des harmoniques par rapport à la « source » et à la « charge »	51
Fig II. 17	Description schématique du problème d'optimisation globale du système	53
Fig II. 18	Harmoniques de courant et de tension obtenus par l'approche globale	54
Fig II. 19	Comparaison entre harmoniques vus par la source dans l'approche mécaniste et leurs valeurs dans l'approche globale	55
Fig II. 20	Comparaison entre harmoniques vus par la charge dans l'approche mécaniste et leurs valeurs dans l'approche globale	56
Fig II. 21	Reconstitution des couplages dans la MFPE	57
Fig II. 22	Description schématique d'une optimisation locale de la source dans la MFPE	58
Fig II. 23	Description schématique d'une optimisation locale de la charge dans la MFPE	58
Fig II. 24	Approche collaborative séquentielle appliquée au cas d'étude simplifié	60
Fig II. 25	Évolution du coût de calcul de la MFPE avec la discrétisation	63
Chapitre 3		
Fig III. 1	Généralisation du cas d'étude	69
Fig III. 2	Schéma de la formulation basée sur l'ATC par rapport à un cas d'étude généralisé	70
Fig III. 3	Description schématique du problème d'optimisation au niveau système	72
Fig III. 4	Description schématique du sous-problème d'optimisation de la source	73
Fig III. 5	Description schématique du sous-problème d'optimisation de la charge	74

Fig III. 6	Schéma de la formulation basée sur l'encapsulation des sous-problèmes	78
Fig III. 7	Description schématique du problème d'optimisation au niveau système	79
Fig III. 8	Description schématique du sous-problème d'optimisation de la source	80
Fig III. 9	Description schématique du sous-problème d'optimisation de la charge	80
Fig III. 10	Formulation multiniveau agrégée et causale	83
Fig III. 11	Description schématique du problème d'optimisation système	84
Fig III. 12	Description schématique du sous-problème d'optimisation de la source	85
Fig III. 13	Description schématique du sous-problème d'optimisation de la charge	86
Fig III. 14	Convergence de l'algorithme système	89
Fig III. 15	Paramétrage de l'algorithme génétique (à gauche : nombre moyen de génération avant convergence en fonction du nombre d'individus, à droite : durée moyenne de l'optimisation multiniveau)	89
Fig III. 16	Décalage de la solution optimale en fonction de la tolérance	90
Chapitre 4		
Fig IV. 1	Schéma du cas d'étude plus réaliste	94
Fig IV. 2	Rappel de l'architecture du canal de génération	95
Fig IV. 3	Schéma circuit de la simulation du canal de génération	95
Fig IV. 4	Architecture des charges LIEBHERR	96
Fig IV. 5	Les données équipementiers dans le réseau étudié	97
Fig IV. 6	Harmoniques de courant et de tension vus par le filtre de la source avant éclaircissement des fréquences	100
Fig IV. 7	Harmoniques de courant et de tension vus par le filtre de la source après éclaircissement des fréquences	103
Fig IV. 8	Harmoniques de courant et de tension vus par le filtre du VCS avant éclaircissement des fréquences	105
Fig IV. 9	Constitution du courant de l'inductance du filtre du VCS avant éclaircissement des fréquences	107
Fig IV. 10	Constitution du courant de l'inductance du filtre du VCS après éclaircissement des fréquences	110
Fig IV. 11	Harmoniques de courant et de tension vus par le filtre de l'ECS avant éclaircissement des fréquences	112
Fig IV. 12	Constitution du courant de l'inductance du filtre de l'ECS avant	

éclaircissement des fréquences	114
Fig IV. 13 Constitution du courant de l'inductance du filtre de l'ECS après éclaircissement des fréquences	115
Fig IV. 14 Harmoniques de courant et de tension du réseau dimensionné par l'approche globale avant l'utilisation des critères d'éclaircissement	117
Fig IV. 15 Harmoniques de courant et de tension du réseau dimensionné par l'approche globale après l'utilisation des critères d'éclaircissement	118
Fig IV. 16 L'approche multiniveau agrégée appliquée au cas d'étude plus réaliste	119
Fig IV. 17 Convergence de la fonction objectif	120
Fig IV. 18 Relâchement de la norme en courant spécifiée aux charges	121
Fig IV. 19 Évolution de la masse du système par rapport au relâchement de la norme en courant	122
Fig IV. 20 Harmoniques de courant et de tension par rapport à la définition initiale de la norme	123
Fig IV. 21 harmoniques de tension et de courant après modification de la norme	125
Fig IV. 22 Convergence de l'optimisation multiniveau (vue générale)	127

# Liste des tableaux

Tableau		Page
Chapitre 1		
Tab I. 1	Représentation FDT des couplages dans l'exemple	26
Tab I. 2	Représentation AM des couplages dans l'exemple	26
Chapitre 2		
Tab II. 1	Distribution fréquentielle des harmoniques de l'onduleur coté continu	34
Tab II. 2	Fréquences caractéristiques du système	39
Tab II. 3	Valeurs des harmoniques qui polluent le réseau	39
Tab II. 4	Entrées/sorties de la fonction de transfert du filtre de la source	40
Tab II. 5	Entrées/sorties de la fonction de transfert du filtre de charge	41
Tab II. 6	Entrées/sorties de la fonction de transfert du système constitué des deux filtres	41
Tab II. 7	Correction du modèle de la fonction de transfert du filtre de la source	
Tab II. 8	Données du problème d'optimisation mécaniste de la source	44
Tab II. 9	Résultats de l'optimisation mécaniste du filtre de la source	45
Tab II. 10	Correction du modèle de la fonction de transfert du filtre de la charge	45
Tab II. 11	Données du problème d'optimisation mécaniste de la charge	
Tab II. 12	Principaux résultats de l'optimisation mécaniste de la charge	46
Tab II. 13	Représentation des couplages dans l'approche mécaniste	47
Tab II. 14	Correction du modèle des fonctions de transfert du système	48
Tab II. 15	Données du problème d'optimisation mécaniste de la charge	49
Tab II. 16	Principaux résultats de l'optimisation globale du système	53
Tab II. 17	Distinction entre les différentes variables dans la MFPE	53
Tab II. 18	Taille de l'espace des solutions selon la discrétisation des variables globales	54 57
Tab II. 19	Résultat de la MFPE suivant différentes discrétisations	
Tab II. 20	Comparaison des approches en termes de solution optimale	58
Tab II. 21	Coût de calcul de l'approche mécaniste	59
Tab II. 22	Coût de calcul de l'approche globale	61
Tab II. 23	Coût de calcul des différentes approches	62
Tab II. 24	Nature de la collaboration selon l'approche	62
		64
		65
Chapitre 3		

Tab III. 1	Répartition des contraintes de cohérence	76
Tab III. 2	Performances de l'approche multiniveau par rapport aux approches précédentes	91
Chapitre 4		
Tab IV. 1	Résumé des pollutions harmoniques qui attaquent le réseau	96
Tab IV. 2	Les harmoniques qui attaquent la source	99
Tab IV. 3	Paramètres de l'optimisation mécaniste de la source avant éclaircissement	99
Tab IV. 4	Résultats de l'optimisation mécaniste du filtre de la source avant éclaircissement des fréquences	99
Tab IV. 5	Paramètres de l'optimisation mécaniste de la source après éclaircissement	102
Tab IV. 6	Comparaison des résultats de l'optimisation mécaniste du filtre de la source avant et après éclaircissement des fréquences	103
Tab IV. 7	Les harmoniques qui attaquent le filtre VCS	104
Tab IV. 8	Paramètres de l'optimisation mécaniste du filtre du VCS	105
Tab IV. 9	Résultats de l'optimisation mécaniste du filtre du VCS avant éclaircissement des fréquences	105
Tab IV. 10	Paramètres d'optimisation mécaniste du filtre VCS	109
Tab IV. 11	Comparaison des résultats de l'optimisation mécaniste du filtre du VCS avant et après éclaircissement des fréquences	109
Tab IV. 12	Paramètres de l'optimisation mécaniste du filtre de l'ECS	111
Tab IV. 13	Résultats de l'optimisation mécaniste du filtre de l'ECS avant éclaircissement des fréquences	111
Tab IV. 14	Paramètres de l'optimisation mécaniste du filtre ECS	114
Tab IV. 15	Comparaison des résultats de l'optimisation mécaniste du filtre de l'ECS avant et après éclaircissement des fréquences	115
Tab IV. 16	Paramètres de l'optimisation globale sans éclaircissement	117
Tab IV. 17	Paramètres de l'optimisation globale avec éclaircissement	117
Tab IV. 18	Comparaison entre les résultats de dimensionnement dans les deux approches : mécaniste et globale	118
Tab IV. 19	Paramètres de l'optimisation multiniveau	120
Tab IV. 20	Valeurs de la masse du système suivant les différentes approches	120
Tab IV. 21	Rappel des masses de la solution optimale	123

# Introduction Générale

---

## **Contexte : Le projet CORAC GENOME**

Le COncil pour la Recherche Aéronautique Civile a été créé en juillet 2008 sur la base des recommandations du « Grenelle de l'Environnement » fin 2007 avec comme mission d'amplifier les efforts R&T pour atteindre les grands objectifs de l'ACARE (Advisory Council for Aeronautical Research in Europe [ACA]). Il regroupe sous l'impulsion de la DGAC et du GIFAS, l'ensemble des acteurs français du secteur du transport aérien (l'industrie aéronautique, les compagnies aériennes, les aéroports, l'ONERA, les institutionnels et les ministères concernés). Il a pour vocation la mise en cohérence des efforts de recherche et d'innovation dans le domaine aéronautique, notamment pour la préservation de l'environnement et le développement durable. Un ensemble de 6 plateformes de démonstration technologiques est proposé dans le cadre des programmes d'investissement d'avenir parmi lesquelles la plateforme GENOME (GEstioN OptiMisée de l'Energie). Son principal objectif, dans la perspective de l'avion plus électrique, est de valider de nouvelles architectures et technologies de génération et de distribution de l'énergie non propulsive pour de plus faibles retombées environnementales (gain sur la consommation en carburant, utilisation plus écologique des avions au sol). L'autre objectif concerne l'accroissement de la compétitivité de la filière française en ciblant des technologies clés comme l'électronique de puissance pour se démarquer des technologies actuelles à faibles potentiels d'amélioration. Enfin, des gains en fiabilité, en sécurité et en coût d'exploitation des avions sont aussi recherchés. Cette plateforme rassemble des acteurs industriels (Airbus, THALES, LIEBHERR,...) et leurs partenaires dont le laboratoire de génie électrique de Grenoble (G2ELab) et le laboratoire plasma et conversion d'énergie de Toulouse (LAPLACE).

## **Problématique de recherche : Méthodologies et outils de conception système**

La plateforme GENOME propose des ruptures technologiques permettant un gain de performances pour dépasser les technologies classiques matures mais en butée d'évolution. Son action se situe du niveau technologique au niveau des « systèmes » et du réseau de bord.

La conception intégrée, faisant appel à des techniques d'optimisation, est l'une de ces pistes qui a montré ses capacités et qui se généralise notamment dans le large domaine de l'électrical engineering et plus particulièrement dans le domaine des systèmes et réseaux embarqués, domaine dans lequel se situe ce projet de thèse. Des

premiers travaux [NGU 08] ont montré qu'il était possible de réaliser une optimisation globale d'un canal de génération 540 V DC pour l'aéronautique (générateur synchrone associé à un pont de diodes). Ces travaux ont permis de dimensionner simultanément les composants du canal de génération tout en gérant les aspects multi-physiques du problème (électrique, électromagnétique, thermique, ...). D'autres travaux sur l'optimisation d'un actionneur à puissance électrique qui rassemble une machine à grande vitesse pilotée par un onduleur connecté au bus 540 V DC par un filtre ont permis d'identifier des couplages entre les organes du système [DEA 13]. Grâce à une optimisation globale de ces organes, de meilleurs compromis masse/pertes ont pu être trouvés.

L'objectif de cette thèse est d'approfondir ces résultats en étudiant un couplage système qui dépasse la vision locale de chaque l'équipementier. [GIR 14] a travaillé sur la mutualisation des convertisseurs d'électronique de puissance embarqués, nos travaux concernent la mutualisation des étages de filtrage, des organes qu'on retrouve de plus en plus sur les avions plus électriques. Ces filtres sont distribués entre les équipements, ils sont fortement couplés et permettent ensemble de respecter une certaine qualité de l'énergie.

D'autre part, il existe un enjeu méthodologique qui nous conduit à évaluer les approches de conception disponibles sur un problème de conception système dans un contexte industriel :

- Les approches classiques avec comme seul arbitre la norme sont-elles en mesure de trouver l'optimum système ?
- Peut-on généraliser la démarche d'optimisation globale que l'on avait utilisée jusqu'à maintenant au niveau d'un seul équipementier à un système composé de sous-systèmes provenant de différents équipementiers ?
- Existe-il dans la bibliographie des approches intermédiaires susceptible d'appréhender les couplages système en partant d'optimisations séparées ?

Ce sont là les interrogations qui ont guidé nos travaux de thèse, notre but ayant toujours été de chercher la meilleure stratégie pour appréhender le dimensionnement d'un réseau de bord complet.

## **Plan du mémoire**

La première étape de nos travaux consistera à faire une large prospection des méthodes et approche de conception utilisées dans le domaine des systèmes électriques aéronautiques. Nos recherches nous conduirons par la suite à étudier des approches utilisées dans d'autres secteurs applicatifs, tels que les systèmes de traction ferroviaire. Sur le plan méthodologique nous nous concentrerons sur une famille d'approches nommées « MDO » (Multidisciplinary Design Optimization).

Notre deuxième tâche sera de construire des cas d'études pour déployer l'ensemble des méthodes et approches recueillies dans la bibliographie. Notre choix se portera sur les filtres du réseau HVDC 540 V. Ces étages de filtrage sont par ailleurs responsables d'une partie non négligeable de la masse embarquée. [BOR 14] Un cas d'étude académique composé d'un filtre de sortie d'un canal de génération et d'un filtre d'entrée d'un actionneur a été mis en place. Il nous permettra de tester les approches disponibles et nous servira de support de développement pour l'approche multiniveau. Un effort de formulation particulièrement important sera nécessaire à l'élaboration de cette approche.

Le dernier défi sera de confronter cette approche à un cas d'étude plus complexe et plus proche d'un réseau électrique aéronautique. Grâce à la formulation multiniveau du chapitre 3, il s'agira d'être capable de gérer la complexité, notamment due au problème d'augmentation du nombre de charges. Au vue de cette complexité, nous proposerons enfin le développement de méthodes et de critères permettant d'envisager la mise en œuvre de la méthode dans des cas réels représentatifs.





# **Chapitre 1**

## **Approches pour la conception des réseaux électriques en aéronautique**

## 1.1 Introduction

Le réseau électrique de bord joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement d'un aéronef. Dans le contexte de « l'avion plus électrique », il assure de plus en plus de fonctionnalités comme la navigation, le conditionnement d'air ou le dégivrage. La conception du réseau électrique se situe au niveau « système » de la procédure donnée (cf. Fig I. 1).

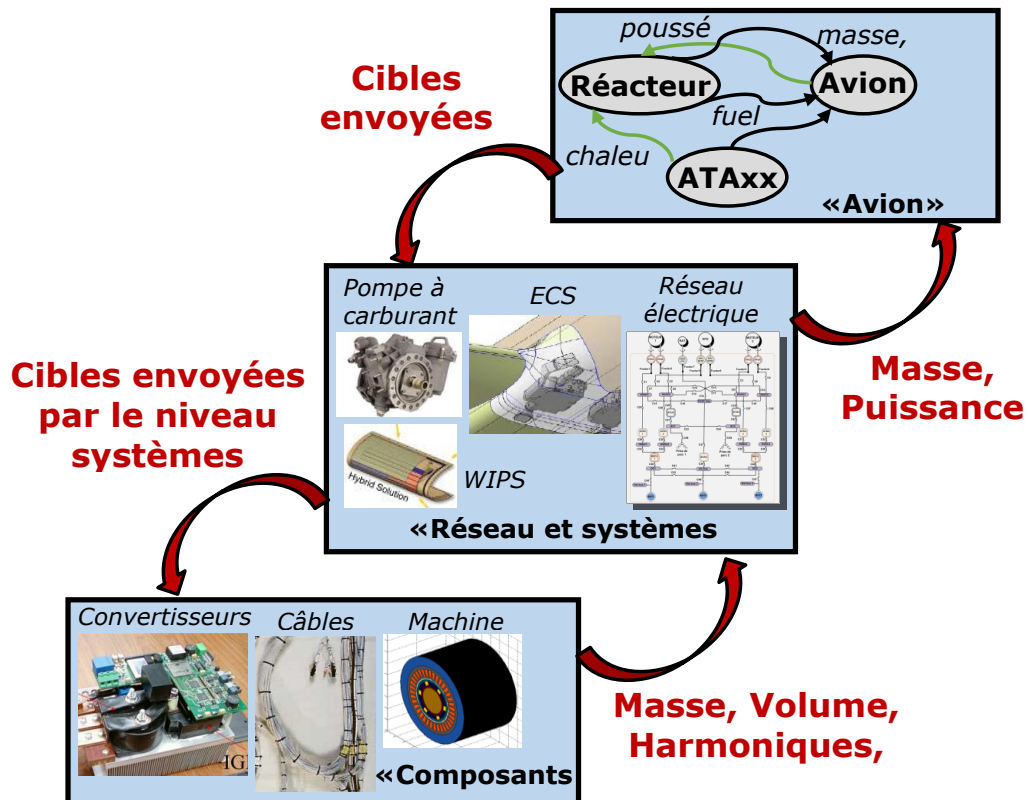


Fig I. 1 Procédure de conception à trois niveaux : avion, systèmes, composants

Dans le domaine aéronautique, on entend par « système » les dispositifs qui assurent les fonctionnalités non propulsives de l'aéronef. On y trouve par exemple les pompes à carburant ou à inertage, les commandes de vol ou les systèmes de conditionnement d'air (ECS), de freinage ou d'antigivrage (WIPS). Le réseau électrique interagit bien sûr avec des systèmes de nature différente. L'enjeu derrière sa conception est double. D'une part, il faut intégrer au mieux dans le réseau les différents composants électriques de l'avion et assurer les couplages avec les autres systèmes embarqués ainsi qu'avec les autres niveaux de la conception. D'autre part, il faut intégrer au mieux le réseau lui-même dans l'avion.

Nos travaux concernent la problématique d'intégration à forte densité énergétique. Cela requiert une optimisation de la masse. Le réseau électrique de bord d'un avion comporte un nombre élevé d'équipements électriques. Ces équipements sont

fournis à l'intégrateur par différents équipementiers. Ils doivent fonctionner dans des conditions de sécurité et de performance suffisantes pendant toute la mission de l'avion. Jusqu'à présent ces conditions sont notamment fixées par des normes de qualité réseau. Notre but est de fournir des méthodes et des outils qui permettent à l'intégrateur d'optimiser le dimensionnement du réseau en orientant les équipementiers pour atteindre le compromis optimal au niveau réseau et non une somme d'optima locaux des équipements. Il est donc nécessaire d'avoir une vision système appréhendant toutes les relations entre les différents équipements et il ne faut pas se contenter de la vision locale centrée sur chaque équipement.

Dans ce chapitre introductif, nous allons décrire les évolutions que connaît l'architecture du réseau de bord dans le contexte de l'avion plus électrique et donner les conséquences sur la stratégie de conception du point de vue intégrateur. On détaillera ensuite les principales sources de complexité que l'on devra traiter. Le cœur de ce chapitre consistera à présenter des méthodes et outils utilisés actuellement pour faire face à cette complexité grandissante. Une attention particulière sera prêtée aux approches multiniveaux qui découlent de la « MDO » (Multidisciplinary Design Optimization) et dont nous nous sommes inspirés pour développer nos propres méthodes de conception.

## **1.2 Evolution des réseaux électriques de bord dans le cadre de l'avion plus électrique**

L'essentiel de l'énergie primaire fournie par les réacteurs de l'avion sert à propulser l'avion. Une toute petite partie, environ 3 %, de la puissance totale des réacteurs sert à alimenter les systèmes non propulsifs. Ces systèmes utilisent cette énergie selon 4 vecteurs : mécanique, électrique, hydraulique et pneumatique.

Ces dernières années, une tendance à l'électrification des systèmes pneumatiques et hydrauliques est constatée. Les systèmes électriques offrent des avantages en termes de maintenance et de souplesse d'utilisation. De plus, la réduction du nombre de vecteurs énergétiques (un seul pour le non propulsif, dans le cas d'un « avion tout électrique ») permet une meilleure rationalisation de la gestion de l'énergie à bord, donc des gains de masse à la clé. Enfin, grâce aux innovations en électronique de puissance et à l'amélioration des machines électriques, on arrive maintenant à des systèmes électriques aussi performants que les systèmes classiques avec une efficacité énergétique accrue et une masse de plus en plus réduite.

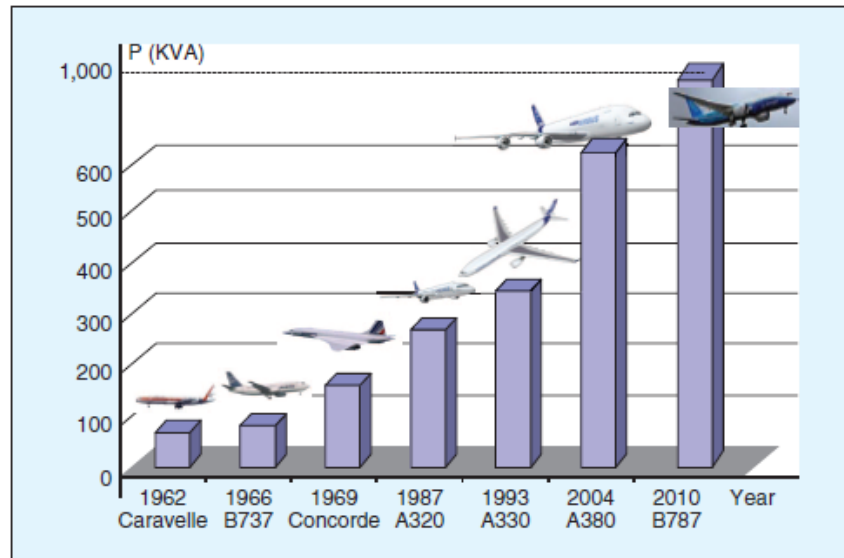


Fig I. 2 Évolution de la puissance électrique embarquée dans un avion

Ces différentes évolutions ont conduit à une forte augmentation de la puissance électrique embarquée. Ainsi on considère qu'à taille égale d'aéronef, le passage au bleedless (c'est-à-dire la suppression du réseau pneumatique embarqué) mène à quadrupler la puissance électrique des systèmes non propulsifs. Le Dreamliner (B787) embarque ainsi 4 alternateurs de 250kVA, soit 1 MVA électrique à bord ! De nouveaux besoins en termes d'équipements de loisir et de confort viennent soutenir cette hausse. La suppression de certains systèmes hydrauliques, train d'atterrissage, freinage, commandes de vol est aussi dans « *l'air du temps* », sans parler de nouvelles fonctions en émergence telles que le « *green taxiing* » qui vise à donner davantage d'autonomie au sol via un système de moteurs électriques près des roues, capable d'entraîner l'avion dans les deux sens de marche.

Cette augmentation de la puissance électrique embarquée provoque un changement profond de l'architecture des systèmes électriques de bord. Les gains de masse recherchés poussent d'autre part à optimiser ces systèmes.

L'apparition de nouveaux niveaux de tension, HVDC (High Voltage Direct Current) (+/-270V, +/-540V) côté continu et HVAC (High Voltage Alternative Current) (230VAC) côté alternatif est une évolution marquante des architectures de réseau pour un avion plus électrique [GIR 14]. L'utilisation de niveaux de tension élevés répond à la nécessité de limiter le courant dans les câbles (donc leur section et leur masse), compte tenu des valeurs élevées de puissance électrique transmise et permet de mutualiser les étages de redressement qui se multiplient pour alimenter les charges à fréquence variable [GIR 10].

Dans l'architecture de l'avion plus électrique inspiré du projet MOET [GIR 10]-[ROB 12], des charges pouvaient être directement connectées au réseau HVAC. Le cahier

des charges contenait donc de fortes limitations sur la pollution harmonique générée à ce niveau par l'alimentation de la partie continue, ce qui se traduisait par un surplus de masse. Dans nos études, nous avons travaillé sur un cahier des charges utilisant un réseau HVDC 540 V où toutes les charges sont raccordées directement sur le bus HVDC grâce à l'utilisation de cœurs d'électronique modulaires et mutualisés [GIR 14]. Par l'abandon des contraintes de raccordement sur l'étage alternatif, cette évolution s'accompagne de la simplification du canal de génération qui passe d'un ATRU (Auto Transformer Rectifier Unit) à un RU (Rectifier Unit) utilisant un simple pont redresseur à diodes avec filtre capacitif (cf. Fig I. 3).

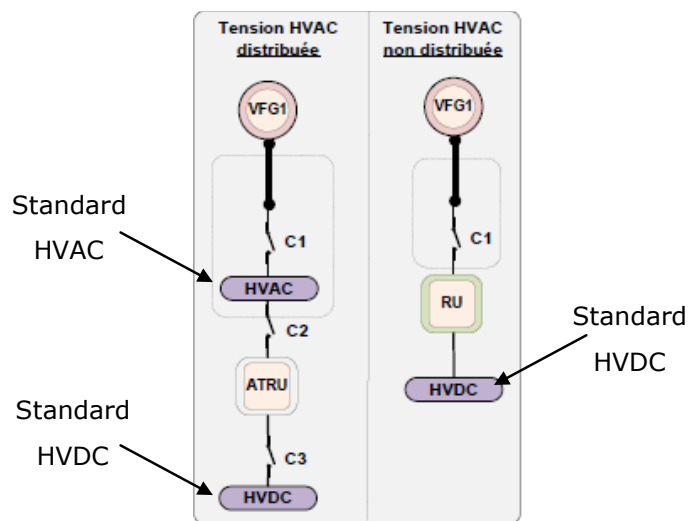


Fig I. 3 Évolution des organes de conversion HVAC/HVDC

Cette évolution a forcément une conséquence directe sur les performances du réseau et nécessite une réévaluation du dimensionnement de ses éléments parmi lesquels les étages de filtrage qui assurent la qualité de la tension HVDC 540 V.

## **1.3 Problématique de conception d'un réseau électrique de bord**

### **1.3.1 Le processus de conception**

#### **1.3.1.1 Cycle de conception d'un réseau de bord**

La conception d'un réseau de bord électrique est un long processus qui passe par trois étapes :

- La première étape est la définition système: l'intégrateur fixe les choix d'architecture, les spécifications aux équipementiers sous forme de normes pour garantir le bon fonctionnement du dispositif.
- L'étape suivante est le dimensionnement spécifique du réseau : chaque équipementier conçoit sa partie du réseau (son équipement) en tenant compte des spécifications envoyées par l'intégrateur ; il propose un concept qui possède les meilleures performances à moindre coût, fournit généralement un modèle d'intégration et parfois des prototypes qui permettent à l'intégrateur de valider l'interconnexion de tous les sous-systèmes dans le réseau.
- La dernière étape est l'intégration système et la validation, au moyen d'études systémiques, de simulations et de bancs d'essais expérimentaux.

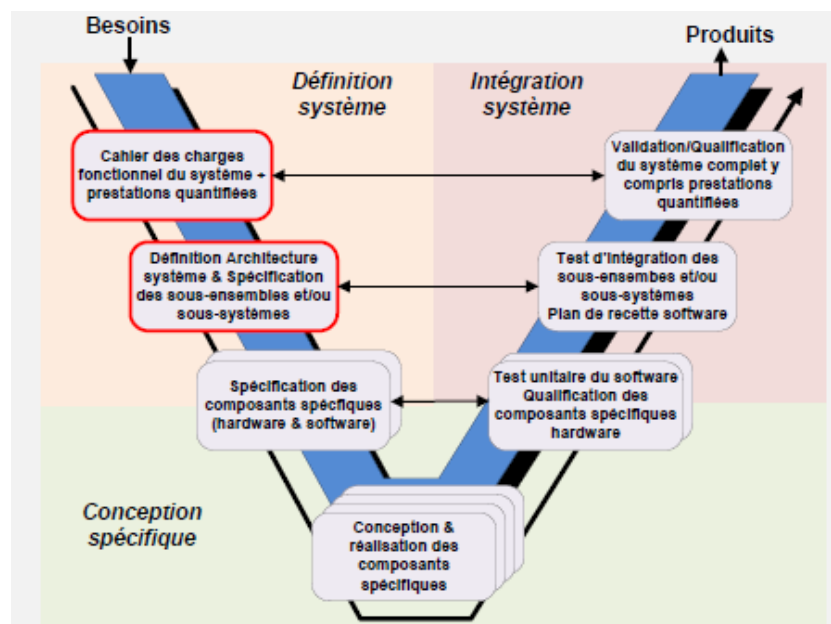


Fig I. 4 Le cycle de conception, un procédé itératif intégrateur-équipementier

Le formalisme (cf. Fig I. 4) est très utile. Il permet la décomposition du processus de conception en plusieurs étapes liées par une contractualisation qui établit les responsabilités de tous les intervenants. Un deuxième avantage majeur de cette décomposition est qu'elle permet de modifier et d'améliorer une étape du processus sans remettre en question l'ensemble du processus. Ceci facilite le transfert de connaissance et la diffusion des résultats de la recherche comme par exemple des modifications dans la conception des équipements qui utilisent des méthodes et des outils basés sur l'optimisation au lieu de l'expertise uniquement.

On trouve, dans la bibliographie relative à la conception des réseaux électriques aéronautiques, de nombreux travaux qui traitent de la seconde étape (dimensionnement) du cycle de conception à travers la conception de certains équipements comme les générateurs [ROB 12], les actionneurs [AND 11], [LIS 08], [FRA 12] et les convertisseurs

[RUB 10], [BEL 11]. Les travaux de thèse de [NGU 08a] sur la conception d'un canal de génération de type ATRU sont une bonne illustration de la démarche de conception par optimisation d'un sous-système constitué de plusieurs organes : transformateur, redresseur, inductance d'interface et filtre de sortie. Il existe aussi beaucoup d'études sur la systématique du réseau en phase d'intégration. On peut citer les études sur la stabilité de [BEL 11] utilisant le critère de Middlebrook. A travers l'analyse modale, il a réalisé une étude de stabilité qu'il a pu vérifier sur un banc de test expérimental ASVR (Aircraft Systems Validation Rig).

D'autres chercheurs se sont intéressés aux relations entre la seconde et la dernière étape du cycle de conception, c'est-à-dire comment concevoir un sous-système en intégrant son environnement. [SAU 09] introduit par exemple la notion de robustesse du dimensionnement qui permet de rendre robuste le dimensionnement face aux incertitudes sur l'environnement de fonctionnement. Il essaye ainsi de valider l'intégration du sous-système dès la seconde étape. [GIR 10] utilise quant à lui le critère de Routh-Hurwitz afin d'étudier la stabilité et intègre cet aspect avec la qualité du réseau dans une démarche de dimensionnement des équipements à masse minimale.

### **1.3.1.2 Avènement de la conception par optimisation**

En ingénierie deux catégories de problèmes existent : les problèmes directs et les problèmes inverses.

- Les problèmes directs : « *pour des caractéristiques données d'un système (structure, dimensions et conditions d'utilisation), déterminer les performances* » [WUR 08].
- Les problèmes inverses : « *pour des performances exigées (étant donné le cahier des charges), trouver les caractéristiques du système (structure, dimensions et conditions d'utilisation)* » [WUR 08].

Classiquement, la conception au niveau équipement se fait de façon incrémentale, faisant appel à l'expertise et, depuis les années 90, à des modèles d'analyse et des simulations plus ou moins précis et fins. Plus récemment, on assiste à l'arrivée de la « *conception par optimisation* », approche faisant appel au couplage de modèles de conception avec un algorithme d'optimisation qui, sous le regard critique des experts, aide ces derniers à paramétrer de façon optimale son dispositif (cf. Fig I. 5).



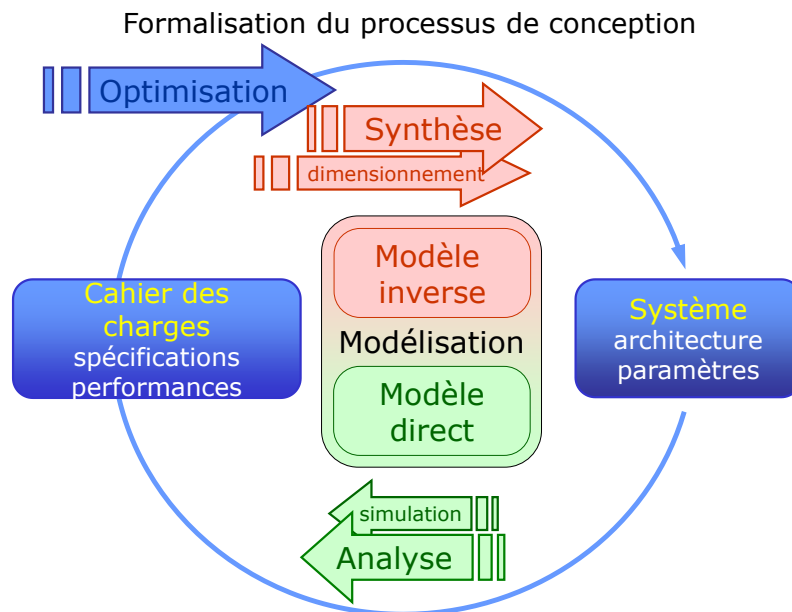


Fig I. 5 Dualité « synthèse-Analyse »

La formulation générale d'un problème d'optimisation se fait comme suit :

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{X}} \mathbf{F}(\mathbf{X}) \\ \mathbf{G}(\mathbf{X}) \leq 0 \\ \mathbf{H}(\mathbf{X}) = 0 \end{cases} \quad \text{Eq I. 1}$$

- X est le vecteur des variables de décision du système, il s'agit des variables qui permettent de dimensionner le système.
- F est le vecteur des fonctions objectif qui sont liées au cahier des charges. Dans nos études on retiendra une seule fonction objectif qui est la masse qu'on minimisera.
- G et H sont respectivement les vecteurs des contraintes d'inégalité et d'égalité, issues du cahier des charges.

Les vecteurs des fonctions F, G et H sont évalués grâce à des modèles de dimensionnement et des modèles comportementaux, pour chaque valeur du vecteur de variable de décision X.

## 1.3.2 Les principaux verrous méthodologiques

### 1.3.2.1 La complexité des systèmes étudiés

Le réseau électrique de bord d'un aéronef est un système complexe qui rassemble plusieurs équipements pour réaliser des missions que nous avons évoqués dans l'introduction. Selon Bertalanffi, un « système » est un « ensemble d'éléments en interaction ». Et c'est la nature des couplages et des relations entre les éléments qui font

la complexité d'un système. On peut donc dire qu'un système est complexe si les interactions entre ses éléments sont indescriptibles ou difficiles à appréhender. Par conséquent, il est impossible de réduire le système à un modèle unique et complètement calculable. A l'opposé, étudier le complexe en séparant chacun de ses constituants par une approche « *mécaniste* » revient certes à le simplifier, mais conduit également à une rupture des couplages. Et cela conduit le concepteur vers une somme d'optima locaux souvent distante de l'optimum global. Tout cela explique l'importance des méthodologies de conception et des concepteurs eux-mêmes pour les systèmes complexes [WUR 08], [PAP 00], [LEM 99].

Ces définitions rejoignent un des principes de la modélisation systémique qui est « *le principe d'émergence* ». Selon ce principe, des lois, des phénomènes émergent à un certain niveau, sans que cette émergence ne puisse être étudiée et prévue par l'étude des sous parties prises isolément, notamment parce-que cette émergence résulte non des propriétés des parties prises isolément, mais des propriétés de leurs interactions [WUR 08], [BIT 07]. Nous verrons par la suite, sur nos cas d'étude, que cette notion est directement liée à l'approche de conception utilisée. Les modèles qui émergent au niveau d'un sous-système du réseau et ceux issus d'une vue globale font appel à des variables différentes, d'où une modification de la formulation du problème de conception.

### **1.3.2.2 La difficulté voir l'impossibilité de trouver des modèles**

Le premier enjeu est technologique, c'est celui de trouver la description adéquate, des modèles fidèles mais des modèles qui permettent tout de même d'aboutir à un dimensionnement. Il n'est pas aisé de décrire des couplages interdisciplinaires, inter éléments avec des modèles fiables. De plus, assembler des modèles de différentes parties pour construire un modèle système aboutit généralement à des modèles très lourds où l'on peut trouver des fonctions analytiques rapidement calculables, mais aussi des parties semi-analytiques ou numériques qui nécessitent des ressources de calcul importantes.

### **1.3.2.3 Notion de problème mal posé**

Avant de résoudre un problème de conception, il convient de bien le poser. Un problème bien posé est un problème dont la résolution peut-être automatisée par l'ordinateur. On admet donc qu'une résolution est possible et qu'il existe au moins une solution à ce problème. Cette définition permet de distinguer ce qui est complexe de ce qui est compliqué, deux notions fondamentalement différentes.

La complexité –nous l'avons vu- dépend des interactions entre les composants du système qui font émerger certains phénomènes à un certain niveau. Elle est du ressort

du concepteur qui use de son savoir-faire, de son expertise, de son esprit d'innovation pour proposer une formulation qui permet le traitement du problème.

Le compliqué est tout ce qui est décomposable, automatisable et finalement traitable par ordinateur, gérer le « *compliqué* » est donc le rôle de l'outil [WUR 06], [NGU 08a]. Le réseau de bord d'un avion peut contenir des dizaines de sous-systèmes. L'optimisation du réseau fait donc appel à un nombre très élevé d'équations et de variables et cela sera à l'outil d'être à même de gérer les complications posées par la grande taille du problème d'optimisation. Séparer le rôle du concepteur du rôle de l'outil participe donc à bonne formulation du problème.

Un premier exemple relativement simple concerne les fonctions de transfert des filtres du réseau HVDC. Notre rôle en tant que concepteur est de modéliser ces fonctions de transferts par des matrices d'admittance tandis que l'outil permet de gérer des matrices de rang élevé qu'il serait difficile pour nous de traiter.

Un autre exemple plus évolué concerne l'élaboration des méthodes d'optimisation multiniveaux. Nous avons travaillé avec VESTA SYSTEM [CAD] sur le développement d'un outil de conception à cet effet. Notre rôle en tant que concepteur a été de poser l'architecture de la méthode en spécifiant les différents niveaux d'optimisations et les interfaces nécessaires à la communication de données entre les différents niveaux. L'outil CADES devrait quant à lui permettre de gérer l'optimisation multiniveau d'un réseau (système) composé d'un nombre important de sous-systèmes en proposant une plateforme logicielle pour l'intégration des différents sous-problèmes, leurs optimisations locales et leurs communications avec le niveau supérieur.

#### **1.3.2.4 Des systèmes multiéléments multidisciplinaires**

Nous avons vu que le rôle du réseau électrique de bord est de plus en plus important. La puissance qu'il véhicule, le nombre de sous-systèmes qu'il intègre et donc sa taille sont amenés à croître. De plus, compte tenu des nouvelles missions qui lui sont allouées (compression d'air, dégivrage) il connaît une multidisciplinarité de plus en plus importante. Il est difficile voire impossible d'appréhender au niveau système ces nouvelles sources de complexité qui posent de sérieux défis à l'intégrateur. Le recours à la décomposition du problème système en une série de sous-problèmes plus petits et plus simples à résoudre localement est une évidence à condition de préserver les couplages du système.

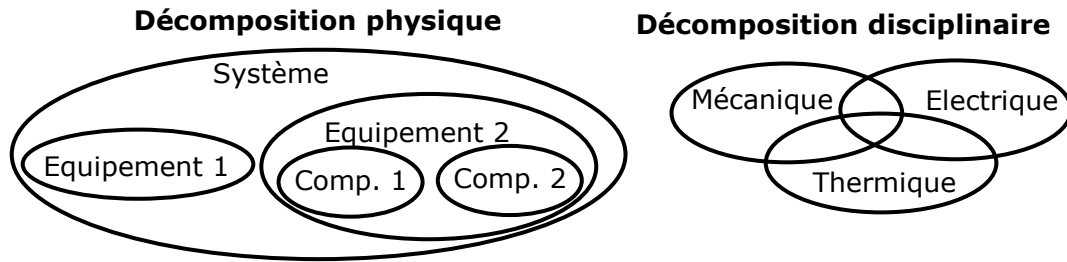


Fig I. 6 Exemples de décomposition MDO

[BER 12] propose - deux méthodes pour gérer distinctement la problématique de la taille du problème et celle de sa multidisciplinarité. Il utilise une approche multiniveau pour décomposer un problème par rapport aux sous-systèmes qui le composent. Nous verrons dans la suite du mémoire que nous nous sommes inspirés de cette approche pour proposer des formulations multiniveau des problèmes d'optimisation que nous traiterons. Pour la multidisciplinarité, il utilise une décomposition par rapport aux phénomènes physiques et applique une approche collaborative multidisciplinaire pour résoudre le problème multiniveau ainsi formulé.

Il apparaît dans les deux cas que la structuration multiniveau est une piste sérieuse pour l'aider à la formulation de problèmes de conception multiéléments multidisciplinaires.

### 1.3.3 Les contraintes industrielles

En plus des verrous méthodologiques dans le paragraphe précédent, des contraintes industrielles peuvent s'ajouter qui sont relatives aux enjeux technologiques, économiques et d'organisation du secteur aéronautique.

#### 1.3.3.1 Les procédés d'intégration

La construction de l'avion est réalisée en répartissant les rôles. On décompose le réseau électrique en sous-systèmes, on établit des cahiers des charges et des standards pour garantir la cohérence de l'intégration, mais ce sont les équipementiers qui assurent la conception des équipements. Proposer de nouvelles approches peut conduire à remettre en question cette organisation, ce qui nécessiterait des changements profonds chez tous les acteurs de la chaîne. Il faut donc intégrer cet enjeu et essayer si possible d'adapter les nouvelles approches à l'organisation actuelle.

#### 1.3.3.2 Les contraintes de confidentialité

Les aspects de concurrence et de confidentialité sont omniprésents dans le processus de conception du réseau électrique de bord d'un avion. Certains équipementiers peuvent être concurrents et l'échange d'informations doit donc être

réduit à son minimum. Pour cela, les avionneurs établissent des cahiers des charges sous formes de normes, ces normes souvent très rigides sont censées assurer la cohérence de l'intégration dans la mesure où il n'y a que très peu d'échange de données entre les différents concepteurs des sous-systèmes.

D'autre part, lors de la conception d'un équipement aéronautique, les équipes d'ingénieurs et d'experts sont souvent réparties selon des domaines d'expertise et la communication entre les équipes est restreinte. Notamment, la démarche couramment adoptée est structurée selon un processus séquentiel : on conçoit un premier élément qui permet d'en concevoir un second, ainsi de suite.

### **1.3.3.3 Les temps de développement**

Dans l'industrie en général, il est impératif de développer des solutions innovantes dans les plus brefs délais afin de les intégrer dans la phase de production et de les proposer rapidement aux clients. Les phases d'avant-projet où l'intégrateur et les équipementiers discutent des normes conditionnent la suite du processus de développement : choix d'architecture, niveaux de tension ce qui peut se traduire par des retards dans les programmes de développement de nouvelles séries d'avion.

### **1.3.3.4 Nos problématiques**

Dans ce mémoire, nous allons traiter deux problématiques :

- *PROBLEMATIQUE 1 : « Trouver une formulation système qui intègre les étapes du cycle de conception depuis les spécifications système, en passant par le dimensionnement optimal des différents organes jusqu'à l'intégration et la validation système. »*

Aujourd'hui, le choix et la définition des normes se fait par itération et par un dialogue entre intégrateur et équipementier. Par exemple, la norme de qualité réseau à laquelle on se réfèrera abondamment au cours de ce mémoire, fait l'objet d'un compromis entre les efforts consentis par les équipementiers de type « *consommateurs* » et par celui en charge de la conception du canal de génération. Au vu de ce compromis, il n'y a donc pas un choix unique de la norme et l'intégrateur peut judicieusement profiter de ce degré de liberté pour gagner en performance et en niveau d'intégration de son réseau de bord.

On pourrait aussi songer, dans le contexte de la conception par optimisation, à trouver une formulation du problème qui intègre les normes elles-mêmes : le dimensionnement des différents organes de la structure et leur intégration pourrait alors conduire à une solution plus optimale du point de vue système, satisfaisante par rapport à une norme elle-même optimisée et cohérente du point de vu des couplages entre sous-systèmes.

- **PROBLEMATIQUE 2** : « Quels sont les moyens (les méthodes et les outils) les plus à même de traiter le problème de dimensionnement complet d'un réseau électrique contenant un nombre important de sous-systèmes. »

Lorsque les couplages entre les sous-systèmes ne sont pas abordés dans la phase de dimensionnement, l'optimalité du réseau est limitée. Il ne suffit pas d'avoir des sous-systèmes localement optimaux pour garantir les performances et l'optimalité du réseau complet.

Pour traiter le second défi du dimensionnement complet d'un réseau électrique aéronautique, nous allons nous pencher sur le découpage du réseau et la communication bidirectionnelle « *intégrateur-équipementier* ». Nous partirons des approches actuelles de conception, basées sur une communication par les normes pour comprendre et illustrer les lacunes de cette démarche. Puis, à l'aide de méthodes issues principalement de la MDO, nous proposerons de nouvelles approches destinées à pallier ces manques. Nous intégrerons l'approche « *optimisation* » dans toutes les étapes du cycle de conception alors qu'elle se limite aujourd'hui à la deuxième phase : on parlera alors « d'optimisation multiniveaux ».

## **1.4 Approches de conception proposées pour la conception de réseaux électriques aéronautiques**

Les méthodes utilisées dans la conception de systèmes électriques sont abondantes dans la bibliographie [LIS 13] [HAL 12] [BAR 05], Par contre, les approches de conception destinées à la conception de réseaux complexes et permettant une intégration des couplages forts et principaux sont nettement moins nombreuses surtout dans les réseaux électriques aéronautiques [GAN 03]. Des travaux pertinents concernent des chaînes de traction ferroviaire [MOU 09], [BER 12].

Les méthodes de conception utilisées dans les réseaux électriques aéronautiques sont souvent basées sur l'expertise des équipes d'ingénierie. Le savoir-faire accumulé pendant des années par les ingénieurs et leurs expériences ont façonné des méthodes de travail. Les contraintes extérieures et les collaborations provoquent des changements mais en général chaque équipementier possède ses propres méthodes, souvent jalousement gardés car elles constituent une partie non négligeable du cœur de métier de ces sociétés. Nous allons donc essayer de dégager une classification des approches qui se base sur une vue de l'intégrateur. L'intégrateur ne connaît pas forcément les détails de la conception de chaque équipement mais c'est lui qui fixe les règles et impose

des normes et donc indirectement impose une démarche commune à tous ses équipementiers.

### **1.4.1 Les approches normatives ou mécanistes**

Ce sont les approches classiques qui se basent sur un dialogue « intégrateur - équipementier » ou « systémier - sous-traitant ». Dans l'exemple de la Fig I. 4, le dialogue est « *principalement* » unidirectionnel (AIRBUS fixe au départ des normes à ses équipementiers), même si les normes peuvent évoluer au gré du dialogue avec les équipementiers. En pratique aussi, au cours des programmes et pour des raisons qui dépassent parfois la technique, l'intégrateur peut accepter des « *dérogations* » à la norme.

Compte tenu de son expertise, l'équipementier a tout loisir de mettre en œuvre un modèle de conception orienté dimensionnement, couplant divers champs disciplinaires : électrique, mécanique, thermique,... Le modèle doit faire le lien entre des entrées et des sorties.

Il existe deux types d'entrées :

- Des entrées externes qui viennent de l'environnement de l'équipement. Dans les approches normatives, comme les valeurs des variables externes sont méconnues par l'équipementier, elles sont approximées à leur pire cas en référence à la norme, afin de garantir la fiabilité de l'intégration système.
- Les entrées internes constituent l'ensemble des degrés de liberté de l'équipement qui ne sont pas fixés par l'environnement. Les constantes physiques sont les variables d'entrées qui restent fixes pendant le processus de dimensionnement : elles correspondent à des hypothèses sur des choix de matériaux ou de paramétrage interne issus de l'expertise. Les « variables de décision », sont la partie des variables d'entrée sur lesquelles le concepteur va jouer pour obtenir (et optimiser) les performances escomptées.

Les variables de sorties sont également divisées en deux parties :

- Les variables de sorties externes, sont les variables qui lient directement l'équipement à son environnement ; elles doivent respecter les spécifications de l'intégrateur.
- Les variables de sortie internes rassemblent le reste des variables ; elles peuvent correspondre à des contraintes internes que l'expertise fixe pour garantir les performances de l'équipement.

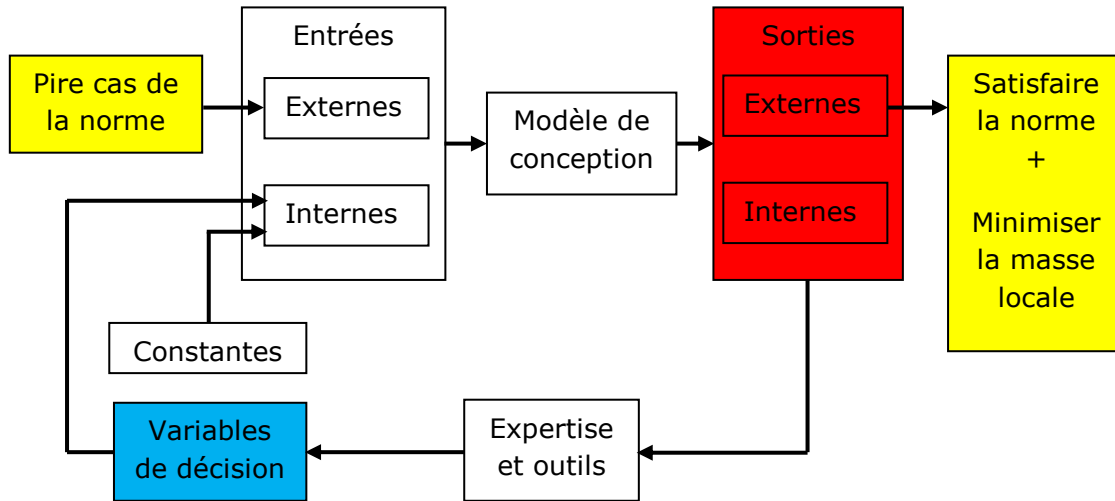


Fig I. 7 Conception d'un équipement par l'approche mécaniste « normative »

A normes fixées, l'équipementier est totalement indépendant pour réaliser la conception de son système. Cette démarche est compatible avec le cycle de conception classique de l'intégrateur et permet une contractualisation claire entre les différents collaborateurs. L'avantage pour l'équipementier est la confidentialité de son savoir-faire puisque l'intégrateur n'est pas intrusif dans son dimensionnement et dans son cœur de métier. Côté intégrateur, la norme lui permet une simplification puisqu'il délègue des choix à ses équipementiers.

Le premier inconvénient de cette approche est sa « *vulnérabilité* » par rapport à la norme. Si la norme n'est pas bien définie, l'intégration ne sera pas validée et c'est l'intégrateur qui en assumera la responsabilité. Des sous-systèmes respectant localement les spécifications pourraient finalement s'avérer incompatibles si tous les couplages entre équipements n'étaient pas complètement intégrés au travers de la norme. Une autre situation critique est possible. Nous pouvons avoir des normes trop restrictives qui conduisent à la validation de l'intégration au prix d'un surdimensionnement du système. Dans les deux cas, l'intégrateur devra modifier sa norme en ayant peu de visibilité sur les parties du réseau qui seront impactées dans la mesure où un changement de la norme implique l'ensemble des équipements.

### 1.4.2 L'approche globale

L'approche globale tient compte de la totalité des couplages entre équipements. Il est donc nécessaire de décrire l'ensemble des phénomènes du réseau au sein d'un même environnement intégrant les modèles de l'ensemble à concevoir. Toutes les variables de décision des équipements sont partagées et gérées à un seul niveau.



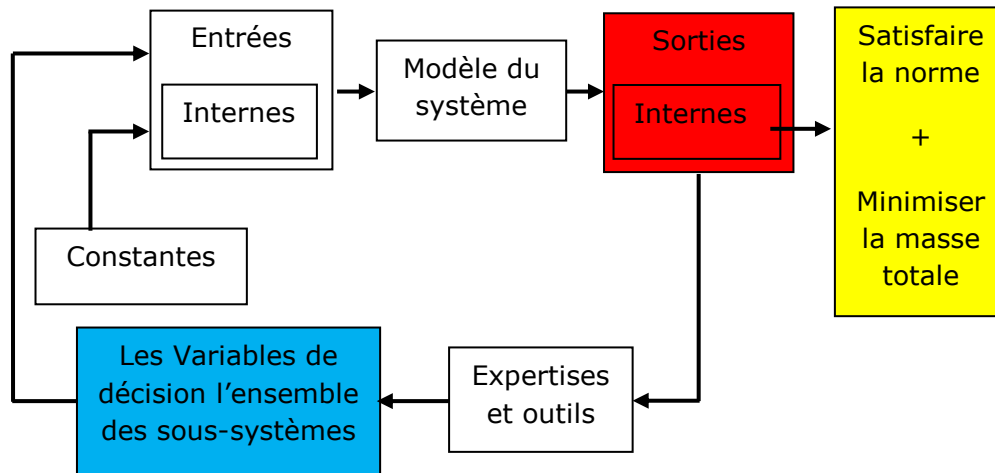


Fig I. 8 Conception d'un système par l'approche globale

L'avantage de cette approche est qu'elle permet une description fidèle du réseau en intégrant l'ensemble des couplages entre les différents équipements. La vision du concepteur est générale et détaillée. On peut aisément agir sur la bonne variable de décision pour obtenir la sortie souhaitée. De plus, un seul processus de conception permet de trouver le dimensionnement simultané de l'ensemble des organes du réseau au lieu d'avoir un ensemble de processus (autant que le nombre d'équipements à concevoir) dans les approches normatives.

Encore faut-il qu'un modèle unique et calculable soit accessible. Cette approche est en pratique de l'ordre de l'utopie pour des raisons de confidentialité et parce qu'il est très difficile voire impossible de décrire dans un seul modèle l'ensemble des équipements d'un réseau aéronautique. Ce dernier problème est dû à la complexité statique, c'est-à-dire à la taille du système et au nombre de sous-systèmes qui le composent mais aussi à la complexité dynamique qui se manifeste dans ce type de système par une grande dispersion modale. Il y a aussi la complexité de résolution qui touche au temps de convergence voire à la convergence elle-même, il n'est pas sûr que les algorithmes d'optimisation puissent gérer le nombre de variables de décision d'un système de grande taille.

### 1.4.3 La méthode des Fronts de Pareto étendus (MFPE)

Cette approche a été développée au G2ELab par [NGU 08b], dans le cadre du dimensionnement optimal multi objectif (masse et rendement) d'une chaîne de conversion électromécanique constituée d'un onduleur et d'un moteur électrique. Dans cette approche, on considère les couplages entre les sous-systèmes à travers des variables qui garantissent l'interconnexion des sous-systèmes. Dans le cas étudié par l'auteur, ce sont la tension, le courant, le  $\cos \phi$  et la fréquence. On utilise aussi une propriété souvent observée dans les systèmes ; les fonctions objectif sont

hiérarchiquement séparables : ici, la masse du système est la somme des masses des éléments de la chaîne et son rendement est le produit des rendements des éléments.

Ces variables d'interconnexion, appelées variables globales, sont discrétisées selon leurs domaines de variation. Puis, chaque équipement est dimensionné séparément par rapport à toutes les combinaisons possibles des variables globales qui interviennent dans sa conception. Il en résulte un nombre de solutions, plus ou moins optimales localement, aussi élevé que le nombre de combinaisons de variables globales. Pour chaque équipement, les solutions locales sont représentées sous forme de courbes de Pareto qui représentent dans l'application considérée ici, le compromis entre masse ( $W$ ) et rendement ( $\eta$ ).

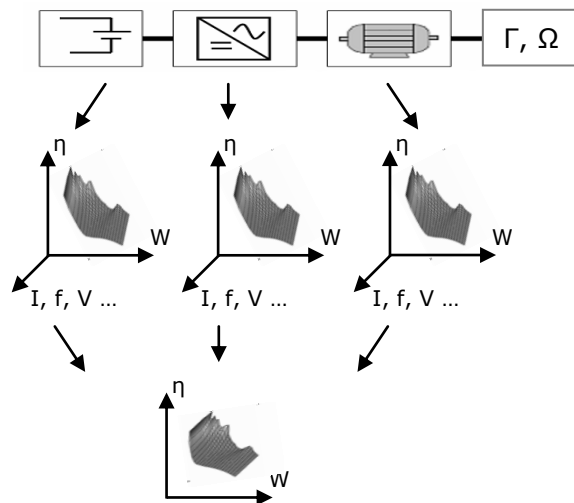


Fig I. 9 Principe de la méthode des fronts de Pareto Etendus [NGU 08b]

La dernière étape consiste à choisir dans tous les fronts de Pareto des équipements, les solutions compatibles entre elles qui partagent les mêmes valeurs des variables globales. Ces solutions sont représentées sur un front de Pareto système en agrégeant les fonctions objectif des équipements :

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{tot} = \sum_{i=1}^{N_{subsystems}} M_{subsystem\ i} \\ \eta_{tot} = \prod_{i=1}^{N_{subsystems}} \eta_{subsystem\ i} \end{array} \right. \quad \text{Eq I. 2}$$

Ensuite, un critère de dominance au sein du front de Pareto système permet de sélectionner les solutions optimales du point de vue système.

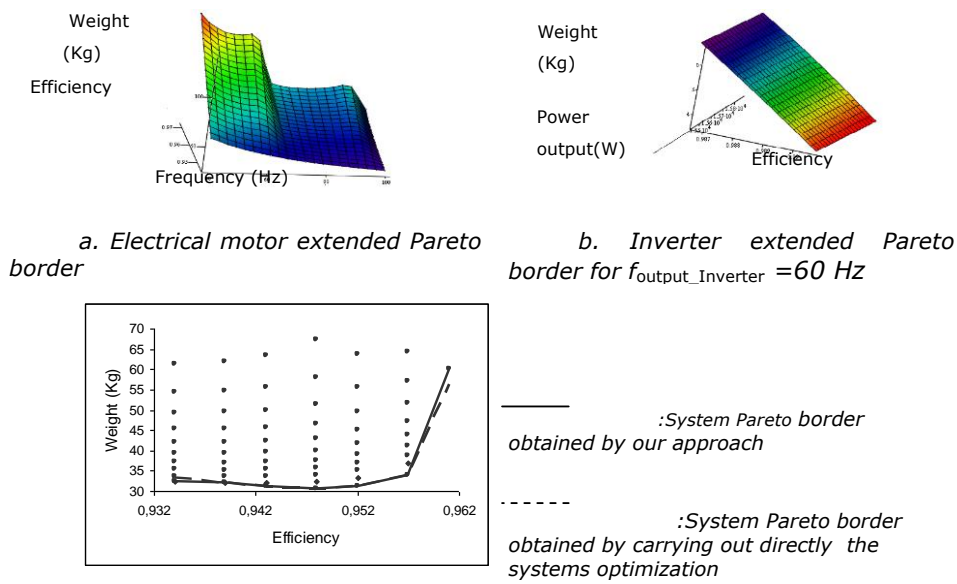


Fig I. 10 Construction du front de Pareto système [NGU 08b]

Cette approche système permet de considérer les couplages entre les organes d'un système au moyen de variables globales. Le dialogue entre les sous-systèmes est plus poussé, comparé à une norme, mais reste modéré dans le sens où le partage des modèles n'est pas nécessaire et que chaque équipement conserve la maîtrise de sa conception.

Le principal défaut de cette approche est le nombre d'optimisations nécessaires qui dépend du nombre de combinaisons possibles des variables globales. Ceci est un sérieux handicap pour les systèmes dont le nombre de variables globales est important et dont la gamme d'évolution possible s'étend et nécessite un nombre d'échantillons élevés. Si on désigne par  $N_{Var. Glob}$  le nombre des variables globales et que chaque variable globale peut prendre  $D_j$  valeurs possibles, alors le nombre de solutions de dimensionnement possibles pour chaque sous-système est donné par l'équation.

$$N_{sol} = \prod_{j=1}^{N_{VarGlob}} D_j \quad \text{Eq I. 3}$$

#### 1.4.4 L'approche « collaborative séquentielle »

Cette approche part du constat suivant : à moins de considérer un pire cas des variables globales, qui garantisse l'intégration d'un équipementier dans le système, il faut à minima considérer les mêmes valeurs des variables globales dans tous les sous-systèmes. Dans cette approche, nous utilisons le même formalisme que dans la MFPE.

C'est les variables globales qui assurent l'intégration des couplages entre les sous-systèmes.

Pour répondre au problème de l'explosion combinatoire du nombre d'optimisations nécessaire avec la précédente approche, pour chaque équipement, nous introduisons la notion de séquençement. Les équipements ainsi sont conçus séquentiellement : chaque équipement bénéficie des valeurs de variables globales trouvées par les équipements optimisés auparavant. Cette approche permet d'imposer le même point de fonctionnement à l'équipementier suivant. L'équipementier considère les variables globales trouvées par le précédent équipementier dans sa conception, met à jour certaines de ses variables qui sont des variables de sortie dans son dimensionnement et renvoie le nouveau jeu de valeurs à l'équipementier suivant l'ordre du séquençement.

Une fois le dernier sous-système optimisé, on compare les valeurs des variables globales considérées dans tous les sous-systèmes. S'il y a concordance, les solutions trouvées sont des solutions cohérentes du point de vue système. Dans le cas contraire, on relance le processus mais cette fois avec les dernières valeurs obtenues des variables globales pour tenir compte des modifications apportées lors de l'itération précédente. Au bout de quelques itérations, l'échange d'information à travers les variables globales guide l'ensemble des équipements vers des configurations compatibles qui correspondent à une solution système.

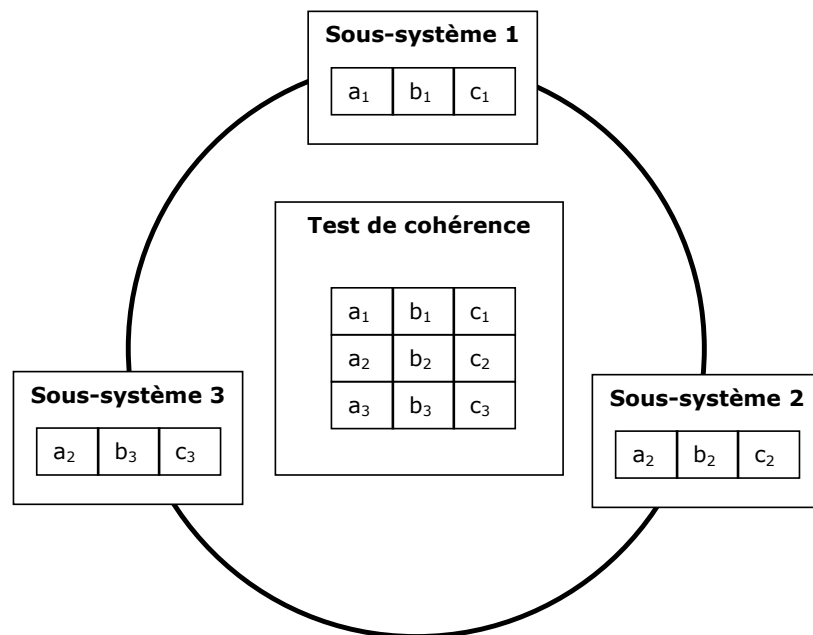


Fig I. 11 Principe de l'approche séquentielle collaborative

L'avantage de cette approche est l'imposition de la cohérence pour certaines variables de couplage ce qui peut aider à l'amélioration de la convergence. Cependant, le processus s'effectue sans aucune orientation vers une optimalité système, ce qui le rend

dépendant de l'étape d'initialisation. On peut y voir une analogie avec les algorithmes d'optimisation de type gradient qui convergent vite mais convergent localement.

## 1.4.5 Les approches multiniveaux

### 1.4.5.1 État de l'art

La MDO est une démarche de conception née d'un double besoin ; une multidisciplinarité omniprésente avec des champs d'expertise diversifiés et un nombre d'éléments élevé dont la conception est hiérarchiquement distribuée sur différents niveaux. *All et al* présentent deux approches MDO : la première est l'approche collaborative CO (collaborative Optimization) basée sur une décomposition disciplinaire. La seconde approche, l'ATC (Analytical Target Cascading) est basée sur une décomposition physique hiérarchique du système. Il applique ensuite ces approches sur deux cas d'études : un système de fixation et une pompe à eau électrique. Le principal défi dans ces méthodes est d'assurer la cohérence aux frontières de la décomposition et les stratégies de coordination sont ici d'une importance capitale [ALL 05].

L'organisation multiniveau est adaptée aux réseaux électriques aéronautiques car il y a un « *chef d'orchestre* », l'intégrateur, qui interagit avec des équipementiers fournisseurs de sous-systèmes. Les formulations multiniveaux qu'on trouve dans la bibliographie sont très liées aux problèmes étudiés, il n'est donc pas simple de se retrouver dans toutes les variantes développées. Nous proposons comme référence la thèse de maîtrise [TOS 04] qui est une très bonne synthèse de l'ensemble de la démarche et qui a guidé l'élaboration de l'ATC. L'auteur commence par présenter la problématique d'optimisation par décomposition avant d'introduire la méthode ATC. Un chapitre est dédié aux stratégies de coordination nécessaires pour garantir la convergence de cette approche. Ce qui est particulièrement intéressant est la quinzaine d'exemples différents qui sont présentés pour illustrer la méthode ATC, montrant l'adaptabilité de la méthode à différentes sortes de problèmes de conception par décomposition.

Dans la communauté francophone en génie électrique, les premiers travaux sur la MDO ont, à notre connaissance, été menés par l'équipe Optimisation au laboratoire L2EP. Dans la thèse de [MOU 09], une formulation multiniveau par l'approche ATC a été utilisée pour le dimensionnement d'une chaîne de traction. Ensuite, le problème d'optimisation multiniveau a été résolu avec un accent mis en particulier sur la technique de coordination qui permet d'assurer la cohérence entre les sous-systèmes. Dans la thèse de [BER 12], en plus de l'approche ATC, d'autres méthodes MDO ont été utilisées. Ces méthodes sont basées sur une décomposition différente, soit par rapport aux modèles soit par rapport aux disciplines qui rentrent en jeu. Un chapitre traite également de

l'utilisation des méta-modèles dans l'optimisation : la réduction de modèle est essentielle pour permettre la convergence de processus itératifs complexes dans des temps non prohibitifs.

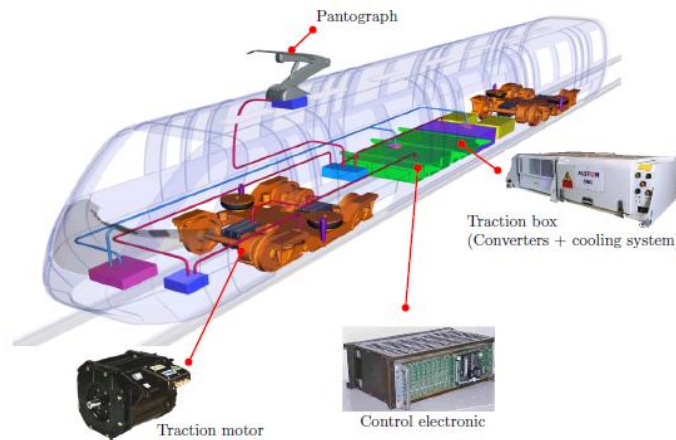


Fig I. 12 Décomposition du système de traction ferroviaire en blocs physiques [MOU 09]

D'autres travaux menés dans d'autres communautés scientifiques reprennent la même démarche. On peut notamment citer les travaux de *L.T. Leifsson* sur la réduction du bruit acoustique des avions de transport [LEI 05].

#### 1.4.5.2 Le problème de la décomposition d'un système

La décomposition du système est faite dans le but d'obtenir des sous-problèmes plus petits, donc plus faciles à résoudre localement. Les méthodes multiniveaux se basent sur une décomposition pour répartir les rôles : localement, chaque processus est plus simple à résoudre et la convergence plus aisée, mais la présence d'interactions inter éléments et inter niveaux requiert la mise en œuvre d'itération et d'un dialogue via des variables de couplage entre les entités du processus multiniveaux. Dans la méthode ATC, le découpage est effectué par rapport aux limites physiques des sous-systèmes. D'autres approches utilisent un découpage par disciplines, ce qui leur permet de répartir les rôles entre les différentes équipes d'experts. Concernant la numérotation des sous-problèmes, on attribut deux indices : le premier renvoie au niveau du sous-problème dans la hiérarchie, le second permet de numéroter les problèmes d'un même niveau.

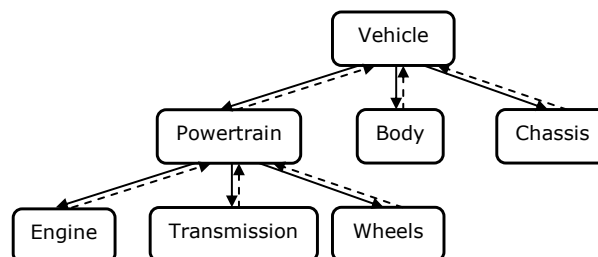


Fig I. 13 Décomposition physique d'une architecture automobile [TOS 04]

Le partitionnement du système engendre une rupture des couplages entre les éléments du système tels qu'ils sont intégrés dans le modèle global système. Il est donc nécessaire d'exprimer ces couplages pour assurer la coordination du système et pour, à l'issue du processus, s'approcher de l'optimum global plutôt que d'une somme d'optima locaux.

Différentes méthodes permettent d'exprimer les couplages dans un système ; les plus utilisées sont la FDT (functional dependence table) et l'AM (adjacency matrix). La FDT est une représentation matricielle du Jacobien des différentes fonctions objectif et contraintes. L'AM est aussi une représentation sous une matrice symétrique : sur la première ligne et la première colonne on énumère l'ensemble des variables du système dans le même ordre, une case  $(i, j)$  reçoit une valeur non nulle s'il existe une fonction qui dépend de la variable portant l'indice  $i$  en abscisse et la variable portant l'indice  $j$  en coordonnée. Le même raisonnement peut être fait en permutant variables et fonctions [TOS 04].

Exemple 
$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{x \in \mathbb{R}^n} \quad f : x_1 \quad x_2 + x_3 = x_4 \\ \text{sujet à} \quad h_1 : x_1 \quad x_3 + x_2 = 0 \\ \text{et à} \quad h_2 : x_1 \quad x_4 + x_3 = 0 \end{array} \right. \quad \text{Eq. I. 4}$$

Tab I. 1 Représentation FDT des couplages dans l'exemple

	$f$	$h_1$	$h_2$
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
$x_2$	$x_1$	1	0
$x_3$	$x_4$	$x_1$	0
$x_4$	$x_3$	0	$x_1$

Tab I. 2 Représentation AM des couplages dans l'exemple

	$f$	$h_1$	$h_2$
$f$		$z_1, z_2, z_3$	$z_1, z_3, z_4$
$h_1$	$z_1, z_2, z_3$		$z_1, z_3$
$h_2$	$z_1, z_3, z_4$	$z_1, z_3$	

L'utilisation de ces représentations matricielles permet de comprendre les couplages entre les différentes fonctions, on peut ainsi choisir le découpage qui découple

au maximum les sous-systèmes autrement dit limiter le dialogue entre les sous-systèmes ce qui aura comme conséquence directe une rapidité accrue de la convergence. [BRO 01] s'est basé sur la DSM (Direct Structure Matrix) qui est une représentation matricielle permettant de décrire les couplages d'un problème de dimensionnement analytique. Dans le cas de la conception d'un actionneur, il a pu automatiser et « optimiser » le choix des variables de décision, ce qui a engendré une amélioration de la convergence et de la solution optimale.

Le découpage hiérarchique utilisé par l'ATC fait apparaître des sous-problèmes d'optimisation placés à des niveaux hiérarchiques différents, chaque sous problème d'optimisation correspondant à la conception d'une partie du réseau qui peut elle-même être composée d'autres parties (sous-problèmes « enfants ») et qui est englobée par un problème « père ». La communication entre les sous-problèmes est strictement verticale, un sous-problème ne communique qu'avec ses sous-problèmes fils et le sous-problème père.

Dans la méthode ATC, il existe deux sortes de variables : les variables globales qui sont communes à deux niveaux hiérarchiques (père et fils) et des variables locales propres aux sous-problèmes. Les variables globales sont dédoublées pour pouvoir avoir une valeur dans les deux niveaux. L'opération qui consiste à harmoniser les valeurs de ces variables entre les niveaux s'appelle la coordination. Différentes stratégies existent pour cela, elles ordonnent la résolution des sous-problèmes d'optimisation pour guider la convergence des variables.

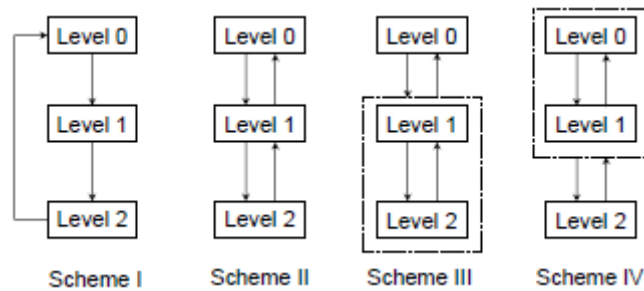


Fig I. 14 Différentes stratégies de coordination pour un problème à trois niveaux

### 1.4.5.3 Formulation de sous-problèmes d'optimisation

La décomposition permet de poser l'architecture qui permet de structurer le problème multiniveaux. Il reste alors à formuler les sous-problèmes d'optimisation à chaque niveau. Pour le sous-problème  $P_{ij}$ , on dresse un tableau contenant l'ensemble des variables qui interviennent dedans. La Fig I. 15 montre le cas général des variables qui interviennent dans un sous-problème  $P_{ij}$ .



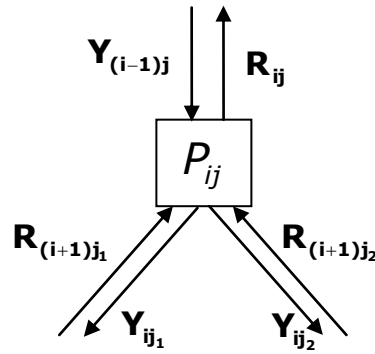


Fig I. 15 Les variables d'un sous-problème dans la méthode ATC

Mis à part le sous-problème de niveau supérieur dans la hiérarchie ATC, chaque sous problème possède un sous-problème père. Il peut ou pas avoir des sous-problèmes fils. La communication dans le sens descendant se fait par des variables appelées cibles (targets) notées  $Y$  et dans le sens inverse par des variables appelées réponses notées  $R$ . On rajoute deux indices : le premier réfère au niveau où la variable a été calculée et le second à la numérotation du sous-problème parmi les sous-problèmes du même niveau. Les variables locales qui n'interviennent qu'au niveau du sous-problème sont les variables locales et sont notées  $X$ .

Les variables qui sont calculées par un sous-problème  $P_{ij}$  sont :

- Les variables locales (vecteur) :  $\mathbf{X}_{ij}$ ,
- Les cibles envoyées au  $k^{\text{ème}}$  sous-problème fils (vecteur) :  $\mathbf{Y}_{ij_k}$
- Les réponses envoyées au sous-problème père (vecteur) :  $\mathbf{R}_{ij}$
- Les variables reçues par le sous-problème  $P_{ij}$  sont :
- Les réponses des sous-problèmes enfants (vecteur) :  $\mathbf{R}_{(i+1)j_k}$
- La cible envoyée par le sous-problème père (vecteur) :  $\mathbf{Y}_{(i-1)j}$

Une formulation simplifiée d'un sous-problème d'optimisation  $P_{ij}$  est donnée par l'Eq I. 5:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f_{ij}(\mathbf{X}_{ij}, \mathbf{R}_{ij}, \mathbf{Y}_{ij_1}, \dots, \mathbf{Y}_{ij_k}) \\ + w_y \left\| \mathbf{R}_{ij} - \mathbf{Y}_{(i-1)j} \right\|^2 + \sum_{l=1}^k w_{j_l} \left\| \mathbf{Y}_{ij_l} - \mathbf{R}_{(i+1)j_l} \right\|^2 \\ \text{sujet à } \mathbf{G}_{ij}(\mathbf{X}_{ij}, \mathbf{R}_{ij}, \mathbf{Y}_{ij_1}, \dots, \mathbf{Y}_{ij_k}, \mathbf{Y}_{(i-1)j}, \mathbf{R}_{(i+1)j_s}) \leq 0 \\ \text{et à } \mathbf{H}_{ij}(\mathbf{X}_{ij}, \mathbf{R}_{ij}, \mathbf{Y}_{ij_1}, \dots, \mathbf{Y}_{ij_k}, \mathbf{Y}_{(i-1)j}, \mathbf{R}_{(i+1)j_s}) = 0 \end{array} \right. \quad \text{Eq I. 5}$$

Dans cette formulation, on agrège dans la fonction objectif scalaire  $f_{ij}$  des termes qui garantissent la coordination entre les sous-problèmes d'optimisation via des coefficients de pondération  $w$ . Ces derniers permettent de donner plus ou moins du poids

aux termes selon l'ordre de priorité. D'autres formulations peuvent être envisagées, où les contraintes de coordination sont exprimées en contraintes d'égalité, si l'algorithme d'optimisation permet de gérer ce type de contraintes plus facilement.

## **1.5 Une vue sur les outils utilisés**

La recherche et le développement d'outils d'aide à la conception est un enjeu important qui répond à une demande récurrente formulée par les industriels du secteur aéronautique : avoir les outils pour réaliser une conception rapide et performante.

Il existe des outils orientés analyse et d'autre orientés plutôt synthèse et dimensionnement. Cette classification a tendance à disparaître dans la mesure où les développeurs tendent à proposer des environnements complets qui permettent de résoudre toutes les catégories de problèmes : analyse et simulation, dimensionnement et optimisation comme c'est le cas pour MATLAB.

### **1.5.1 Les logiciels de calcul et de simulation**

Ils permettent de résoudre des problèmes directs (dans le sens de l'analyse), Un logiciel de calcul nécessite donc un modèle et un certain jeu de paramètres pour calculer d'autres valeurs du modèle. Les logiciels de simulation (PSIM, FLUX, PSpice, SABER) fonctionnent suivant le même principe : un modèle est construit et paramétré ; puis, une simulation est lancée pour observer certaines variables qui intéressent le concepteur. En particulier, le logiciel SABER est très utilisé dans le contexte aéronautique pour l'analyse des transitoires, de la qualité ou des modes de défaillances dans les réseaux et systèmes électriques ou « *électro-quelque chose* ». Les logiciels généralistes de calcul mathématique comme MATHCAD et MATLAB fonctionnent aussi suivant le même principe.

Une fois les résultats obtenus, le concepteur prend le relais en effectuant des analyses comparatives par rapport au cahier des charges puis grâce à son expertise génère le nouveau jeu de paramètres.

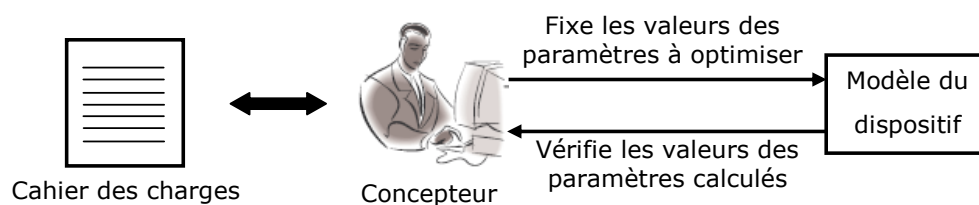


Fig I. 16 Le processus de conception utilisant des logiciels de calcul [MAG 04]

Avec la diffusion de l'optimisation dans la communauté des concepteurs, certains logiciels ont intégré des bibliothèques de fonctions d'optimisation. Elles permettent d'automatiser la génération de nouveaux paramètres en comparant les résultats aux cahiers des charges. La fonction `fmincon` de MATLAB permet par exemple de réaliser des optimisations sur des problèmes linéaires et non linéaires en proposant un choix varié d'algorithmes d'optimisation. Des algorithmes d'optimisation externes peuvent aussi être utilisés couplés à des modèles implantés sur MATLAB. L'utilisation de ces logiciels devient encore plus difficile lorsqu'il s'agit d'implémenter des méthodes multiniveaux; c'est à la charge du concepteur d'implémenter l'architecture multiniveau, de formuler chaque sous-problème d'optimisation, de gérer la communication entre les sous-problèmes et de définir les stratégies de coordination.

### **1.5.2 Les logiciels de dimensionnement**

Ils ont pour rôle la résolution des problèmes inverses. Les logiciels de dimensionnement permettent d'implémenter plus facilement des problèmes d'optimisation. Ils sont construits sur le même formalisme que les problèmes d'optimisation. Ils permettent de gérer à la fois la modélisation du système, son paramétrage, la définition des cahiers des charges et le calcul de la meilleure solution qui répond à ces cahiers des charges. Nous détaillons en annexe le logiciel CADES [Annexe 2] que nous utiliserons pour réaliser des optimisations sur le réseau électrique de bord. La version CADES 3, en cours de développement, est destinée à faciliter l'implémentation de méthodes multiniveaux grâce à l'encapsulation des optimisations sous-problèmes en boîtes blanches, grises ou noires ce qui devrait largement simplifier l'utilisation de ces approches.

## **1.6 Conclusion**

Ce chapitre illustre tout d'abord le contexte de l'avion plus électrique, les enjeux et les motivations qui entraînent une évolution des réseaux de bords.

La première partie aborde les défis qui se dressent face aux concepteurs de réseaux et d'équipements aéronautiques. On rappelle dans un premier temps des notions classiques de la systémique à travers les déclinaisons de la complexité dans le domaine de la conception, l'importance de la formulation qui s'avère être le principal sujet du travail du concepteur et les caractéristiques particulières des systèmes (multiéléments et multidisciplinaires) qui augmentent le niveau de difficulté. D'autres contraintes, de nature industrielle ont été citées pour préciser le cadre voire la limite de notre action.

La seconde partie est consacrée aux approches de conception qu'il va être possible d'adopter pour le réseau de bord.

## **Chapitre 2**

# **Problématique de dimensionnement optimal d'un réseau électrique de bord**

## **2.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons nous placer à la deuxième étape du cycle de conception (cf. Fig I. 4) : le dimensionnement optimal d'un réseau. Notre objectif est de montrer sur un cas simple les couplages inter systèmes, la manière dont ils sont considérés dans chaque approche de conception, leur impact sur le dimensionnement de chaque système et sur le réseau. Les couplages dépendent de la définition de la norme dans l'étape 1 du cycle de conception et conditionnent la validation dans la phase d'intégration.

Le cas d'étude proposé est l'une des nombreuses pistes de mutualisation envisagées pour alléger l'avion. Il s'agit de la mutualisation des étages de filtrage des équipements électriques du réseau HVDC. X. GIRAUD a montré dans sa thèse [GIR 14] que l'on pouvait mutualiser les convertisseurs d'électronique de puissance en introduisant le concept de cœur électronique modulaire et mutualisé. Notre idée est de concevoir de façon concertée l'ensemble des filtres présents dans un réseau et de profiter des interactions entre ces filtres pour alléger la masse totale du filtrage. Les filtres sont de plus en plus utilisés en aéronautique compte tenu de l'utilisation accrue de l'électronique de puissance mais cette masse supplémentaire peut parfois annuler le gain de masse obtenu grâce à l'électrification des systèmes embarqués [BOR 14].

Nous allons commencer par présenter le cas d'étude en précisant le cahier des charges, les modèles comportementaux adoptés pour les filtres et les modèles de dimensionnement des éléments passifs. Notre critère d'optimisation sera la minimisation totale de la masse des filtres. Ensuite, suivant chaque approche présentée dans le premier chapitre, nous allons formuler le problème d'optimisation et le résoudre. En plus du résultat proprement dit du dimensionnement, nous allons nous focaliser sur l'analyse du coût de chaque approche en termes du niveau de collaboration exigé et du coût de calcul. Enfin, une étape bilan permettra de comparer les différentes approches et leurs points forts seront pour nous les ingrédients pour construire une nouvelle approche multiniveau que l'on présentera dans le chapitre III.

## **2.2 Cas d'étude simplifié mais typiques des réseaux électriques en aéronautiques**

### **2.2.1 Architecture du réseau et topologies des filtres**

Le réseau étudié est un réseau HVDC 540 V. Il correspond à une architecture d'un avion « *Bleedless* » inspiré du projet MOET [ROB 12]. Dans cette architecture, il n'y a plus de charges alimentées directement sur le réseau HVAC et donc la contrainte de qualité sur le réseau HVAC est relâchée. Par conséquent, les ATRUs des canaux de générations qui permettent d'alimenter le réseau HVDC 540 V sont remplacés par des RUs constitués d'un simple redresseur à diodes double pont et d'un filtre capacitif. Nous allons considérer une seule charge qui est alimentée directement par le réseau 540 V HVDC. Elle comporte une machine tournante, un onduleur et un filtre d'entrée pour limiter la rejection de courants harmoniques sur le réseau HVDC 540 V.

Le périmètre du cas d'étude se limite aux filtres raccordés directement sur le réseau HVDC. Ces filtres sont des quadripôles soumis d'un côté au réseau HVDC et de l'autre à un convertisseur d'électronique de puissance (cf. Fig II. 1).

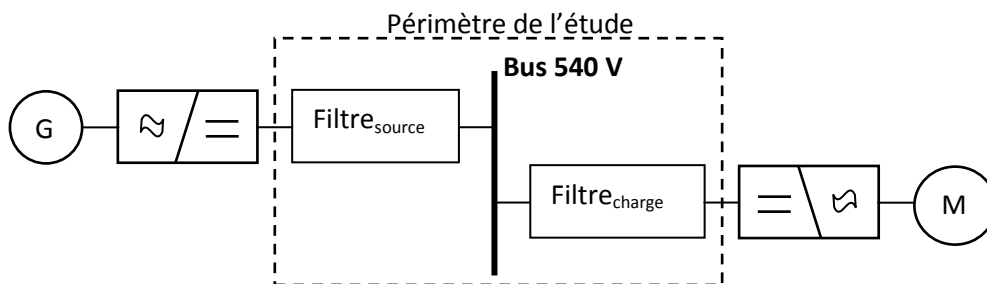


Fig II. 1 Exemple d'un réseau électrique aéronautique

Le filtre de la source est un filtre capacitif et le filtre de la charge est un filtre LC avec une capacité amortie. Afin de limiter notre étude au dimensionnement optimal des filtres, nous allons simplifier les parties qui se trouvent en amont du filtre capacitif (générateur + redresseur) et en aval du filtre de la charge (onduleur + moteur) pour les remplacer par des sources de courant possédant une pollution harmonique typique, respectivement d'un redresseur triphasé à diodes pour le canal de génération et d'un onduleur à MLI pour la charge (cf. Fig II. 2).

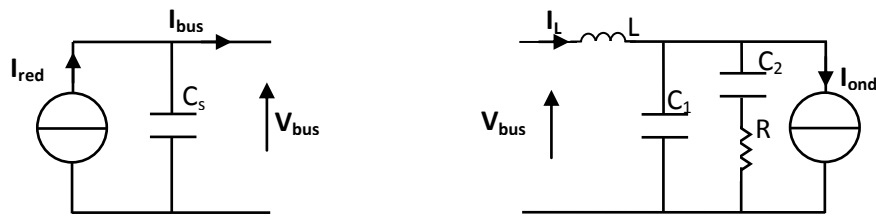


Fig II. 2 Topologies des filtres utilisés

La puissance qui transite par ce réseau est de de 40 kW. Pour caractériser les sources de courant qui polluent le réseau du côté du canal de génération, nous avons simulé un générateur triphasé fonctionnant à une fréquence de 400 Hz qui débite sur un redresseur triphasé à diodes. Le redresseur est raccordé au réseau HVDC 540 V via un filtre capacitif pour limiter l’ondulation de tension. La distribution des fréquences des harmoniques du courant du redresseur obéit à l’équation :

$$f_{red} = 6 \times k \times f_{gen} \quad \text{Eq II. 1}$$

En ce qui concerne la distribution en fréquences des harmoniques générés par l’onduleur MLI de la charge du côté continu, nous avons utilisé les travaux de [ZHA 06] qui permettent de calculer la distribution fréquentielle de ces harmoniques et leurs amplitudes respectives. Par la suite nous avons pu vérifier ces résultats par simulation (cf. [Annexe A], Tab II. 1).

Tab II. 1 Distribution fréquentielle des harmoniques de l’onduleur coté continu

$f_{ond}(f_{dec}, f_{mot})$	$\frac{I_{f_{ond}}}{I_{dc}} (\%)$
$f_{dec}-3.f_{mot}$	27.4
$f_{dec}+3.f_{mot}$	27.4
$2.f_{dec}$	69.97
$3.f_{dec}-3.f_{mot}$	19.64
$3.f_{dec}+3.f_{mot}$	19.64
$4.f_{dec}$	23.61
$4.f_{dec}-6.f_{mot}$	9.93
$4.f_{dec}+6.f_{mot}$	9.93

## 2.2.2 Cahier des charges

Le dimensionnement des filtres se fait dans notre cas d’étude par rapport au régime établi. Seules les contraintes de qualité de réseau sont considérées. Il existe deux spécifications distinctes pour les équipements selon qu’ils sont du type « source » ou « charge ».

### 2.2.2.1 Ondulation de tension en mode différentiel

La contrainte de qualité sur la tension HVDC concerne les équipements de type source. Les équipements « source » sont les équipements qui fournissent l'énergie électrique, ils doivent garantir une certaine qualité de tension malgré une certaine pollution en courant sur le bus continu (cf. Fig II. 3).

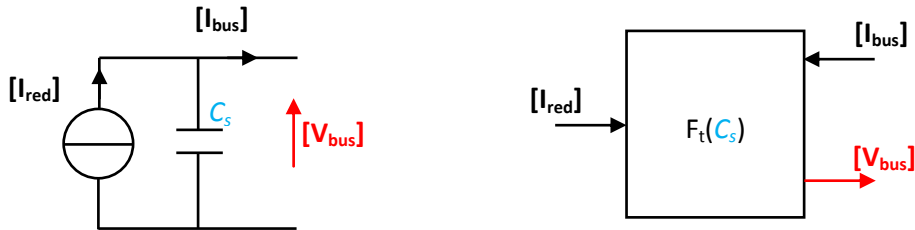


Fig II. 3 Entrée/sorties du filtre capacitif de la source

La norme exige que la tension harmonique en mode différentiel d'un équipement de type « source » soit en dessous du gabarit de la Fig II. 4-haut lorsque l'équipement est soumis à un courant dont la pollution harmonique ne dépasse pas le gabarit de la Fig II. 4-bas.

Les niveaux de pollution en tension et en courant sont respectivement donnés en dBV et dBA sur une plage de fréquence allant de 10 Hz à 150 kHz. Au-delà de cette fréquence, les niveaux d'harmoniques sont régis par une norme CEM qui n'entre pas dans notre étude.

Cette première contrainte limite donc la tension en sortie du filtre lorsqu'il est soumis à une double pollution : une pollution qui provient du redresseur et une pollution qui provient du bus et donc du réseau. La pollution qui provient du redresseur est connue puisqu'elle provient du canal de génération lui-même. Par contre, la pollution qui provient du courant de bus n'est *a priori* pas connue car elle dépend de l'état des charges.



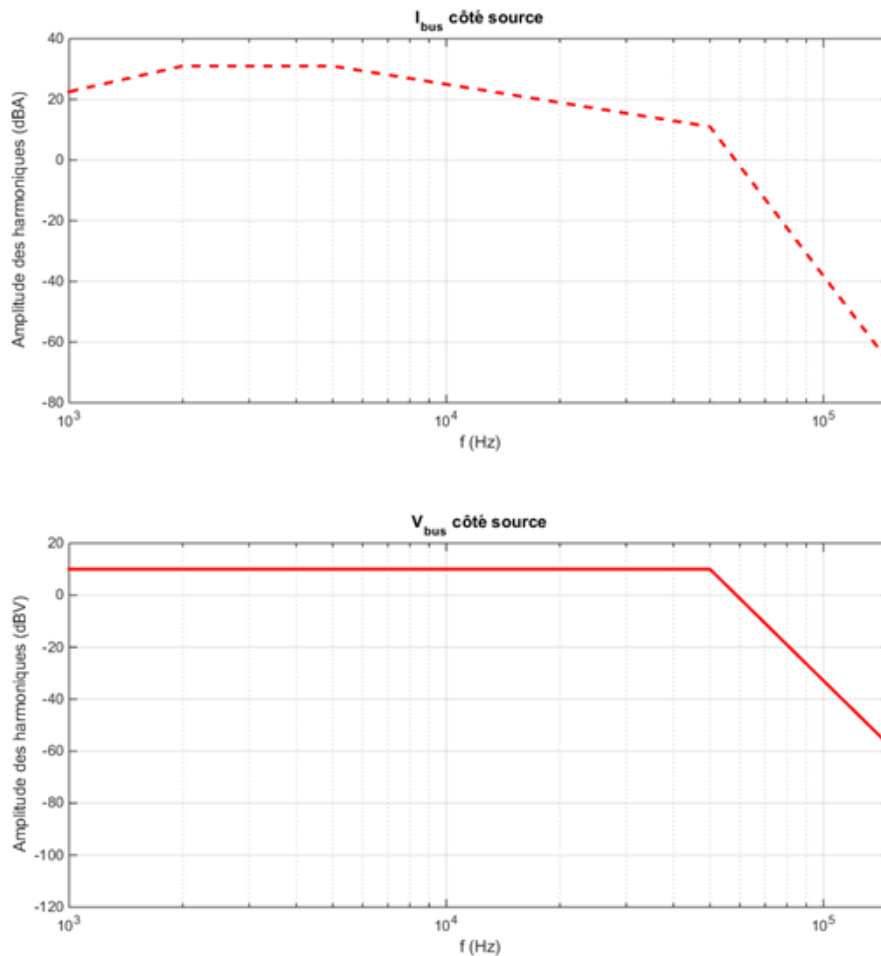


Fig II. 4 Norme imposée aux équipements de type « source »

Une seconde contrainte concerne le taux de distorsion globale de la tension du bus lorsque la source alimente avec un facteur de charge unitaire une charge purement résistive. Cette contrainte quant à elle ne dépend pas de la pollution harmonique sur le réseau mais uniquement de la pollution générée par la source.

$$THD_V \leq 0.74\% \quad \text{Eq II. 2}$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_f V_{bus_f}^2}}{V_{bus_{DC}}} \quad \text{Eq II. 3}$$

### 2.2.2.2 Ondulation de courant en mode différentiel

La contrainte de qualité sur le courant du réseau HVDC concerne les équipements de type « charge ». Le filtre dans ce cas est soumis à une tension HVDC ayant une

certaine pollution d'un côté, aux harmoniques générés par la charge de l'autre (cf. Fig II. 5).

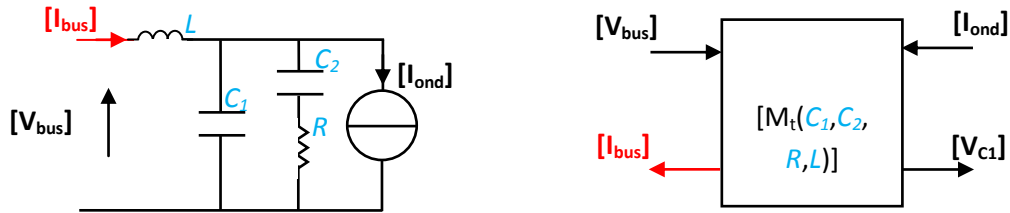


Fig II. 5 Entrées/sorties du filtre de la charge

La norme exige que le courant absorbé par les charges ne dépasse pas le gabarit de la Fig II. 6-haut lorsque la tension qui les alimente est en dessous du gabarit de la Fig II. 6-bas.

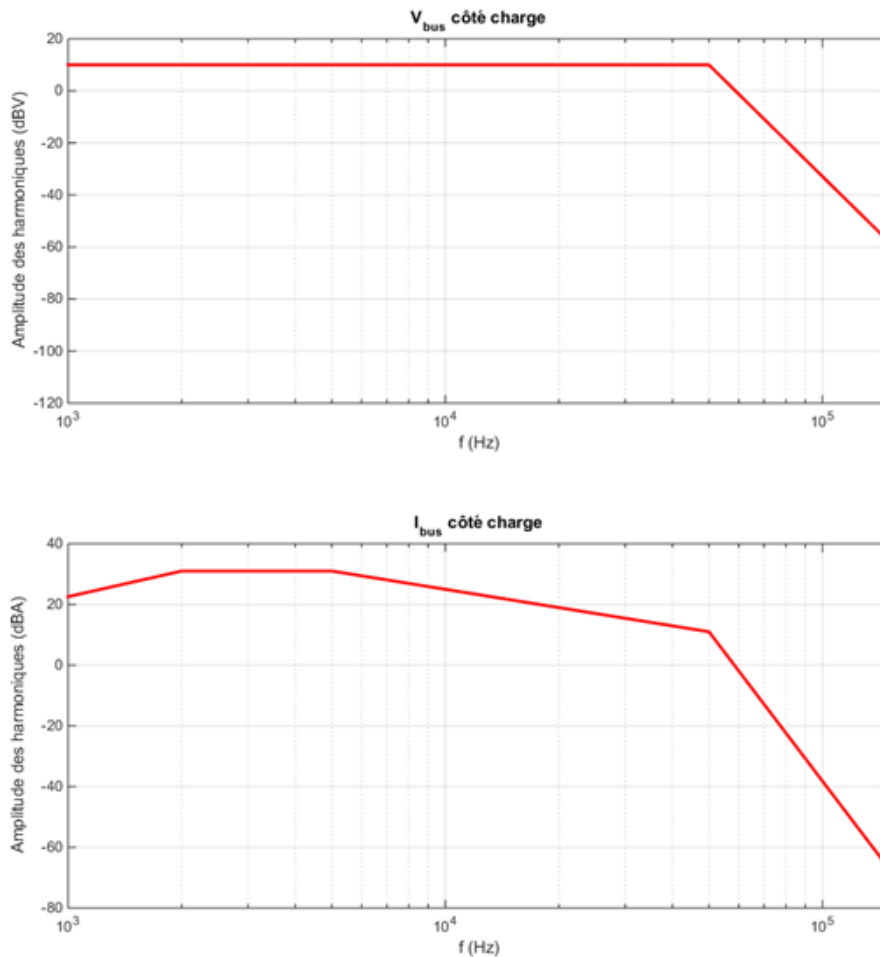


Fig II. 6 Norme imposée aux équipements de type « charge »

Il est à noter que le gabarit qui limite le courant absorbé par les charges ne dépend pas de leur puissance contrairement aux versions précédentes de la norme. La

Fig II. 7 montre que le gabarit du courant spécifié aux équipements du type charge n'est pas le même que celui spécifié aux équipements de type source. En effet il y a un décalage de 6 dB sur la gamme [0,50] kHz, un décalage qui se réduit jusqu'à s'annuler à 150 kHz. Ce décalage de 6 dB correspond en réalité à un rapport de 2. Une explication possible de ce décalage est la suivante : dans le pire des cas, il ne peut y avoir que deux charges au maximum qui polluent à la même fréquence avec la même phase.

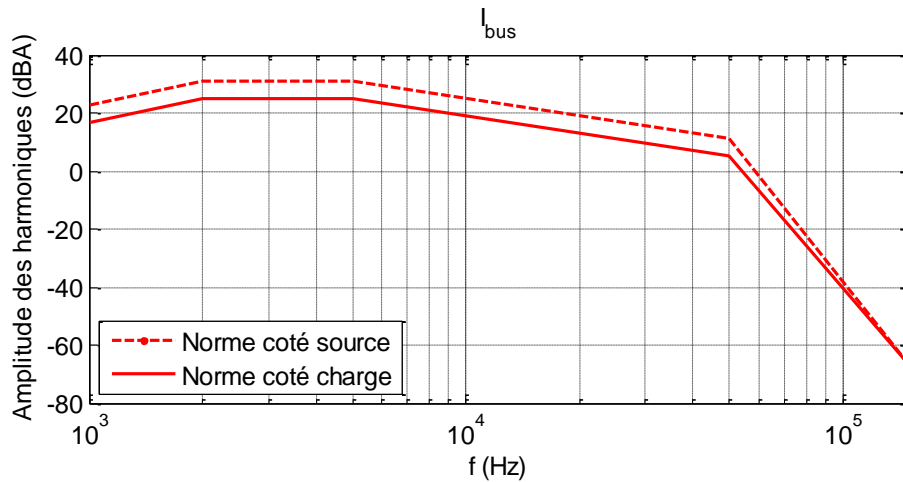


Fig II. 7 Comparaison entre la norme en courant spécifiée aux équipements de type « source » et celle spécifiée aux équipements de type « charge »

Une seconde contrainte limite le taux de distorsion global du courant absorbé sur le bus continu. Cette limite est définie selon la puissance de la charge. On retrouve ici une volonté de contrebalancer une définition des seuils harmoniques individuels indépendants de la puissance par une limitation globale qui -elle- dépend de la puissance.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } P \leq 20 \text{ kW} \quad THD_I \leq 70.81 \\ \text{si } P \geq 20 \text{ kW} \quad THD_I \leq 100 \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{1.78 \cdot P}{1000} + 8.48\right)^2}{I_{dc}^2} - 1} \end{array} \right. \quad \text{Eq II. 4}$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_f I_{bus_f}^2}}{I_{bus_{DC}}} \quad \text{Eq II. 5}$$

### 2.2.3 Description fréquentielle simplifiée du problème

Pour terminer la description du problème, nous devons faire des choix quant aux valeurs de la fréquence du générateur et de la fréquence de découpage de l'onduleur de la charge. Ces deux fréquences vont caractériser les pollutions harmoniques que les filtres ont à atténuer pour respecter les gabarits de la norme.

Nous allons choisir une fréquence de générateur de 400 Hz qui correspond à une valeur utilisée par les systèmes de génération aéronautiques réels du type IDG. Concernant la fréquence de découpage de l'onduleur de la charge, nous allons la fixer à 35 kHz. C'est une valeur choisie délibérément élevée pour avoir des harmoniques significatifs en hautes fréquences [50,150] kHz où la norme en courant est la plus restrictive (cf. Fig II. 7).

Dans la gamme [0,150] kHz, toutes les harmoniques ne dépassent pas le gabarit de la norme, seul un nombre très réduit de fréquences est vraiment dimensionnant pour les filtres. Nous allons donc sélectionner les raies les plus critiques pour le dimensionnement. Pour le courant du redresseur, c'est la première raie ( $6 \times f_{gen}$ ) dont l'amplitude est la plus élevée qui est choisie en plus d'une raie où nous avons un foisonnement avec une fréquence du courant harmonique de l'onduleur. Pour le courant de l'onduleur, on prendra la raie dont l'amplitude est la plus élevée et la raie la plus haute en fréquence où la spécification de la norme est la plus critique. Une raie supplémentaire est considérée où on aura un foisonnement avec un harmonique du redresseur comme cité auparavant (cf. Tab II. 2 et Tab II. 3).

Tab II. 2 Fréquences caractéristiques du système

Fréquences caractéristiques		Fréquences des harmoniques sélectionnés	
$f_{gen}$ (Hz)	400	$f_{red}$ (kHz)	2.4 108
$f_{dec}$ (kHz)	35	$f_{ond}$ (kHz)	70 108 140
$f_{mot}$ (kHz)	1		

Tab II. 3 Valeurs des harmoniques qui polluent le réseau

$f$ (Hz)	$\frac{I_{red}}{I_{dc}}$ (%)	$\frac{I_{ond}}{I_{dc}}$ (%)
2 400	4.59	0
70 000	0	69.97
108 000	0.0035	19.64
140 000	0	23.61

## 2.2.4 Modèles électriques et modèles de dimensionnement

Compte tenu du cahier des charges spécifié pour le dimensionnement des filtres, nous allons utiliser des modèles fréquentiels pour chaque filtre. Les modèles électriques sont les modèles de simulations qui permettent le calcul des grandeurs de tension et de courant en se basant sur les fonctions de transfert des filtres. Quant aux modèles de dimensionnement, leurs objectif est la détermination de la masse.

### 2.2.4.1 Modélisation électrique du filtre capacitif de la source

Nous avons vu que le filtre de la source était soumis à une double pollution, d'un côté par le courant du redresseur et de l'autre par le courant du bus continu. La valeur de la tension est calculée par rapport à ces deux grandeurs et à la valeur de la capacité de filtrage.

Tab II. 4 Entrées/sorties de la fonction de transfert du filtre de la source

Entrées		sorties	
$[\mathbf{I}_{red}]$	Courant du redresseur	$[\mathbf{V}_{bus}]$	Tension du bus HVDC
$[\mathbf{I}_{bus}]$	Courant du bus HVDC		
$C_s$	Paramètre du filtre		

Nous utilisons des modèles fréquentiels, on considère donc les spectres de courant et de tension comme des vecteurs d'harmoniques exprimés en valeurs complexes qui correspondent aux fréquences du spectre :

$$\begin{aligned} [\mathbf{V}_{bus}] &= \frac{[\mathbf{I}_{red}] - [\mathbf{I}_{bus}]}{j \cdot C_s \cdot \omega} & \text{Eq. II. 6} \\ \omega &= 2 \cdot \pi \cdot f \end{aligned}$$

Dans les spécifications de la norme en tension, une limitation existe sur le taux de distorsion globale de la tension lorsque la charge est résistive (cf. Fig II. 8).

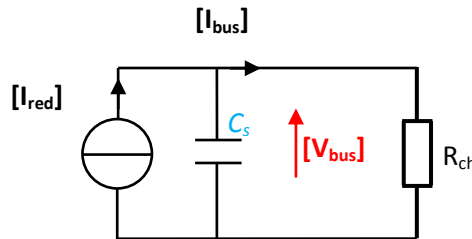


Fig II. 8 Modèle circuit considéré pour le calcul de la contrainte sur le taux de distorsion global en tension

$$[\mathbf{V}_{res}] = [\mathbf{I}_{red}] \cdot Z(C_s // R_{ch}) \quad \text{Eq. II. 7}$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_f (V_{res_f})^2}}{V_{dc}} \quad \text{Eq. II. 8}$$

### 2.2.4.2 Modélisation électrique du filtre de la charge

Le filtre de la charge quant à lui est soumis à la pollution harmonique de sa propre charge d'un côté et de la tension du bus de l'autre. Les variables d'état sont le courant absorbé du bus continu et les tensions aux bornes des deux capacités.

Tab II. 5 Entrées/sorties de la fonction de transfert du filtre de charge

Entrées		Sorties	
$[\mathbf{I}_{\text{ond}}]$	Courant de l'onduleur	$[\mathbf{I}_{\text{bus}}]$	Courant absorbé du bus HVDC
$[\mathbf{V}_{\text{bus}}]$	Courant du bus HVDC	$[\mathbf{V}_{C1}]$	Tension de la capacité C1
$C_1, C_2, L, R$	Paramètres du filtre	$[\mathbf{V}_{C2}]$	Tension de la capacité C2

Le modèle du filtre de la charge est obtenu en résolvant le système d'équations qui décrit ce filtre :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\text{bus}} \\ \mathbf{V}_{C1} \\ \mathbf{V}_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j \cdot L \cdot \omega & 1 & 0 \\ 1 & -C_1 \cdot \omega & -C_2 \cdot \omega \\ 0 & 1 & -(j \cdot R \cdot C_2 \cdot \omega + 1) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{\text{bus}} \\ \mathbf{I}_{\text{ond}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \text{Eq II. 9}$$

On doit également calculer le taux de distorsion globale du courant absorbé compte tenu de la norme (cf. Eq II. 5).

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_f (I_{\text{bus}_f})^2}}{I_{dc}} \quad \text{Eq II. 10}$$

### 2.2.4.3 Modélisation électrique du système constitué des deux filtres

Il s'agit du modèle global lorsqu'on considère les deux filtres ensemble dans un seul système. Ce système est alors constitué de deux quadripôles en cascade soumis aux pollutions des convertisseurs. Les variables d'état sont le courant du bus continu, sa tension et les tensions des deux capacités  $C_1, C_2$ .

Tab II. 6 Entrées/sorties de la fonction de transfert du système constitué des deux filtres

Entrées		sorties	
$[\mathbf{I}_{\text{red}}]$	Courant de l'onduleur	$[\mathbf{V}_{\text{bus}}]$	Tension du bus HVDC
$[\mathbf{I}_{\text{ond}}]$	Courant du redresseur	$[\mathbf{I}_{\text{bus}}]$	Courant absorbé du bus HVDC
$C_s, C_1, C_2, L, R$	Paramètres des filtres	$[\mathbf{V}_{C1}]$	Tension de la capacité C1
		$[\mathbf{V}_{C2}]$	Tension de la capacité C2

Le modèle est décrit par le système d'équations suivant :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\text{bus}} \\ \mathbf{V}_{\text{bus}} \\ \mathbf{V}_{C1} \\ \mathbf{V}_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j \cdot L \cdot \omega & -1 & +1 & 0 \\ 1 & j \cdot C_s \cdot \omega & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -j \cdot C_1 \cdot \omega & -j \cdot C_2 \cdot \omega \\ 0 & 0 & -1 & 1 + j \cdot R \cdot C_2 \cdot \omega \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_{\text{red}} \\ \mathbf{I}_{\text{ond}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \text{Eq II. 11}$$

### 2.2.4.4 Modèles de dimensionnement des éléments passifs

Les modèles de dimensionnement des éléments passifs permettent de déterminer les masses des éléments passifs en partant des valeurs de ces éléments et en utilisant soit des calculs géométriques soit en se référant à des bases de données constructeurs.

La résistance :

La masse de la résistance est estimé par rapport à ses pertes.

$$M_R = k_R \cdot P_R \quad \text{Eq II. 12}$$

Les pertes dans la résistance sont les pertes Joules :

$$P_R = R \cdot I_R^2 \quad \text{Eq II. 13}$$

La capacité :

Le modèle de masse de la capacité est tiré de la base de données du fabricant AVX. Ces capacités ont été sélectionnées par rapport au calibre exigé dans la norme  $U_c \geq 900$  V.

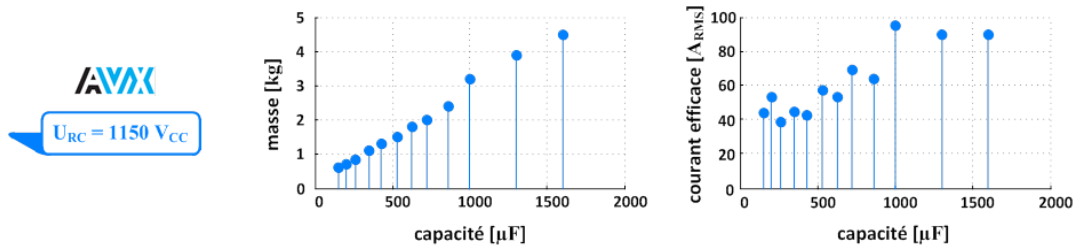


Fig II. 9 Caractéristiques constructeur des capacités utilisées [AVX]

La masse de la capacité est approximée linéairement par rapport à sa valeur :

$$M_{Source} (kg) = M_{C_s} = C_s (\mu F) \cdot 2666.67 \quad \text{Eq II. 14}$$

L'inductance :

Le dimensionnement de l'inductance se fait par rapport à un modèle géométrique [LEP 07].

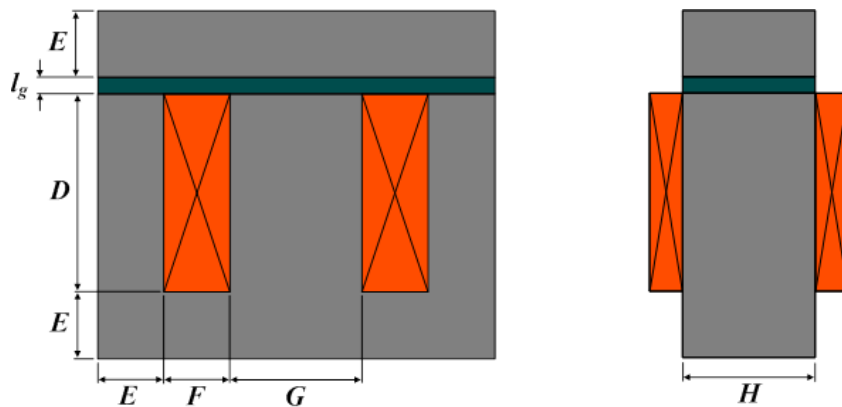


Fig II. 10 Géométrie de l'inductance

La largeur de la fenêtre du bobinage est donnée par l'équation suivante :

$$F = \left( \frac{1}{12} \cdot \frac{L \cdot I_{L_{max}}^2}{J_{max} \cdot B_{bob_{max}} \cdot k_f \cdot k_u \cdot k_i} \right)^{0.25} \quad \text{Eq II. 15}$$

Avec :

- $L$ : valeur de l'inductance en H
- $I_{L_{max}}$ : Courant maximal dans l'inductance
- $J_{max}$ : Densité de courant maximale dans les spires
- $B_{bob_{max}}$ : Induction magnétique maximale dans l'enroulement
- $k_f$ : coefficient de foisonnement (1 pour la ferrite)
- $k_u$ : coefficient de remplissage d'enroulements
- $k_i$ : rapport entre courant maximal et efficace

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{La hauteur } E = F \\ \text{La largeur du noyau central: } G = 2 \cdot F \\ \text{La hauteur des jambes: } D = 3 \cdot F \\ \text{La longueur du noyau: } H = G \\ \text{L'épaisseur de l'entrefer: } e = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot L \cdot N_{SL} \cdot I_{L_{max}}}{B_{bob_{max}}} \end{array} \right. \quad \text{Eq. II. 16}$$

Avec :

$$N_{SL} = \sqrt{\frac{3}{4} \cdot \frac{L \cdot J_{max} \cdot k_u \cdot k_i}{B_{bob_{max}}}} \quad \text{le nombre de spires} \quad \text{Eq. II. 17}$$

$\mu_0$ : la permittivité de l'air

La masse de l'inductance est la somme des masses du circuit magnétique et du bobinage :

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{fer} = D_{ferrite} \cdot ((2 \cdot E + D) \cdot (2 \cdot (F + E) + G) \cdot H - 2 \cdot F \cdot D \cdot H) \\ M_{Cu} = D_{Cu} \cdot S_{Cu} \cdot l_{Cu} \end{array} \right. \quad \text{Eq. II. 18}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{Cu} = 2 \cdot (G + H + 2 \cdot F) \\ S_{Cu} = N_{SL} \cdot \frac{I_{L_{RMS}}}{J_{max}} \end{array} \right. \quad \text{Eq. II. 19}$$

$D_{ferrite}$  et  $D_{Cu}$ : les densités respectives de la ferrite et du cuivre

$$M_L = M_{fer} + M_{Cu} \quad \text{Eq. II. 20}$$



## **2.3 Formulation et résolution du problèmes d'optimisation par les approches classiques**

La formulation du problème d'optimisation est une étape clé, car elle permet de confronter les modèles établis avec un cahier des charges. Un problème d'optimisation bien posé est un problème d'optimisation qui admet au moins une solution faisable ; résoudre un problème mal posé revient à chercher des solutions optimales alors qu'il n'y a même pas de solutions faisables [WUR 08], [NGU 08].

La formulation du problème d'optimisation dépend de l'approche adoptée. Nous allons détailler la formulation du problème d'optimisation dans chaque approche présentée dans le chapitre I en explicitant les variables mises en jeu.

### **2.3.1 L'approche mécaniste**

C'est l'approche utilisée classiquement par les équipementiers. Chaque sous-système est dimensionné indépendamment des autres sous-systèmes du réseau. L'interaction avec le réseau se fait par la norme.

#### **2.3.1.1 Optimisation mécaniste du filtre de la source**

Le cahier des charges spécifié pour le dimensionnement de la source nous impose de considérer une certaine pollution du courant de bus décrite par le gabarit de la figure Fig II. 4-haut. De plus, nous n'avons pas d'information sur les phases de ces harmoniques. Le dimensionnement rigoureux du filtre de la source nous impose donc de un modèle électrique pour le dimensionnement compatible avec le pire cas de foisonnement des harmoniques, cette précaution se traduit par l'hypothèse d'une opposition de phases des harmoniques (cf. Tab II. 7).

Tab II. 7 Correction du modèle de la fonction de transfert du filtre de la source

Modèle électrique théorique	Modèle électrique pour le dimensionnement
$\left[ \overrightarrow{V}_{bus} \right] = \frac{\left[ \overrightarrow{I}_{red} \right] - \left[ \overrightarrow{I}_{bus} \right]}{j \cdot C_s \cdot \omega}$	$\left[ \mathbf{V}_{bus} \right] = \frac{\left[ \mathbf{I}_{red} \right] + \left[ \mathbf{I}_{bus} \right]_{Norme}}{C_s \cdot \omega}$

Tab II. 8 Données du problème d'optimisation mécaniste de la source

Variable	Désignation	Valeurs
Variable de décision	$C_s$	$[1,1e+03]$ $\mu$ F
Variables d'entrée	$[I_{red}]$	Tab II. 3
	$[I_{bus}]_{Norme}$	Fig II. 4-haut
Fonction objectif	$M_{Source}(C_s)$	À minimiser
Contraintes d'inégalité	$[V_{bus}]_{Norme}$	Fig II. 4-bas
	$THD_V$	0.74 %

Le problème d'optimisation de la source (cf. Fig II. 11) se formule par l'approche mécaniste comme suit :

$$\begin{cases} \min_{C_s} M_{Source} \\ [V_{bus}] \leq [V_{bus}]_{Norme} \\ THD_V \leq THD_{V_{Norme}} \end{cases} \quad \text{Eq. II. 21}$$

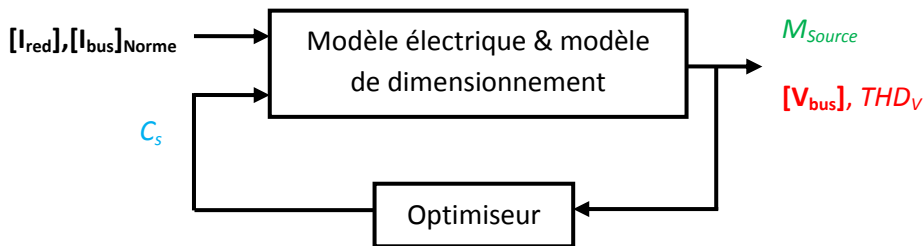


Fig II. 11 Description schématique du problème d'optimisation mécaniste de la source

Le problème d'optimisation est résolu par l'algorithme SQP (Sequential Quadratic Programming). Étant donné la simplicité du problème, on obtient une convergence rapide vers l'optimum global.

La contrainte de dimensionnement est le premier harmonique de tension (cf. Fig II. 12). On rappelle qu'à cette fréquence, l'harmonique du courant redresseur est le plus important.

Tab II. 9 Résultats de l'optimisation mécaniste du filtre de la source

$M_{Source}$ (kg)	2.17
$C_s$ ( $\mu$ F)	8.15e+02
$THD_V$ (%)	0.051

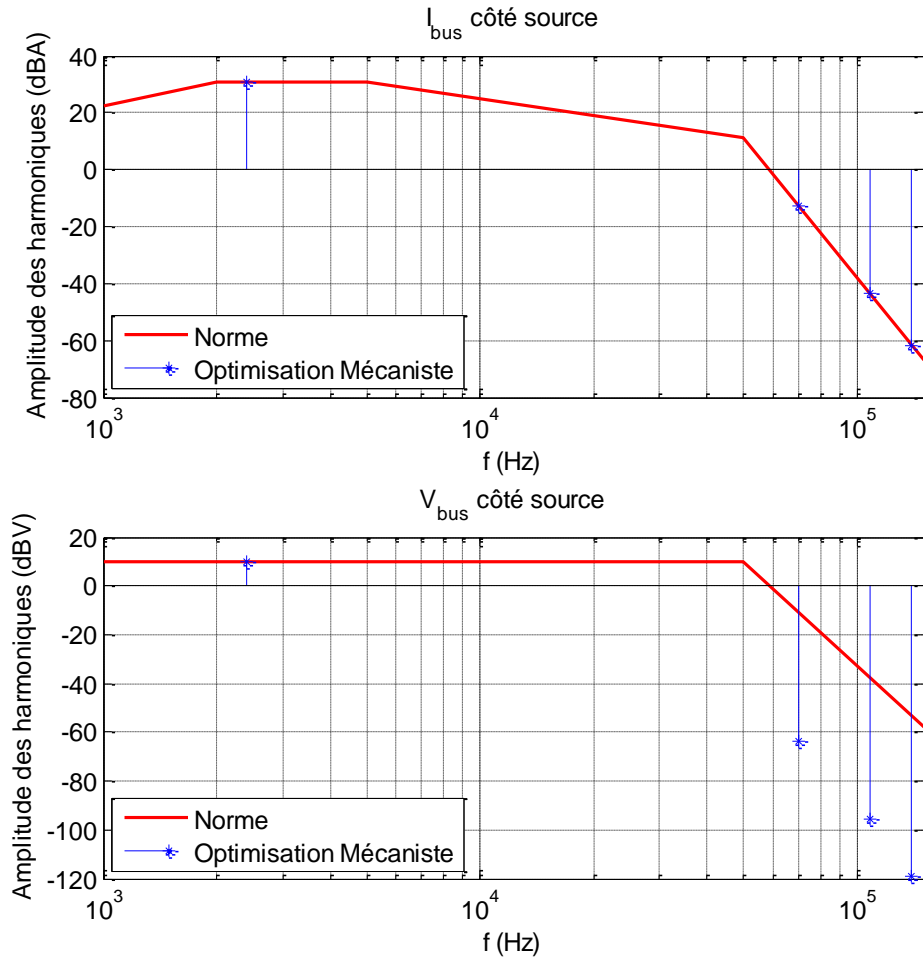


Fig II. 12 Harmoniques de courant et de tension vus par le filtre de la source

### 2.3.1.2 Optimisation mécaniste du filtre de la charge

Comme dans l’optimisation de la source, et pour la même raison (considération d’un spectre harmonique de la tension dont on ignore les phases) il est nécessaire d’adapter le modèle électrique pour tenir compte des pires cas de pollution harmonique possible en entrée du filtre (cf. Tab II. 10).

Tab II. 10 Correction du modèle de la fonction de transfert du filtre de la charge

Le modèle électrique théorique	
$\vec{\mathbf{I}}_{bus}$	$= \mathbf{Ft}_{I_{bus}/V_{bus}}(L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot \vec{\mathbf{V}}_{bus} + \mathbf{Ft}_{I_{bus}/I_{ond}}(L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot \vec{\mathbf{I}}_{ond}$
Le modèle électrique pour le dimensionnement	
$\mathbf{I}_{bus}$	$= \ \mathbf{Ft}_{I_{bus}/V_{bus}}(L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot \mathbf{V}_{bus}\ _{Norme} + \ \mathbf{Ft}_{I_{bus}/I_{ond}}(L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot \mathbf{I}_{ond}\ $

Tab II. 11 Données du problème d'optimisation mécaniste de la charge

variable	Désignation	Valeur
Variables de décision	$C_1$	[1,1e+03] $\mu\text{F}$
	$C_2$	[1,1e+03] $\mu\text{F}$
	$L$	[1,1e+03] $\mu\text{H}$
	$R$	[1e-03,1e+03] $\Omega$
Variables d'entrée	$[\mathbf{I}_{\text{ond}}]$	Tab II. 3
	$[\mathbf{V}_{\text{bus}}]_{\text{Norme}}$	Fig II. 6-haut
Fonction objectif	$M_{\text{Charge}}(C_1, C_2, L, R,)$	À minimiser
Contraintes d'inégalité	$[\mathbf{I}_{\text{bus}}]_{\text{Norme}}$	Fig II. 6-bas
	$THD_I$ Norme	36,49 %

Le problème d'optimisation de la charge (cf. Fig II. 13) se formule par l'approche mécaniste comme suit :

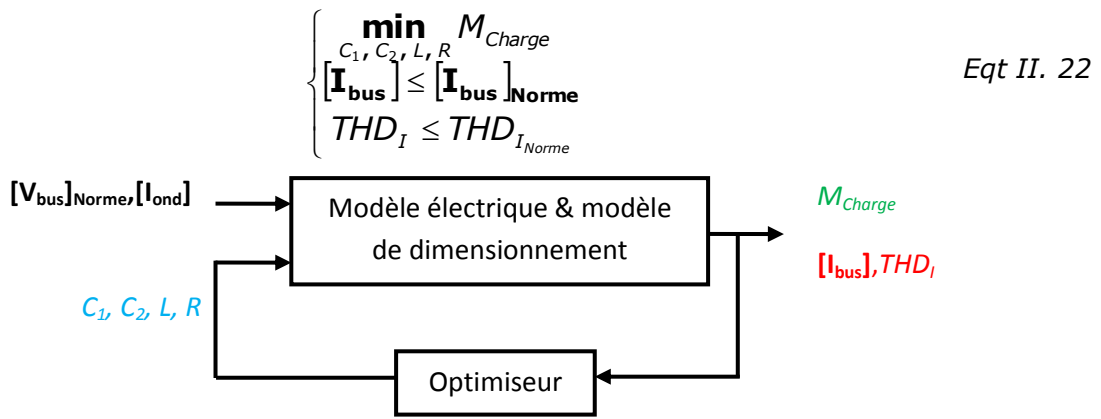


Fig II. 13 Description schématique du problème de d'optimisation mécaniste de la charge

Le filtre est caractérisé par une résonance qui peut « localement » conduire à une violation du gabarit par amplification de la pollution harmonique. Lors de la minimisation de la masse du filtre, les variations des paramètres  $L$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  et  $R$  occasionnent un déplacement de cette fréquence de résonance relativement aux zones fréquentielle où la pollution est la plus élevée. Ceci conduit à modifier de façon non linéaire et discontinue les fréquences caractéristiques des harmoniques situés en butée du gabarit normatif. Cela confère un caractère multimodal au problème d'optimisation pouvant entrainer une convergence locale et prématurée du SQP.

Afin d'éviter cette vulnérabilité face aux optima locaux, on a recours à différentes initialisations des variables de décision. On peut également hybrider l'algorithme SQP avec un algorithme génétique. Le logiciel CADES permet en effet cette hybridation des algorithmes présents dans sa bibliothèque [CAD].

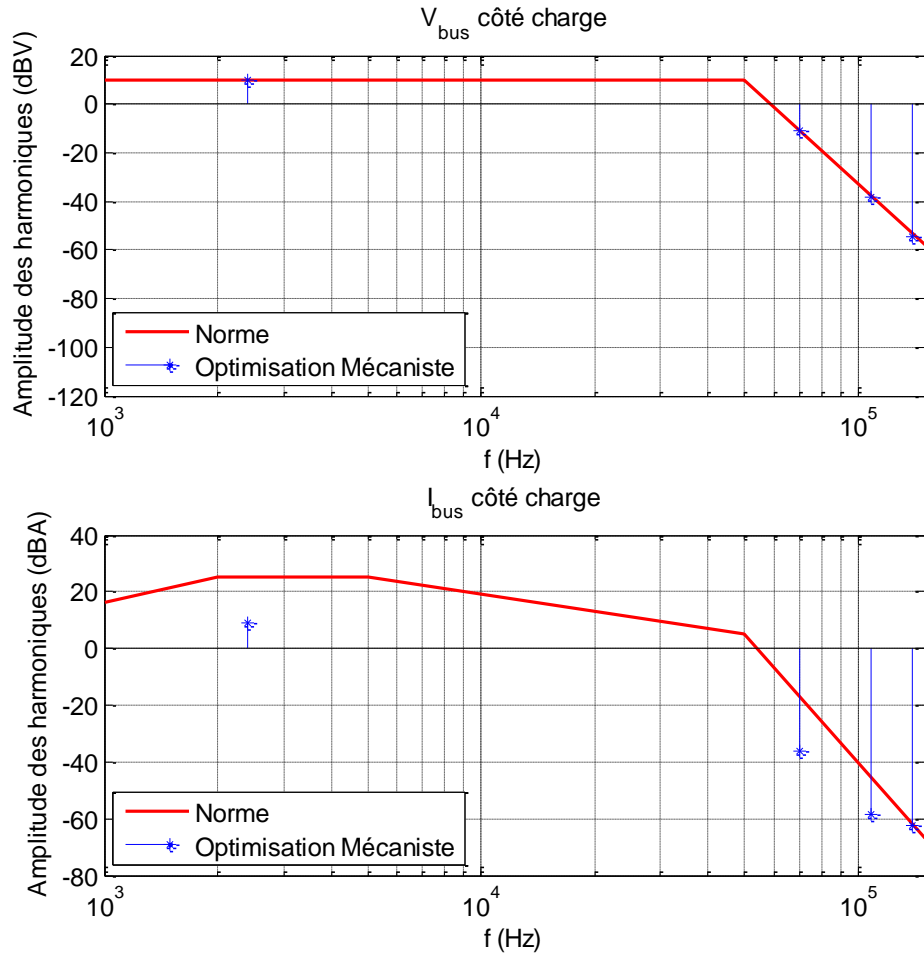


Fig II. 14 Harmoniques de courant et de tension vus par le filtre de la charge

La contrainte de dimensionnement est l'harmonique de courant à la fréquence la plus élevée (cf. Fig II. 14). À cette fréquence, la limitation de la norme est la plus basse.

Tab II. 12 Principaux résultats de l'optimisation mécaniste de la charge

$M_{Charge}$ (kg)	2.24
$C_1$ ( $\mu$ F)	3.53e+02
$C_2$ ( $\mu$ F)	1.09e-6
$L$ ( $\mu$ H)	8.78e+01
$R$ ( $\Omega$ )	1e-03
$THD_I$ (%)	3.76

### 2.3.1.3 Analyse des résultats et des couplages systèmes

Dans l'approche mécaniste, il y'a un découplage source-charge qui s'exprime à travers une vision locale de chaque sous-système qui ne considère pas l'autre filtre. On peut le voir clairement dans le calcul des deux variables de couplages (courant et tension du bus). Les valeurs de ces grandeurs sont différentes selon qu'on se place dans le dimensionnement de la source ou celui de la charge, le changement de l'un n'affecte pas l'autre (cf. Tab II. 13). Ce dédoublement de valeurs pour une même variable est le

résultat de l'approche de conception, les sous-systèmes une fois dimensionnés et intégrés dans un réseau donneront lieu à une seule et unique valeur pour chaque spectre.

Tab II. 13 Représentation des couplages dans l'approche mécaniste

Optimisation mécaniste de la source		Optimisation mécaniste de la charge	
Variables d'entrée	<b>[V<sub>bus</sub>]</b>	Variables d'entrée	<b>[I<sub>bus</sub>]</b>
$C_s$	Couplage	$C_s$	Pas de couplage
$C_1, C_2, L, R$	Pas de couplage	$C_1, C_2, L, R$	couplage
<b>[I<sub>bus</sub>]</b>	Pas de couplage	<b>[V<sub>bus</sub>]</b>	Pas de couplage
<b>[I<sub>bus</sub>]<sub>Norme</sub></b>	Couplage	<b>[V<sub>bus</sub>]<sub>Norme</sub></b>	couplage

Vu que les valeurs de ces variables sont différentes dans la phase de dimensionnement, on est en droit de s'interroger sur la vraie valeur après intégration. Ces variables respecteront-elles le gabarit de la norme après intégration ?

En simulant le réseau avec les deux filtres dimensionnés suivant les résultats des optimisations mécanistes on retrouve les vraies valeurs des harmoniques de tension et de courant (cf. Fig II. 15).

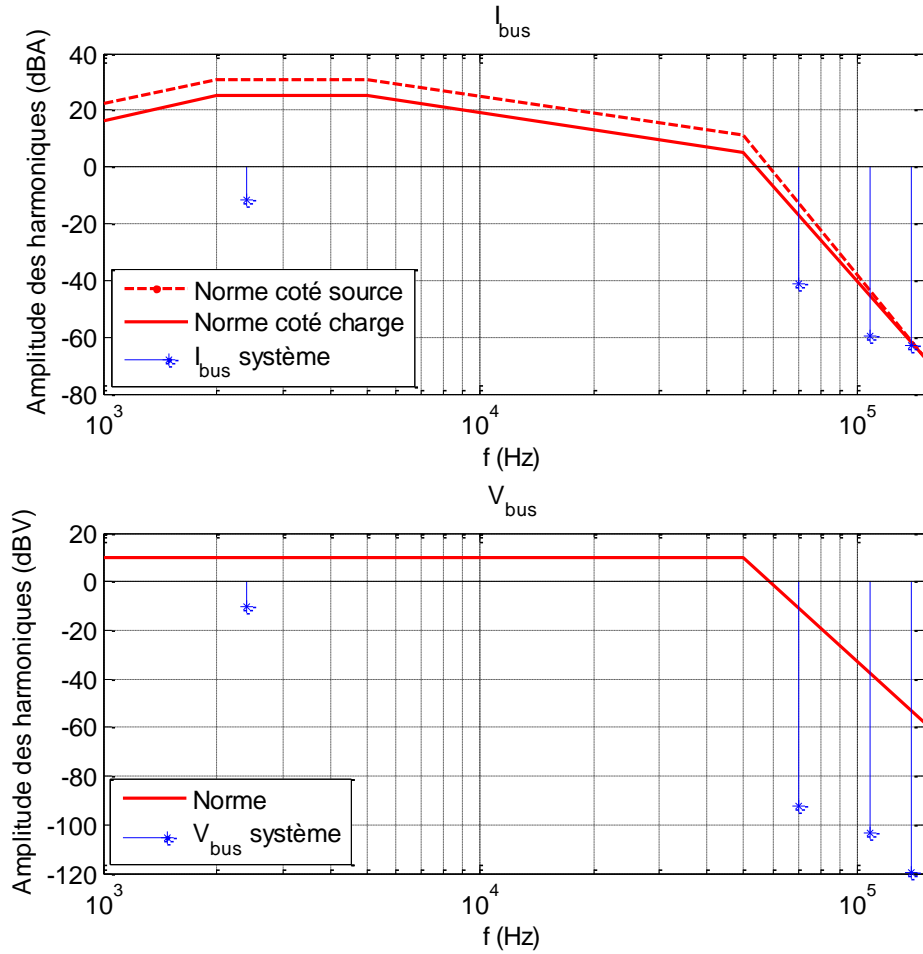


Fig II. 15 Valeurs réelles de la tension et du courant obtenu dans la simulation système

La première remarque est que les valeurs des harmoniques respectent le gabarit de la norme ce qui est rassurant du point de vue intégration et validation. Comparons-les avec les valeurs de ces mêmes harmoniques dans l'approche mécaniste (cf. Fig II. 15 et Fig II. 16).

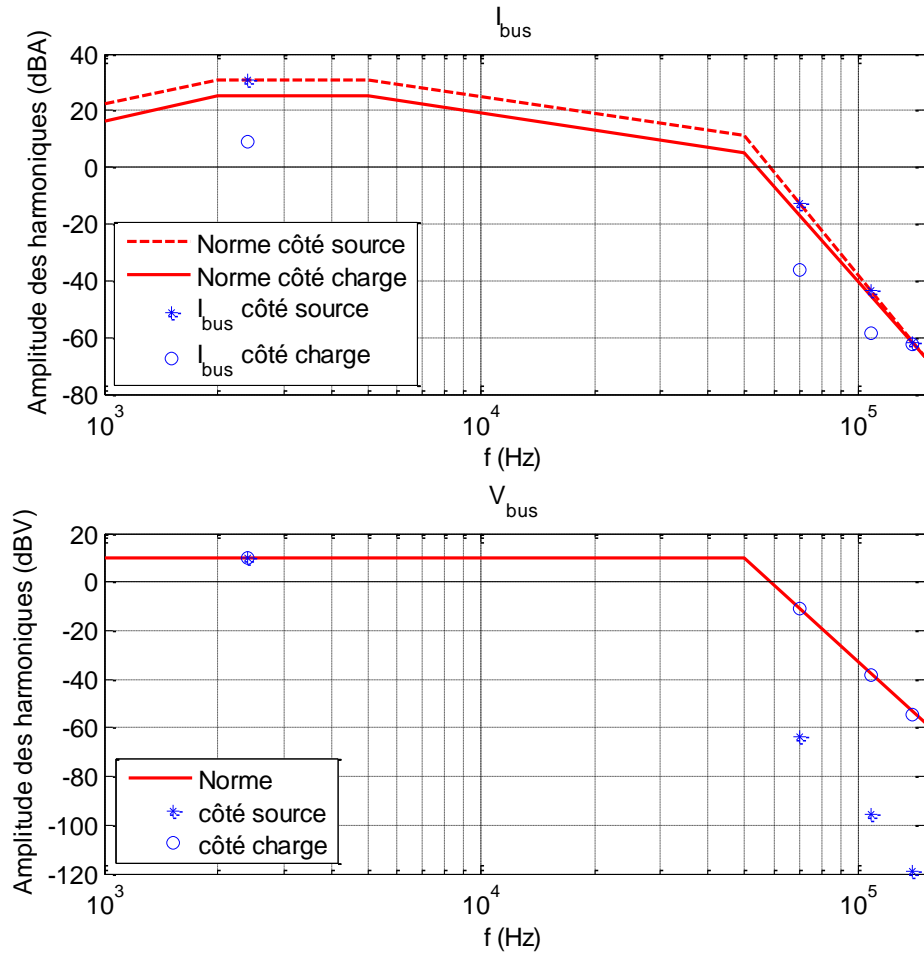


Fig II. 16 Multiples valeurs des harmoniques par rapport à la « source » et à la « charge »

On remarque que ces harmoniques sont excessivement atténués par rapport à la norme (cf. Fig II. 15) et largement atténués par rapport à leurs valeurs dans l'approche mécaniste (cf. Fig II. 15 et Fig II. 16). Ces marges prouvent que les filtres obtenus avec une masse totale de 4.41 kg sont surdimensionnés.

Par rapport à la source, le filtre est dimensionné pour supporter le pire cas de pollution du courant de bus, la tension calculée respectant la norme. Par rapport à une pollution plus faible du courant de bus, la tension ne peut être que plus faible.

$$\begin{cases}
 [\mathbf{V}_{bus}]_{Source} = C^{ste} + \frac{[\mathbf{I}_{bus}]_{Norme}}{C_s \cdot \omega} \leq [\mathbf{V}_{bus}]_{Norme} \\
 [\mathbf{I}_{bus}]_{Charge} \leq [\mathbf{I}_{bus}]_{Norme}
 \end{cases}
 \quad \text{Eq II. 23}$$

$$\Rightarrow [\mathbf{V}_{bus}]_{Systeme} \leq [\mathbf{V}_{bus}]_{Source} \leq [\mathbf{V}_{bus}]_{Norme}$$

Par rapport à la charge, le filtre est dimensionné pour supporter le pire cas de pollution de la tension du bus. La tension calculée lors du dimensionnement du filtre de la



source respecte cette limitation, et donc le courant par rapport à cette tension ne peut être qu'inférieur à la solution fournie par le dimensionnement mécaniste.

$$\begin{cases} [\mathbf{I}_{bus}]_{Charge} = \left\| \mathbf{F}_{\mathbf{I}_{bus}/V_{bus}} \cdot [\mathbf{V}_{bus}]_{Source} \right\| + C^{ste} \leq [\mathbf{I}_{bus}]_{Norme} \\ [\mathbf{V}_{bus}]_{Source} \leq [\mathbf{V}_{bus}]_{Norme} \end{cases} \quad \text{Eq. II. 24}$$

$$\Rightarrow [\mathbf{I}_{bus}]_{Systeme} \leq [\mathbf{I}_{bus}]_{Source} \leq [\mathbf{I}_{bus}]_{Norme}$$

#### 2.3.1.4 Conclusion sur l'approche mécaniste

Il apparait donc que le surdimensionnement constaté dépend de la manière dont est considérée la norme dans l'approche mécaniste, du découplage source-charge qui empêche un sous-système de tirer profit de l'effort de filtrage fourni par l'autre sous-système.

Il est nécessaire –pour dépasser cette faiblesse de l'approche mécaniste– d'adopter une approche orientée système, en se basant sur le couplage source-charge afin de profiter des marges supplémentaires d'atténuation observées.

Concernant l'impact de l'approche mécaniste sur le cycle de conception, on peut dire que l'approche dépend fortement de l'étape 1 du cycle de conception puisqu'elle est tributaire des seuils de la norme. L'étape 3 du cycle (l'intégration) est assurée au prix d'un surdimensionnement des filtres qu'on ne peut pas mesurer.

### 2.3.2 L'approche globale

#### 2.3.2.1 Formulation du problème d'optimisation

L'approche globale consiste à intégrer l'ensemble du dimensionnement d'un système dans une unique boucle d'optimisation. Elle permet de décrire avec exactitude l'ensemble des interactions entre les composants en rassemblant les équations qui décrivent le système.

Les pollutions harmoniques que doit filtrer le système constitué des deux filtres sont le courant en sortie du redresseur et le courant de l'onduleur. Le foisonnement relatif de ces grandeurs n'est pas connu, il est donc nécessaire de prendre la même précaution dans le calcul du modèle électrique fait dans l'approche mécaniste (cf. Tab II. 7 et Tab II. 10) mais cette fois par rapport au courant du redresseur et celui de l'onduleur (cf. Tab II. 14).

Tab II. 14 Correction du modèle des fonctions de transfert du système

Le modèle physique	
$\overrightarrow{I_L}(\omega)$	$= \mathbf{Ft}_{I_L/I_{red}}(C_s, L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot \overrightarrow{I_{red}}(\omega) + \mathbf{Ft}_{I_L/I_{ond}}(C_s, L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot \overrightarrow{I_{ond}}(\omega)$
$\overrightarrow{V_{bus}}(\omega)$	$= \mathbf{Ft}_{V_{bus}/I_{red}}(C_s, L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot \overrightarrow{I_{red}}(\omega) + \mathbf{Ft}_{V_{bus}/I_{ond}}(C_s, L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot \overrightarrow{I_{ond}}(\omega)$
Le modèle physique pour le dimensionnement	
$\  \overrightarrow{I_L}(\omega) \ $	$= \  \mathbf{Ft}_{I_L/I_{red}}(C_s, L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot \overrightarrow{I_{red}}(\omega) \  + \  \mathbf{Ft}_{I_L/I_{ond}}(C_s, L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot \overrightarrow{I_{ond}}(\omega) \ $
$\  \overrightarrow{V_{bus}}(\omega) \ $	$= \  \mathbf{Ft}_{V_{bus}/I_{red}}(C_s, L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot \overrightarrow{I_{red}}(\omega) \  + \  \mathbf{Ft}_{V_{bus}/I_{ond}}(C_s, L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot \overrightarrow{I_{ond}}(\omega) \ $

De plus, il est possible de considérer une fonction objectif système qui est la masse totale du système ce qui permet de rechercher des compromis entre les masses de la source et de la charge.

Tab II. 15 Données du problème d'optimisation mécaniste de la charge

variable	Désignation	Valeur
Variables de décision	$C_s$	[1,1e+03] $\mu\text{F}$
	$C_1$	[1,1e+03] $\mu\text{F}$
	$C_2$	[1,1e+03] $\mu\text{F}$
	$L$	[1,1e+03] $\mu\text{H}$
	$R$	[1e-03,1e+03] $\Omega$
Variables d'entrée	$\overrightarrow{I_{red}}$	Tab II. 3
	$\overrightarrow{I_{ond}}$	Tab II. 3
Fonction objectif	$M_{\text{Système}}(C_s, C_1, C_2, L, R)$	A minimiser
Contraintes d'inégalité	$\  \overrightarrow{V_{bus}} \ _{\text{Norme}}$	Fig II. 4-bas
	$THD_V$ Norme	0.74 %
	$\  \overrightarrow{I_{bus}} \ _{\text{Norme}}$	Fig II. 6-bas
	$THD_I$ Norme	36,49 %

Le problème d'optimisation système (cf. Fig II. 17) se présente dans l'approche globale comme suit :

$$\begin{cases}
 \min_{C_s, C_1, C_2, L, R} M_{\text{Système}} \\
 \| \overrightarrow{V_{bus}} \| \leq \| \overrightarrow{V_{bus}} \|_{\text{Norme}} \\
 THD_V \leq THD_{V_{\text{Norme}}} \\
 \| \overrightarrow{I_{bus}} \| \leq \| \overrightarrow{I_{bus}} \|_{\text{Norme}} \\
 THD_I \leq THD_{I_{\text{Norme}}}
 \end{cases}
 \quad \text{Eq II. 25}$$

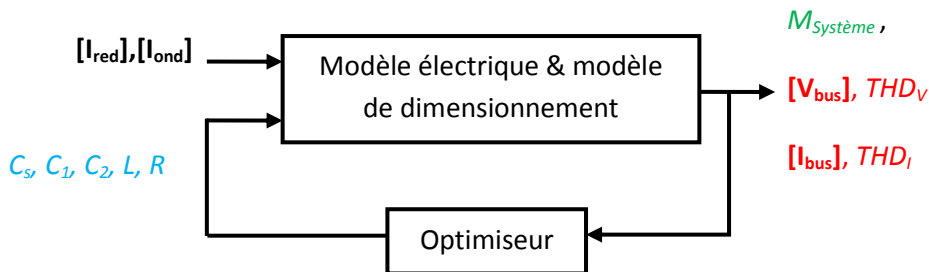


Fig II. 17 Description schématique du problème d'optimisation globale du système

Le problème d'optimisation est résolu soit avec l'algorithme SQP avec plusieurs initialisations afin de trouver l'optimum global, soit avec une hybridation de l'algorithme

SQP par un algorithme génétique pour explorer l'espace de recherche sans se faire piéger par un optimum local.

Tab II. 16 Principaux résultats de l'optimisation globale du système

$M_{Système}$ (kg)	2.56
$M_{Source}$ (kg)	0.35
$M_{Charge}$ (kg)	2.21
$C_s$ ( $\mu$ F)	1.32e+02
$C_1$ ( $\mu$ F)	3.55e+02
$C_2$ ( $\mu$ F)	1.00e-6
$L$ ( $\mu$ H)	8.46e+01
$R$ ( $\Omega$ )	1.00e-03
$THD_V$ (%)	0.31
$THD_I$ (%)	3.92

Deux contraintes sont dimensionnantes. Il s'agit des mêmes harmoniques trouvés que lors des optimisations mécanistes à savoir le premier harmonique de tension et le dernier harmonique de courant (cf. Fig II. 18).

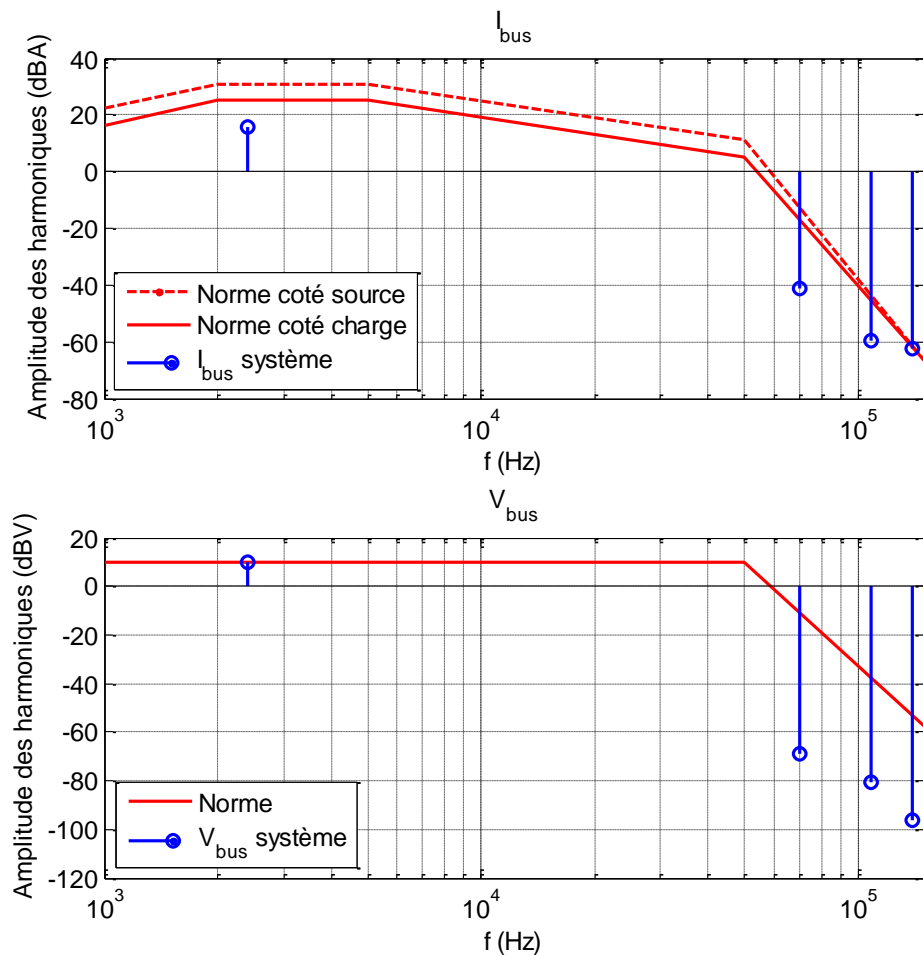


Fig II. 18 Harmoniques de courant et de tension obtenus par l'approche globale

### 2.3.2.2 Analyse des résultats et des couplages système

Les valeurs des harmoniques pendant la phase de dimensionnement sont les valeurs des harmoniques après intégration vue que le comportement global et émergent est décrit. L'étape 3 du processus de conception est donc validée par l'approche elle-même.

L'ensemble des grandeurs de tension et de courant dépendent de tous les paramètres des filtres, les sous-systèmes sont couplés.

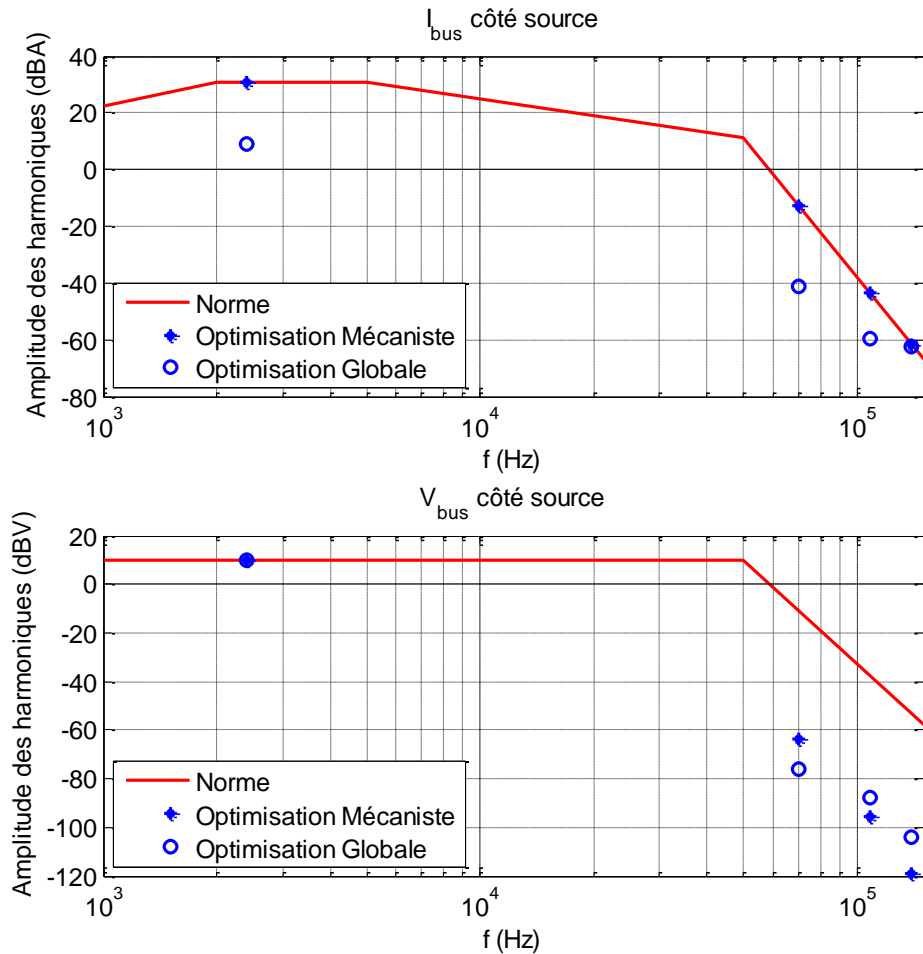


Fig II. 19 Comparaison entre harmoniques vus par la source dans l'approche mécaniste et leurs valeurs dans l'approche globale

On trouve une masse totale de 2.56 kg contre 4.41 kg pour l'approche mécaniste. Les masses des sous-systèmes « source » et « charge » sont respectivement de 0.35 kg et 2.21 kg contre 2.17 kg et 2.24 kg pour l'approche mécaniste. Les dimensionnements des filtres ne sont pas obligés de supporter le pire cas de pollution harmonique puisque les valeurs exactes sont accessibles (cf. Fig II. 19 et Fig II. 20). Contrairement à l'approche mécaniste ou soit la tension soit le courant était au maximum de la norme sur

toutes les fréquences du spectre, dans l'approche globale seule le premier harmonique de tension et le dernier harmonique de courant atteignent le seuil limite du gabarit.

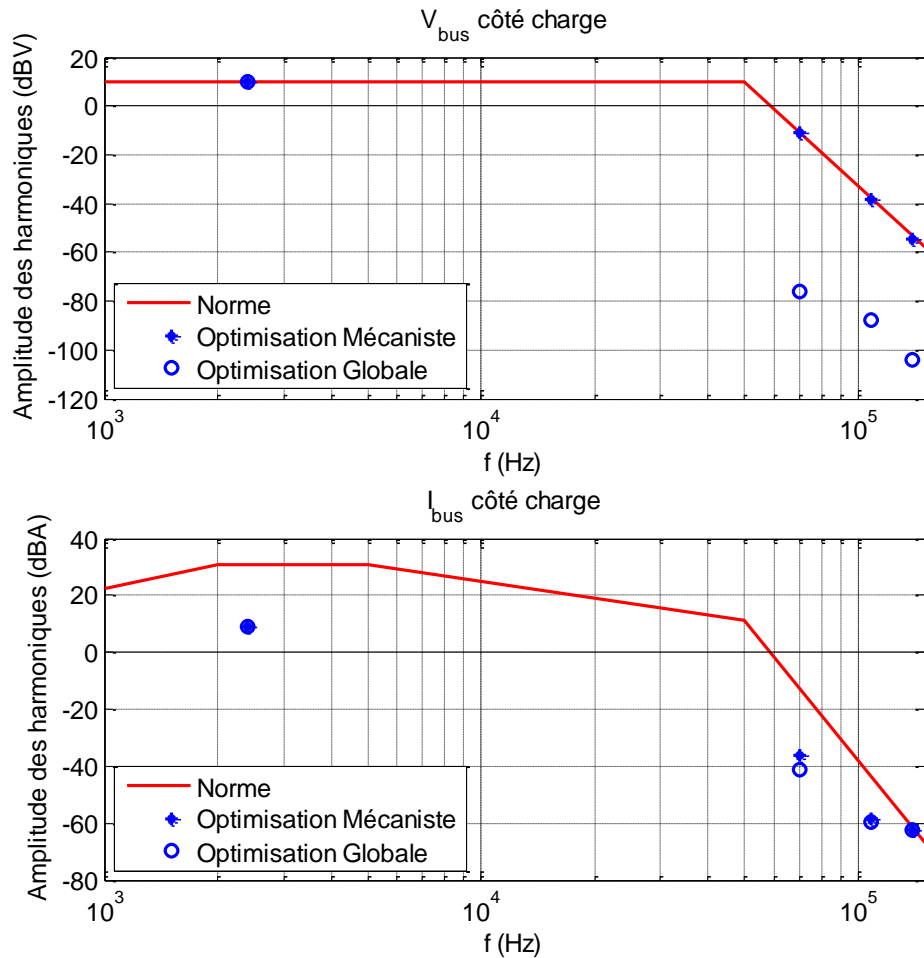


Fig II. 20 Comparaison entre harmoniques vus par la charge dans l'approche mécaniste et leurs valeurs dans l'approche globale

### 2.3.3 La méthode des fronts de Pareto étendus (MFPE)

#### 2.3.3.1 Analyse comparative des couplages entre l'approche globale et l'approche mécaniste et principe de la MFPE

Nous avons vu que le découpage du système dans l'approche mécaniste ne permet qu'une vision locale des comportements des sous-systèmes ce qui se traduit par un surdimensionnement. Le modèle utilisé dans l'approche globale est obtenu en joignant les modèles des sous-systèmes, en résolvant un seul problème d'optimisation avec des valeurs uniques pour chaque variable.

$$\begin{cases} [\mathbf{V}_{bus}]_{Source} = [\mathbf{V}_{bus}]_{Charge} = [\mathbf{V}_{bus}] \\ [\mathbf{I}_{bus}]_{Source} = [\mathbf{I}_{bus}]_{Charge} = [\mathbf{I}_{bus}] \end{cases} \quad \text{Eq II. 26}$$

Nous avons appliqué les spectres de tension et de courant obtenus par l'approche globale en entrée des optimisations mécanistes, nous avons observé que le dimensionnement local de chaque équipement rejoignait alors le résultat de l'approche globale. Cette observation nous conduit à introduire l'égalité (cf. Eq II. 26) dans le processus de dimensionnement.

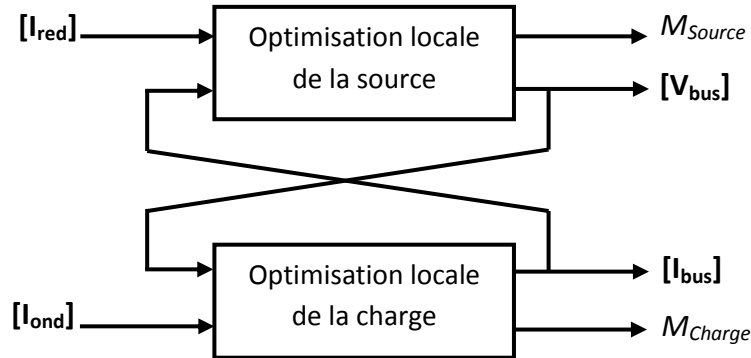


Fig II. 21 Reconstitution des couplages dans la MFPE

La MFPE cherche à reconstruire les couplages systèmes tout en maintenant l'indépendance des optimisations locales. Pour cela il faut identifier les variables globales communes aux deux sous-systèmes et les séparer des autres variables propres (cf. Fig II. 21 et Tab II. 17).

Tab II. 17 Distinction entre les différentes variables dans la MFPE

	Variables d'entrée		Variables de sorties	
	propre	globale	Propre	Globale
Optimisation de la source	$[I_{red}], C_s$	$[I_{bus}]$	$M_{Source}$	$[V_{bus}]$
Optimisation de la charge	$[I_{ond}], C_1, C_2, L, R$	$[V_{bus}]$	$M_{Charge}$	$[I_{bus}]$

Les variables globales sont discrétisées entre 0 et le seuil spécifié par la norme et cela pour les 4 fréquences du spectre retenues pour l'étude. Pour chaque configuration possible des variables d'entrée globales d'un problème, une optimisation est résolue et les valeurs des variables globales de sorties sont calculées.

Ensuite, pour reconstruire l'objectif système, on cherchera les optimisations locales qui ont les mêmes variables globales pour respecter la cohérence exprimée par l'Eq II. 26. Parmi ces couples (source, charge) on sélectionnera celui dont la somme des masses est la plus petite.

### 2.3.3.2 Espace des solutions de la source

La variable globale d'entrée de l'optimisation de la source est le courant du bus (cf. Fig II. 22). Pour obtenir l'espace des solutions de la source, nous allons générer les combinaisons possibles du spectre à 4 fréquences du courant de bus. Une discrétisation de  $N_{ech}$  valeurs par amplitude d'harmonique engendre un espace de solution de taille  $\Gamma_{Source} = N_{ech}^4$  formés par les différentes combinaisons du courant du bus.

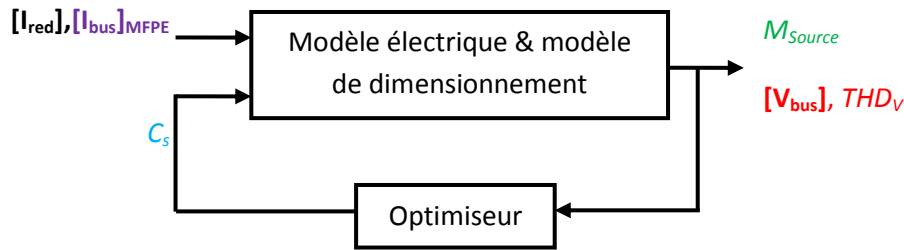


Fig II. 22 Description schématique d'une optimisation locale de la source dans la MFPE

Nous avons utilisé plusieurs valeurs de  $N_{ech} = 3, 4, 5, 6, 7$  et  $8$  pour avoir des espaces de solutions plus denses à chaque fois (cf. Tab II. 18).

Tab II. 18 Taille de l'espace des solutions selon la discrétisation des variables globales

$N_{ech}$	3	4	5	6	7	8
$\Gamma_{Source}$	81	256	626	1296	2401	4096

L'espace de solution est finalement sous forme d'un tableau de  $\Gamma_{Source}$  colonnes, chaque colonne contient les valeurs du courant de bus, la masse trouvée par l'optimisation et les valeurs de la tension de bus.

### 2.3.3.3 Espace des solutions de la charge

Pour obtenir l'espace des solutions de la charge (cf. Fig II. 23), nous allons générer les combinaisons possibles des amplitudes du spectre à 4 fréquences de la tension de bus. Une discrétisation de  $N_{ech}$  valeurs par amplitude d'harmonique engendre un espace de solution de taille  $\Gamma_{Charge} = N_{ech}^4$  formés par les différentes combinaisons de la tension bus.

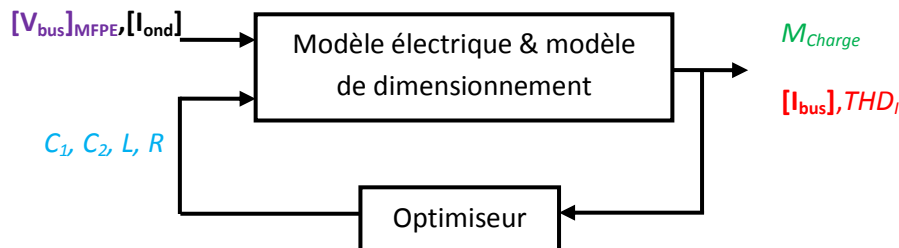


Fig II. 23 Description schématique d'une optimisation locale de la charge dans la MFPE

### 2.3.3.4 Couples de solutions cohérentes et résultat système

Une fois les espaces de solution construits, nous allons chercher les couples de solution (source-charge) qui respectent l'égalité de l'équation Eqt II. 26. Cette égalité est vérifiée avec une tolérance à 0.1 %. Plus la taille de l'espace de solution est grande, plus il faudra faire de comparaisons. Le nombre de comparaison nécessaire à faire est  $\Gamma_{comp}$ .

$$\Gamma_{comp} = \Gamma_{Source} \times \Gamma_{Charge} \quad \text{Eq II. 27}$$

Ces couples forment des solutions systèmes, c'est-à-dire des solutions cohérentes dont le nombre est  $N_{sys}$  et pour lesquelles on calcule la masse totale qui est la somme des masses des deux filtres  $M_{Faisable}$ .

Enfin, on compare les masses totales des couples de solutions cohérentes pour en sélectionner la plus faible  $M_{Système}$  (cf. Tab II. 19).

Tab II. 19 Résultat de la MFPE suivant différentes discrétisations

$N_{ech}$	3	4	5	6	7	8
$\Gamma_{Source}$	81	256	626	1296	2401	4096
$\Gamma_{comp}$	6 561	65 536	390 625	1 679 616	5 764 801	16 777 216
$N_{sys}$	92	967	5 023	19 054	47 239	114 822
$\frac{N_{sys}}{\Gamma_{comp}}$ (%)	1.40	1.48	1.29	1.13	0.82	0.68
$M_{Système}$	3.41	3.07	2.91	2.80	2.74	2.69

Le premier résultat notable est qu'on arrive à trouver un résultat système faisable plus optimal que celui de l'approche mécaniste avec  $N_{ech} = 3$ . Et la masse diminue à mesure que l'échantillonnage des variables globales est fin. Nous nous sommes arrêtés à 8 en raison des temps de calculs qui devenaient exorbitants. Ce point sera discuté en détail dans la partie bilan mais on peut relever dès maintenant le nombre d'optimisations mécaniste nécessaires et le nombre de comparaison qui croissent de façon exponentielle avec la discrétisation de l'espace de recherche des solutions.

$$\begin{cases} \Gamma_{Source} = \Gamma_{Charge} = N_{ech}^4 \\ \Gamma_{comp} = \Gamma_{Source} \times \Gamma_{Charge} = N_{ech}^8 \end{cases} \quad \text{Eq II. 28}$$

On remarque également que le nombre de couples qui forment des solutions faisables est très faible par rapport à toutes les combinaisons possibles, la plupart des optimisations locales qui consomment un coût de calcul important ne donne aucun résultat. Ce taux a tendance à diminuer encore plus à mesure que l'échantillonnage est plus fin.

## 2.3.4 L'approche collaborative séquentielle

### 2.3.4.1 Formulation de l'approche

L'approche collaborative séquentielle part du même constat opéré dans la MFPE. Il faut respecter l'égalité des variables globales pour garantir les couplages systèmes et s'approcher de la solution optimale.

Cependant, nous avons montré que la MFPE conduit à un nombre d'optimisations très élevé qui augmente à mesure que le pas d'échantillonnage se réduit et dont la plupart ne donne aucun résultat.



Afin de résoudre ce problème, on propose de résoudre les optimisations mécanistes de manière séquentielle, en imposant à l'optimisation mécaniste d'un filtre la pollution harmonique calculée par l'optimisation mécaniste de l'autre filtre calculé précédemment (cf. Fig II. 24).

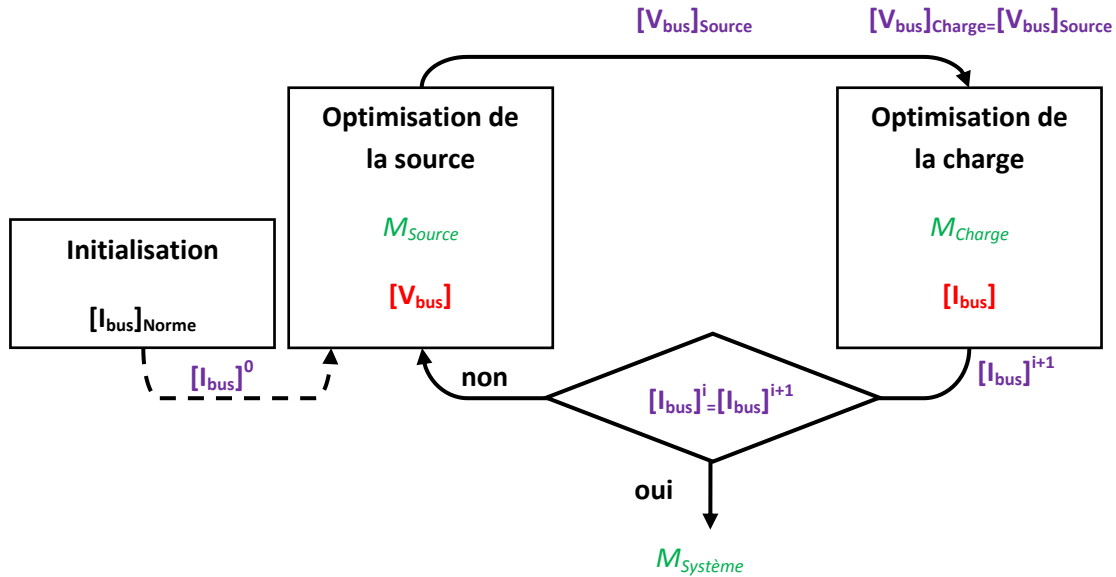


Fig II. 24 Approche collaborative séquentielle appliquée au cas d'étude simplifié

### 2.3.4.2 Convergence et solution optimale

Le processus de l'approche collaborative est itératif et bouclé. Il est nécessaire d'initialiser l'approche par une valeur quelconque, ici nous l'avons fait avec la norme en courant.

Le critère d'arrêt est le critère de cohérence de la MFPE à savoir une égalité des variables globales. Dans cette configuration l'égalité de la tension est assurée puisque la valeur de la tension calculée dans l'optimisation de la source est directement envoyée à l'optimisation de la charge. Par contre, en raison de l'initialisation, la valeur du courant change d'une itération à une autre. La convergence est assurée lorsque la valeur du courant est stable entre deux itérations.

$$[\mathbf{I}_{bus}]^i = [\mathbf{I}_{bus}]^{i+1} \quad \text{Eq II. 29}$$

Nous avons obtenu une convergence, soit une égalité avec une tolérance de 0.1% après seulement 3 itérations. La masse totale obtenue est de 2.91 kg. C'est un résultat sous-optimal dû à une convergence locale en raison de l'initialisation.

On retrouve un résultat largement meilleur que la solution de l'approche mécaniste mais qui reste sous-optimal. Il n'y a aucun critère qui guide l'approche à choisir la solution optimale parmi des solutions faisables.

## **2.4 Bilan des approches classiques et critères de construction d'une approche réaliste et efficace**

Nous allons maintenant mesurer et comparer les approches utilisées en termes de solution optimale, de coût de calcul mais également du niveau de collaboration requis entre les équipementiers qui est un facteur essentiel pour la diffusion de ces approches dans le secteur industriel. Nous allons également se projeter dans un cas d'étude plus compliqué (plus de charges) pour mesurer la robustesse des approches.

### **2.4.1 Masse optimale**

Les résultats (cf. Tab II. 20) montrent que l'approche globale, dans une moindre mesure la MFPE et l'approche collaborative séquentielle sont les approches qui donnent la plus faible masse. À l'inverse, l'approche mécaniste conduit à un résultat largement sous-optimal. Ceci confirme l'importance des couplages pour le dimensionnement. Ces résultats montrent que la considération des couplages est une condition nécessaire mais pas suffisante. La MFPE permet de trouver des solutions faisables qui respectent les couplages mais le résultat n'est pas optimal pour autant. Ceci est aussi valable pour l'approche collaborative séquentielle, d'où la nécessité d'un critère système qui permette de sélectionner parmi toutes les solutions faisables celle qui est la plus optimale.

Tab II. 20 Comparaison des approches en termes de solution optimale

Approche de conception	Masse optimale (kg)	Commentaires
Approche mécaniste	4.41	Masse la plus lourde
Méthode des FPE	[2.69, 3.41]	Plus Nech est grand plus on s'approche du résultat optimal
Approche collaborative séquentielle	2.91	Convergence rapide vers une solution faisable
Approche globale	2.56	Masse la plus faible

### **2.4.2 Coût de calcul**

D'habitude, pour mesurer le coût de calcul d'un algorithme d'optimisation on se réfère au nombre d'évaluations ou d'itérations mais comme il s'agit d'approches de conception qui comportent d'autres calculs que l'optimisation nous allons directement comparer les temps nécessaires à l'obtention du résultat.

De plus, dans une même méthode qui fait appel à plusieurs optimisations, le temps nécessaire à une optimisation n'est pas fixe car le chemin de convergence n'est pas le même selon les variables mises en jeu. Nous avons donc mesuré des durées

d'optimisation totales. Tous les temps de calcul énoncés sont déterminés sur la même machine dans les mêmes conditions<sup>1</sup>.

### 2.4.2.1 Coût de calcul de l'approche mécaniste

L'approche mécaniste contient deux optimisations indépendantes qui peuvent se faire en parallèle.

Le temps de calcul de l'approche est le maximum des temps de calcul des deux optimisations puisque les optimisations concernent normalement deux sous-systèmes indépendants qui peuvent être dimensionnés en parallèle (cf. Tab II. 21).

Tab II. 21 Coût de calcul de l'approche mécaniste

Durée de l'optimisation mécaniste de la source	Durée de l'optimisation mécaniste de la charge	Durée de l'optimisation de l'approche : $T_{mécaniste}$
43 ms	183 ms	183 ms

Dans une optique d'un réseau à  $N_{charges}$  charges, la durée de l'optimisation mécaniste sera la durée de l'optimisation mécaniste la plus longue.

$$T_{mécaniste}^{Général} = \max_{i=1:N_{charges}} (T_{mécaniste,i}) \quad \text{Eq. II. 30}$$

### 2.4.2.2 Coût de calcul de l'approche globale

L'approche globale contient une seule et unique optimisation  $N_{globale} = 1$  dont la durée est supérieure à l'optimisation mécaniste car le modèle est plus « lourd » (cf. Tab II. 22).

Tab II. 22 Coût de calcul de l'approche globale

	Réseau à une seule charge	Réseau à deux charges
$T_{globale}$ (ms)	399	503

Nous avons renseigné la durée d'optimisation d'un réseau à deux charges pour pouvoir donner une estimation de la durée d'une optimisation globale à  $N_{charges}$  charges. Si on considère qu'en rajoutant des équations au modèle fréquentiel des filtres et les équations de dimensionnement associées on augmente linéairement le temps de calcul, on peut estimer :

$$T_{globale}^{Général} = 399 + N_{charges} \times 104 \quad \text{Eq. II. 31}$$

<sup>1</sup> Intel® Core(TM) i5-3317U CPU @ 1.70GHz, avec 6GB de RAM, sur Windows 8.1 64-bit

### 2.4.2.3 Méthode des fronts de Pareto étendus

Nous avons appliqué la méthode des Fronts de Pareto Étendus avec différentes valeurs de  $N_{ech}$ . Le coût total de l'application de cette méthode comprend le coût de calcul de la construction des espaces des solutions et le coût de calcul de la phase de comparaison. La construction des espaces de solution peut se faire de façon indépendante et donc en parallèle sur deux machines de deux équipementiers différents.

$$T_{MFPE} = T_{Opti} + T_{comp} = \max(T_{\Gamma_{source}}, T_{\Gamma_{charge}}) + T_{comp} \quad \text{Eq II. 32}$$

Nous avons mesuré ces temps pendant l'application de la MPFPE suivant les différentes valeurs de  $N_{ech}$  (cf. Fig II. 25).

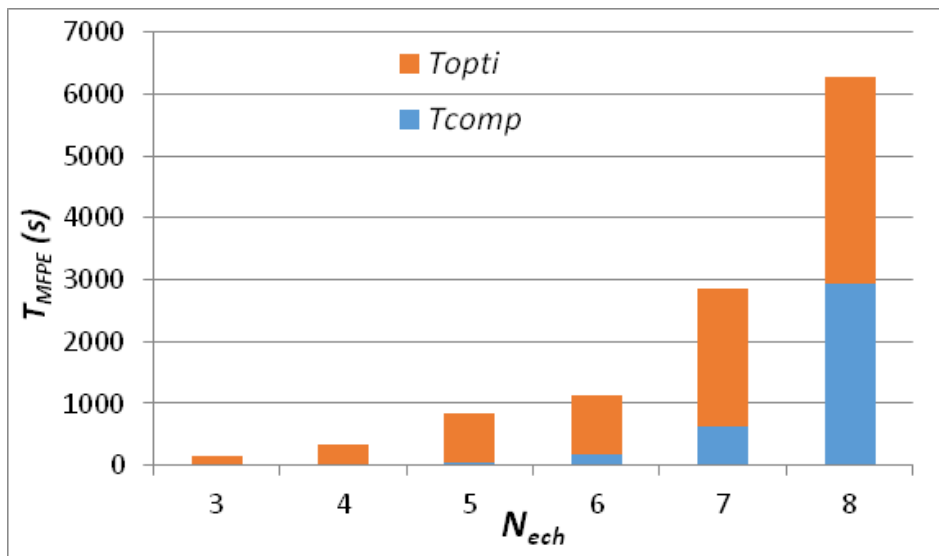


Fig II. 25 Évolution du coût de calcul de la MFPE avec la discrétisation

Le coût de calcul total de la MFPE est la somme des coûts de la phase de création des espaces de solutions et de la phase de comparaison (cf. Eq II. 32). Lorsque la discrétisation est faible, c'est le coût de création des espaces de recherche qui est le plus élevé, ce qui s'explique par la durée d'une optimisation qui est supérieure à la durée d'une comparaison. À mesure que  $N_{ech}$  augmente le coût de comparaison devient de moins en moins négligeable compte tenu du nombre de comparaison  $N_{comp}$  qui croît de façon quadratique par rapport au nombre d'optimisation  $\Gamma_{charge}$  (cf. Eq II. 28).

Le coût de calcul de la méthode peut être stabilisé lors du passage à un système à  $N_{charges}$ . Le coût de génération des espaces de recherche peut rester constant grâce à la mise en parallèle des calculs. Concernant le coût de la phase de comparaison, il ne change pas dans la mesure où on compare toujours une tension de bus et un courant de bus même si ce dernier devient la somme de courants issus des optimisations des charges.

#### 2.4.2.4 Le coût de calcul de l'approche collaborative

L'approche collaborative repose sur des optimisations locales successives, la durée de l'approche dépend donc du nombre d'itérations. Nous avons obtenu une convergence après 3 itérations :

$$T_{Col.Seq} = 3 \cdot (T_{source} + T_{charge}) \quad \text{Eq II. 33}$$

La durée obtenue pour l'approche collaborative appliquée au cas d'étude est de 678 ms. Dans un système ayant  $N_{charges}$  les optimisations des charges peuvent se faire de façon parallèle car elles ne sont dépendantes que de l'optimisation de la source à travers la variable de la tension du bus, on peut donc calculer la durée de la méthode en se basant sur le nombre d'itération avant convergence  $N_{convergence}$  par la formule :

$$T_{Col.Seq}^{General} = N_{convergence} \cdot \left( T_{source} + \max_{i=1:N_{charges}} T_{charge_i} \right) \quad \text{Eq II. 34}$$

#### 2.4.2.5 Comparaison

Si on considère les temps de calcul uniquement, c'est l'approche mécaniste qui l'emporte. Si maintenant on intègre la masse optimale trouvée, l'approche globale est la meilleure suivie de l'approche collaborative séquentielle. La MFPE permet de trouver une masse très proche de la solution globale mais le coût est exorbitant (cf. Tab II. 23).

Tab II. 23 Coût de calcul des différentes approches

Approche	Masse optimale (kg)	Temps de calcul (s)
Approche mécaniste	4.41	0.183
Méthode des FPE	2.69 ( $N_{ech} = 8$ )	6282
Approche collaborative séquentielle	2.91	0.678
Approche globale	2.56	0.399

### 2.4.3 Le niveau de collaboration

Le niveau de collaboration est un facteur très important notamment dans le secteur industriel. Certains équipementiers qui fournissent des systèmes à l'intégrateur peuvent être concurrents, l'aspect de confidentialité des données revêt donc une importance capitale. Le niveau de collaboration que nous avons mis en avant pour mieux décrire les couplages et converger vers des solutions plus optimales devient une contrainte que les industriels cherchent à limiter (cf. Tab II. 24).

Nous allons définir trois niveaux de collaboration et analyser les approches étudiées par rapport à ces niveaux.

Tab II. 24 Nature de la collaboration selon l'approche

approche	Masse Totale (kg)	Temps de calcul (s)	Collaboration
Approche mécaniste	4.41	0.183	Minimale
MFPE	2.69	6282	Faible
Approche collaborative séquentielle	2.91	0.678	Moyenne
Approche globale	2.56	0.399	Totale

Considérer le niveau de collaboration nous permet de nuancer les résultats quant aux performances des différentes approches.

L'utilisation de l'approche mécaniste dans le secteur industriel se justifie, c'est une approche qui nécessite peu de collaboration, un faible temps de calcul et qui donne un résultat.

Le même constat est fait de façon symétrique sur l'approche globale. Certes, elle permet de trouver la solution optimale. Cependant, elle nécessite une collaboration totale, c. a. d. un échange des modèles, un seul niveau de décision mais aussi la complication du modèle système qui peut engendrer des difficultés de convergence. L'application de cette approche dans le secteur industriel relève de l'utopie, les équipementiers ne sont pas disposés à livrer leurs savoirs faire d'un côté et de l'autre l'intégrateur ne tient pas forcément à gérer toute la complexité à son niveau, il a besoin de déléguer certaines tâches qui sont du ressort des équipementiers.

Entre les approches qui restent, on choisira forcément l'approche collaborative séquentielle. Moyennant un coût de calcul modeste et en rajoutant une plateforme commune pour les échanges collaboratifs, on peut améliorer le dimensionnement mécaniste sans pour autant être intrusive dans les modèles ou dans le dimensionnement. Chaque équipementier peut gérer sa conception à son niveau avec comme seule contrainte supplémentaire : accepter des valeurs dynamiques de pollution à l'entrée au lieu d'une valeur fixe (la norme) et fournir sa pollution qu'il calcule à son niveau.

La MFPE, bien qu'elle puisse séduire par l'indépendance qu'elle offre aux équipementiers nécessite un coût de calcul important pour espérer se rapprocher du dimensionnement optimal. Néanmoins, ce coût peut être maîtrisable en cas de multiples charges.

#### **2.4.4 Résumé du bilan et recommandations pour l'élaboration d'une approche efficace et faisable**

Nous terminons ce chapitre par des recommandations basées sur les différentes approches étudiées. Ces recommandations sont en fait les points forts des méthodes étudiées. Elles serviront à l'élaboration d'une méthode acceptable et efficace.

- 1) La méthode doit tenir compte des couplages système pour converger vers des solutions système faisables (Approche globale, MFPE et approche collaborative séquentielles),
- 2) La méthode doit contenir un critère de sélection de la solution optimale pour garantir la convergence (Approche globale, MFPE),
- 3) La méthode doit profiter des itérations précédentes pour orienter et accélérer la convergence (approche collaborative séquentielle) et éviter les solutions non faisables (MFPE),
- 4) La méthode devra être compatible avec une augmentation du nombre de charges.

## **Chapitre 3**

# **Approche multiniveau agrégée et causale pour l'optimisation d'un réseau électrique aéronautique**



## **3.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons une nouvelle approche pour la conception des réseaux électriques aéronautiques. Il s'agit d'une l'approche multiniveau où un niveau supplémentaire d'optimisation est rajouté. Dans le chapitre I, nous avons introduit les approches multiniveaux comme une piste sérieuse pour traiter la complexité de la conception des réseaux aéronautiques. Dans le chapitre II, nous avons montré sur un cas d'étude simplifié les avantages et les limites, d'abord d'une approche classique (l'approche mécaniste) puis de deux approches originales (la MFPE et approche collaborative) qui incluent des échanges de données entre les optimisations des sous-systèmes. Ce chapitre a donc pour but de montrer l'importance d'un niveau d'optimisation système à travers la présentation de l'approche multiniveau et sa validation par rapport aux attentes relevées dans l'état de l'art et par rapport aux conclusions tirées des autres approches.

La formulation du problème est une étape cruciale dans la résolution d'un problème d'optimisation ; c'est d'autant plus vrai que la formulation est « *multiniveau* ». Nous allons insister sur ce point en proposant trois formulations différentes. À chaque fois, on motivera la nécessité de l'évolution de la formulation. Les trois formulations reposent sur une architecture à deux niveaux, un niveau « *intégrateur* » ou « *système* » et un niveau « *équipementier* » ou « *sous-système* ». Dans toutes les formulations qu'on va présenter, l'échange de données est strictement vertical, il n'y a pas d'échange de données entre les sous-systèmes d'un même niveau. Chaque formulation sera présentée et discutée du point de vue de l'architecture (problèmes système et sous-problèmes locaux) mais aussi par rapport à l'objectif principal qui -rappelons-le- est de se rapprocher le plus du résultat optimal (trouvée par l'approche globale) en garantissant la confidentialité aux équipementiers et en réduisant le coût de la collaboration et le coût du calcul.

La dernière partie du chapitre traitera de l'implémentation et de la résolution du problème d'optimisation multiniveau. Pour cela, nous utiliserons la formulation que l'on jugera meilleure parmi les trois formulations que l'on va présenter et nous l'appliquerons au cas d'étude déjà utilisé pour le chapitre II. Le but est de valider les résultats (solution optimale avec un coût de collaboration réduit et un coût de calcul maîtrisé) et de montrer l'implémentation de l'approche et les choix des algorithmes.

## 3.2 Formulation multiniveau basée sur l'ATC

### 3.2.1 Principe

Rappelons d'abord le système étudié. La Fig III. 1 montre une généralisation du réseau étudié présenté dans le chapitre II. Les éléments passifs des filtres sont les variables de décision du dimensionnement de ces derniers. La tension du bus partagée par l'ensemble des sous-systèmes et les courants absorbés par les charges (dont la somme est le courant fournis par la source) sont les variables globales qui lient les filtres les uns aux autres.

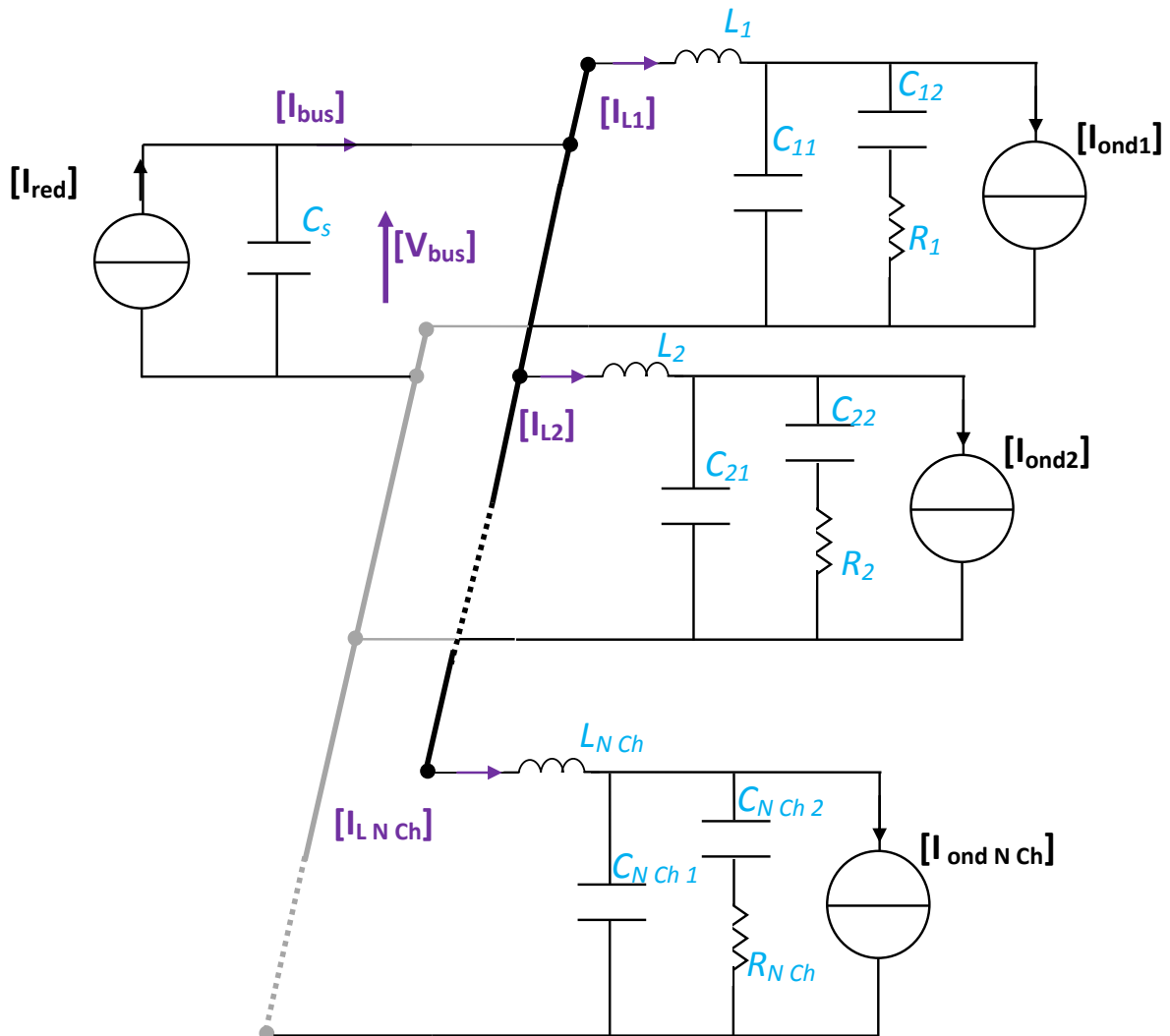


Fig III. 1 Généralisation du cas d'étude

L'ATC (Analytical Target Cascading) se base sur une architecture multiniveau ; les optimisations locales au niveau sous-système sont guidées par un optimiseur au niveau système qui a vocation à sélectionner, parmi les solutions locales possibles, celles qui offrent les meilleures performances du point de vue système tout en conservant les couplages. Pour cela, l'optimiseur propage des valeurs de variables globales sous formes de cibles (targets) dans les différents sous-problèmes. On peut imaginer –comme on le verra par la suite- plusieurs formulations selon les variables qu'on choisit d'échanger entre les niveaux d'optimisation.

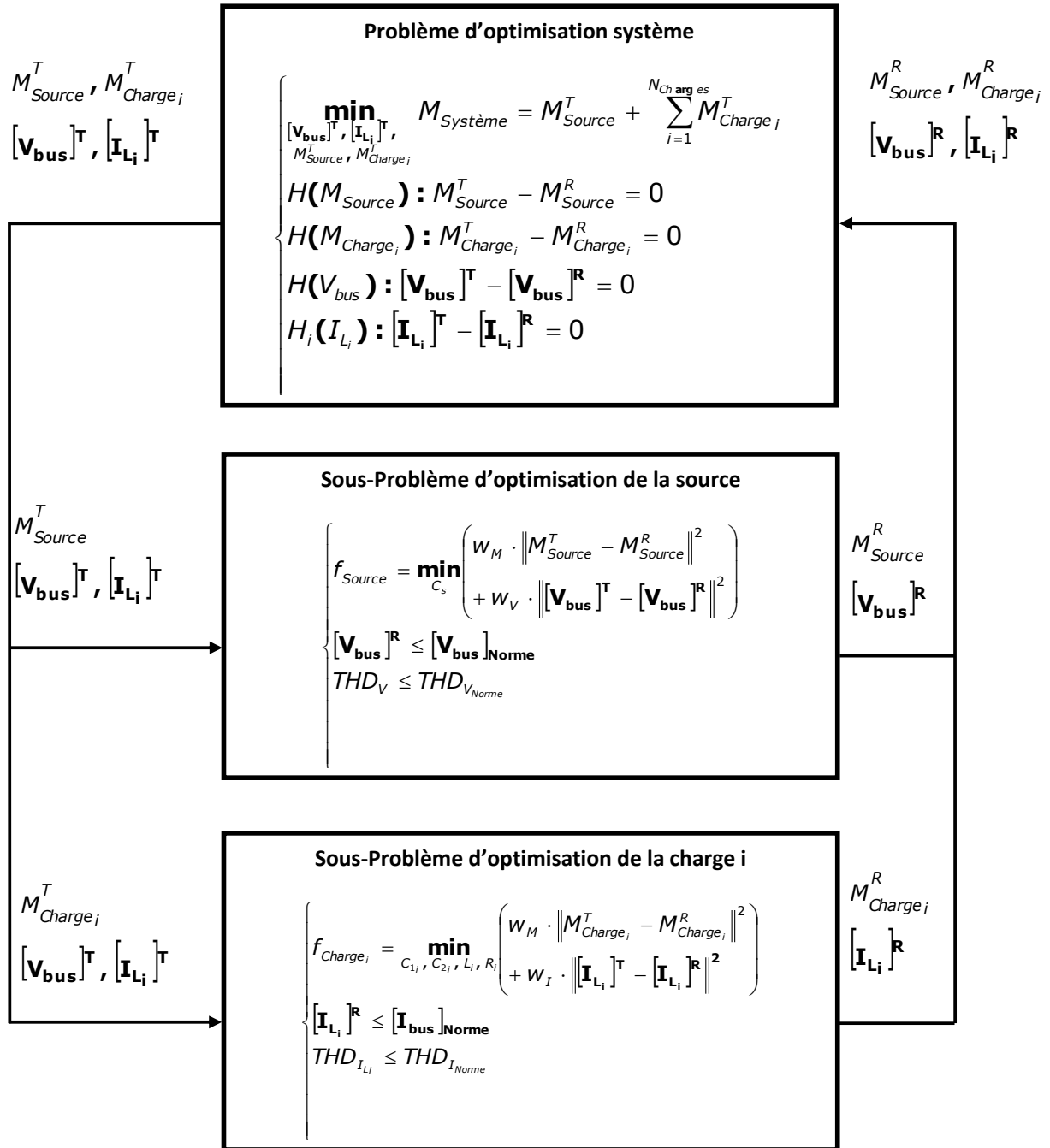


Fig III. 2 Schéma de la formulation basée sur l'ATC par rapport à un cas d'étude généralisé

La Fig III. 2 est un exemple de la formulation du problème par l'approche ATC : les variables échangées ici sont customisées par rapport à notre problème de dimensionnement optimal tel que formulé au Chapitre II.

Puisqu'il s'agit d'une architecture à deux niveaux, nous adopterons l'exposant T pour « *target* » pour les variables cibles générées au niveau système, les variables générées au niveau sous-système porteront l'exposant R pour « *response* ». Dans une architecture contenant plus de deux niveaux, une numérotation qui prend en compte le niveau et la numérotation des sous-systèmes doit être adoptée comme nous l'avons déjà expliqué au chapitre I.

Compte tenu des similitudes apparentes entre les différentes formulations et pour plus de clarté, nous présentons l'ensemble des formulations sur un cas à  $N_{Charges}$  au lieu du cas à une seule charge qu'on utilisait jusqu'à maintenant pour le chapitre II. Dans ce cas, le courant total du bus vu par la source est la somme des courants absorbés par tous les filtres des charges. On utilise les mêmes hypothèses sur le foisonnement des spectres présentées dans le chapitre II, il s'agit donc d'une somme d'amplitudes d'harmoniques.

$$[\mathbf{I}_{bus}]^T = \sum_{i=1}^{N_{Charges}} [\mathbf{I}_{L_i}]^T \quad \text{Eq III. 1}$$

### 3.2.2 Problème d'optimisation au niveau système

La fonction objectif au niveau système doit contenir l'objectif système, en l'occurrence ici la minimisation masse totale des filtres. Elle assure la cohérence entre les valeurs des cibles générées au niveau système et les réponses renvoyées par les optimisations locales (cf. Fig III. 3).

À chaque itération de l'algorithme d'optimisation système, l'optimiseur système génère des variables de décision qui sont les masses des sous-systèmes et les spectres de tension et de courant et les envoie en tant que « *cibles* » vers les sous-systèmes

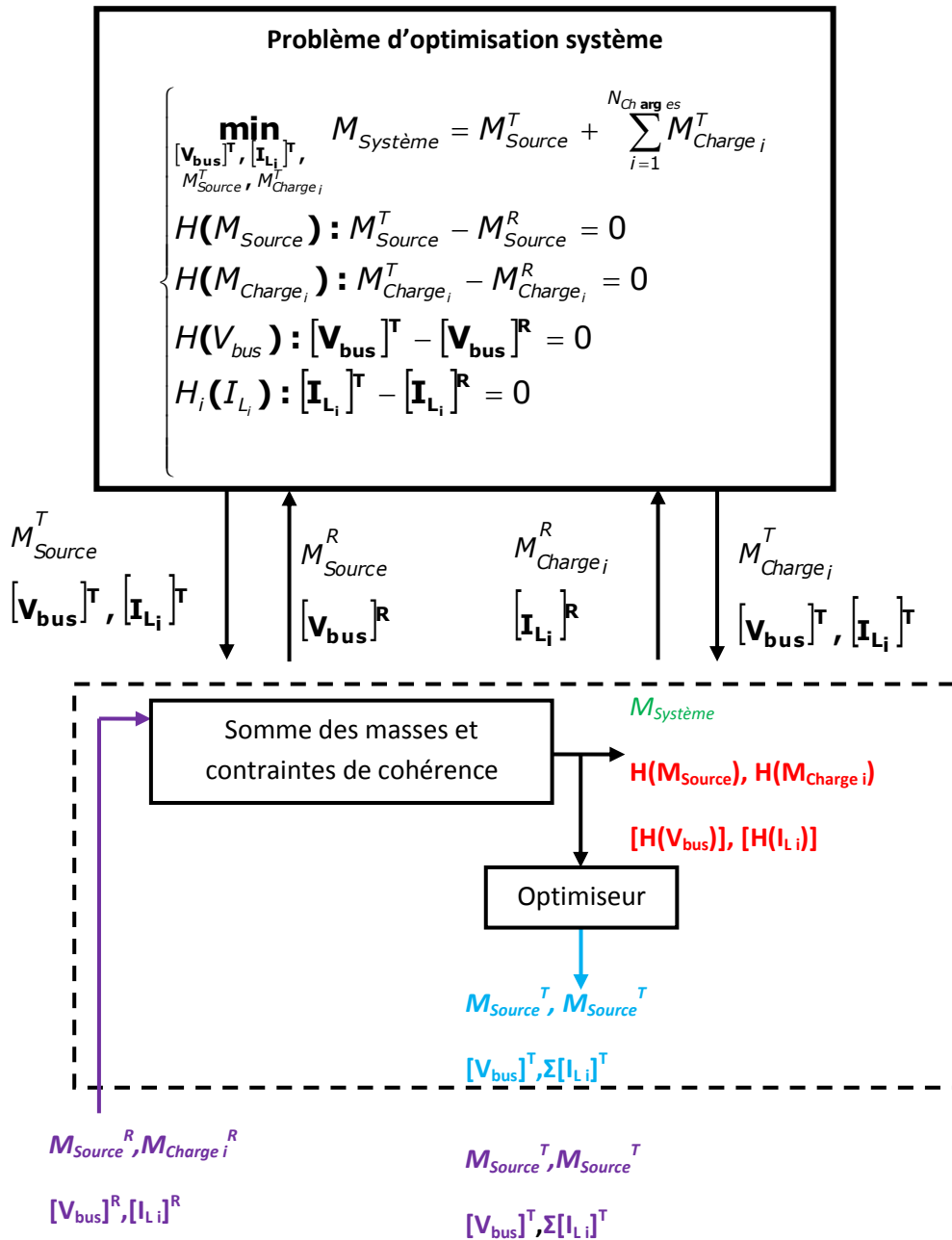


Fig III. 3 Description schématique du problème d'optimisation au niveau système

Chaque sous-système déroule une optimisation locale, guidée par les cibles reçues et renvoie à son tour un « spectre réponse »: l'optimisation de la source envoie un spectre de tension et la masse de la source localement optimisée et les optimisations des charges envoient des spectres de courants et les masses des charges localement optimisées.

### 3.2.3 Problèmes d'optimisation au niveau sous-système

#### 3.2.3.1 Le sous-problème d'optimisation de la source

Deux notions simultanément présentes sont à distinguer dans le sous problème d'optimisation de la source:

La première notion concerne les variables locales et les variables globales par rapport à la place du sous-problème dans l'architecture multiniveau. Les variables locales sont les variables propres au sous-problème qui ne sont pas reçues comme cible ni envoyées comme réponses (variables à l'intérieur du cadre en gras cf. Fig III. 4). Les variables globales sont les variables d'interface portant l'indice T ou celle portant l'indice R (à l'extérieur du cadre en gras Fig III. 4).

La deuxième notion concerne les entrées/sorties des modèles utilisées dans le sous-problème d'optimisation. Les entrées sont les variables de décision, les constantes du modèle et les données qui proviennent d'autres sous-systèmes (les flèches dans le sens rentrant par rapport au rectangle modèles Fig III. 4). Les sorties sont toutes les variables qui résultent du calcul d'optimisation : fonction objectif, contraintes...(Les flèches dans le sens sortant par rapport au rectangle modèles Fig III. 4).

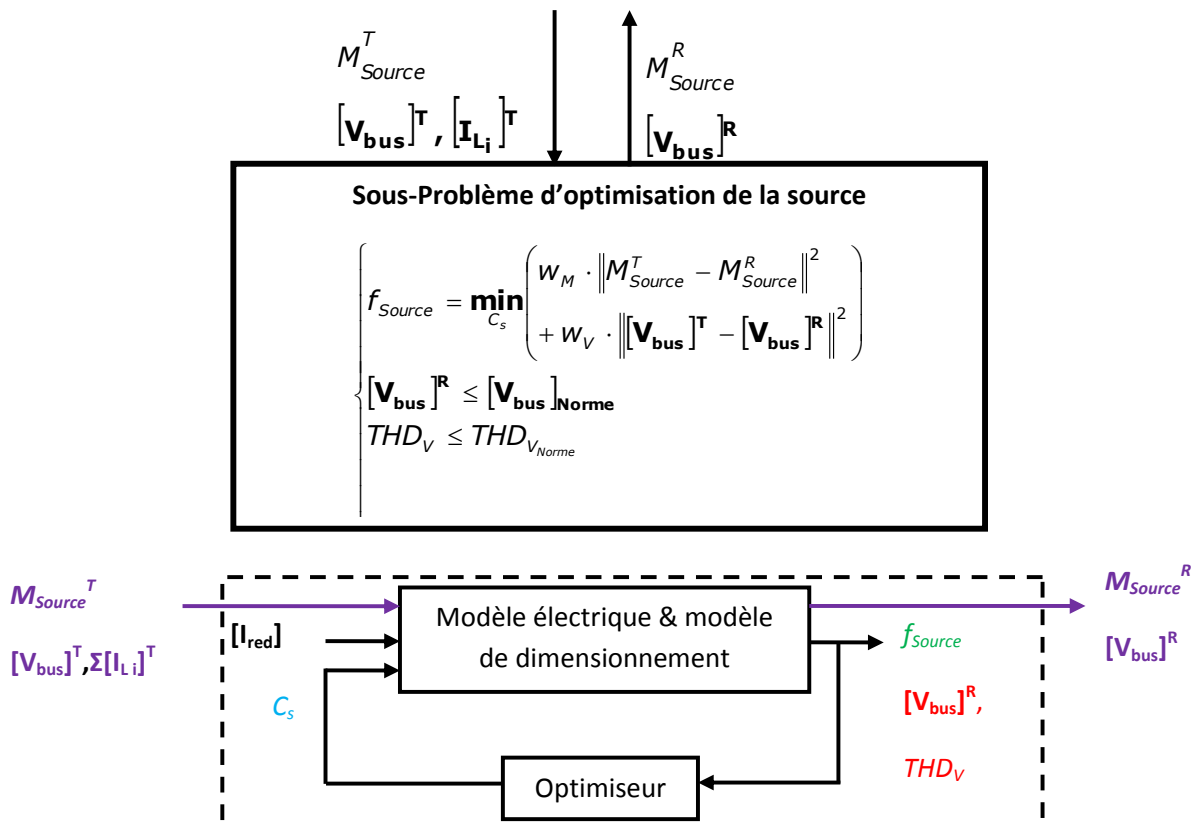


Fig III. 4 Description schématique du sous-problème d'optimisation de la source

Le problème d'optimisation local de la source cherche à minimiser l'écart entre les cibles et les réponses afin de faire correspondre l'optimisation locale autant que possible aux cibles spécifiées par le niveau « système ». Il comprend également les contraintes locales. On précise que dans cette première formulation, il n'y a pas de minimisation de la masse locale dans l'objectif sous-système, seulement le respect des cibles.

### 3.2.3.2 Le sous-problème d'optimisation de la charge<sub>i</sub>

Concernant les variables globales (situées en dehors du cadre en gras cf. Fig III. 5), les cibles sont la masse de la charge, le spectre de tension et le spectre du courant absorbé par cette dernière. Les réponses sont la valeur de la masse trouvée par l'optimisation et le spectre de courant calculé. Les variables locales sont toutes les autres variables (à l'intérieur du cadre en gras, cf. Fig III. 5)

Concernant les entrées/sorties du problème d'optimisation de la charge, les entrées des paramètres du filtre (variable de décision), le courant de l'onduleur et les cibles. Les sorties sont la fonction objectif, le taux de distorsion et les réponses que doit renvoyer le sous-problème au niveau système.

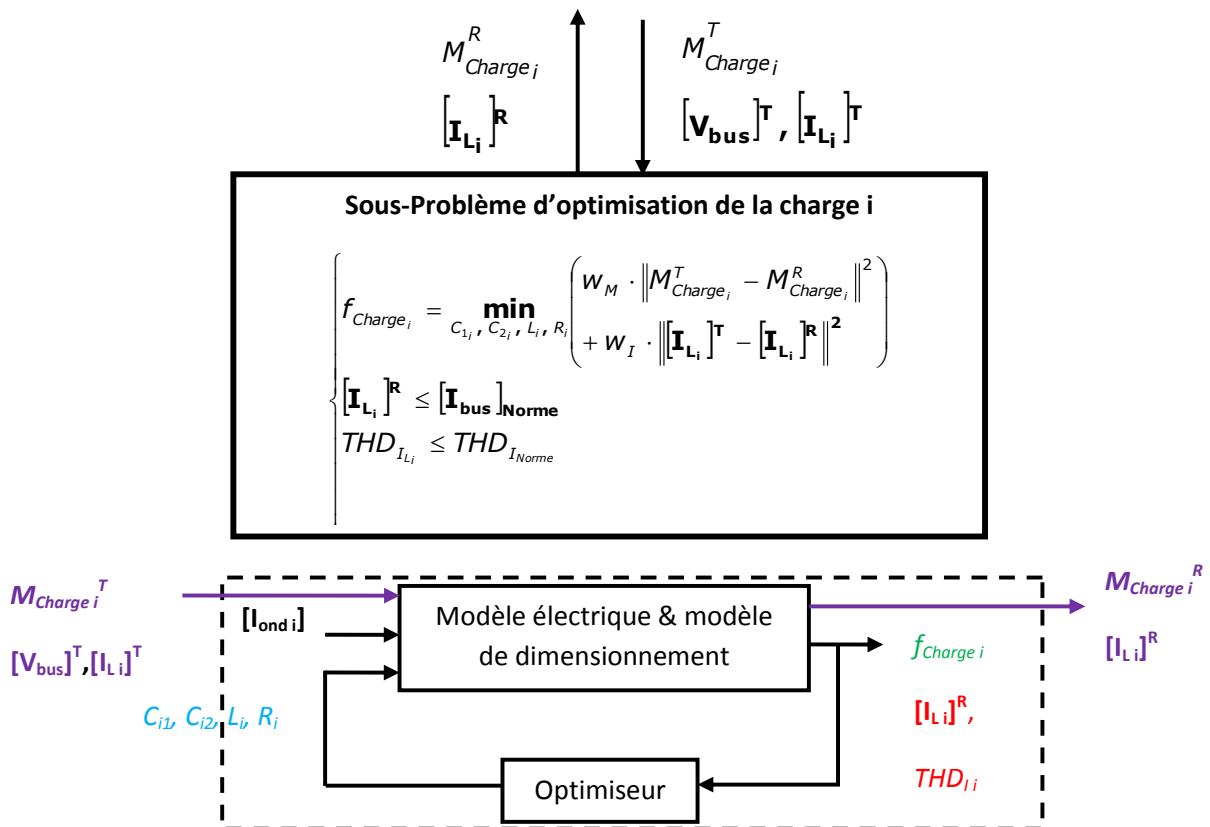


Fig III. 5 Description schématique du sous-problème d'optimisation de la charge

Le problème d'optimisation local de la charge cherche à minimiser l'écart entre les cibles et les réponses afin de faire correspondre l'optimisation locale autant que possible aux cibles du système. Il comprend également des contraintes locales. Comme dans

l'optimisation locale de la source, il n'y a pas de minimisation de la masse locale dans la fonction objectif.

### **3.2.4 Discussion sur la formulation du problème et sa complexité**

#### **3.2.4.1 Nombre de variables de décision système**

Au niveau local, les variables de décision sont les mêmes que dans les approches traditionnelles basées sur la décomposition (approche mécaniste, MFPE et approche collaborative séquentielle). On dénombrera donc ici seulement le nombre de variables de décision système.

La convergence du problème d'optimisation système dépend directement de ses variables de décision. Ces dernières sont les masses des sous-systèmes, le spectre de la tension et les spectres des courants absorbés par les filtres des charges. Rappelons que les spectres contiennent un nombre de fréquences caractéristiques  $N_{freq}$ . Pour un cas à  $N_{charges}$  il faudra générer au niveau système autant de spectres que de charges, en plus de la cible en termes de masse : soit un nombre de variables pour une charge égal à  $N_{freq}+1$ . Pour réseau composé d'une source et  $N_{charges}$ , on aura donc :

$$N_{Var.Déc}^{système} = (1 + N_{charges}) \cdot (N_{freq} + 1) \quad \text{Eq. III. 2}$$

Le nombre de variables de décision aura donc tendance à augmenter linéairement avec le nombre de charges et de fréquences caractéristiques du spectre.

#### **3.2.4.2 Position des contraintes de cohérence dans l'architecture et leur nombre**

Le critère d'arrêt de l'approche multiniveau repose sur la cohérence entre les différents niveaux du problème d'optimisation. Sans cela, les valeurs des fonctions objectives seront fortement pénalisées. Dans cette première formulation, la cohérence est gérée, tant au niveau système qu'au niveau des sous-systèmes (cf. Tab III. 1).



Tab III. 1 Répartition des contraintes de cohérence

Niveau		Nombre de contraintes d'égalité
Niveau système : tension, courants et masses		$N_{Var.Déc}^{système} = (1 + N_{charges}) \cdot (N_{freq} + 1)$
Niveau sous-système	Source : masse et spectre de la tension	$N_{Cont. Ega}^{s. s.} = N_{freq} + 1$
	Charge : masse et spectre du courant	$N_{Cont. Ega}^{s. s.} = N_{freq} + 1$

Le nombre de contraintes d'égalité au niveau sous-système dépend quant à lui uniquement des cibles pour lesquelles des réponses sont calculées par le sous-problème d'optimisation (soit la tension pour la source, soit le courant pour la charge) et de la masse. Nous aurons le même nombre de contraintes de cohérence dans tous les sous-problèmes vue que les mêmes fréquences sont considérées à chaque fois. Au niveau système, on va retrouver l'ensemble des contraintes de cohérence présentes dans les sous-problèmes, ce qui est très difficile à gérer par un optimiseur.

### 3.2.4.3 Nature des problèmes d'optimisation

Le problème d'optimisation système contient des contraintes d'égalité par rapport à tous les spectres générés et par rapport aux masses ; ceci engendre un problème multimodal non convexe.

Ce type de problème peut piéger les algorithmes de type gradient dont la convergence est locale. L'utilisation d'un algorithme d'optimisation globale comme un algorithme génétique est donc nécessaire. Cependant, le nombre important de variables de décision et de contraintes de cohérence limitera l'efficacité de ce type d'algorithme et conduira à un coût de calcul potentiellement important.

Au niveau sous-système, à chaque jeu de cibles envoyées par le niveau supérieur, l'optimiseur local s'efforcera de réduire l'écart entre les cibles et les réponses. Seulement, cette formulation impose au sous-système des contraintes d'égalité entre l'entrée (cible) et à la sortie (réponse) ce qui rompt le lien de causalité du modèle. Les cibles imposées par le niveau système peuvent ainsi s'avérer impossibles à satisfaire.

Par exemple, pour le sous problème source, les contraintes d'égalité entre cibles et réponses en tension s'expriment selon :

$$\begin{cases} [\mathbf{V}_{bus}]^R (C_s, [\mathbf{I}_{red}], [\mathbf{I}_{bus}]^T) = [\mathbf{V}_{bus}]^T \\ \omega = 2 \cdot \pi \cdot f, f \in \{f_1, f_2, f_3, f_4\} \end{cases} \quad \text{Eq. III. 3}$$

$\Rightarrow 4 \text{ équations à } 1 \text{ inconnue } C_s$

Il est très rare que cette équation admette une solution, il est nécessaire pour cela que les valeurs des cibles envoyées par le niveau système –qui n'a aucune information

sur la topologie du filtre et donc l'atténuation de celui-ci- le permette. Lorsque c'est le cas, seul un algorithme global (génétique par exemple) peut la trouver mais lors de la plupart des itérations, aucune solution n'existe et une masse pénalisée indique au niveau système que ses cibles ne peuvent conduire -localement- à aucune solution Eqt III. 4.

$$w_V \cdot \left\| [\mathbf{V}_{bus}]^T - [\mathbf{V}_{bus}]^R \right\| = w_V \cdot \sum_f \left( V_{bus_f}^T - V_{bus_f}^R (C_s, I_{bus_f}^T) \right) \quad \text{Eq. III. 4}$$

De plus, à cause des contraintes d'égalité incorporées dans les fonctions objectifs locales qui les rendent fortement multimodale et non convexes, il est nécessaire là aussi d'avoir recours à des algorithmes d'optimisation stochastiques gourmands en temps de calcul et très vulnérables aux contraintes d'égalité.

Sachant qu'à chaque itération de l'algorithme d'optimisation système (qui lui-même nécessite un nombre élevé d'évaluations) on doit lancer des optimisations locales très lourdes, on aboutit rapidement à une explosion combinatoire qui rend cette première formulation inadaptée à notre cible d'application.

## **3.3 Formulation basée sur l'encapsulation**

### **3.3.1 Le concept d'encapsulation**

L'encapsulation d'un problème d'optimisation signifie la transformation d'un problème d'optimisation en une fonction. Autrement dit, on essaye de transformer un problème inverse (problème d'optimisation) en un problème direct. Cette idée nous a été inspirée en consultant les travaux de [MAG 04], où il était question de dimensionner un filtre ADSL avec une limitation de la fonction de transfert par un gabarit sur une certaine gamme de fréquences. Au lieu de contraindre la fonction de transfert pour toutes les fréquences, seul le maximum de cette fonction de transfert était contraint. Il fallait donc encapsuler un problème d'optimisation (la recherche du maximum de la fonction de transfert) dans le problème d'optimisation de départ (dimensionnement d'un filtre ADSL)

$$Ft_{dB}(f) \leq A \text{ lorsque } f \in [f_1, f_2]$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} f_{\max} = \max_{f \in [f_1, f_2]} Ft_{dB}(f) \text{ (encapsulation)} \\ f_{\max} \leq A \end{cases} \quad \text{Eq. III. 5}$$

Dans notre cas, il s'agit d'encapsuler les sous-problèmes d'optimisation dans des fonctions *c.à.d.* encapsuler les modèles de dimensionnement, l'algorithme d'optimisation

et un cahier des charges dynamique pour faire correspondre à un jeu de cibles donné une solution en termes de dimensionnement local.

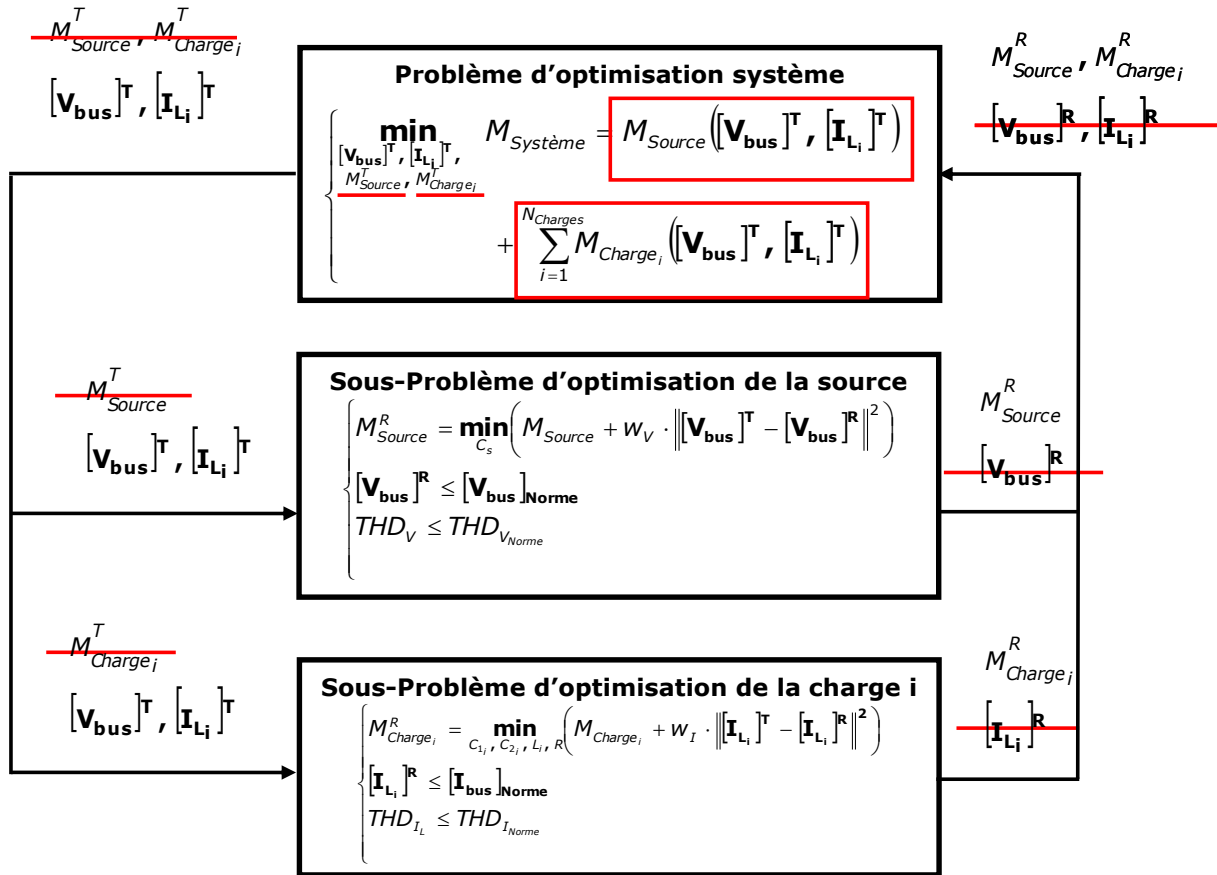


Fig III. 6 Schéma de la formulation basée sur l'encapsulation des sous-problèmes

Cela modifie la première formulation en limitant le dédoublement des variables entre les niveaux (on n'envoie plus des cibles en masse, mais les masses sont le résultat de l'encapsulation). Le deuxième avantage est la réduction du nombre de contraintes d'égalité de cohérence en les traitant une seule fois (soit au niveau système, soit au niveau sous-système). Dans cette deuxième formulation, nous avons choisi de les traiter au niveau sous-système, l'idée étant de les répartir sur des petits problèmes locaux, au lieu d'avoir à les gérer toutes au niveau système (cf. Fig III. 6).

### 3.3.2 Problème d'optimisation au niveau système

Dans cette formulation, le problème d'optimisation système ne génère que des cibles de pollution harmonique. Les valeurs des masses sont le résultat de fonctions qui encapsulent les optimisations des sous-problèmes, et le problème système s'en retrouve largement simplifié. La fonction objectif est la minimisation de la masse totale qui est la somme des masses des charges par action sur les cibles des sous-problèmes (cf. Fig III. 7).

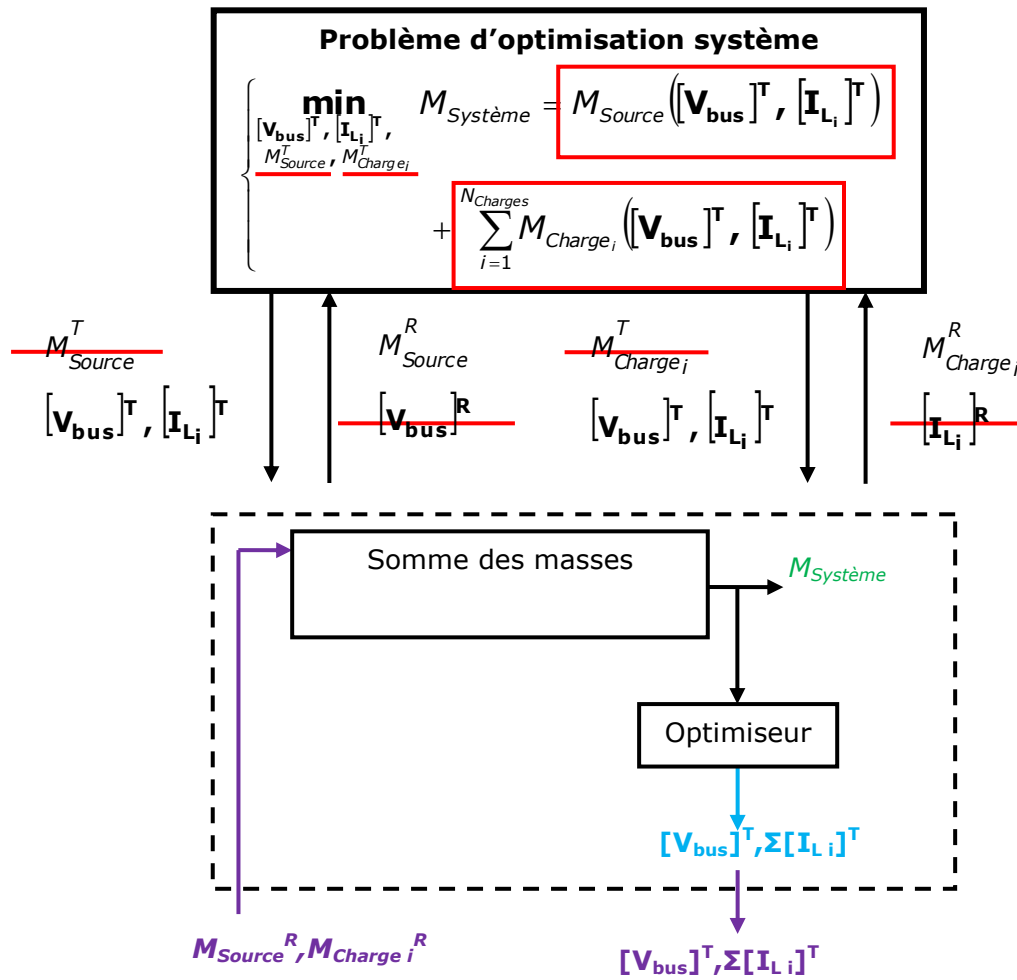


Fig III. 7 Description schématique du problème d'optimisation au niveau système

### 3.3.3 Problèmes d'optimisation au niveau sous-système

#### 3.3.3.1 Sous-problème d'optimisation de la source

L'encapsulation du sous-problème d'optimisation de la source permet d'exprimer la minimisation de la masse dans la fonction objectif. La fonction objectif comprend donc la masse du filtre de la source pénalisée par des termes qui doivent assurer la cohérence entre les cibles et les réponses de la pollution harmonique en tension (cf. Fig III. 8).

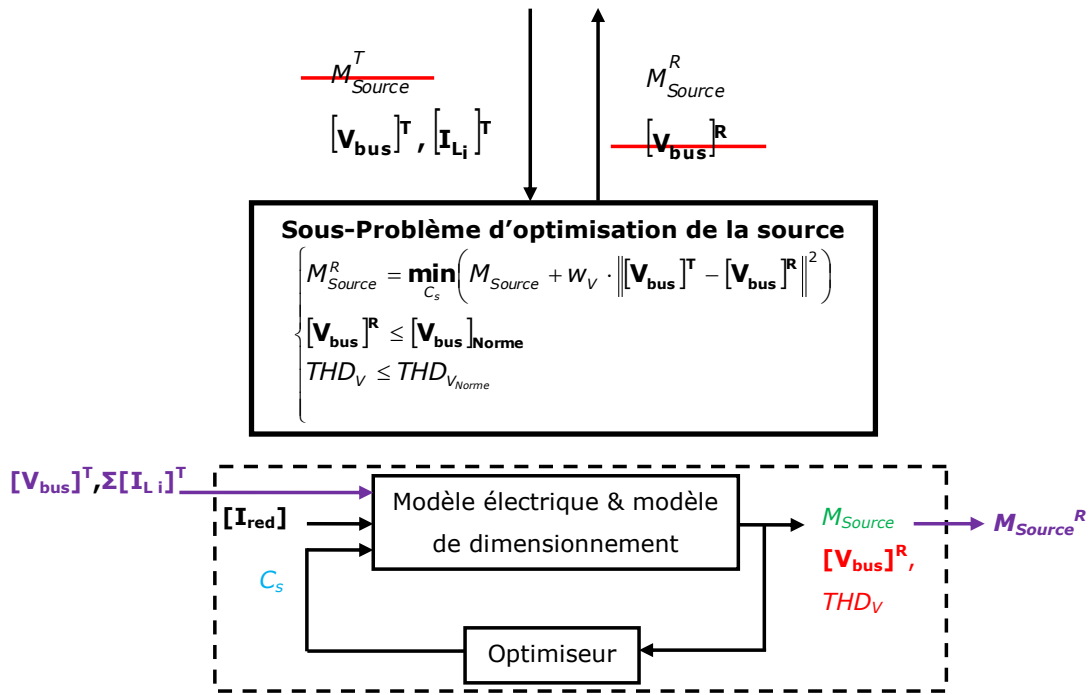


Fig III. 8 Description schématique du sous-problème d'optimisation de la source

### 3.3.3.2 Sous-problème d'optimisation de la charge

Comme pour le sous-problème de la source, l'optimisation locale de la charge cherche à minimiser sa masse locale en respectant les contraintes de cohérence entre cibles et réponses (cf. Fig III. 9).

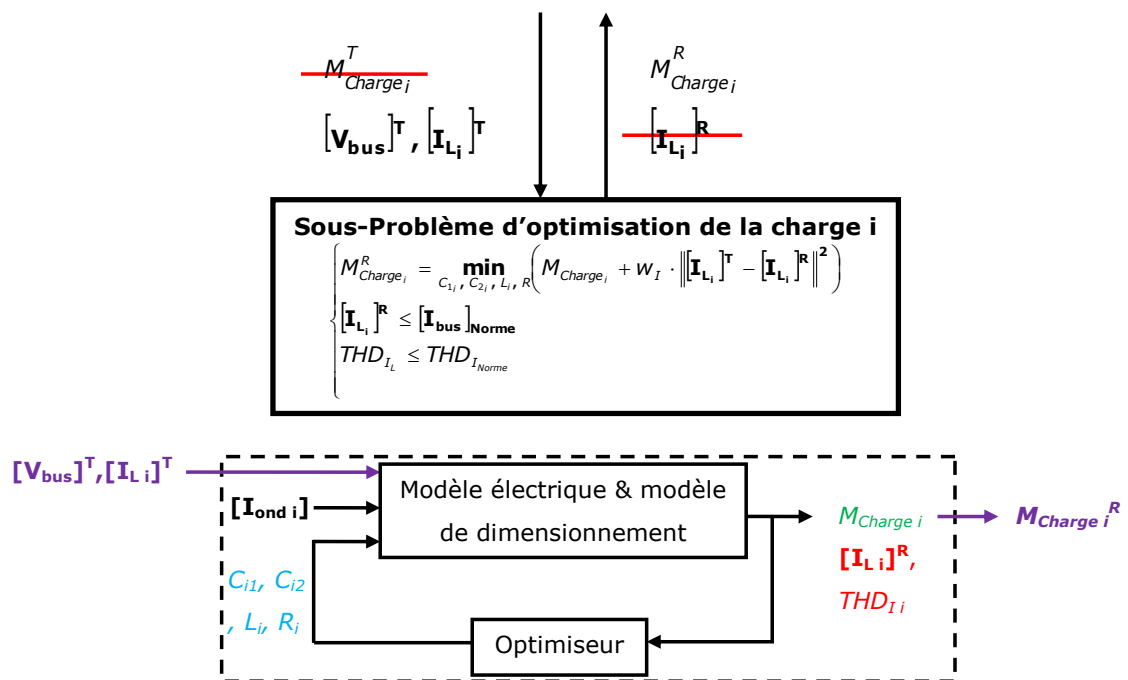


Fig III. 9 Description schématique du sous-problème d'optimisation de la charge

### 3.3.4 Discussion sur la formulation du problème et sa complexité

Le nombre de variables de décision diminue par rapport à la formulation par ATC, puisqu'il n'y a plus de cibles envoyées pour les masses. Cependant, on retrouve l'augmentation linéaire du nombre de variable de décision car elle dépend des cibles sur les spectres.

$$N_{Var.Déc}^{système} = (1 + N_{charges}) \cdot N_{freq} \quad \text{Eq. III. 6}$$

#### 3.3.4.1 Position des contraintes de cohérence dans l'architecture multiniveau et leur nombre

La cohérence entre les niveaux est allégée puisqu'elle n'est gérée qu'au niveau sous-système. Ceci permet d'éviter les contraintes d'égalité dans la fonction objectif système.

Cependant, vu que le niveau sous-système reçoit toujours des cibles sur des entrées et des sorties simultanément, le problème d'incompatibilité évoqué dans la formulation précédente persiste. De plus, un point faible de cette formulation, et qu'on n'avait pas lors de la formulation précédente, est que l'optimiseur système reçoit une seule information de chaque sous-système (la masse pénalisée), il n'a donc pas d'information sur la variable de décision (harmonique du spectre fréquence par fréquence) qu'il faut modifier pour faire converger les sous-problèmes d'optimisation localement.

#### 3.3.4.2 Nature des problèmes d'optimisation

Le problème d'optimisation système s'allège par rapport à l'ATC avec moins de variables de décision et sans contrainte d'égalité. Cependant, la fonction objectif reste non convexe et multimodale en raison des expressions des masses des sous-systèmes pénalisées. L'utilisation d'algorithmes globaux reste donc nécessaire.

Au niveau sous-système, il n'y a aucun changement. Les fonctions objectifs sont non convexes et multimodales ce qui nécessitent des algorithmes stochastiques très gourmands en temps de calcul. Ceci pénalise fortement le concept d'encapsulation, les algorithmes génétiques qui sont des algorithmes stochastiques peuvent converger vers différentes solutions en ayant le même jeu de cible ce qui trouble l'optimiseur système.

## **3.4 Formulation multiniveau causale et agrégée**

### **3.4.1 Agrégation et liens de causalité**

L'encapsulation nous a permis de diviser par deux les variables à chaque niveau en limitant les contraintes d'égalité au seul niveau équipementier. Cependant, trois freins subsistent encore avec cette formulation :

- Le problème des cibles contradictoires,
- Le nombre de variables de décision qui augmente avec le nombre de charges,
- Les contraintes d'égalité sur tous les sous-systèmes,

En analysant de près les causes de ces problèmes, on se rend compte qu'ils ont la même origine: les spectres en courant de chaque charge. Ces spectres sont des sorties des problèmes d'optimisation des charges qui ne doivent donc pas être imposées en tant que cibles, pour des raisons de causalité (dans les modèles électriques des filtres de la charge, le courant est une sortie cf. Eq. II. 6 et Eq. II. 9) mais aussi d'explosion combinatoire vis-à-vis du nombre de charges connectées au réseau électrique. On propose donc de les supprimer au niveau des sous-problèmes des charges.

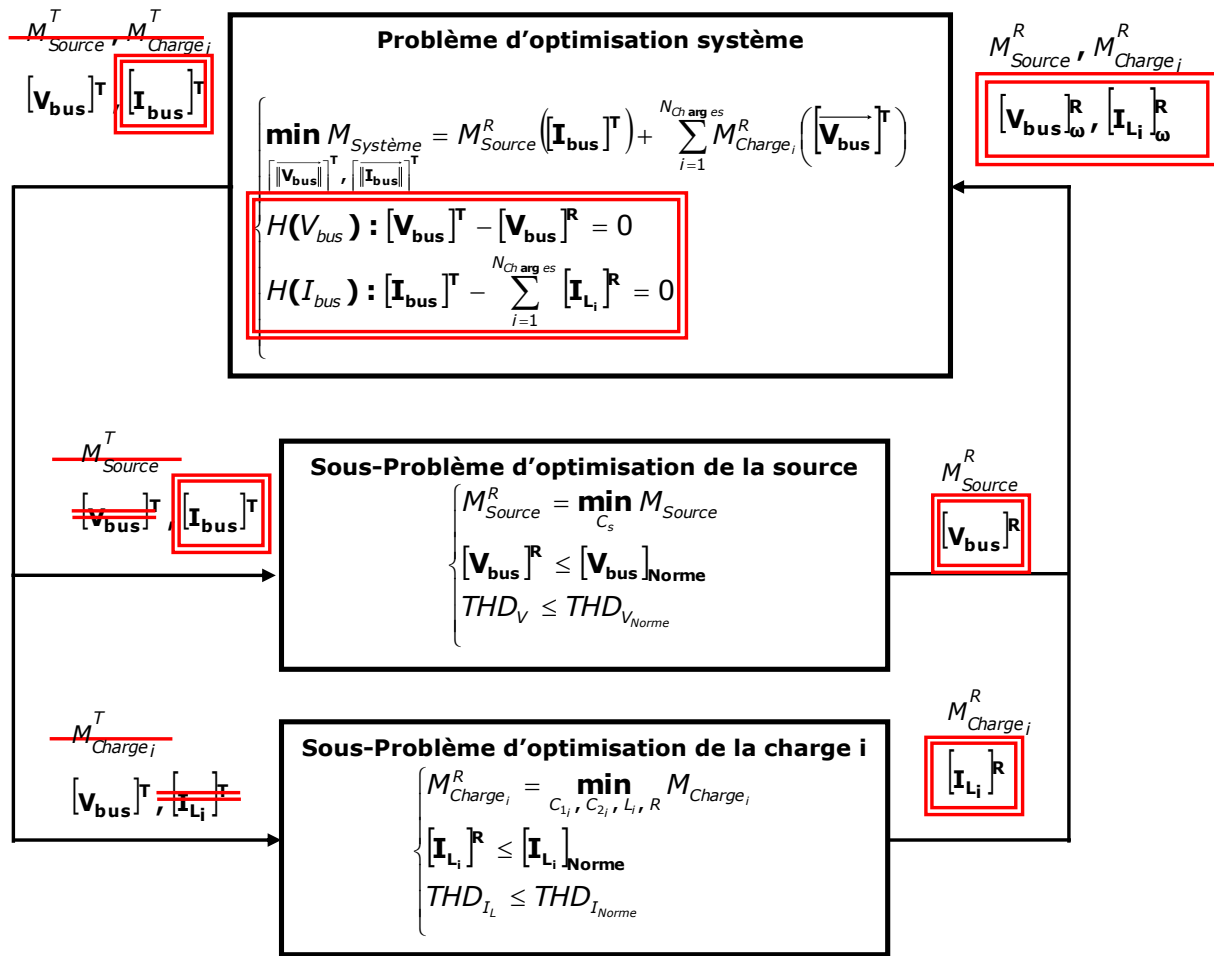


Fig III. 10 Formulation multiniveau agrégée et causale

Concernant l'optimisation de la source, elle a besoin d'une cible en termes de pollution harmonique du courant de bus, cette cible constituant bien une entrée du « modèle source » du point de vue de la causalité. Pour cela, il suffit de générer un spectre du courant total du bus car c'est la contrainte agrégée à laquelle la source est confrontée: c'est donc là que doit intervenir l'agrégation des courants absorbés du bus (cf. Eq. III. 1), ce qui supprime la dépendance entre nombre de charges et complexité de formulation du problème d'optimisation du réseau complet.

Cette modification suppose un déplacement des contraintes d'égalité vers le niveau système car c'est là où nous avons la double information agrégée, portant sur la tension et le courant de bus. Cela a l'avantage de « soulager » les sous-problèmes d'optimisation des contraintes de cohérence. Cela simplifie énormément ces sous-problèmes et en facilite l'encapsulation. Les seules contraintes d'égalité sont cantonnées au niveau système qui joue bien là son rôle majeur de « chef d'orchestre » au sein de cette nouvelle « formulation multiniveau agrégée et causale » (cf. Fig III. 10).



### 3.4.2 Problème d'optimisation au niveau système

Les variables de décision au niveau système sont le spectre de la tension de bus et le spectre du courant total dans le bus. Le retour de l'encapsulation de la source dépend uniquement de la cible sur le courant du bus, celui de l'encapsulation de la charge dépend de la cible sur le spectre de la tension (cf. Fig III. 11).

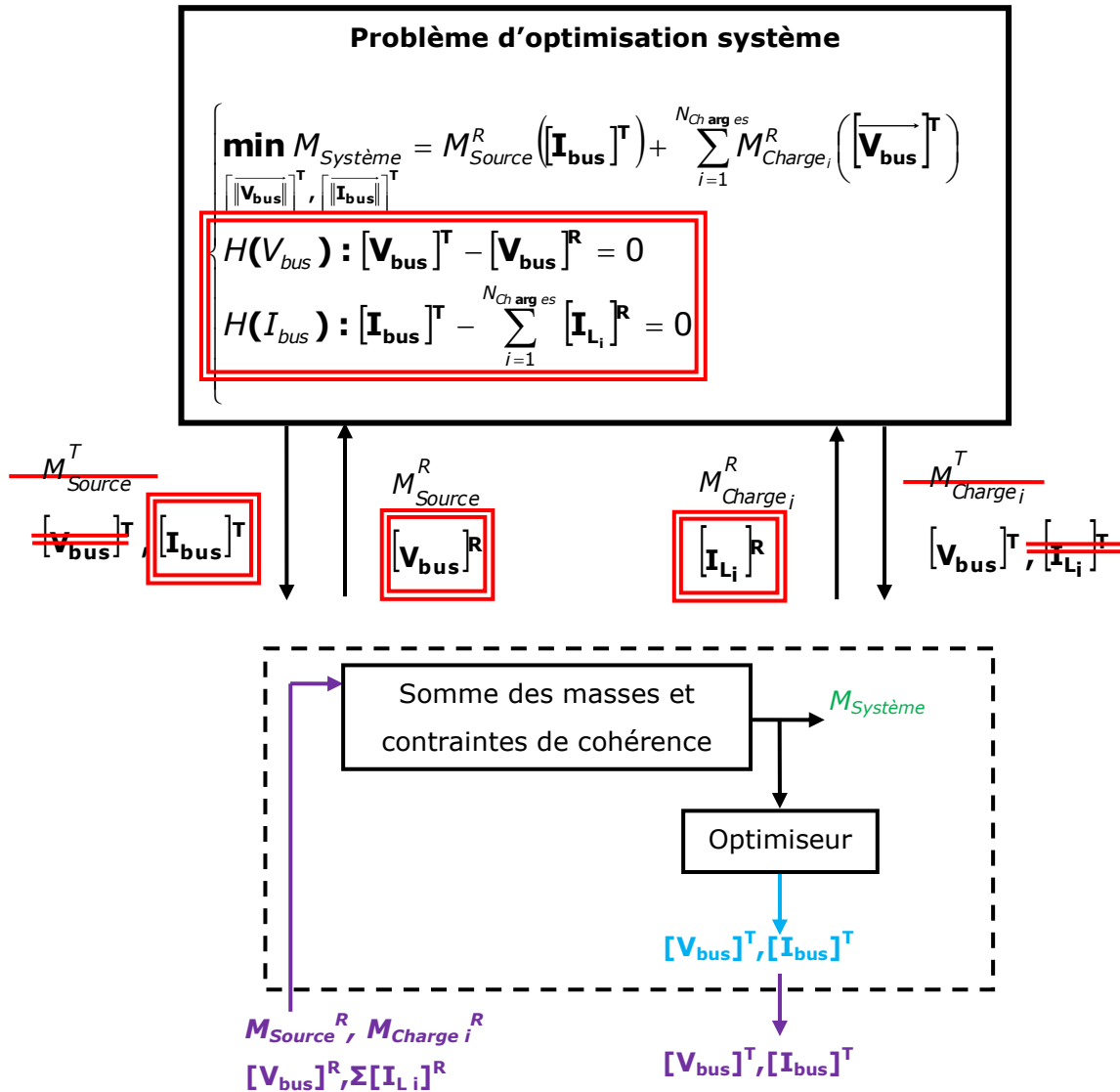


Fig III. 11 Description schématique du problème d'optimisation système

### 3.4.3 Problèmes d'optimisation au niveau sous-système

Au niveau sous-système, les variables globales de type cible concernent les entrées (spectre du courant de bus) et les variables globales de types réponses sont des sorties (masse et spectre de la tension), on respecte ainsi la causalité entrées/sorties qui s'exprime aussi en cibles/réponses.

Il n'y a plus de cohérence à gérer au travers de contraintes d'égalités. Les sous-problèmes d'optimisation se limitent à la minimisation de la masse locale, compte tenu des cibles en entrées (tension ou courant de bus). Débarrassés des cibles sur les sorties, la fonction objectif redevient ce qu'elle était dans l'approche mécaniste.

### 3.4.3.1 Sous-problème d'optimisation de la source

Le sous-problème d'optimisation de la source reçoit une cible sur la pollution harmonique du courant de bus, un peu comme dans l'approche mécaniste sauf que cette cible n'est plus la norme mais une pollution dynamique, c'est-à-dire un niveau de courant harmonique à atteindre. Le sous-problème trouve alors la masse du filtre source minimale en respectant les contraintes locales de la norme sur la tension du bus. Pour chaque cible de pollution harmonique en courant, une solution de filtrage existe pour la source (au pire la solution de l'approche mécaniste), grâce à la suppression des termes de pénalité qui n'existent plus dans cette formulation (cf. Fig III. 12).

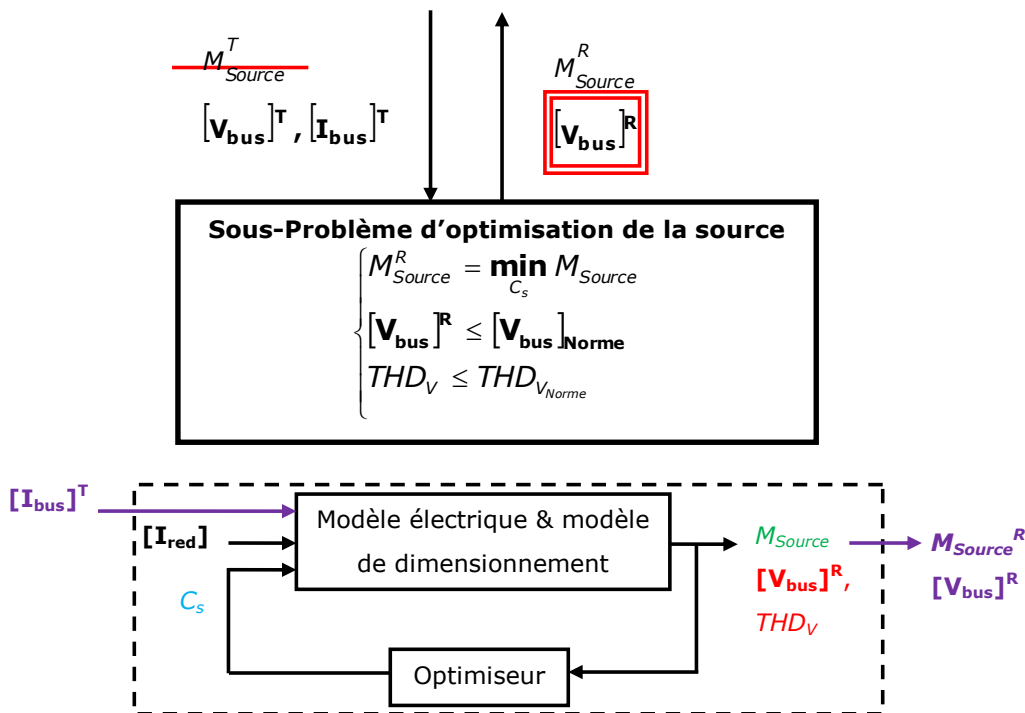


Fig III. 12 Description schématique du sous-problème d'optimisation de la source

### 3.4.3.2 Sous-problème d'optimisation de la charge

Le sous-problème d'optimisation de la charge est le dual du sous-problème d'optimisation de la source. Les charges reçoivent la même cible de pollution en tension de bus qui est une entrée causale du modèle des charges. Le sous problème d'optimisation dimensionne les paramètres du filtre d'entrée pour minimiser leurs masses

et renvoient en sortie des réponses sous-forme de participations à la pollution en courant du bus.

Ce processus est donc parfaitement causal et non « *sur constraint* », c'est-à-dire qu'une solution de dimensionnement de filtre existe pour chaque cible de pollution en tension, même si cette solution peut être plus ou moins massive (cf. Fig III. 13).

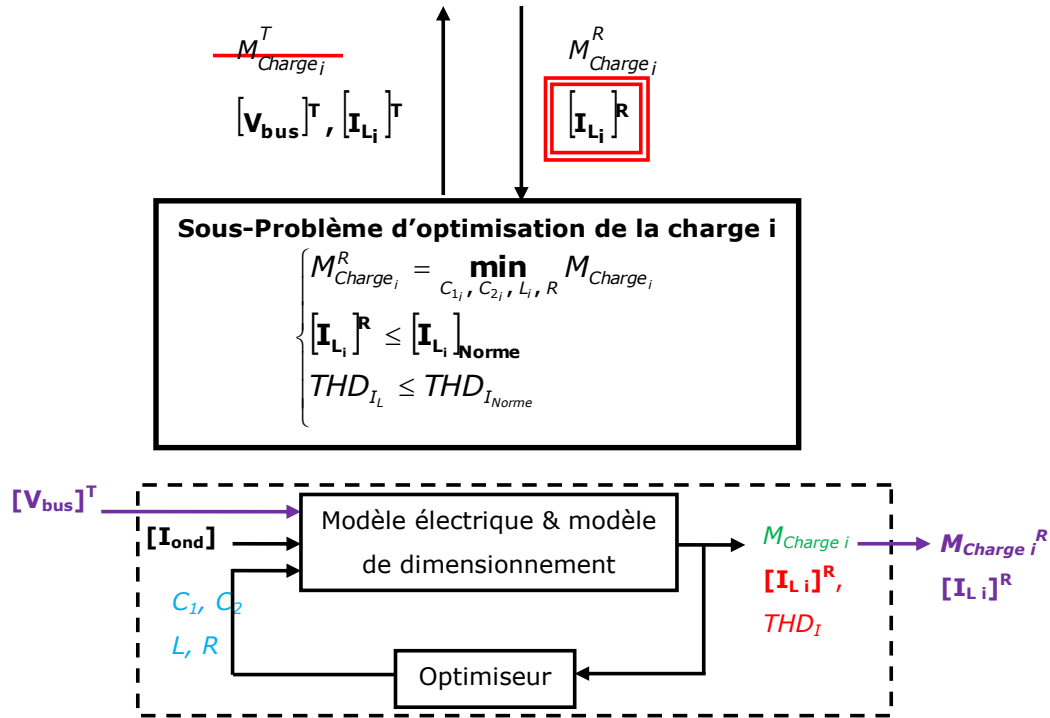


Fig III. 13 Description schématique du sous-problème d'optimisation de la charge

### 3.4.4 Discussion sur la formulation du problème et sa complexité

#### 3.4.4.1 Nombre de variables de décision

Au niveau système, les variables de décision sont des grandeurs agrégées : la tension de bus, commune à toutes les charges et le courant total sur le bus. Le nombre de variables de décision ne dépend donc plus du nombre de charges, la seule dépendance étant inhérente au nombre de fréquences caractéristiques du spectre ( $N_{freq}$ ) C'est le premier point fort de cette formulation qui est « *agrégée* », donc robuste face aux cas d'étude réels contenant un nombre important de charges.

$$N_{Var.Déc}^{système} = 2 \cdot N_{freq} \tag{Eq III. 7}$$

#### **3.4.4.2 Position des contraintes de cohérence dans l'architecture multiniveau et leur nombre**

La cohérence, via les équations de contraintes d'égalité, est gérée au niveau système, il s'agit de vérifier que la même tension fournie par la source est vue par toutes les charges et que la loi des nœuds est respectée. Grace à cela, le nombre de contraintes d'égalité est constant et ne dépend plus que des fréquences harmoniques caractéristiques, choisies pour l'optimisation. Au niveau sous-système il n'y a plus de contrainte d'égalité.

#### **3.4.4.3 Nature des problèmes d'optimisation**

Au niveau système, le problème d'optimisation est non convexe et potentiellement multimodal mais le nombre de variables de décision est constant et réduit par rapport au nombre de charges. L'optimiseur reçoit les réponses en termes de masse et de spectres, il sait fréquence par fréquence quel harmonique respecte ou non la contrainte de cohérence ce qui lui permet de générer à l'itération suivante la bonne valeur de cible correspondante.

Au niveau sous-système, les problèmes d'optimisation redeviennent de simples optimisations de filtres sans contraintes d'égalité et sans contradiction entre les valeurs des cibles. À chaque cible, une solution faisable existe, on peut donc utiliser des algorithmes déterministes (locaux et rapides), comme ceux qu'on utilisait jusque-là pour les approches du chapitre précédent. Cela augmente la rapidité de convergence des optimisations des sous-systèmes et au global de l'optimisation multiniveau. Cela garantit aussi que pour un jeu de cibles donné, la solution soit unique et assure donc à l'optimiseur système une visibilité sur les conséquences des cibles générées.

### **3.4.5 Résolution multiniveau du problème d'optimisation**

Nous proposons dans cette partie la résolution multiniveau du problème de conception optimal du réseau à deux filtres proposé comme cas d'étude simplifié. Nous utilisons la formulation agrégée dont on vient de présenter les avantages.

#### **3.4.5.1 Problème d'optimisation au niveau système**

Dans nos implémentations nous avons utilisé un algorithme génétique à éclaircissement [PET 96] avec nichage [SAR 98] particulièrement performant pour résoudre des problèmes d'optimisation multimodaux et non convexe. Cette algorithme

utilise notamment une procédure de recombinaison auto-adaptative dont le principe avait été introduit dans les références [SAR 04], [NGU 08c].

A chaque itération, l'algorithme génère deux spectres : un pour la tension et un pour le courant du bus. Ces spectres sont normalisés dans l'algorithme d'optimisation afin de ramener les valeurs des harmoniques des deux spectres entre [0,1].

Les contraintes d'égalité sont transformées en contraintes d'inégalité moyennant une tolérance  $\varepsilon$  de l'ordre de 1%. Cet artifice permet de faciliter leur traitement par l'algorithme d'optimisation, ici un algorithme génétique.

$$\begin{cases} H_V : [\mathbf{V}_{bus}]^T - [\mathbf{V}_{bus}]^R = 0 \\ H_I : [\mathbf{I}_{bus}]^T - \sum_{i=1}^{N_{Ch\ arg\ es}} [\mathbf{I}_{L_i}]^R = 0 \end{cases} \quad \text{Eq III. 8}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} G_V : |[\mathbf{V}_{bus}]^T - [\mathbf{V}_{bus}]^R| \leq \varepsilon \cdot [\mathbf{V}_{bus}]_{Norme} \\ G_I : |[\mathbf{I}_{bus}]^T - \sum_{i=1}^{N_{Ch\ arg\ es}} [\mathbf{I}_{L_i}]^R| \leq \varepsilon \cdot [\mathbf{I}_{L_i}]_{Norme} \end{cases}$$

L'optimiseur système calcule la masse totale et gère les contraintes d'inégalité. Le processus est itératif jusqu'à ce que les contraintes soient satisfaites

### 3.4.5.2 Processus itératif et critère d'arrêt

Le critère d'arrêt est celui de l'optimiseur système. En effet, l'optimiseur système résout un problème d'optimisation classique ; il génère des variables de décision et évalue une fonction objectif et des contraintes. Puisqu'il utilise un algorithme génétique, il définit une fonction objectif qui agrège les contraintes avec des coefficients de pénalité. L'optimisation converge lorsque la valeur de cette fonction objectif devient constante.

### 3.4.5.3 Convergence vers la solution système

L'algorithme génétique pour l'optimisation système utilise la technique de pénalisation de la fonction objectif pour satisfaire les contraintes d'inégalité. Le coefficient de pénalisation est de  $10^{20}$ , il est multiplié par le niveau de violation des contraintes non respectées.

Lors des premières itérations, les contraintes ne sont pas respectées, d'où une masse pénalisée. À chaque génération, les contraintes sont de mieux en mieux satisfaites. La masse diminue jusqu'à une itération où on observe un saut de convergence qui correspond à l'itération non pénalisée, où toutes les contraintes d'égalité sont respectées.

La figure Fig III. 14 montre la convergence de l'algorithme système vers la solution optimale. Nous avons obtenu ce résultat avec un nombre d'individus égal à 8 et un nombre de générations égale à 91 (un paramétrage relativement faible).

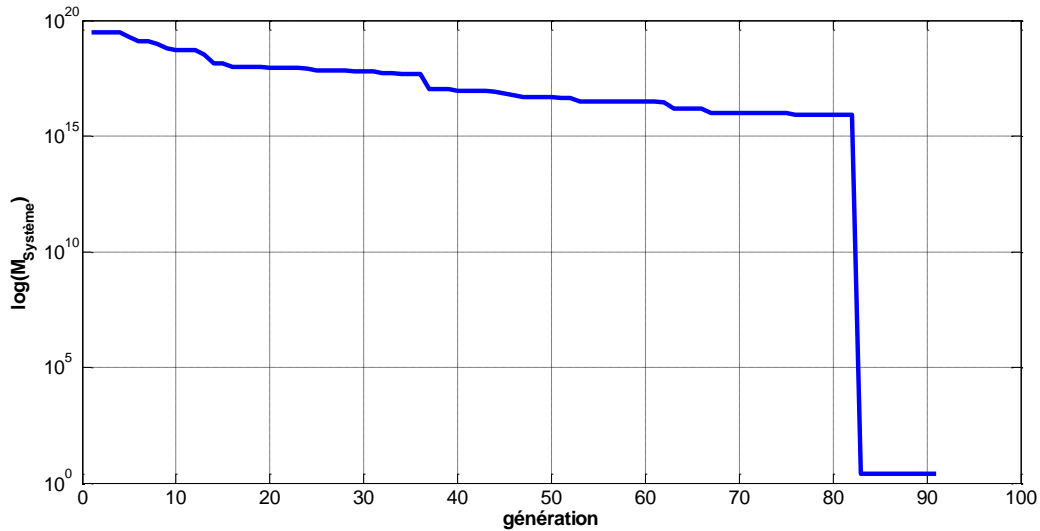


Fig III. 14 Convergence de l'algorithme système

Nous avons effectué plusieurs optimisations multiniveaux pour trouver le réglage optimal qui permet d'obtenir la convergence et pour la caractériser au mieux. On peut agir sur les nombres d'individus et de générations maximaux. Il faut également observer le temps de calcul qui augmente avec le nombre de générations mais aussi lorsque le nombre d'individus augmente.

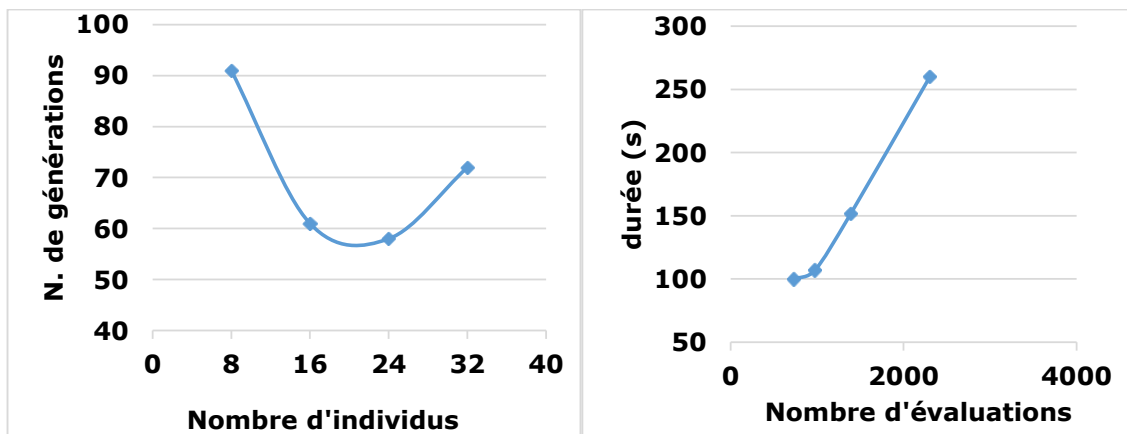


Fig III. 15 Paramétrage de l'algorithme génétique (à gauche : nombre moyen de génération avant convergence en fonction du nombre d'individus, à droite : durée moyenne de l'optimisation multiniveau)

Lorsqu'on augmente le nombre d'individus, le nombre de générations moyen pour obtenir une convergence diminue car la capacité d'exploration augmente (nous avons effectué 10 optimisations à chaque fois). Cette tendance s'inverse ensuite, un nombre d'individus trop élevé engendre une dispersion de l'algorithme génétique ce qui gêne la convergence.

Concernant la durée de l'optimisation, elle augmente puisqu'elle dépend du nombre total d'évaluations qui est le produit du nombre d'individus et du nombre de génération.

#### 3.4.5.4 Réglage de la tolérance

Le coefficient de tolérance  $\epsilon$ , par rapport à la norme, est un paramètre qu'on fixe pour considérer si les contraintes d'égalités sont respectées ou pas Eqt III. 8.

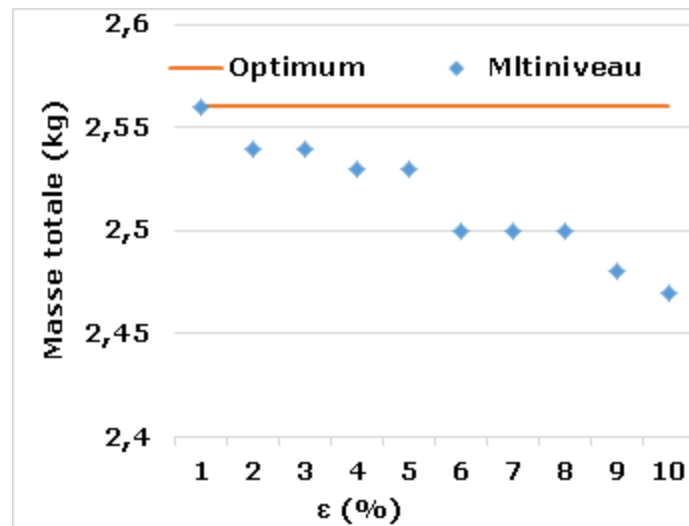


Fig III. 16 Décalage de la solution optimale en fonction de la tolérance

Avec une tolérance de 1% on retrouve le résultat optimal qu'on avait obtenu avec l'approche globale. Si la tolérance est trop élevée, la masse optimale diminue à cause du relâchement sur les harmoniques critiques par rapport à la norme (cf. Fig III. 16).

## 3.5 Conclusion

On rappelle ici le bilan comparatif du chapitre II, en le complétant par les résultats de l'approche multiniveau sur la formulation agrégée. Le niveau de collaboration de l'approche multiniveau est le même que celui de la MFPE ou de l'approche collaborative séquentielle, puisqu'on n'échange que des spectres.

*Tab III. 2 Performances de l'approche multiniveau par rapport aux approches précédentes<sup>2</sup>*

approche	Masse Totale (kg)	Temps de calcul (s)	Collaboration
Approche mécaniste	4.41	0.183	Minimale
MFPE	2.69	6282	Faible
Approche collaborative séquentielle	2.91	0.678	Moyenne
Approche globale	2.56	0.399	Totale
<b>Approche Multiniveau</b>	<b>2.56</b>	<b>100</b>	<b>Moyenne</b>

En termes de résultat sur la masse du réseau, l'approche multiniveau fait aussi bien que l'approche globale qui pourtant n'est pas une option faisable compte tenu de la collaboration totale qu'elle nécessite entre les équipementiers. Elle domine la MFPE puisqu'elle permet de trouver la masse optimale avec un coût de calcul largement inférieur. Par rapport à l'approche mécaniste et à l'approche collaborative séquentielle, le coût de calcul est supérieur mais reste justifié au regard de la solution optimale trouvée (cf. Tab III. 2).

---

<sup>2</sup> Intel® Core(TM) i5-3317U CPU @ 1.70GHz, avec 6GB de RAM, sur Windows 8.1 64-bit



## **Chapitre 4**

# **Optimisation des filtres d'un réseau électrique aéronautique**

## **4.1 Introduction**

Ce dernier chapitre est dédié au dimensionnement optimal d'un réseau électrique aéronautique 200 kVA proche de celui que nous pouvons retrouver dans un réseau d'un avion plus électrique, même si le nombre de charges qui participent au « périmètre d'optimisation collaborative » est réduit à deux, compte tenu des données à notre disposition.

Nous allons donc commencer par présenter le cas d'étude un peu comme nous l'avons fait avec le cas simplifié. Nous allons montrer comment évolue la description de chaque sous-système par rapport à des données issues des équipementiers aéronautiques ; ces données posent notamment le problème des spectres plus denses en termes de représentation fréquentielle, ce qui tend à complexifier le processus d'optimisation multi niveau avec la formulation proposée dans le chapitre 3 (le nombre de variable de décision est linéairement dépendant du nombre de fréquences caractéristiques du système). Pour rappel, dans cette formulation, les fréquences caractéristiques du système sont fixes et connues par l'ensemble des équipementiers car la formulation multiniveau est basée sur la communication des amplitudes des harmoniques de tension et de courant à ces fréquences-là.

Afin de traiter ce problème de spectres avec, nous introduirons donc le concept d'éclaircissement de fréquences. Nous avons avancé lors de la présentation du cas d'étude simplifié l'idée qu'un nombre très réduit d'harmoniques influence réellement sur le dimensionnement des filtres (Chapitre 2). Nous allons exprimer des critères de réduction du nombre de fréquences en partant de chaque équipementier qui se base sur la connaissance de son sous-système et les informations systèmes qu'il reçoit de l'intégrateur. Il exploite ces informations dans une optimisation mécaniste (Chapitre 2) pour sélectionner les fréquences critiques à son niveau. Le choix « *équipementier* » des fréquences critiques ainsi trouvées sera généralisé à la vision « *système* » par la suite.

Ensuite, nous allons dimensionner les filtres par l'approche multiniveau en utilisant la même formulation agrégée et un nombre de fréquences caractéristiques réduit par les critères d'éclaircissement. On montrera l'efficacité de l'approche multiniveau ainsi que la pertinence des critères d'éclaircissement.

Dans la dernière partie, nous utiliserons l'approche multiniveau pour réaliser des études sur le réglage de la norme. Nous présentons quelques pistes de modifications de la norme et analysons leurs conséquences sur le dimensionnement du réseau.

## 4.2 Cas d'étude « plus réaliste »

La première modification concerne le nombre de sous-systèmes : nous allons passer d'un cas à une source et une charge à un cas à une source et trois charges. La puissance du canal de génération passe de 40 kW à 180 kW, le facteur de charge est de 78% pour une puissance totale des charges de 140 kW (cf. Fig IV. 1).

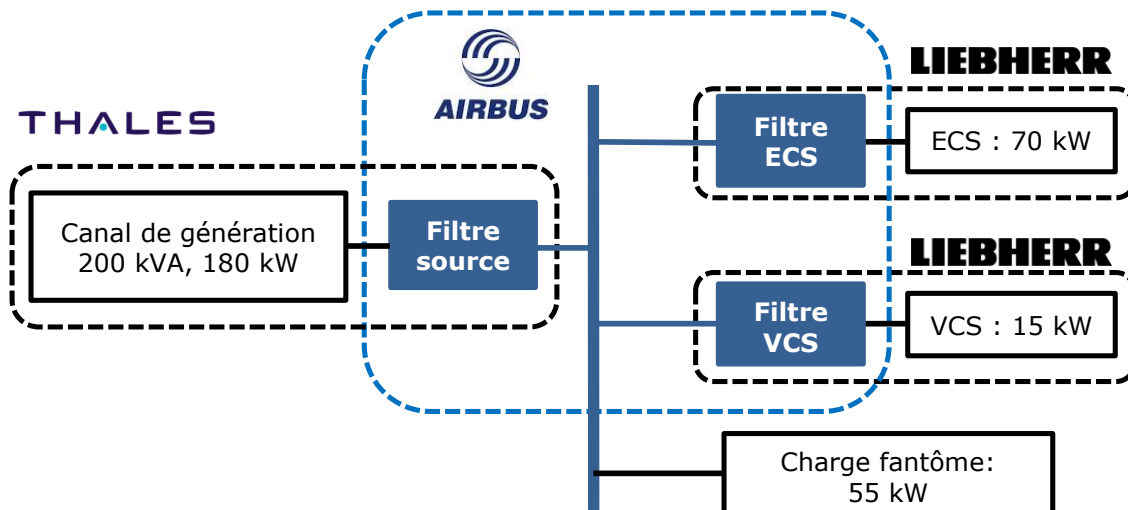


Fig IV. 1 Schéma du cas d'étude plus réaliste

L'autre modification importante est relative au contour de l'étude. Pour un réseau réel, il est fort probable qu'une partie des sous-systèmes du réseau ne puisse pas entrer dans le processus d'optimisation collaborative et ceci pour plusieurs raisons : certains sous-systèmes peuvent être issus d'un développement antérieur et leurs équipementiers ne sont pas disposés à revoir le dimensionnement des filtres pour l'adapter à l'approche collaborative ; certains sous-systèmes sont d'une puissance faible qui ne justifie par l'effort d'adaptation à une nouvelle approche d'intégration. Enfin, au moment où l'optimisation opère, certaines données sur certains équipements peuvent être manquantes et ses équipements ne sont pas encore murs, dans la vie du programme, pour participer à la collaboration.

Pour toutes ces raisons, nous allons introduire le concept de « charge fantôme » qui rassemble tous les sous-systèmes qui ne sont pas intégrés dans la boucle d'optimisation collaborative. Ce concept va nous aider à éprouver l'efficacité de l'approche par rapport à la partie du réseau dont le dimensionnement est figé et sur laquelle seul un raisonnement par rapport à la norme prévaut. La deuxième modification concerne les harmoniques de courant qui polluent le réseau. Nous utiliserons maintenant des spectres issus des dimensionnements internes des

équipementiers. Nous allons détailler ces modifications dans la présentation de chaque sous-système.

### 4.2.1 Le sous-système source : canal de génération

Le canal de génération est constitué d'un alternateur qui débite une puissance électrique sur un redresseur à diodes double pont. Un filtre capacitif est placé à la sortie du redresseur pour garantir une certaine qualité de la tension (cf. Fig IV. 2).

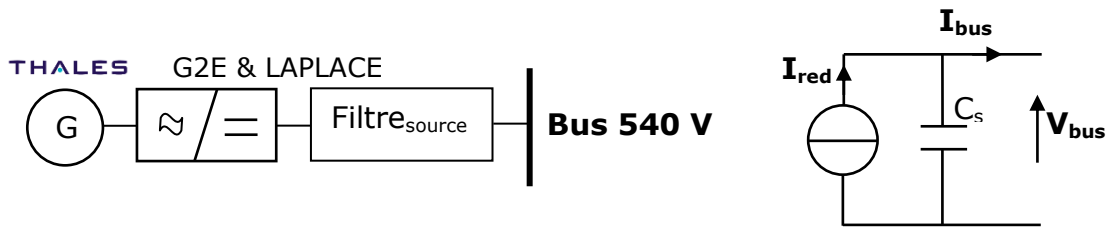


Fig IV. 2 Rappel de l'architecture du canal de génération

Un schéma circuit RLE a été fourni par THALES et a été intégré dans une simulation temporelle avec un redresseur à diode double pont débitant sur un filtre capacitif. La simulation a permis de relever le courant harmonique en sortie du redresseur avant filtrage  $I_{red}$ . C'est ce courant qui sera considéré dans le dimensionnement des filtres du réseau (cf. Fig IV. 3).

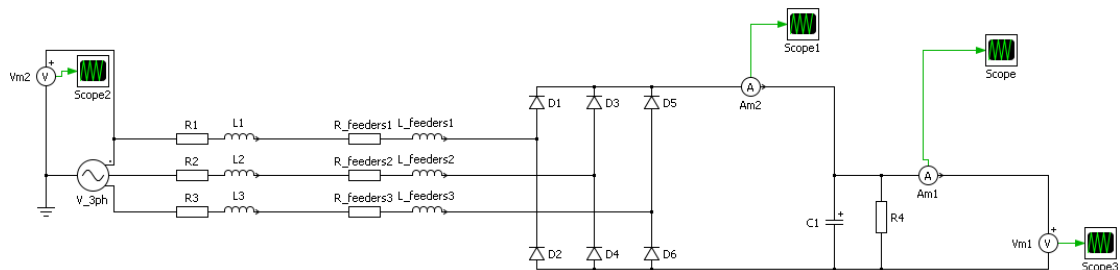


Fig IV. 3 Schéma circuit de la simulation du canal de génération

Le courant est décrit par un spectre fréquentiel qu'on organise dans un tableau de 48 lignes et de deux colonnes, l'une pour les fréquences (48 fréquences caractéristiques) et l'autre pour les amplitudes des harmoniques de courant associés (cf. Eq. II. 1). L'hypothèse qui explique la non considération des phases a été précédemment expliquée (cf. p44).

### 4.2.2 Système de conditionnement d'air « ECS » et système à cycle à vapeur « VCS »

Concernant les données fournies par LIEBHERR Aerospace, des optimisations globales des sous-systèmes ont été faites en interne par un doctorant du

laboratoire LAPLACE ; ces optimisations ont porté sur l'ECS « Environmental Conditioning System » et le VCS « Vapor Cycle System ». Les spectres des courants harmoniques des onduleurs ont été livrés  $I_{ECS}$  (102 fréquences caractéristiques) et  $I_{VCS}$  (225 fréquences caractéristiques). Ces spectres représentent les pollutions en courant que nous allons considérer pour le dimensionnement des filtres (cf. Fig IV. 4).

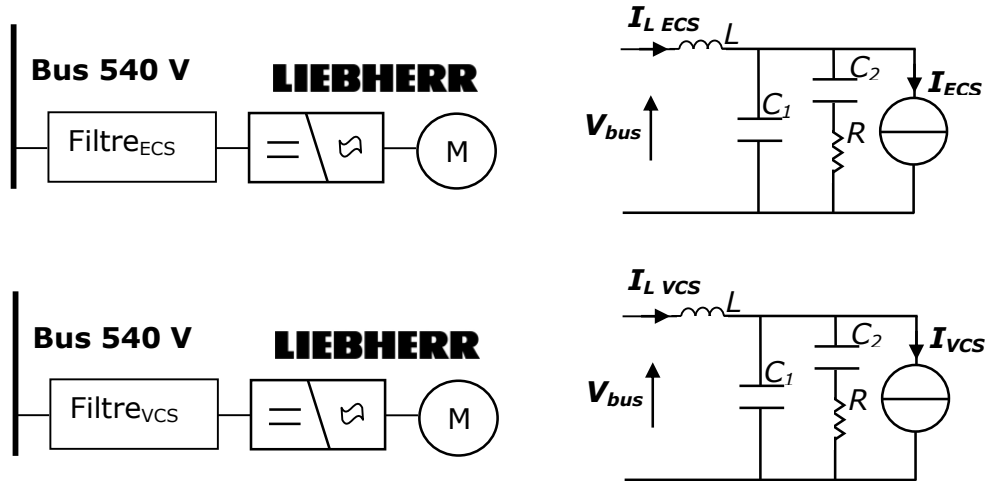


Fig IV. 4 Architecture des charges LIEBHERR

### 4.2.3 La charge fantôme

La charge fantôme représente les autres charges qui ne participent pas au processus collaboratif. Elle doit être considérée « au pire cas » du gabarit spécifié pour les charges.

### 4.2.4 Résumé

Le système étudié est donc constitué de trois filtres : le filtre de la source, le filtre de l'ECS et le filtre du VCS. Ce système est pollué par 4 sources de pollution. Un spectre de courant coté redresseur, les spectres des courants des onduleurs ECS et VCS et le courant émanant de la charge fantôme qui pollue le bus à toutes les fréquences de la source et des charges qui participent au périmètre collaboratif.

Tab IV. 1 Résumé des pollutions harmoniques qui attaquent le réseau

	<b>[I<sub>red</sub>]</b>	<b>[I<sub>ECS</sub>]</b>	<b>[I<sub>VCS</sub>]</b>	<b>[I<sub>Ch. F</sub>]</b>
$f_{red}$	X	0	0	<b>[I<sub>bus</sub>]<sub>Norme</sub></b>
$f_{ECS}$	0	X	0	<b>[I<sub>bus</sub>]<sub>Norme</sub></b>
$f_{VCS}$	0	0	X	<b>[I<sub>bus</sub>]<sub>Norme</sub></b>

Comme illustré dans le tableau Tab IV. 1, chaque sous-système source (48 fréquences) ou charge (ECS : 102 fréquences ; VCS : 225 fréquences) pollue le réseau sur ses propres fréquences caractéristiques ; On considère que seule la charge fantôme pollue le réseau sur toutes les 375 (48+102+225) fréquences caractéristiques du système (cf. Fig IV. 5).

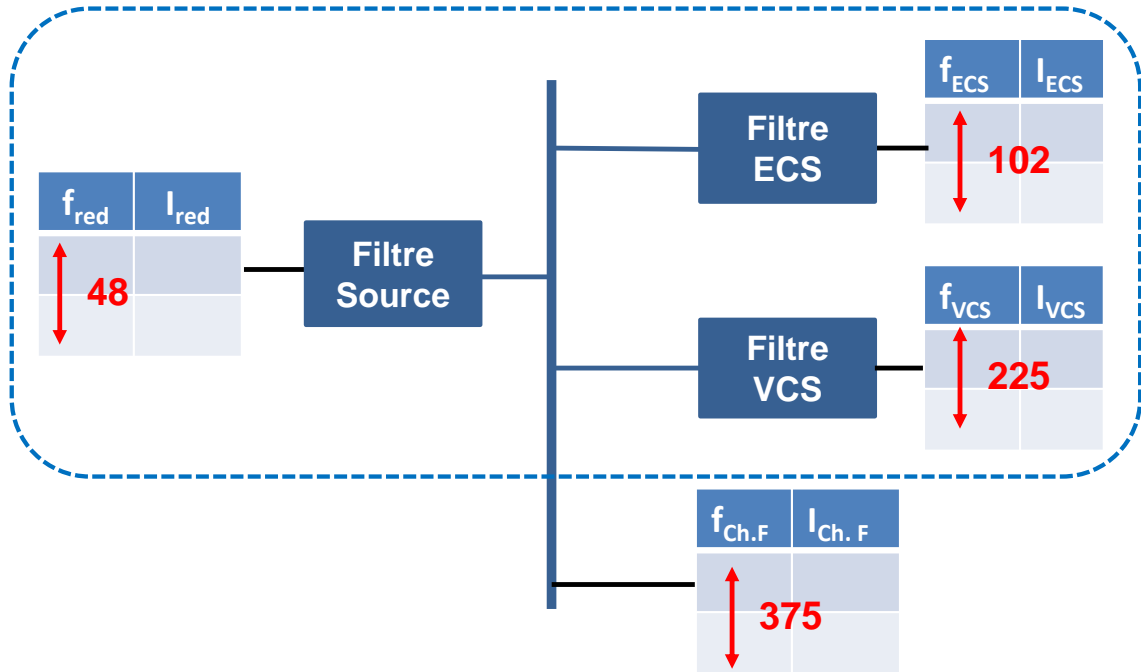


Fig IV. 5 Les données équipementiers dans le réseau étudié

### 4.3 Concept d'éclaircissement des spectres

Dans la formulation multiniveau agrégée et causale, le nombre de variables de décision croit avec le nombre de fréquences caractéristiques du système. Considérer, dans le cas de notre réseau, les 375 fréquences caractéristiques du cas d'étude conduirait à une explosion combinatoire, puisqu'on rappelle que le nombre de variable de décision est proportionnel au nombre de fréquences caractéristiques ; on aurait donc ici :

$$N_{Var.Déc}^{système} = 2 \times 375 = 700 \quad \text{Eq IV. 1}$$

Or, nous avons constaté dans les chapitres II et III qu'un nombre très réduit de raies influait réellement sur le dimensionnement des filtres (cf. Fig II. 18). Dans cette partie nous allons donc essayer d'émettre des critères pour sélectionner ces fréquences critiques, ce qui revient à « éclaircir le spectre » pour minimiser le temps de calcul.

On se place tout d'abord au niveau de l'équipementier qui dispose de données internes sur son sous-système (type de convertisseur, topologie du filtre) et de données système issues de l'intégrateur (norme). Comme indiqué précédemment, chaque équipementier doit informer l'intégrateur sur les fréquences caractéristiques de sa pollution harmonique..

Dans ce qui suit, nous faisons l'hypothèse que les choix technologiques qui influent sur les fréquences caractéristiques du système sont arrêtés : la fréquence du générateur et par conséquent les fréquences caractéristiques du redresseur sont alors fixes. Il en va de même pour les fréquences de découpage des onduleurs des charges que l'on suppose fixées et qui influe directement sur les fréquences caractéristiques réjectées vers le bus DC.

L'approche multiniveau proposée nécessite que l'information sur les fréquences caractéristiques du système rassemblées au niveau de l'intégrateur (système) sont transmises à tous les équipementiers car le dialogue « *système-équipementier* » se fait à travers les harmoniques en ces fréquences.

Nous allons exploiter ces informations dans les optimisations mécanistes des sous-systèmes (filtre de la source, filtres du VCS et de l'ECS) pour établir les critères d'éclaircissement de fréquences. On montrera par la suite que les fréquences éclaircies en partant d'une vue « *sous-système par sous-système* » sont pertinentes lorsqu'on couple l'ensemble des équipements entre eux et qu'on considère l'ensemble du réseau avec une vision « *système*. ». Cette pertinence de l'éclaircissement spectral sera vérifiée au travers d'une optimisation globale.

### **4.3.1 Éclaircissement du spectre du courant du redresseur**

#### **4.3.1.1 Étape 1 : données à disposition de la source**

L'équipementier « *source* » dispose des données suivantes :

- Topologies du filtre (cf. Fig IV. 2), ses modèles (électrique et de dimensionnement cf. Chapitre 2).
- Il connaît la pollution harmonique issue du redresseur ( $f_{red}$ ,  $I_{red}$ ).
- À partir des informations agrégées par le systémier, il connaît l'ensemble des fréquences caractéristiques du système qui interviennent dans l'approche multiniveau ( $f_{red}$ ,  $f_{ECS}$  et  $f_{VCS}$ ). Par contre, il ne connaît pas le dimensionnement des autres filtres du système et ne peut donc pas connaître la valeur réelle de la pollution du courant de bus à toutes ces fréquences ( $I_{bus}$ ). Grâce à l'approche mécaniste, vue de la source (source seule), il doit donc se satisfaire en premier lieu des valeurs de la norme

qui correspondent à un pire cas de pollution harmonique. En excitant la source, en aval du condensateur de sortie via la norme sur  $I_{bus}$  et en amont par le courant issu du redresseur ( $I_{red}$ ) on classe les fréquences caractéristiques du système en deux groupes pour faciliter l'explication des critères d'éclaircissement (cf. Tab IV. 2)

Tab IV. 2 Les harmoniques qui attaquent la source

		$[I_{red}]$	$[I_{bus}]$
1 <sup>er</sup> groupe	$f_{red}$	X	$[I_{bus}]_{Norme}$
2 <sup>ème</sup> groupe	$f_{ECS}$	0	$[I_{bus}]_{Norme}$
	$f_{VCS}$	0	$[I_{bus}]_{Norme}$

#### 4.3.1.2 Étape 2 : réduction des fréquences critiques en se basant sur une optimisation mécaniste de la source

L'idée est ici de procéder successivement à deux optimisations mécanistes, l'une sans, l'autre avec éclaircissement du spectre.

Nous appliquons ici la même démarche que celle réalisée pour le dimensionnement du filtre capacitif dans le cas d'étude académique du chapitre 3, la seule modification concerne les spectres du courant du redresseur et le spectre du courant de bus.

Tab IV. 3 Paramètres de l'optimisation mécaniste de la source avant éclaircissement

Algorithme dans le solveur fmincon	Active-set
Nombre d'itérations (type)	2
Nombres d'initialisations différentes	10
Temps de calcul (ms)	1333

Pour l'ensemble des optimisations nous avons utilisé le même calculateur.<sup>3</sup>

Tab IV. 4 Résultats de l'optimisation mécaniste du filtre de la source avant éclaircissement des fréquences

$M_{Source}$ (kg)	4.11
$C_s$ ( $\mu$ F)	1.52e+03
$THD_V$ (%)	0.48

<sup>3</sup> Intel® Core(TM)2 Duo CPU E4400 @ 2.00GHz, avec 8GB de RAM, sur Windows 7 Entreprise 64-bit



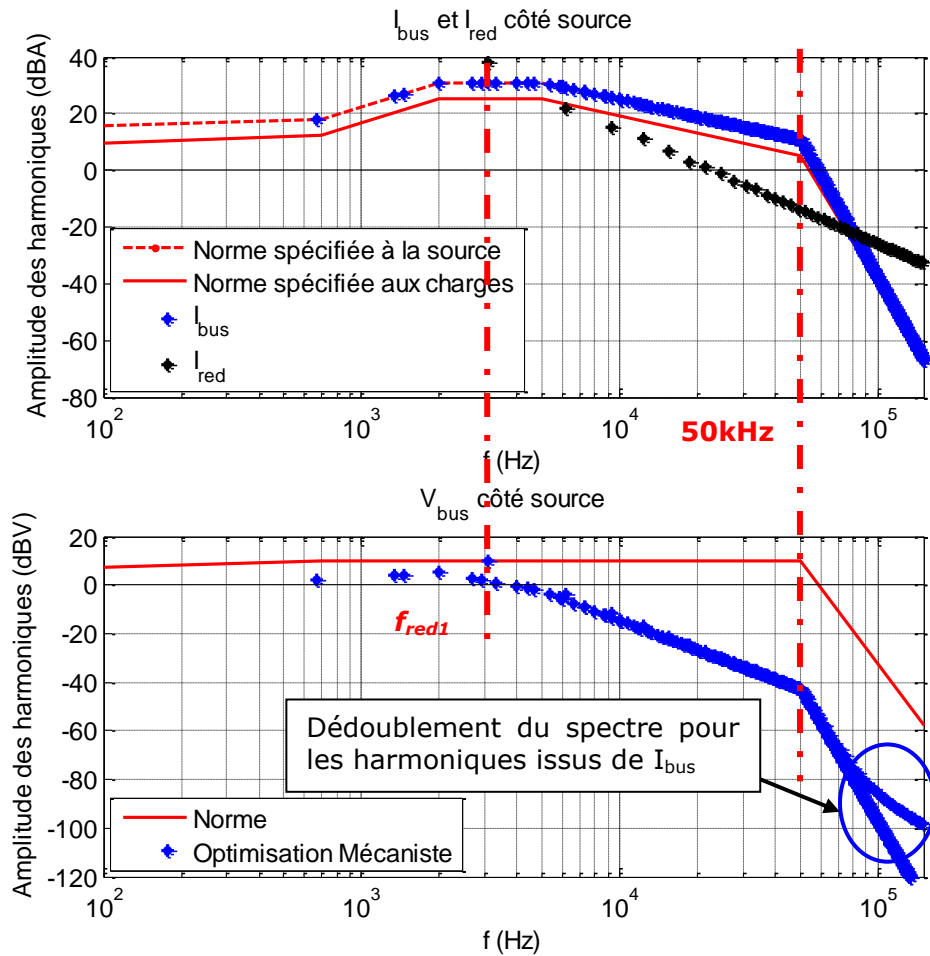


Fig IV. 6 Harmoniques de courant et de tension vus par le filtre de la source avant éclaircissement des fréquences

Le dédoublement apparent du spectre de la tension est en réalité dû à un effet de masquage. À hautes fréquences, les harmoniques étant très proches, certaines ont une composante qui est induite par le courant du redresseur que n'ont pas les autres ; leurs valeurs s'en trouvent donc plus élevées (cf. Fig IV. 6).

Sur le zoom entre [120 KHz, 130 kHz] (cf. Fig IV. 6 zoom) on peut apercevoir les deux groupes de fréquences, celles pour lesquelles nous avons à la fois un harmonique de  $I_{red}$  (en noir) non nul et un harmonique de  $I_{bus}$  (en bleu) et celle où nous n'avons que l'harmonique de  $I_{bus}$  (en bleu). Sur la figure du bas, les harmoniques de tension se scindent en 2 groupes distincts, d'où l'effet de dédoublement des amplitudes harmoniques.

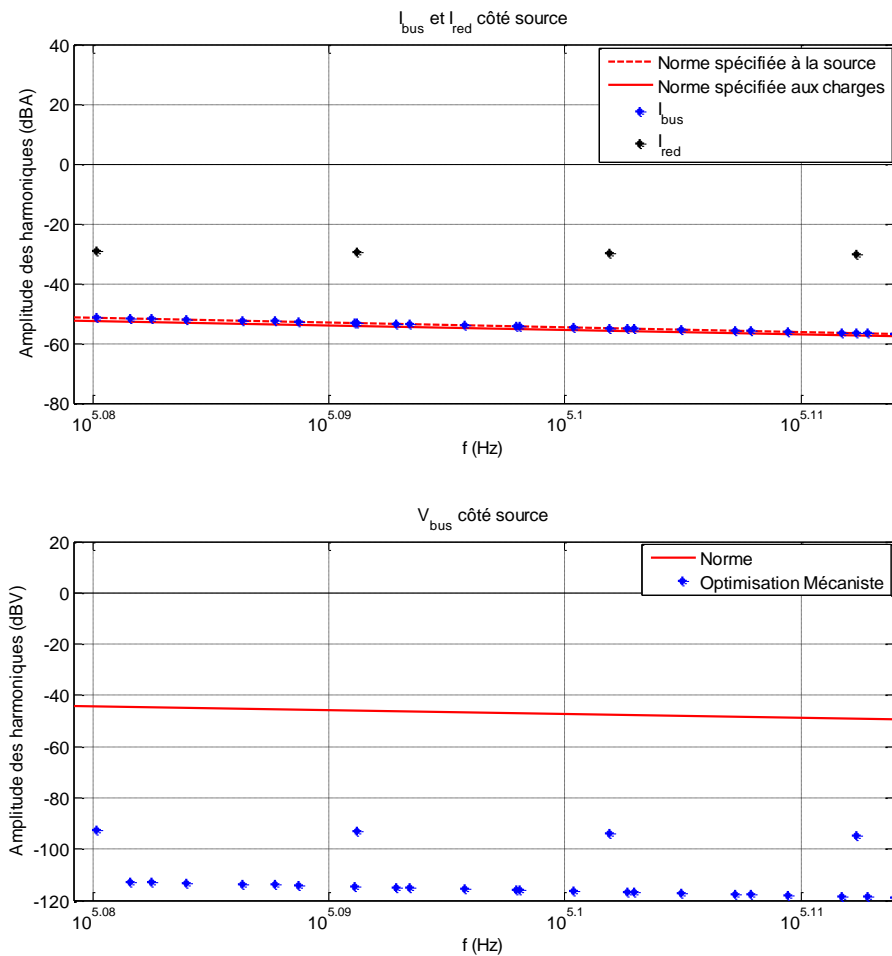


Fig IV. 6.zoom      Agrandissement sur l'intervalle [120,130] kHz

L'optimisation mécaniste avant éclaircissement confirme ce que nous avons observé dans le cas d'étude académique. L'harmonique de tension critique pour le dimensionnement du filtre de la source se réduit à la première fréquence du courant du redresseur  $f_{red1}$  (cf. Eqt IV. 2) ; cette fréquence est matérialisée sur la Fig IV. 6.

$$V_{bus\ f_{red1}} = \frac{I_{red\ f_{red1}} + I_{bus\ Norme\ f_{red1}}}{C_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{red1}} \quad \text{Eqt IV. 2}$$

Les harmoniques de tension qui se situent avant  $f_{red1}$  appartiennent au deuxième groupe (cf. Tab IV. 2), ces harmoniques sont dominés dans le dimensionnement par le premier harmonique du redresseur  $f_{red1}$  (cf. Eqt IV. 3):

$$f \leq f_{red1} \Rightarrow \begin{cases} I_{red f} = 0 \\ \frac{I_{bus Norme f}}{C_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \leq \frac{I_{red f_{red1}} + I_{bus Norme f_{red1}}}{C_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{red1}} \end{cases} \quad \text{Eq IV. 3}$$

$$\Rightarrow V_{bus f} \leq V_{bus f_{red1}}$$

Concernant les fréquences supérieures à  $f_{red1}$ , on distingue deux zones dans la norme de tension :

Dans la première zone [ $f_{red1}$ , 50kHz] : les amplitudes du courant du redresseur  $I_{red}$  sont, soit inférieurs au premier harmonique (à  $f_{red1}$ ) soit nulles (à  $f_{ECS}$  et  $f_{VCS}$ ). Les harmoniques du courant du bus  $I_{bus}$  sont inférieurs ou égaux à l'harmonique de  $I_{bus}$  à  $f_{red1}$  (cf. Eq IV. 4 et Fig IV. 6).

$$f \geq f_{red1} \Rightarrow \begin{cases} (I_{red f=f_{ECS}} \text{ ou } f_{VCS} = 0) \text{ ou } (I_{red f} \leq I_{red f_{red1}}) \\ I_{bus Norme f} \leq I_{bus Norme f_{red1}} \\ C_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \geq C_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{red1} \end{cases} \quad \text{Eq IV. 4}$$

$$\Rightarrow V_{bus f} \leq V_{bus f_{red1}}$$

Dans la deuxième zone (au-delà de 50kHz), les fréquences du premier groupe (à  $f_{red}$   $I_{red} \neq 0$  et  $I_{bus} \neq 0$ ) dominant le second groupe (à  $f_{ECS}$  et  $f_{VCS}$   $I_{red} = 0$ ) (cf. Fig IV. 6 zoom). Pour les deux groupes de fréquences, les harmoniques de tension sont très atténués et donc largement en dessous de la limite de la norme. Il est donc clair que pour le dimensionnement du filtre de la source, une seule raie est critique : le premier harmonique du courant redresseur à  $f_{red1}$ . (cf. Fig IV. 6) Cette fréquence caractéristique « dimensionnante » et unique ne dépend donc que de l'équipement source (redresseur ici) et non de la pollution des autres équipements ou de la norme.

#### 4.3.1.3 Étape 3 : vérification par l'optimisation mécaniste de la source après éclaircissement

En conservant uniquement cet harmonique ( $f_{red1}$ ), nous vérifions que nous aboutissons au même dimensionnement pour le filtre de sortie qu'avant éclaircissement.

Tab IV. 5 Paramètres de l'optimisation mécaniste de la source après éclaircissement

	Sans éclaircissement	Avec éclaircissement
Algorithme dans le solveur fmincon	Active-set	Active-set
Nombre d'itérations (type)	2	2
Nombres d'initialisations différentes	10	10
Temps de calcul (ms)	1333	689 ms

On remarque que le temps de calcul diminue (cf. Tab IV. 5), ce qui est prévisible compte tenu de la diminution drastique du nombre de fréquences caractéristiques.

Tab IV. 6 Comparaison des résultats de l'optimisation mécaniste du filtre de la source avant et après éclaircissement des fréquences

	Avant éclaircissement	Après éclaircissement
$M_{Source}$ (kg)	4.11	4.11
$C_s$ ( $\mu$ F)	1.52e+03	1.52e+03
$THD_V$ (%)	0.48	0.41

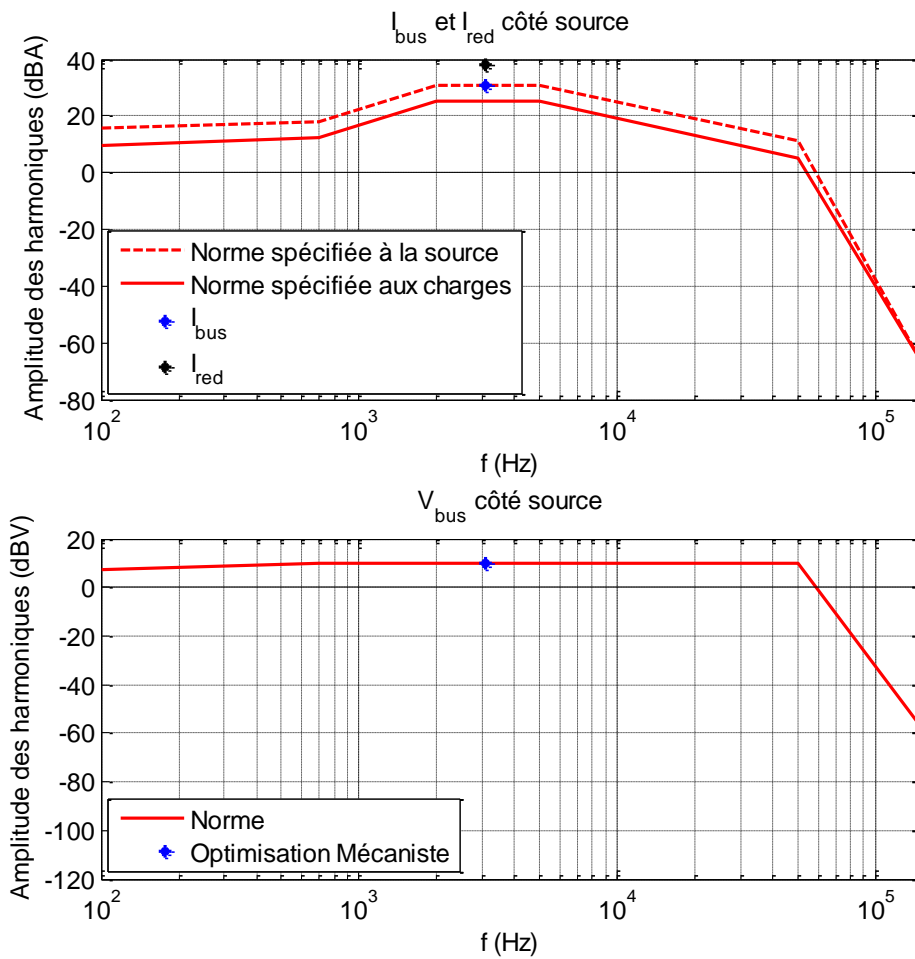


Fig IV. 7 Harmoniques de courant et de tension vus par le filtre de la source après éclaircissement des fréquences

L'application des critères d'éclaircissement élaborés est validée en obtenant les mêmes résultats du point de vue dimensionnement (cf. Tab IV. 6). L'écart se situe au niveau de la contrainte sur le taux de distorsion de la tension mais cet écart d'environ 15% sur le  $THD_V$  n'affecte en rien le résultat du dimensionnement, tout au moins du point de vue de la masse. On peut en déduire que la contrainte de  $THD_V$  n'est pas critique puisque la masse est identique avec et sans éclaircissement (cf. Tab IV. 6).

Si la contrainte sur le  $THD_V$  devenait dimensionnante, il faudrait affiner les critères d'éclaircissement en considérant cette contrainte : on pourrait par exemple rajouter à la fréquence sélectionnée ( $f_{red1}$ ), les premières fréquences où  $I_{red}$  est supérieur à 0 dB qui participent le plus à la valeur totale du  $THD_V$  (on rappelle ici que le  $THD_V$  se calcule par rapport à  $I_{red}$  uniquement en considérant que la charge est purement résistive cf. Eqt II. 8)

### 4.3.2 Éclaircissement des fréquences du courant de l'onduleur du VCS

#### 4.3.2.1 Étape 1 : données à disposition de l'équipementier VCS

L'équipementier «charge VCS» dispose des données suivantes :

- Topologies du filtre (cf. Fig IV. 4), ses modèles (électrique et de dimensionnement cf. Chapitre 2).
- Il connaît la pollution harmonique issue de l'onduleur ( $f_{VCS}$ ,  $I_{VCS}$ ).
- À partir des informations agrégées par le systémier, il connaît l'ensemble des fréquences caractéristiques du système qui interviennent dans l'approche multiniveau dans l'approche multiniveau ( $f_{red}$ ,  $f_{ECS}$  et  $f_{VCS}$ ). Par contre il ne connaît pas le dimensionnement des autres filtres du système et ne peut donc pas connaître la valeur réelle de la pollution en tension du bus en ces fréquences ( $V_{bus}$ ). En appliquant l'approche mécaniste, il peut utiliser les valeurs de la norme en tension qui correspondent à un pire cas. (cf. Tab IV. 7)

Tab IV. 7 Les harmoniques qui attaquent le filtre VCS

	$[I_{VCS}]$	$[V_{bus}]$
$f_{red}$	0	$[V_{bus}]_{Norme}$
$f_{ECS}$	0	$[V_{bus}]_{Norme}$
$f_{VCS}$	X	$[V_{bus}]_{Norme}$

#### 4.3.2.2 Étape 2 : réduction des fréquences critiques pour le dimensionnement du filtre du VCS

Nous appliquons ici la même démarche que celle conduite dans le dimensionnement du filtre dans le cas d'étude simplifié (cf. Chapitre 2). La seule modification concerne les spectres du courant de l'onduleur du VCS et le spectre de tension de bus.

Comme précédemment pour la source, on commence par dérouler une optimisation mécaniste du VCS avant éclaircissement.

Tab IV. 8 Paramètres de l'optimisation mécaniste du filtre du VCS

Algorithme avec le solveur fmincon	Active-set
Nombre d'itérations (type)	11
Nombres d'initialisations différentes	10
Temps de calcul (ms)	1933

Tab IV. 9 Résultats de l'optimisation mécaniste du filtre du VCS avant éclaircissement des fréquences

$M_{VCS}$ (kg)	0.53 kg
$C_{1\ VCS}$ ( $\mu$ F)	2.14e+01
$C_{2\ VCS}$ ( $\mu$ F)	1.69e-04
$L_{VCS}$ ( $\mu$ H)	9.63e+01
$R_{VCS}$ ( $\Omega$ )	9.98e+02
$THD_{I\ VCS}$ (%)	55.81

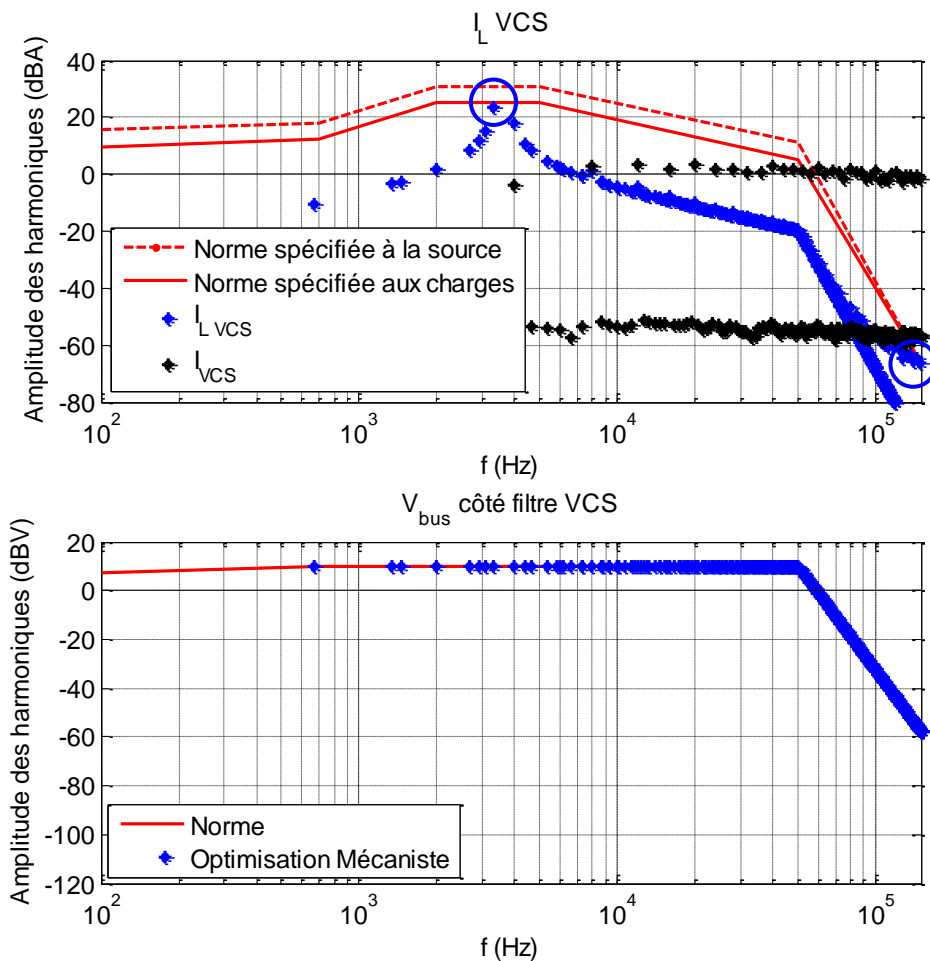


Fig IV. 8 Harmoniques de courant et de tension vues par le filtre du VCS avant éclaircissement des fréquences

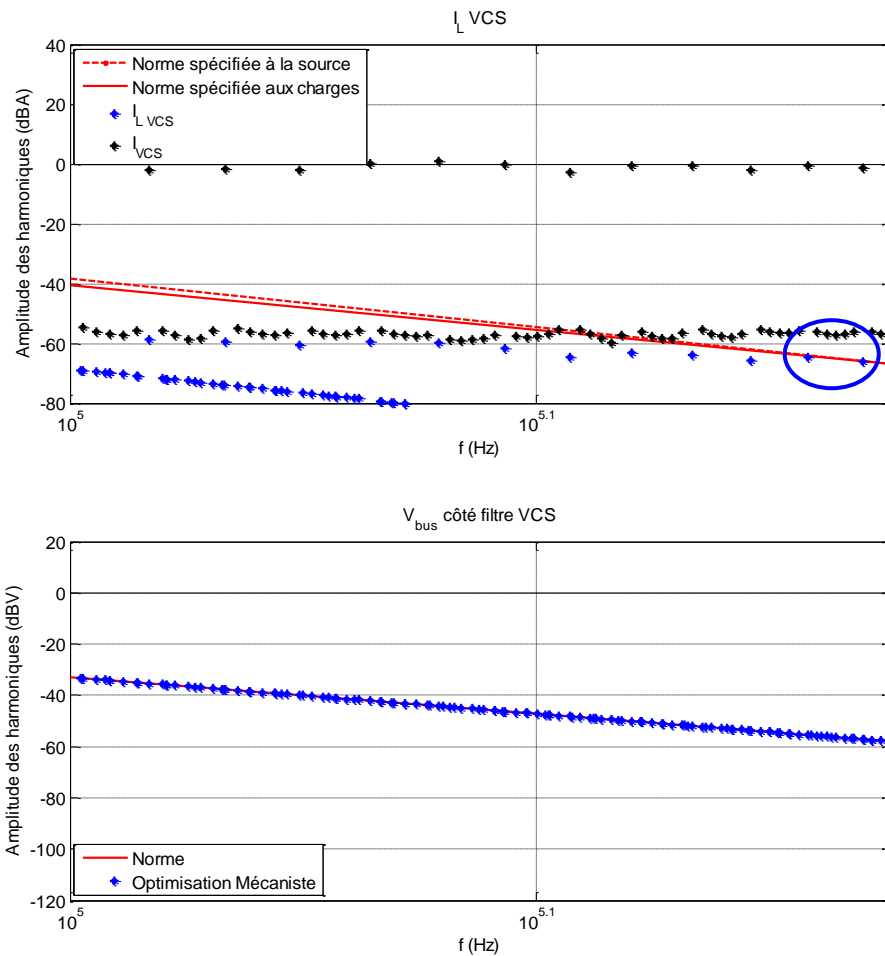


Fig IV. 8 zoom      Agrandissement de l'intervalle [100,150] kHz

Deux fréquences du courant filtré atteignent la limite de la norme ; elles se situent dans les hautes fréquences (Fig IV. 8. zoom). Cependant, il y a des harmoniques qui ne sont pas loin de la limite de la norme à basses fréquences en raison de la résonance du filtre (cf. Fig IV. 8 zoom).

On observe le même phénomène de dédoublement du spectre du courant absorbé par le filtre du VCS à cause du phénomène de masquage (cf. Fig IV. 8).

L'optimisation mécaniste du filtre du VCS montre donc deux fréquences critiques dans les hautes fréquences et une fréquence dont l'harmonique est presque critique en basses fréquences. Nous allons donc distinguer ces deux zones et établir des critères en distinguant les basses et hautes fréquences. Nous allons procéder par élimination des fréquences non critiques en les comparant avec les fréquences critiques. Mais rappelons que le calcul du courant dans l'inductance du filtre est le résultat de la somme de deux fonctions de transfert, l'une par rapport à la tension de bus et l'autre par rapport au courant de l'onduleur :

$$\begin{aligned}
 [\mathbf{I}_L] = & \left\| \mathbf{F}t_{I_L/V_{bus}}(L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot [\mathbf{V}_{bus}]^{Norme} \right\| \\
 & + \left\| \mathbf{F}t_{I_L/I_{ond}}(L, C_1, C_2, R, \omega) \cdot [\mathbf{I}_{ond}] \right\|
 \end{aligned}
 \quad \text{Eq IV. 5}$$

La (Fig IV. 9) montre les deux composantes qui constituent le courant dans l'inductance du filtre. A basses fréquences, le courant dans l'inductance est en majorité issu de l'atténuation de l'harmonique de tension (les points en noir sont confondus avec les points en bleu sur la Fig IV. 9). En hautes fréquences, le phénomène s'inverse et c'est le courant de l'onduleur qui, pour ce dimensionnement de filtre impose le courant dans l'inductance (les points en vert sont confondus avec les points en bleu sur la Fig IV. 9).

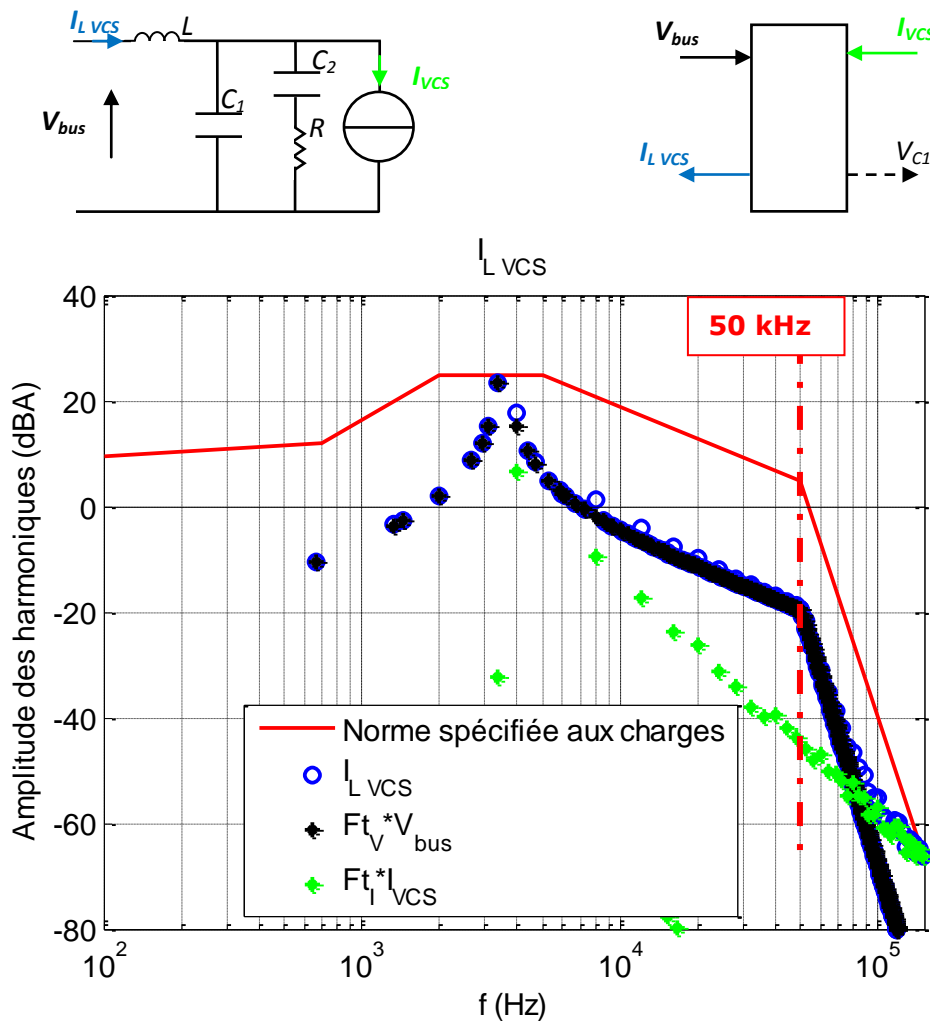


Fig IV. 9 Constitution du courant de l'inductance du filtre du VCS avant éclaircissement des fréquences

À basse fréquence (< 50 kHz), c'est la composante par rapport à la tension qui est prépondérante dans le courant de l'inductance.



$$\|Ft_{I_L/V_{bus}} \cdot [V_{bus}]_{Norme} \gg \|Ft_{I_L/I_{ond}} \cdot [I_{ond}]\| \quad \text{Eq. IV. 6}$$

Seulement, dans cette zone, la pollution tension qui est considérée (dans cette approche mécaniste) au pire cas de la norme est quasi constante (cf. Fig IV. 8). Le but étant d'éclaircir le spectre de  $I_{VCS}$ , on analyse donc les harmoniques du courant de l'onduleur du VCS qui vont participer au courant dans l'inductance. On sait également que, compte tenu de la topologie du filtre (cf. Fig IV. 4), il ne peut y avoir qu'une seule résonance : à basses fréquences (avant résonance), l'atténuation du filtre diminue jusqu'au passage de la résonance à partir duquel l'atténuation va augmenter. On formule donc le critère suivant :

- On commence par sélectionner le point du spectre ( $dBI_{VCS}(f_i)$ ) de plus basse fréquence. On l'utilise, pour initialiser, une référence de l'amplitude de l'harmonique du courant de l'onduleur ( $dBI_{ref}$ ).
- À mesure qu'on monte en fréquence, si l'amplitude de l'harmonique du courant de l'onduleur majorée d'un seuil de précaution (10 dB) est plus grande que la référence, le point est gardé et la référence est mise à jour ; cette majoration est une précaution qu'on prend pour garder le maximum de points pertinents. Ce critère permet de se débarrasser (d'éclaircir) de tous les points non critiques au vue de leur niveau d'harmonique.

$$\begin{cases} dBI_{ref} = dBI_{f_0} \\ \text{Si } dBI_{f_i} + 10 \text{ dB} > dBI_{ref} : \\ f_i \text{ est sélectionné et } dBI_{ref} = dBI_{f_i} \end{cases} \quad \text{Eq. IV. 7}$$

À haute fréquence [50, 150] kHz, c'est la composante par rapport au courant de l'onduleur qui devient prépondérante (les points en vert sont confondus avec les points en bleu (cf. Fig IV. 9), on raisonne donc uniquement par rapport au courant de l'onduleur, plus exactement par rapport au dépassement à la norme.

$$\Delta dBI = dBI - Norme_I \quad \text{Eq. IV. 8}$$

On sélectionne, dans un premier temps, les points du courant onduleur qui dépassent la norme et qui doivent absolument être atténués (donc considérés dans le design : fréquences non éclaircis). On initialise une référence des dépassements par fréquence la plus élevée.

NB : on pourrait le faire en commençant par la fréquence la plus basse mais l'algorithme mettrait plus de temps en actualisant plus souvent la référence car ce sont les points en hautes fréquences qui sont les plus critiques.

On parcourt donc les fréquences dans le sens décroissant ; si le dépassement à la norme du nouveau point considéré est plus important que le

dépassement de référence, on le garde et on met à jour le dépassement de référence.

$$\begin{cases} \Delta dBI_{ref} = \Delta dBI_{f_{max}} \\ \text{Si } \Delta dBI_{f_i} > \Delta dBI_{ref} : f_i \text{ est sélectionné et } \Delta dBI_{ref} = \Delta dBI_{f_i} \end{cases} \quad \text{Eq IV. 9}$$

#### 4.3.2.3 Étape 3 : vérification par l'optimisation mécaniste du VCS après éclaircissement

Les paramètres de l'optimisation mécaniste après éclaircissement sont comparés dans le tableau suivant à ceux qu'on avait obtenu avant éclaircissement.

Tab IV. 10 Paramètres d'optimisation mécaniste du filtre VCS

	Avant éclaircissement	Après éclaircissement
Algorithme avec le solveur fmincon	Active-set	Active-set
Nombre d'itérations (type)	11	9
Nombres d'initialisations différentes	10	10
Temps de calcul (ms)	1933	682

Tab IV. 11 Comparaison des résultats de l'optimisation mécaniste du filtre du VCS avant et après éclaircissement des fréquences

	Avant éclaircissement	Après éclaircissement
$M_{VCS}$ (kg)	0.53	0.51
$C_{1VCS}$ ( $\mu$ F)	2.14e+01	3.80e+01
$C_{2VCS}$ ( $\mu$ F)	1.69e-04	1.30e-06
$L_{VCS}$ ( $\mu$ H)	9.63e+01	7.34e+01
$R_{VCS}$ ( $\Omega$ )	9.98e+02	9.24e+01
$THD_{IVCS}$ (%)	55.81	51.50

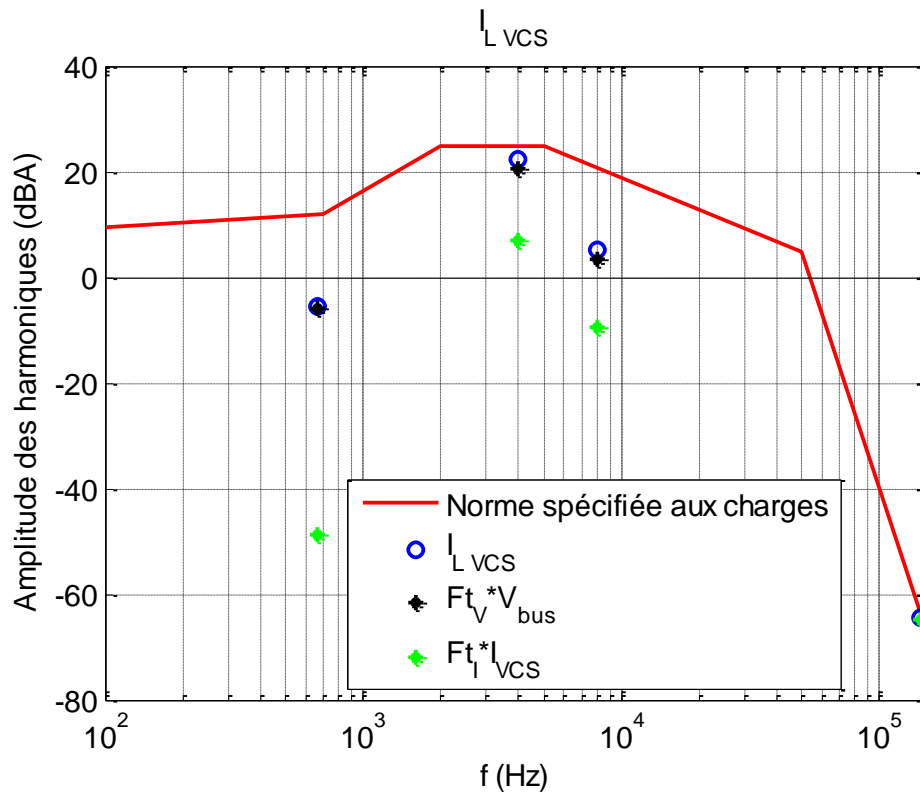


Fig IV. 10 Constitution du courant de l'inductance du filtre du VCS après éclaircissement des fréquences

En appliquant ces critères, on trouve donc que 4 points sont conservés (cf. Fig IV. 10) : 1 d'entre eux figurent parmi les fréquences critiques du dimensionnement du filtre du VCS (le dernier), l'absence du deuxième est expliquée par la redondance avec le dernier point qui est très proche (cf. Fig IV. 8 zoom). Le deuxième point sélectionné est proche du point où on avait une résonance avant éclaircissement. Il y a un petit décalage entre les résultats avant et après éclaircissement des fréquences (3.33 kg avant contre 3.17 kg après). Ce décalage reste faible (4.8 %)

Comme précédemment pour la source et pour le  $THD_V$ , on remarque ici une diminution, assez faible ( $\sim 8\%$ ), du taux global de distorsion en courant ; cette diminution de  $THD_I$  est liée à la suppression par l'éclaircissement des fréquences « jugées non critiques » en raisonnant sur des critères purement harmoniques, mais qui ne tiennent pas compte de la valeur du  $THD_I$ . Or, la diminution du nombre de fréquences caractéristiques diminue « l'énergie spectrale » de la pollution et tend donc logiquement à atténuer le  $THD_I$ . Comme évoqué pour la source, une perspective à cette partie sur l'éclaircissement consisterait à intégrer des critères supplémentaires tenant compte de l'énergie spectrale : ce point sera repris à la section suivante dans le cas de l'ECS.

Cette suppression de fréquences conduit cependant au gain escompté en termes de temps de calcul du fait de la diminution du nombre d'opérations.

### 4.3.3 Éclaircissement des fréquences du courant de l'onduleur de l'ECS

La réduction des fréquences du courant de l'onduleur de l'ECS suit le même processus que le courant de l'onduleur du VCS. On utilise exactement les mêmes critères et procédures. On se limite donc à présenter les résultats de l'approche mécaniste avant et après éclaircissement des fréquences.

#### 4.3.3.1 Étape 2 : réduction des fréquences critiques pour le dimensionnement du filtre de l'ECS

Nous appliquons ici la même démarche que celle conduite dans le dimensionnement du filtre dans le cas d'étude simplifié (cf. Chapitre 2). La seule modification concerne les spectres du courant de l'onduleur de l'ECS et le spectre de tension de bus.

Tab IV. 12 Paramètres de l'optimisation mécaniste du filtre de l'ECS

Algorithme dans le solveur fmincon	Active-set
Nombre d'itérations (type)	6
Nombres d'initialisations différentes	10
Temps de calcul (ms)	2601

Tab IV. 13 Résultats de l'optimisation mécaniste du filtre de l'ECS avant éclaircissement des fréquences

$M_{ECS}$ (kg)	3.33
$C_{1\ ECS}$ ( $\mu$ F)	1.14e-04
$C_{2\ ECS}$ ( $\mu$ F)	1.05e-12
$L_{ECS}$ ( $\mu$ H)	6.96e-05
$R_{ECS}$ ( $\Omega$ )	2.50e+02
$THD_{I\ ECS}$ (%)	19.31

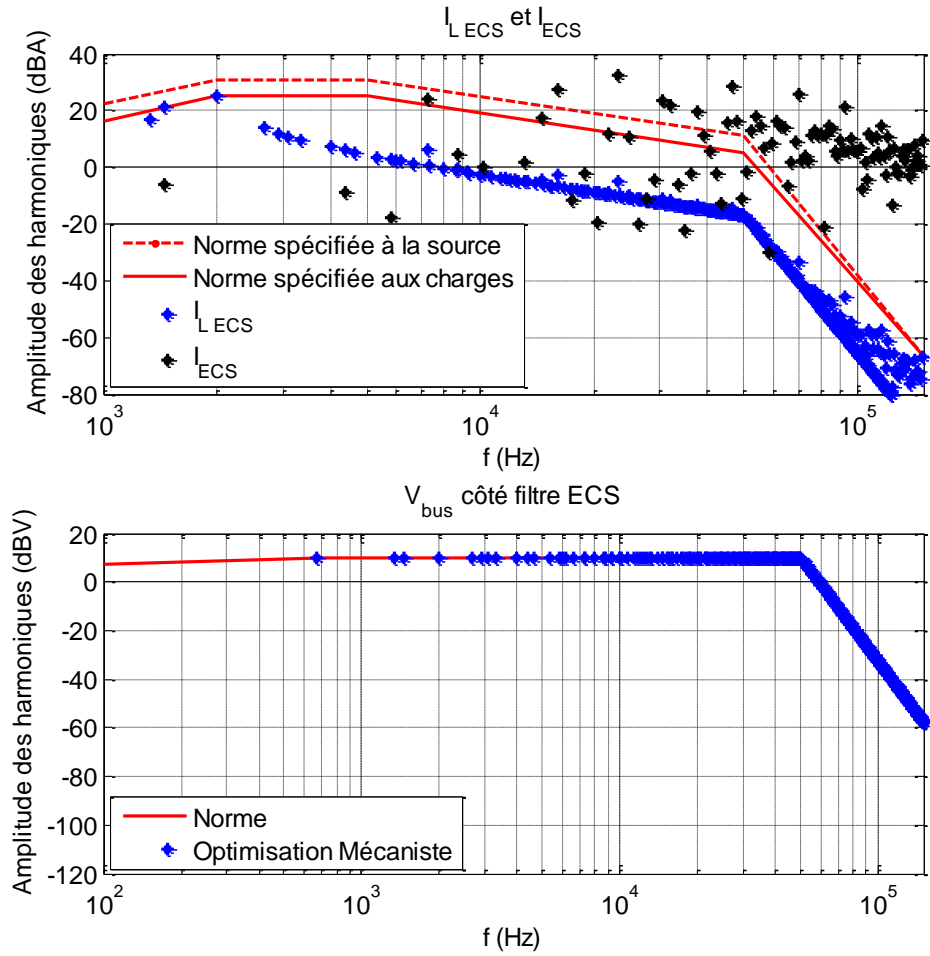


Fig IV. 11 Harmoniques de courant et de tension vues par le filtre de l'ECS avant éclaircissement des fréquences

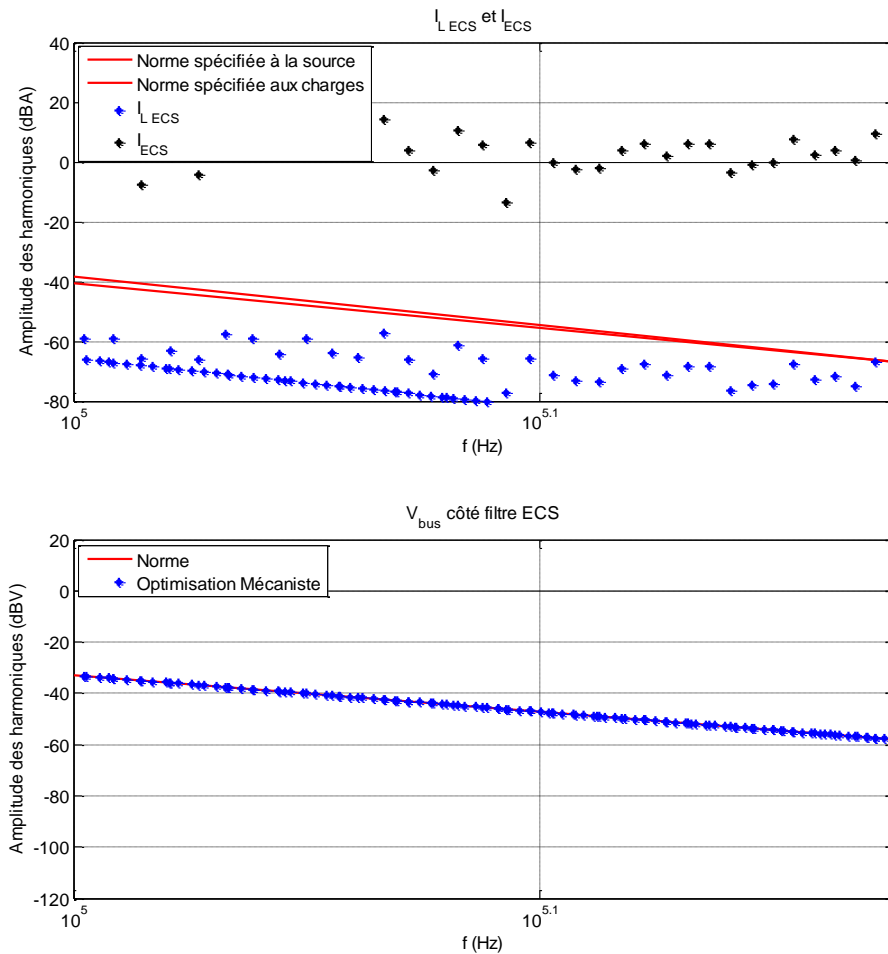


Fig IV. 11 zoom      Agrandissement de l'intervalle [100, 150] kHz

Comme pour le filtre du VCS, le courant dans l'inductance du filtre de l'ECS se compose d'une partie provenant de l'harmonique de tension (dominante à basses fréquences : points noirs et points bleus confondus cf. Fig IV. 12) et d'une partie provenant de l'harmonique du courant de l'onduleur de l'ECS (dominante en hautes fréquences : points verts et points bleus confondus cf. Fig IV. 12).

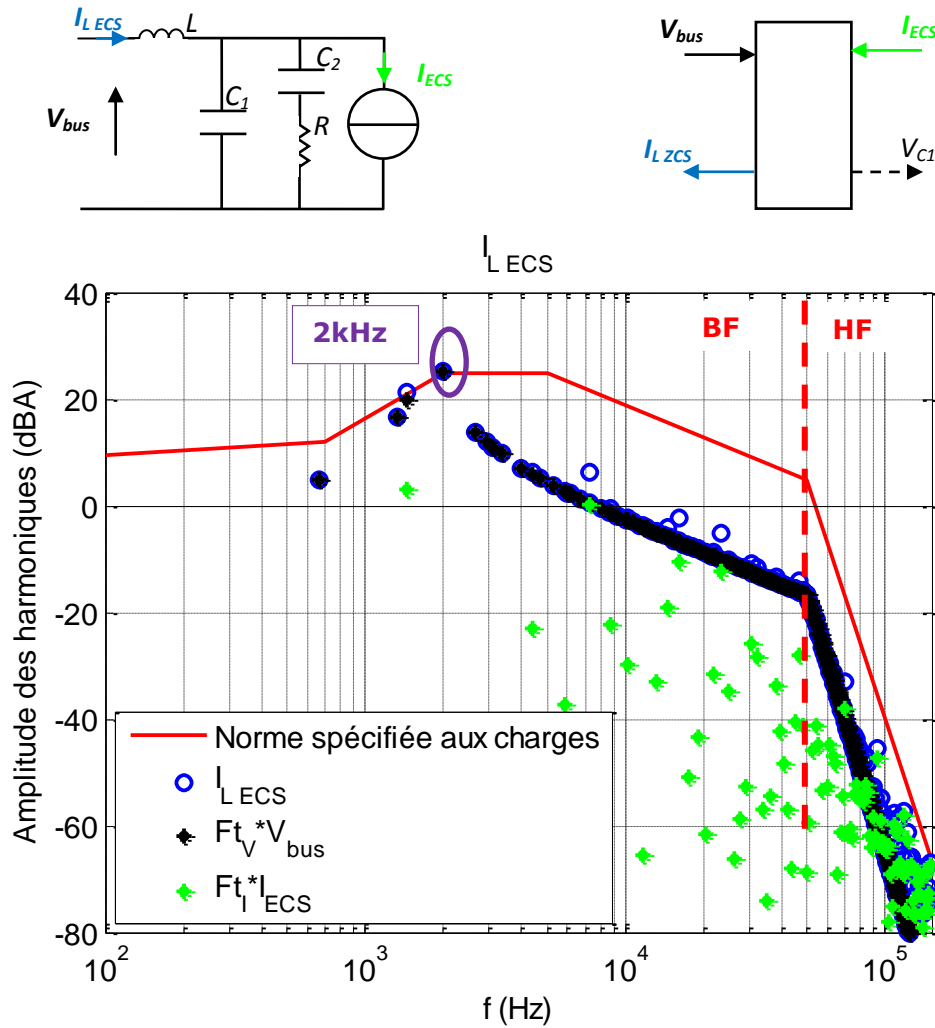


Fig IV. 12 Constitution du courant de l'inductance du filtre de l'ECS avant éclaircissement des fréquences

### 4.3.3.2 Étape 3 : vérification par l'optimisation mécaniste de l'ECS après éclaircissement

En appliquant les critères d'éclaircissement de fréquence on réalise une optimisation mécaniste du filtre de l'ECS.

Tab IV. 14 Paramètres de l'optimisation mécaniste du filtre ECS

	Avant éclaircissement	Après éclaircissement
Algorithme dans le solveur fmincon	Active-set	Active-set
Nombre d'itérations (type)	6	5
Nombres d'initialisations différentes	10	10
Temps de calcul (ms)	2601	1256

Tab IV. 15 Comparaison des résultats de l'optimisation mécaniste du filtre de l'ECS avant et après éclaircissement des fréquences

	Avant éclaircissement	Après éclaircissement
$M_{ECS}$ (kg)	3.33	3.17
$C_{1\ ECS}$ ( $\mu\text{F}$ )	1.14e-04	1.30e-04
$C_{2\ ECS}$ ( $\mu\text{F}$ )	1.05e-12	1.05e-12
$L_{ECS}$ ( $\mu\text{H}$ )	6.96e-05	6.52e-05
$R_{ECS}$ ( $\Omega$ )	2.50e+02	2.50e+02
$THD_{I_{ECS}}$ (%)	19.31	10.19

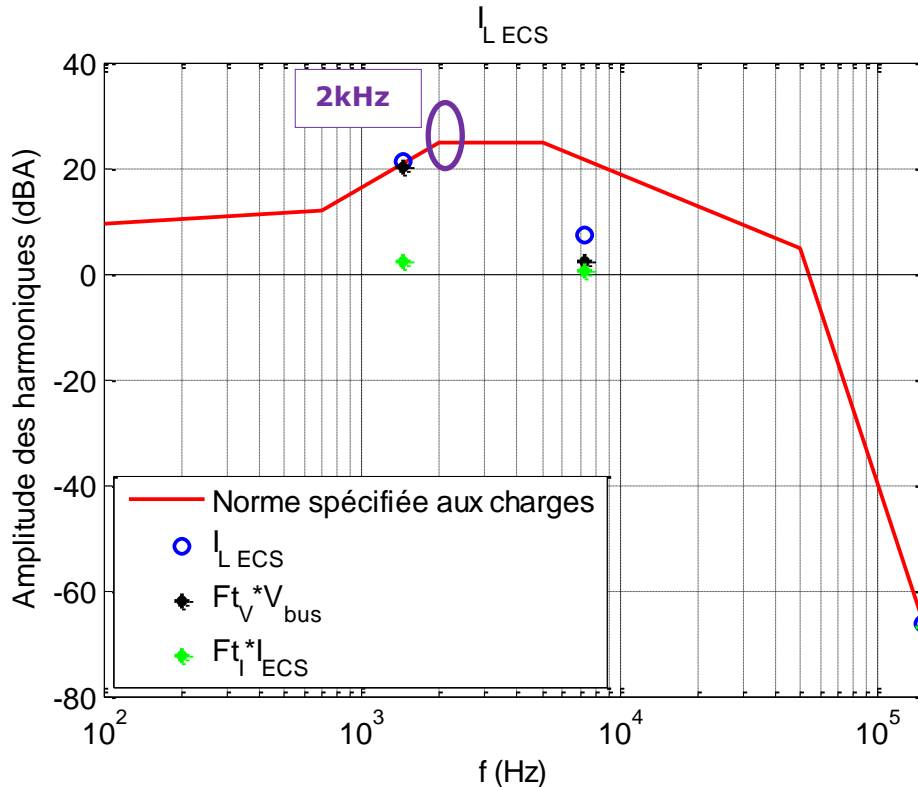


Fig IV. 13 Constitution du courant de l'inductance du filtre de l'ECS après éclaircissement des fréquences

En appliquant ces critères, on trouve donc que 3 points sont conservés (cf. Fig IV. 13) : deux d'entre eux figurent parmi les fréquences critiques du dimensionnement du filtre de l'ECS avant la réduction des fréquences. La troisième fréquence critique à 2 kHz n'est pas sélectionnée car le critère estime que ce point est redondant par rapport à celui qui le précède (et qui est sélectionné). Ceci explique le léger décalage entre les résultats avant et après éclaircissement des fréquences (3.33 kg avant contre 3.17 kg après). Ce décalage reste faible (4.8 %) et compte tenu de la topologie du filtre, l'autre point critique est redondant par rapport au premier.

On remarque également, comme pour les autres sous-systèmes, une diminution du temps de calcul liée à la réduction du nombre de fréquences.



Cependant, contrairement au VCS, le décalage entre les valeurs du taux de distorsion du courant avant et après éclaircissement est important (proche de 100%). Ce décalage s'explique par la non sélection de l'harmonique dont l'amplitude est la plus importante (ici à 2 kHz cf. Fig IV. 12) et qui participe le plus à la valeur total du  $THD_I$ .

Ce résultat nous interpelle quant à la pertinence des critères d'éclaircissement établis sur des analyses purement liées à l'amplitude des harmoniques et non à la densité de ces harmoniques ; la priorité qui a guidé la diminution du nombre de fréquences se limitait à préserver la même masse après qu'avant éclaircissement. Dans ce cas où la contrainte sur le  $THD_I$  n'est pas dimensionnante cela n'a aucun effet, par contre si cette contrainte devenait dimensionnante, il faudrait modifier et compléter les critères d'éclaircissement pour préserver non seulement la masse avant et après éclaircissement mais également le  $THD_I$ .

Ceci peut constituer une piste pour améliorer les critères de sélection des fréquences éclaircies ; ce point sera repris dans les perspectives de ce travail.

#### **4.3.4 Vérification des critères d'éclaircissement dans l'approche globale**

Nous avons montré que l'utilisation des critères d'éclaircissement n'affectait que très peu les résultats du dimensionnement dans l'approche mécaniste. Qu'en est-il de l'approche globale qui couple la source à l'ensemble des charges ? Est-ce que les fréquences retenues localement, équipement par équipement, par l'éclaircissement au niveau de chaque sous-système sont pertinentes du point de vu système ?

Afin de le vérifier, nous allons effectuer une optimisation globale avec toutes des fréquences du système puis nous allons effectuer une optimisation système en ne retenant que 8 fréquences issues des critères d'éclaircissement appliqués aux trois sous-systèmes (1 fréquence pour la source, 3 pour l'ECS et 4 pour le VCS). Ensuite, nous considérerons les variables de décision (paramètres des filtres) trouvées dans les fonctions de transfert mais cette fois avec toutes les fréquences du système (rappelons ici que cette étude n'est possible que parce que nous possédons les modèles de tous les filtres et qu'elle ne serait pas faisable dans un contexte industriel, d'où la nécessité de l'approche multiniveau).

Tab IV. 16 Paramètres de l'optimisation globale sans éclaircissement

Algorithme avec le solveur fmincon	Active-set
Nombre d'itérations (type)	8
Nombres d'initialisations différentes	10
Temps de calcul (ms)	5366

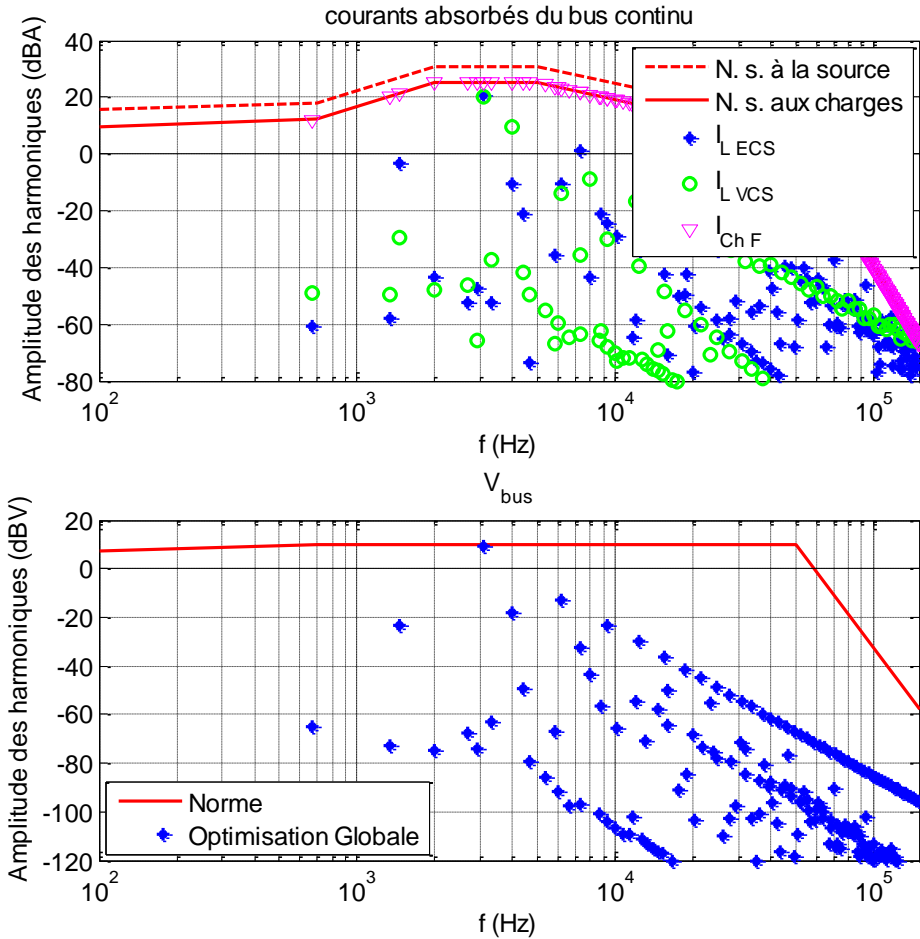


Fig IV. 14 Harmoniques de courant et de tension du réseau dimensionné par l'approche globale avant l'utilisation des critères d'éclaircissement

Tab IV. 17 Paramètres de l'optimisation globale avec éclaircissement

Algorithme avec le solveur fmincon	Active-set	Active-set
Nombre d'itérations (type)	8	7
Nombres d'initialisations différentes	10	10
Temps de calcul (ms)	5366	386

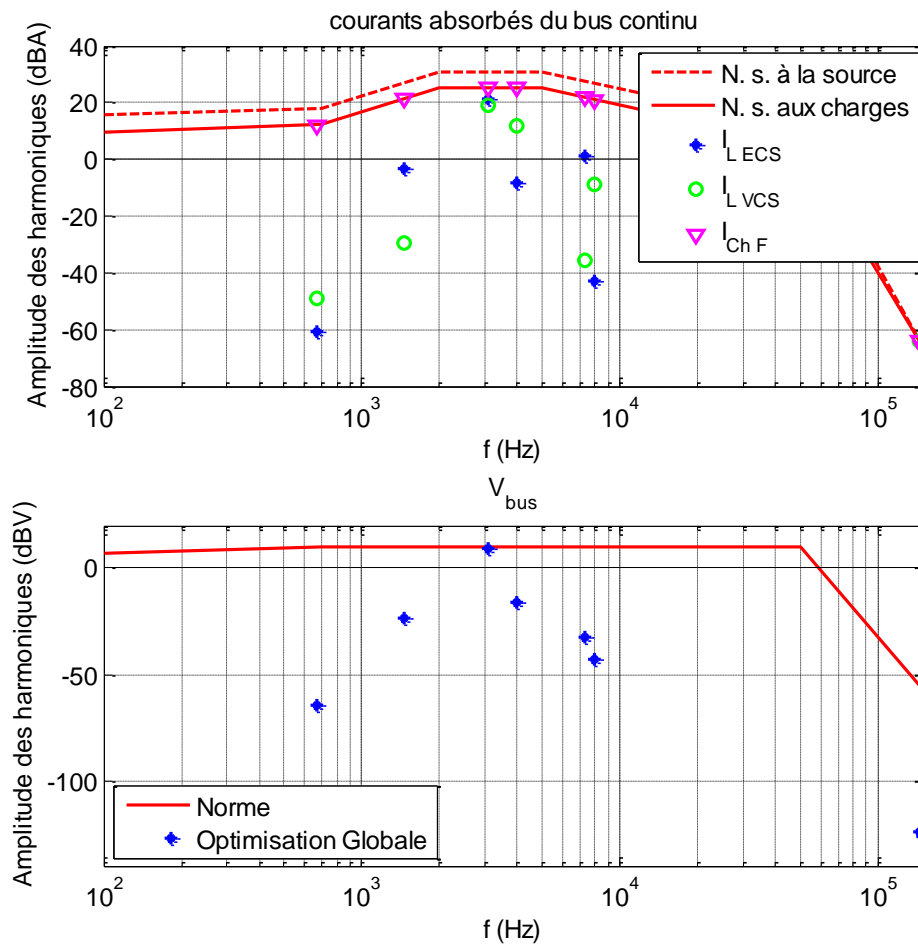


Fig IV. 15 Harmoniques de courant et de tension du réseau dimensionné par l'approche globale après l'utilisation des critères d'éclaircissement

Tab IV. 18 Comparaison entre les résultats de dimensionnement dans les deux approches : mécaniste et globale

	Approche mécaniste			Approche globale			Gain en masse
	Sans éclair.	Avec éclair.	Ecart	Sans éclair.	Avec éclair.	Ecart	
$M_{Source}$ (kg)	4.11	4.11	0.0	2.86	2.86	0	1.25
$M_{ECS}$ (kg)	3.33	3.17	0.16	2.19	2.11	0.08	1.06
$M_{VCS}$ (kg)	0.53	0.51	0.02	0.35	0.32	0.03	0.13
$M_{Système}$ (kg)	7.97	7.79	0.18	5.40	5.29	0.11	2.5

Les résultats de l'application des critères d'éclaircissement dans l'approche globale sont encore meilleurs que dans l'approche mécaniste. Le nombre total de fréquences, 8) a augmenté par rapport à l'approche mécaniste (1 pour la source, 3 pour l'ECS et 4 pour le VCS) par conséquent la fonction de transfert système est mieux interpolée et on perd moins d'information.

Nous vérifions également que les décalages entre les résultats en utilisant l'éclaircissement des fréquences sont très petits devant les gains de masses recherchés entre l'approche mécaniste et l'approche globale comme le montre le tableau suivant.

## **4.4 Dimensionnement optimal des filtres par l'approche multiniveau utilisant la formulation agrégée et causale**

L'implémentation de l'approche multiniveau se fait de la même façon que dans le cas d'étude académique (Chapitre III), le seul changement concerne le calcul de la contrainte de cohérence sur le courant du bus. À présent, les valeurs des courants absorbés du bus qui proviennent des optimisations locales des charges doivent être sommées pour être comparés au courant total envoyé comme cible au sous-problème source.

$$\mathbf{H}_I : [\mathbf{I}_{bus}]^T - ([\mathbf{I}_{L_{ECS}}]^R + [\mathbf{I}_{L_{VCS}}]^R + [\mathbf{I}_{Ch F}]^R) = 0 \quad \text{Eq IV. 10}$$

L'implémentation se fait par rapport aux 7 fréquences retenues en appliquant les critères d'éclaircissement (cf. Fig IV. 16).

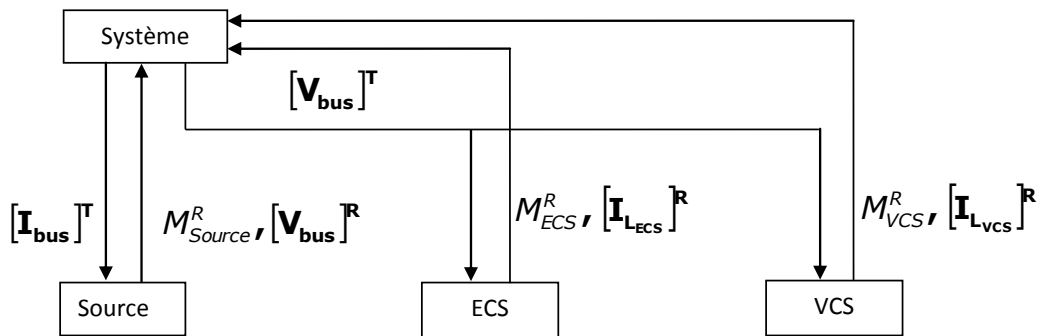


Fig IV. 16 L'approche multiniveau agrégée appliquée au cas d'étude plus réaliste

### **4.4.1 Résultats en termes de dimensionnement**

Le premier résultat à regarder est la masse du système (Tab IV. 20). L'approche multiniveau donne un résultat de dimensionnement identique à l'approche globale : 5.29 kg et ceci avec une tolérance de 1% sur les valeurs des spectres entre le niveau « système » et les optimisations locales.

Tab IV. 19 Paramètres de l'optimisation multiniveau

Algorithme	Génétique avec nichage
Nombre de fréquences sélectionnées	8
Nombre d'individus	20
Nombre de génération maximum	100
Temps de calcul (s)	1313

Tab IV. 20 Valeurs de la masse du système suivant les différentes approches

Approche	$M_{\text{système}}$ (kg)
Approche mécaniste	7.79
Approche globale	5.29
Approche multiniveau basée sur la formulation agrégée	5.29

### 4.4.2 Convergence vers la solution optimale

Nous avons lancé –comme à chaque fois qu'on utilise l'algorithme génétique avec nichage- dix exécutions pour avoir une moyenne. On a sélectionné parmi les 10 exécutions, celle qui s'approchait le plus de la moyenne pour présenter un résultat typique. Le résultat optimal est trouvé avec un paramétrage relativement faible de l'algorithme génétique au niveau système : un nombre d'individu égal à 20 et un nombre de génération égal à 56. En réalité on obtient un saut de convergence à la 37<sup>ème</sup> génération mais la masse est alors de 5.61 kg, l'algorithme continue à améliorer la solution et se stabilise à partir de la 56<sup>ème</sup> génération à 5.29 kg (cf. Tab IV. 17).

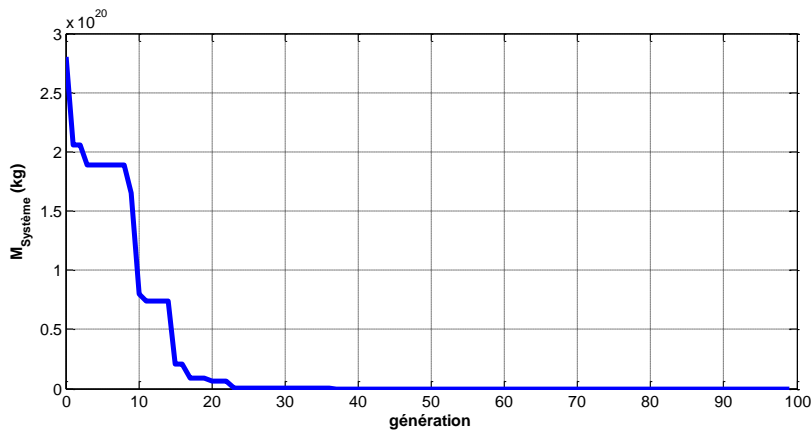


Fig IV. 17 Convergence de la fonction objectif

Du point de vue temps de calcul, il faut 1300 s pour réaliser les 100 générations (près de 22 minutes). Ce chiffre (100) correspond au nombre de génération maximum qui est un paramètre de l'algorithme génétique. La convergence quand elle a lieu peut apparaitre largement avant.

La tolérance avec laquelle on juge que les contraintes d'égalités du problème système sont respectées (cf. Eq. IV. 10) est de 1 %. On retrouve les mêmes résultats que l'approche globale (cf. Fig IV. 16).

## **4.5 Analyses et études supplémentaires**

Dans cette dernière partie, nous allons illustrer, avec deux exemples, le potentiel de l'approche multiniveau en termes d'évolution de la démarche de conception des réseaux embarqués. Les exemples que nous allons illustrer portent sur des modifications apportées à la norme ou à la façon de la définir..

### **4.5.1 Impact du relâchement de la norme en courant**

L'un des avantages de l'approche multiniveau est qu'elle permet de voir aisément l'impact de modifications apportées par l'intégrateur sur la norme soumise simultanément sur l'ensemble des sous-systèmes ; pour le montrer on propose les deux études suivantes (cf. Tab IV. 18).

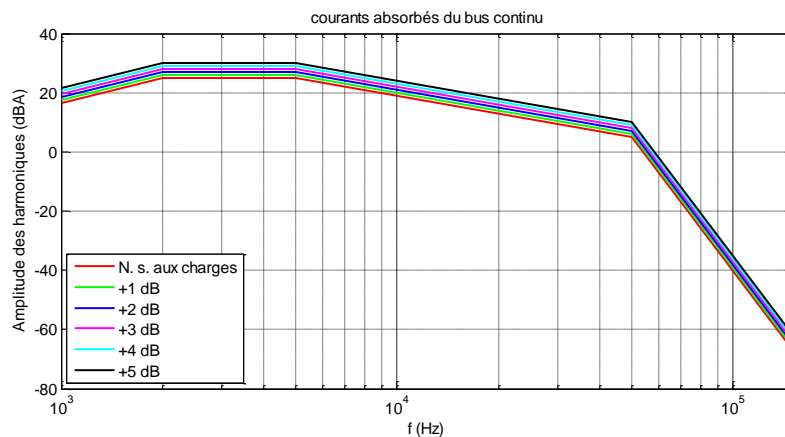


Fig IV. 18 Relâchement de la norme en courant spécifiée aux charges

On sait que les contraintes de dimensionnement des charges concernent les harmoniques qui se situent en hautes fréquences (proches de 150 kHz). Nous allons relâcher la norme en courant de quelques dBs et mesurer le gain de masse.

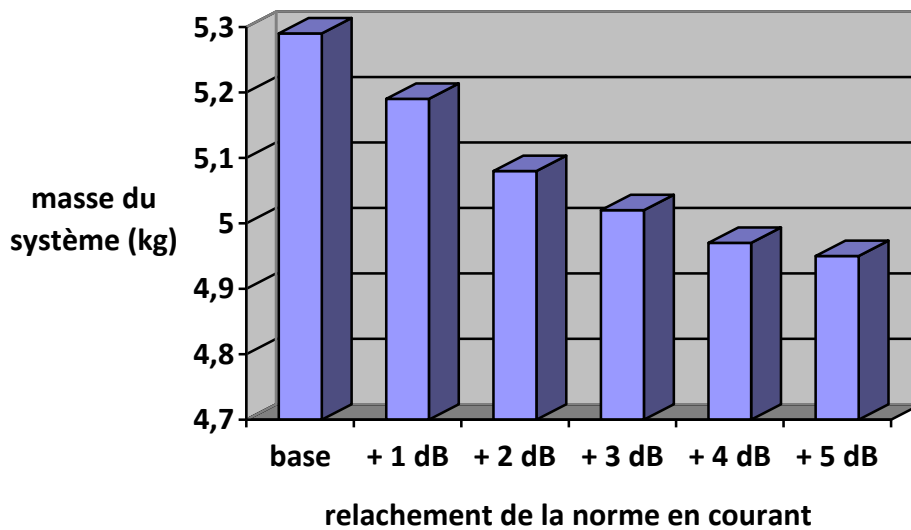


Fig IV. 19 *Évolution de la masse du système par rapport au relâchement de la norme en courant*

Le gain de masse est faible par rapport au relâchement (0.1 kg, soit -2%/dB relâché) et il a tendance à diminuer, entre 4 et 5 dB le gain est d'à peine 0.02 kg. Cette étude nous permet de conclure quant aux perspectives de gain de masse lié au relâchement de la norme et de nous focaliser plus sur d'autres pistes (cf. Tab IV. 19).

### 4.5.2 Une seule norme en courant pour tous les équipementiers

La norme en courant a été créée dans l'approche mécaniste et rajoutée aux spécifications de la tension pour forcer les sous-systèmes de type charge à participer à l'effort de filtrage. Sans cela, ce serait le canal de génération qui devrait assumer seul cette fonction.

Désormais, les sous-systèmes sont liés les uns aux autres par l'approche collaborative multiniveau, la mutualisation des filtres est prise en compte au niveau système puisque l'optimiseur système cherche à minimiser la somme des masses des filtres et non pas la masse de chaque filtre séparément. Pour le vérifier, nous proposons une série de modifications de la norme en courant pour voir les conséquences sur la masse totale du système.

Pour toutes les modifications suivantes, on considèrera le même niveau de la pollution harmonique de la charge fantôme pour évaluer l'impact des modifications des sous-systèmes uniquement.

Cas initial : la norme actuelle avec un seuil harmonique spécifié pour les charges qui est 50% plus faible que celui spécifié à la source

Tab IV. 21 Rappel des masses de la solution optimale

	$M_{Source}$	$M_{ECS}$	$M_{VCS}$	$M_{Système}$
Cas initial	2.86	2.11	0.32	5.28

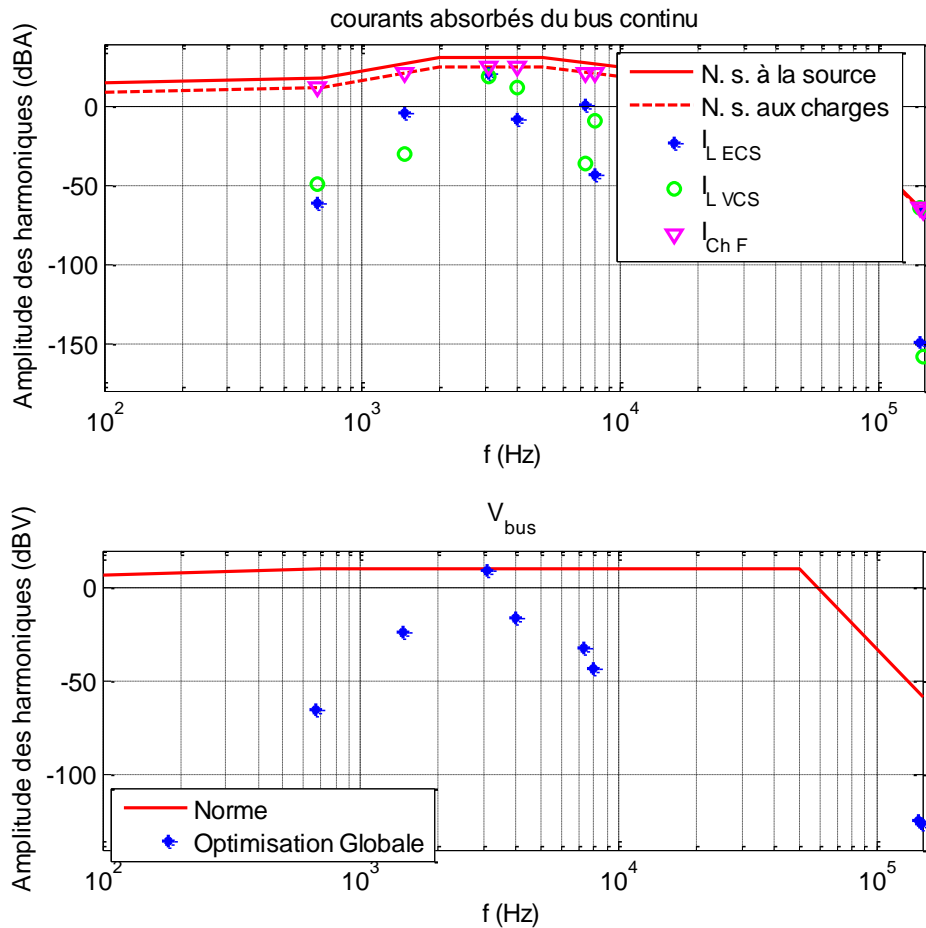


Fig IV. 20 Harmoniques de courant et de tension par rapport à la définition initiale de la norme



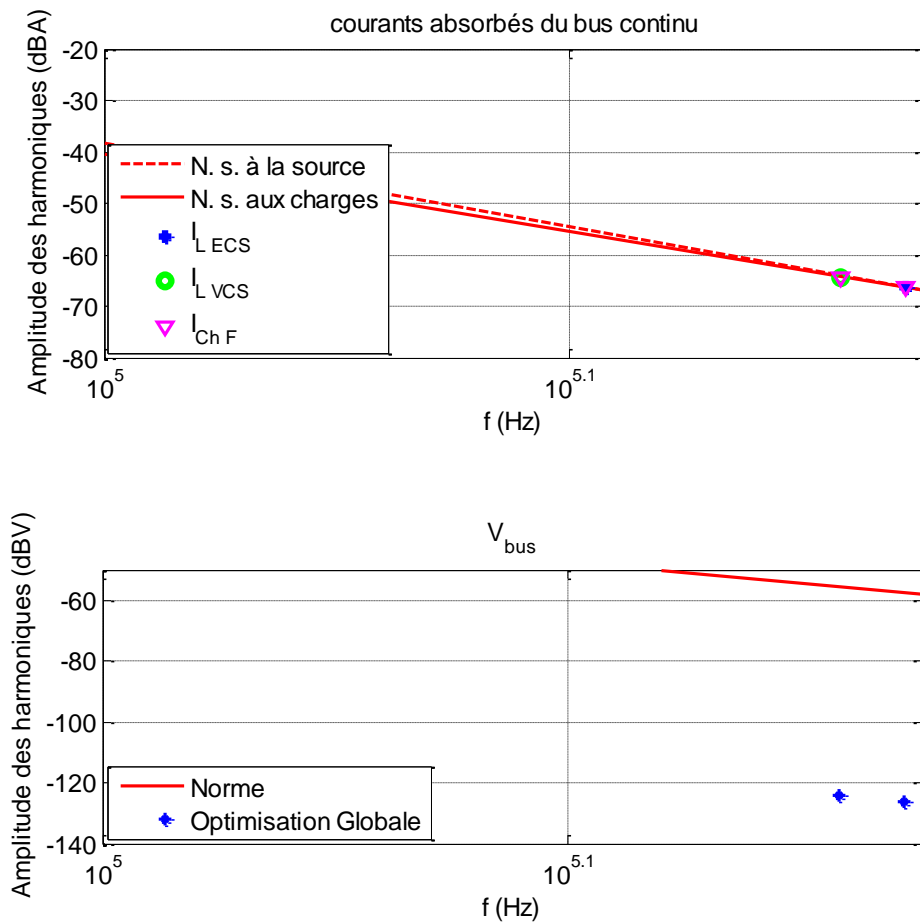


Fig IV. 20.zoom Agrandissement de l'intervalle [100,150] kHz

Comme le montre la Fig IV. 20, les contraintes critiques pour le dimensionnement concernent le dernier harmonique du courant absorbé par le filtre ECS et l'avant dernier harmonique de courant absorbé par le filtre du VCS.

Par contre, ils ne sont critiques que vis-à-vis d'une seule charge à chaque fois (dernier point en bleu et avant dernier point en vert cf. Fig IV. 20 zoom).

Afin d'éviter la double spécification de la norme en courant (une pour les équipementiers « source » et l'autres pour les équipementiers « charge »), on garde la norme spécifiée à la « source » et on la généralise aux charges en prenant soin de contraindre la somme des courants dans le bus que l'on calcule dans l'approche multiniveau.

Modification : Attribuer la norme en courant spécifiée initialement pour la source à l'ensemble des charges et contraindre la somme des courants absorbés par les filtres.

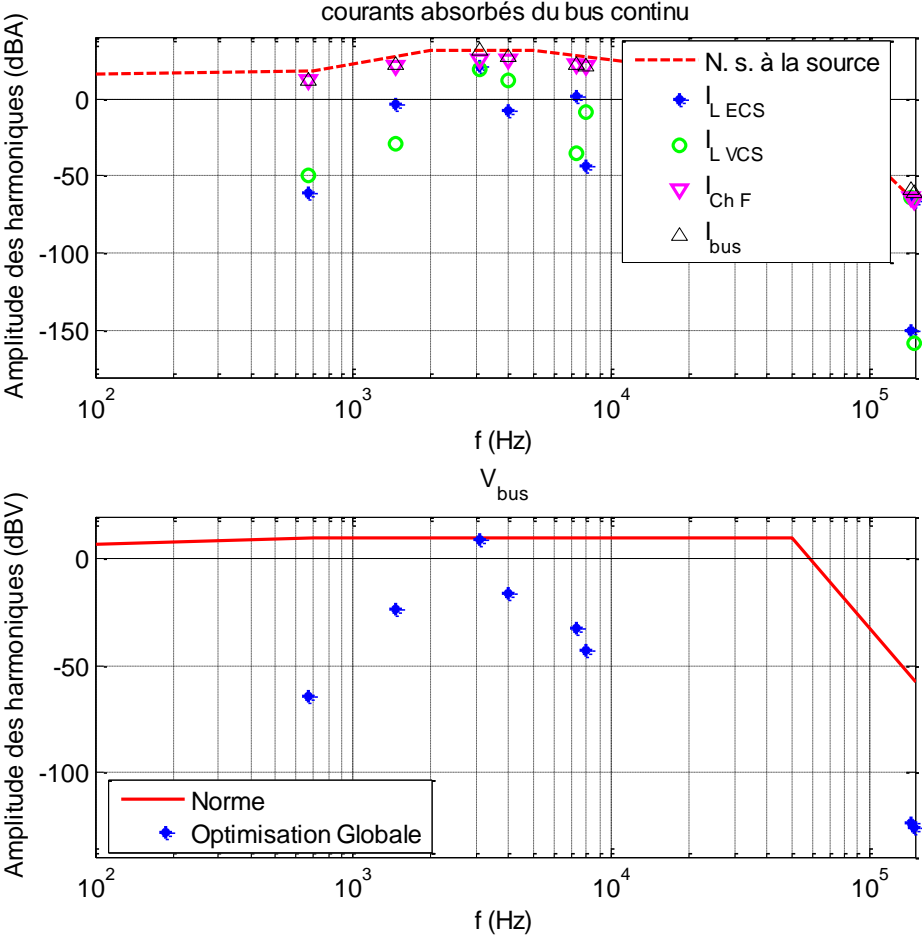


Fig IV. 21 harmoniques de tension et de courant après modification de la norme

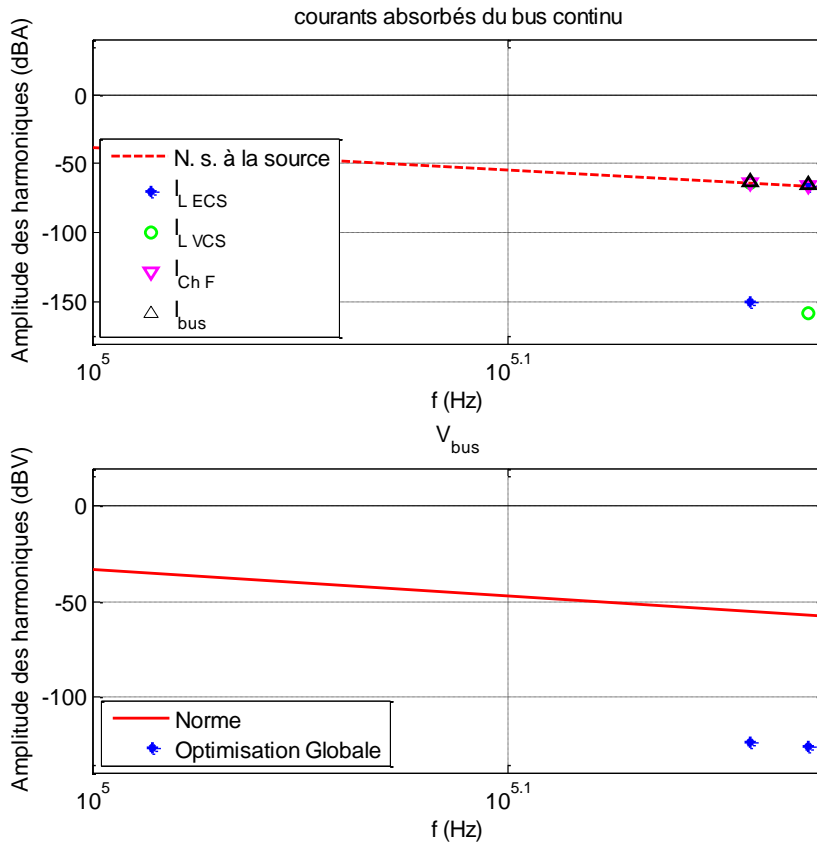


Fig IV. 21 zoom Agrandissement de l'intervalle [100,150] kHz

On retrouve la même masse que le cas initial (5.40 kg). L'avantage ici est la simplification de la norme (Un seule norme de courant existe au lieu de spécifier une norme en courant pour la source et une autre pour les charges).

### 4.5.3 Modification des contraintes d'intégration

Dans la formulation multiniveau actuelle, l'intégration est garantie par des contraintes d'égalité qui imposent les mêmes valeurs de la tension et du courant de bus à tous les sous-systèmes.

$$\begin{cases} \mathbf{H}_V : [\mathbf{V}_{bus}]^T - [\mathbf{V}_{bus}]^R = 0 \\ \mathbf{H}_I : [\mathbf{I}_{bus}]^T - ([\mathbf{I}_{L_{ECS}}]^R + [\mathbf{I}_{L_{VCS}}]^R + [\mathbf{I}_{Ch F}]^R) = 0 \end{cases} \quad \text{Eq IV. 11}$$

Dans la formulation multiniveau, afin de respecter le couplage réseau, on utilise des contraintes d'égalité pour vérifier que tous les sous-systèmes ont la même vue du réseau (tension et courant).

Cependant, on pourrait définir des contraintes d'inégalité dans le même esprit que l'approche mécaniste où l'équipementier source assure une tension plus propre que celle considérée par les équipementiers de type charge. et inversement, le courant qui résulte des optimisations des charges devrait être plus propre que le

courant considéré par la source. Le cas de l'égalité reste possible et représente le cas limite de ces contraintes.

$$\begin{cases} \mathbf{G}_V : [\mathbf{V}_{bus}]^R - [\mathbf{V}_{bus}]^T \leq 0 \\ \mathbf{G}_I : ([\mathbf{I}_{L_{ecs}}]^R + [\mathbf{I}_{L_{vcs}}]^R + [\mathbf{I}_{Ch F}]^R) - [\mathbf{I}_{bus}]^T \leq 0 \end{cases} \quad \text{Eq IV. 12}$$

Nous avons vérifié cela en réalisant une optimisation multiniveau avec le nouveau critère (contraintes d'inégalité cf. Eq IV. 12). Il nous a fallu un paramétrage plus réduit de l'algorithme (10 individus et 100 générations max) pour obtenir la convergence, ce qui confirme un résultat connu pour les algorithmes génétiques : la gestion de contraintes d'inégalité est plus aisée que la gestion de contraintes d'égalité. De plus, la solution trouvée est de 5.34 kg qui est très proche de la solution optimale de 5.29 kg avec les critères classiques (contraintes d'égalité cf. Eq IV. 11).

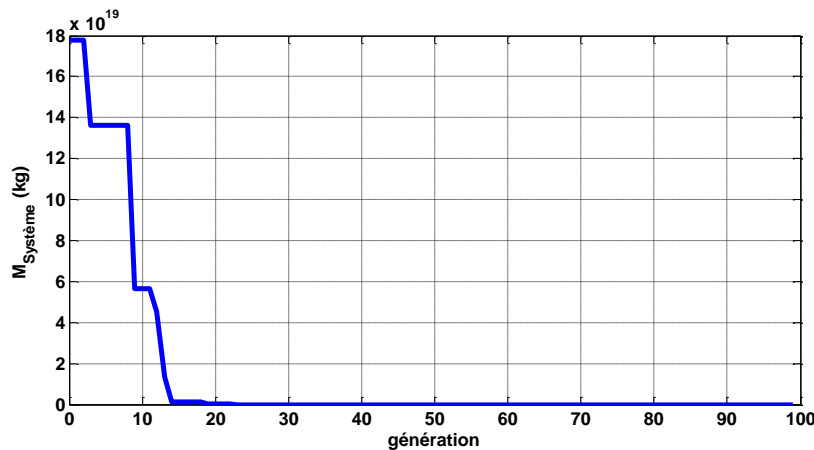


Fig IV. 22 Convergence de l'optimisation multiniveau (vue générale)

Cette modification des contraintes de cohérence facilite la convergence de l'algorithme puisque les contraintes d'inégalité sont plus faciles à atteindre. L'approche multiniveau est compatible avec le dialogue « *intégreur-équipementier* » utilisant les normes (cf. Fig IV. 22).

## **4.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons validé l'approche d'optimisation multiniveau sur un cas d'étude plus réaliste qui, bien qu'encore simplifié, est typique des réseaux électriques aéronautiques.

Pour cela, nous avons utilisé un cas d'étude plus complexe qui intègre différentes caractéristiques des réseaux réels que l'on ne trouve pas dans le cas d'étude simplifié présenté au chapitre III. La première évolution est liée au nombre de charges ; le réseau étudié comporte trois charges au lieu d'une précédemment.

Deuxièmement, il prend en considération les charges dont le dimensionnement ne peut être remis en compte par l'approche (la charge fantôme). Le dernier point concerne la dimension spectrale où nous avons utilisé des spectres issus directement des équipementiers.

L'approche multiniveau agrégée a confirmé sa pertinence dans le traitement de ce cas d'étude ; la formulation agrégée et causale a permis de gérer le dimensionnement de trois filtres soumis à quatre sources de pollution harmonique. Elle permet également de tenir compte des parties du réseau qu'elle ne redimensionne pas (charge fantôme) en se basant sur les niveaux de réjection harmonique autorisés par la norme.

Concernant le traitement des spectres harmoniques qui engendrerait une formulation multiniveaux complexe pour un réseau à grand nombre de charge, l'hypothèse de réduction des harmoniques aux seules raies dimensionnantes a fait l'objet d'un développement particulier qui a permis de formuler des critères d'éclaircissement des spectres. Ces critères ont été testés et validés par l'approche mécaniste et l'approche globale. Grâce à cela, l'approche multiniveau a pu être appliquée avec un coût de calcul maîtrisé et on a pu retrouver le résultat optimal du dimensionnement, un résultat que nous avons vérifié en considérant l'ensemble des fréquences des spectres.

Enfin, nous avons pu utiliser l'approche multiniveau pour réaliser des études systèmes remettant en cause le réglage de la norme et sa définition. Le but est d'offrir à l'intégrateur un outil qui lui permettrait de mesurer l'impact de l'évolution de la norme sur le dimensionnement optimal du réseau de façon à choisir en connaissance de cause le niveau de contrainte de qualité à imposer aux équipementiers.

# Conclusion générale et perspectives

---

## **Rappel du contexte général**

La plateforme GENOME du programme national CORAC préconise la rupture technologique permettant l'exploration de nouvelles pistes à fort potentiel d'évolution afin de remplacer les technologies existantes en butée d'évolution, devenues moins attrayantes dans le contexte de l'avion plus électrique.

C'est dans ce cadre que se situent nos travaux de recherche. Ils visent à identifier les axes de développement en matière de méthodologies de conception au niveau système permettant une optimisation de la masse des équipements électriques. Notre travail nous a conduit à la remise en question des processus de développement actuels, rigides et cloisonnés, avec un dialogue systémier – équipementier via la norme, cette dernière étant un gage de fiabilité pour ce qui est de l'association des sous-systèmes au sein du réseau ; ces processus de développement « mécanistes » sont la première source du surdimensionnement du réseau électrique de bord qui, dans l'état, empêchent l'émergence d'autres approches basés sur plus de communication et de compromis entre les acteurs de réseau.

## **Justification de notre travail de recherche**

La réponse actuelle en termes d'approche de conception système obéit à une logique qu'il nous a fallu comprendre et caractériser au vue de l'évolution des réseaux électriques de bords (électrification et montée en puissance), de leur complexité et des enjeux industriels qui y sont rattachés. Par la suite, l'examen de l'approche mécaniste actuellement prônée a permis d'illustrer les lacunes qui empêchaient d'atteindre l'optimum global, conduisant comme évoqué précédemment à un sur dimensionnement. Il y a donc une marge d'amélioration qu'il est possible de mesurer, moyennant la connaissance exacte de l'ensemble du système, par l'approche globale que nous avons présentée. Une approche globale intégrant TOUS les éléments dans une boucle unique étant utopique vue la complexité des réseaux, les questions qui nous ont été posées furent les suivantes :

- « Peut-on atteindre l'optimum global au niveau réseau en partant de l'approche classique mais en y introduisant quelques changements »?

- Etait-il nécessaire de modifier en profondeur la façon dont on aborde la conception de ces systèmes ?

Tels étaient les questionnements derrière la présentation de la MFPE et de l'approche collaborative d'un côté, et des approches multiniveau de l'autre.

Le second chapitre a donc été consacré à répondre au premier questionnement. Nous avons utilisé un cas d'étude d'optimisation de filtres comme support pour expliquer et illustrer le traitement du problème de dimensionnement optimal. A travers de ce cas d'école, volontairement simplifié, nous avons pu comparer les « tenants et aboutissants » (caractéristiques et performances) de différentes approches, partant de l'approche classique mécaniste pour continuer par l'approche globale (en une boucle), puis en terminant par la mise en œuvre des méthodes MFPE et l'approche collaborative séquentielle. Nous avons pu, par ce comparatif, mesurer les performances des approches en termes d'objectifs (masse optimale), de performance (coût de calcul) et de « typologie » (niveau de collaboration). Ces comparaisons nous ont conduits à identifier les faiblesses et les points forts, nous guidant vers l'élaboration de l'approche multiniveau.

Dans le troisième chapitre, nous avons ainsi exposé l'approche multiniveau qui constitue pour nous le « saut méthodologique » proposé dans cette thèse dans le contexte des réseaux aéronautiques. Cette approche complexe nécessite un effort important de formulation que nous avons justifié en proposant trois formulations différentes. En examinant à chaque fois les points faibles, en introduisant le concept d'encapsulation puis celui de formulation agrégée et causale, nous sommes finalement parvenus, après un parcours parfois « fastidieux » à une formulation performante (agrégée) et efficace.

Le chapitre IV a servi de validation de l'approche multiniveau agrégée et causale sur un autre cas d'étude, plus complexe mais plus représentatif de la réalité « de terrain ». Nous avons prouvé la pertinence de cette approche agrégée par rapport à l'augmentation du nombre de charges : en termes d'objectif de réduction de masse, la formulation multiniveau conduit à des résultats quasi identiques à ceux qu'on pourrait obtenir si l'on était capable de mener une optimisation globale du réseau dans une seule boucle. Enfin, l'utilisation de critères d'éclaircissement du spectre de pollution, couplée à l'approche multiniveau agrégée nous ont permis de gérer, en les simplifiant, des spectres fréquentiels complets. Avec cette formulation et les simplifications conduites par l'éclaircissement, nous sommes maintenant confiants pour aborder des « cas réels » que nous pourrions éprouver sur un réseau à grand nombre de charges, à condition de disposer des données nécessaires.

En fin de chapitre, nous avons proposé quelques pistes d'évolution de la norme : l'approche multiniveau a démontré tout son potentiel en tant qu'outil de réglage des normes à concevoir par l'intégrateur.

### **Résumé des principaux apports de la thèse**

Ils se situent à deux niveaux :

Le premier a été de proposer une palette assez variée d'approches d'optimisation que l'on pourrait reprendre pour la conception d'autres systèmes. Bien que les approches classiques ne soient pas satisfaisantes par rapport à nos besoins, ils peuvent constituer des pistes pour d'autres systèmes avec des cahiers des charges différents. Le concepteur peut se servir de nos travaux pour se guider dans le choix de l'approche la plus adéquate ou pour en développer une à la mesure du problème de dimensionnement rencontré.

Le deuxième, c'est l'approche multiniveau agrégée et causale, plus par la formulation multiniveau que par sa résolution. La formulation d'un problème d'optimisation est une condition nécessaire « essentielle » à sa résolution, c'est d'autant plus vrai lorsqu'il s'agit d'un problème multiniveau.

### **Perspectives**

L'approche multiniveau a été validée par deux cas d'études, il reste cependant encore beaucoup à faire pour la valider complètement, en assurant « une fiabilité totale des résultats obtenus », ce dernier aspect prenant tout son sens dans le contexte applicatif en aéronautique.

Le premier point concerne les pollutions harmoniques des équipementiers. Nous avons considéré les spectres fournis par nos partenaires tels qu'ils sont, mais on pourrait y appliquer un traitement de signal pour ôter du spectre certaines fréquences qui n'ont pas de sens physique mais qui résultent plus de la conversion temporelle-fréquentielle (exemple des harmoniques basses fréquences dans les spectres des courants des onduleurs lorsqu'on connaît l'ordre de grandeur des fréquences de découpage utilisées). Toujours dans le même registre, il convient d'effectuer une étude de robustesse des critères d'éclaircissement par rapport au glissement fréquentiel des spectres qui peuvent bouger selon la fréquence de découpage.

Un second point non véritablement abordé ici concerne les profils de mission au cours du vol. En effet, nous avons considéré ici un seul spectre de pollution harmonique par sous-système. Or, il est clair que le spectre évoluerait, en amplitude et fréquence, au cours la mission de l'aéronef. Cette vision multi points de mission ajoute une dimension à la complexification du processus. Les notions d'éclaircissement seraient donc à re-examiner en tenant compte de cette nouvelle dimension.



Un troisième point, plus ambitieux, serait de remonter l'information sur les fréquences caractéristiques du système (fréquence du générateur et fréquences de découpage) pour les gérer comme variables de décision au niveau système. Il paraîtrait effectivement intéressant, « mais certainement pas simple », que le systémier joue son véritable rôle de chef d'orchestre en répartissant entre chaque équipementier les bandes de fréquences qui lui correspondent sur le plan technologique. Ceci permettrait d'optimiser l'étalement du spectre du courant de bus, étalement probablement synonyme d'une réduction de la masse globale. Pour cela, il faudrait une nouvelle formulation du problème.

Une perspective supplémentaire serait de repousser les contours de l'approche multiniveau en intégrant plus de sous-systèmes, l'électronique de puissance dans un premier temps et les moteurs afin d'explorer tous les couplages qui peuvent exister dans le système.

Aussi, la robustesse de ces processus collaboratifs reste pour nous « *la question centrale* » ; en effet, « *dans la vraie vie* », le spectre fourni au systémier par un équipementier, à un instant donné du processus de développement d'un programme, est susceptible d'évoluer dans la vie du programme ou tout simplement de différer entre la phase de conception et la démonstration en phase ultime de développement (fort TRL). Ainsi, de façon plus générale, le « spectre de spectres » qui agrège l'ensemble des données de pollution issues des équipementiers a été dans notre cas considéré comme une donnée déterministe, puis éclairci par les critères énoncés au chapitre 4. Que se passe-t-il si cette donnée d'entrée n'est pas exacte ou varie au cours du développement des équipements ? Il reste donc un certain nombre d'étapes essentielles à franchir pour parvenir GARANTIR aux avionneurs ... et à leurs passagers une robustesse et donc une fiabilité suffisante en termes de conception d'équipement, cette fiabilité restant quand même en grande partie garantie ici par le respect de la norme en tension.

Il existe par ailleurs des perspectives relatives aux outils et plateformes logicielles qu'il faut mettre en œuvre pour déployer les approches d'optimisation collaborative. L'équilibre entre confidentialité et collaboration que nous avons abordé se déclinera dans les applications industrielles en méthodes orientées « boîtes blanches » ou « boîtes noires ».

# **Annexes**

# Annexe A : Estimation analytique des harmoniques d'un onduleur triphasé à MLI

Dans les travaux de [ZHA 06], une méthode analytique est présentée pour le calcul des harmoniques produits par un onduleur à MLI sur le bus continu.

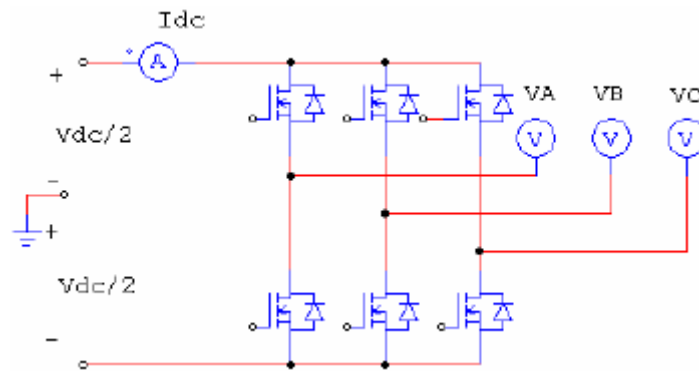


Fig A. 1 Représentation d'un Onduleur triphasé

A l'aide des formules présentées, on peut déterminer bien avant la construction de l'onduleur le spectre qu'on obtiendra sur le bus continu pour dimensionner correctement le filtre.

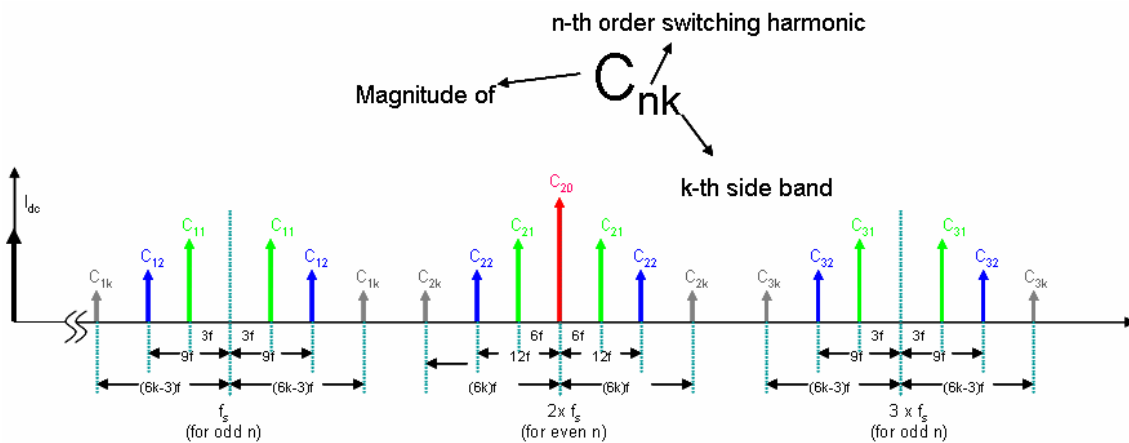


Fig A. 2 Distribution spectrale des harmoniques de courant coté continu

L'approche analytique proposée permet de caractériser la distribution harmonique en fonction de la fréquence de découpage et de la fréquence du fondamental. Les raies se situent autour des fréquences multiples de la fréquence de découpage.

L'approximation de Bessel permet de donner une formule approximative pour calculer analytiquement les magnitudes des harmoniques de courant:

$$\begin{aligned}
 I_{dc} &= I_{dc_0} \\
 &+ 0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_{1k} \{ \cos[2\pi(f_s + (6k - 3)f)t] + \cos[2\pi(f_s - (6k - 3)f)t] \} \\
 &+ C_{20} \cos[2\pi(2f_s)t] + \sum_{k=1}^{\infty} C_{2k} \{ \cos[2\pi(2f_s + 6kf)t] + \cos[2\pi(2f_s - 6kf)t] \} \\
 &+ 0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_{3k} \{ \cos[2\pi(3f_s + (6k - 3)f)t] + \cos[2\pi(3f_s - (6k - 3)f)t] \} \\
 &+ C_{40} \cos[2\pi(4f_s)t] + \sum_{k=1}^{\infty} C_{4k} \{ \cos[2\pi(4f_s + 6kf)t] + \cos[2\pi(4f_s - 6kf)t] \} \\
 &+ \dots \\
 &+ \dots
 \end{aligned}$$

Eq. AI. 1

Avec

$$I_{dc_0} = \frac{3}{2} \left( \frac{M}{2} \right) I_m \cdot \cos \theta$$

$\{ I_m : \text{Amplitude du courant AC}$   
 $\theta : \text{déphasage entre le courant AC et la tension AC}$

$$|C_{nk}| = \frac{3}{\pi} I_m \frac{1}{n} \sqrt{J_{6k-4}^2 \left( \frac{\pi}{2} n \times M \right) + J_{6k-2}^2 \left( \frac{\pi}{2} n \times M \right) - 2J_{6k-4} \left( \frac{\pi}{2} n \times M \right) J_{6k-2} \left( \frac{\pi}{2} n \times M \right) \cos 2\theta}$$

pour  $n$  impaire

$$|C_{n0}| = \frac{6}{\pi} I_m \frac{1}{n} \left| J_1 \left( \frac{\pi}{2} n \times M \right) \cos \theta \right| \quad \text{pour } n \text{ pair}$$

$$|C_{nk}| = \frac{3}{\pi} I_m \frac{1}{n} \sqrt{J_{6k-1}^2 \left( \frac{\pi}{2} n \times M \right) + J_{6k+1}^2 \left( \frac{\pi}{2} n \times M \right) - 2J_{6k-1} \left( \frac{\pi}{2} n \times M \right) J_{6k+1} \left( \frac{\pi}{2} n \times M \right) \cos 2\theta}$$

pour  $n$  pair et  $k \neq 0$

$J_k(x) : k^{\text{ème}}$  ordre de la fonction de Bessel

Tab A. 1 On Distribution spectrale des principales raies

$f$	$0$	$f_s$			
$f$	$0$	$f_s + 3f$	$f_s - 3f$	$f_s + 9f$	$f_s - 9f$
$C_{nk}$	$I_{dc_0}$	$C_{11}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{12}$
$\frac{C_{nk}}{I_m}$	0.5850	0.1603	0.1603	0	0

$\frac{C_{nk}}{I_m} (\%)$	100	27.40	27.40	0	0
$f$	$2f_s$				
	$2f_s$	$2f_s + 6f$	$2f_s - 6f$	$2f_s + 12f$	$2f_s - 12f$
$C_{nk}$	$C_{20}$	$C_{nk}$	$C_{20}$	$C_{nk}$	$C_{20}$
$\frac{C_{nk}}{I_m}$	0.4093	$\frac{C_{nk}}{I_m}$	0.4093	$\frac{C_{nk}}{I_m}$	0.4093
$\frac{C_{nk}}{I_m} (\%)$	69.97	$\frac{C_{nk}}{I_m} (\%)$	69.97	$\frac{C_{nk}}{I_m} (\%)$	69.97
$f$	0	$3f_s$			
$f$	0	$3f_s + 3f$	$3f_s + 3f$	$3f_s + 9f$	$3f_s - 9f$
$C_{nk}$	$I_{dc_0}$	$C_{31}$	$C_{31}$	$C_{32}$	$C_{32}$
$\frac{C_{nk}}{I_m}$	0.5850	0.1149	0.1149	0	0
$\frac{C_{nk}}{I_m} (\%)$	100	19.64	19.64	0	0
$f$	$4f_s$				
$f$	$4f_s$	$4f_s$	$4f_s$	$4f_s$	$4f_s$
$C_{nk}$	$C_{40}$	$C_{40}$	$C_{40}$	$C_{40}$	$C_{40}$

---

$\frac{C_{nk}}{I_m}$	<i>0.1381</i>	<i>0.1381</i>	<i>0.1381</i>	<i>0.1381</i>	<i>0.1381</i>
$\frac{C_{nk}}{I_m}$ (%)	<i>23.61</i>	<i>23.61</i>	<i>23.61</i>	<i>23.61</i>	<i>23.61</i>

# Annexe B : Présentation de CADES 3

La présentation du logiciel se fait à travers un cas d'étude similaire au cas académique présenté dans le chapitre II et III.

## Description du modèle optimisé

Le modèle utilisé pour réaliser et tester l'implémentation de la stratégie d'optimisations multiniveaux dans CADES 3 est simple et de taille réduite. C'est un modèle à visée pédagogique et académique. Il est suffisamment simple pour être appréhendé et en étudier exhaustivement les propriétés tout en étant suffisamment complexe pour montrer les difficultés, les enjeux scientifiques et industriels.

Il s'agit d'un réseau avionique HVDC composé uniquement d'un redresseur et d'un onduleur triphasés connectés sur ce bus continu. Chaque convertisseur possède un filtre d'harmoniques sur le bus continu et reçoit une pollution harmonique en amont ( $H_{Is\_fx}$ ) et en aval ( $H_{Il\_fx}$ ). Fig B. 1 est un schéma simplifié de ce réseau.

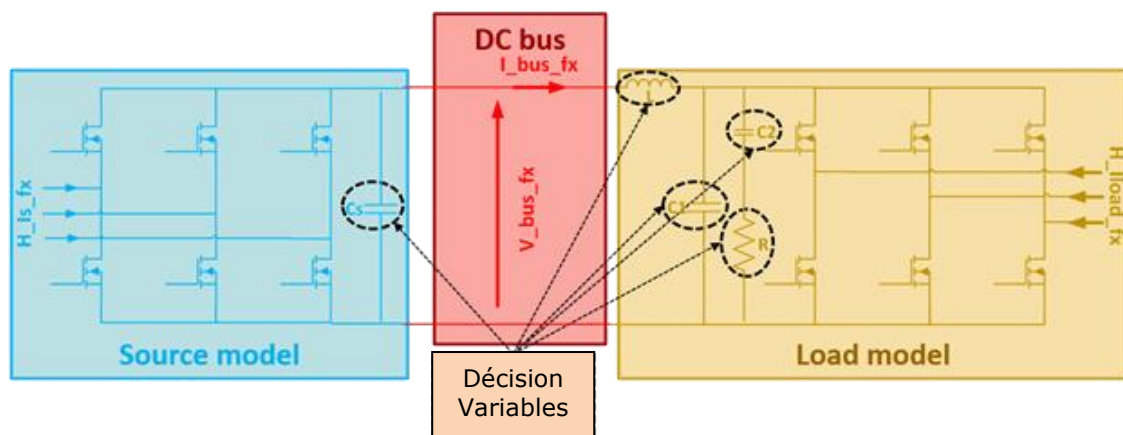


Fig B. 1 Schéma du réseau à optimiser

En optimisation, les variables de décision sont les variables qui possèdent un degré de liberté et qui influencent les fonctions objectifs et/ou les contraintes du système. Dans ce cas académique, l'unique fonction objectif est la minimisation de la masse globale des filtres du système. Ainsi, le but est de déterminer les valeurs des capacités et des inductances des filtres, qui permettent d'atténuer suffisamment les harmoniques du bus continu pour que les normes soient respectées, tout en ayant une masse globale des filtres la plus faible possible. En d'autres termes, on cherche les

valeurs de  $C_s$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $L$  et  $R$  qui donnent une masse globale de filtre minimale tout en veillant au respect des normes en harmoniques sur le bus continu.

Pour diminuer la taille du problème d'optimisation, seules quatre fréquences d'harmoniques seront étudiées. Quatre types d'harmoniques seront aussi discernés:

- Les harmoniques en courant du bus continu (nommés  $I_{bus\_fx}$ )
- Les harmoniques en tension du bus continu (nommés  $V_{bus\_fx}$ )
- Les harmoniques en courant reçus par la source sur son réseau triphasé alternatif (nommés  $H_{Is\_fx}$ )
- Les harmoniques en courant reçus par la charge sur son réseau triphasé alternatif (nommés  $H_{Il\_fx}$ )

Les harmoniques du bus continu sont contraints en amplitude par des normes (établies par Airbus dans notre cas, cf. Fig II. 4). C'est pourquoi ces harmoniques sont découpés en parties réelles et en parties imaginaires. Cependant dans la suite de ce rapport, afin d'en simplifier la lecture, les parties réelles et imaginaires ne seront pas discernées dans les schémas.

Les harmoniques reçus par la source et la charge sur leur réseau triphasé respectif ont été déterminés au préalable (cf. Annexe A). Il y a aussi la possibilité de choisir les quatre fréquences de ces harmoniques à étudier. Ainsi, ces valeurs et ces choix de fréquences constituent le point de fonctionnement de l'optimisation multi-niveaux.

### **Description de la méthode multiniveau appliquée sur un cas d'étude académique dans CADES 3**

Si la stratégie d'optimisation multiniveaux ou cascade porte ces deux noms, c'est pour la simple raison qu'il s'agit d'optimisation en cascade: une optimisation globale (à l'échelle intégrée et globale, typiquement celle du systémier Airbus) pilote des sous-optimisations à une échelle locale (à l'échelle des équipements et donc des équipementiers). Le modèle du système global peut être découpé de la façon suivante : un modèle pour la source, un modèle pour la charge et un modèle gérant la connexion des deux autres, nommé modèle global.

La procédure d'optimisation multiniveau implémentée dans CADES peut être illustrée (Fig B. 2) ainsi que décrite de manière itérative dans le temps comme fait ci-dessous :

- Le systémier (modèle global) définit des **cibles**. Ces cibles sont : les valeurs des quatre harmoniques en courant du bus continu pour la source (nommés  $I_{bus\_target}$  dans la Fig B. 2) et les valeurs des quatre harmoniques en tension du bus continu pour la charge (nommés  $V_{bus\_target}$  dans la Fig B. 2).



- Ces **cibles** deviennent des entrées fixes pour les modèles de la source et de la charge. Une sous-optimisation est réalisée sur chacun de ces deux modèles. Ces sous-optimisations doivent être rapides, déterministes et précises, d'où le choix ici de l'algorithme à gradients SQP. En fonction du modèle équipementier optimisé, le choix de l'algorithme peut être différent.
- Les modèles de la source et de la charge envoient certains de leurs résultats d'optimisations. Dans ce cas précis : les quatre harmoniques en tension du bus continu pour la source (nommés  $V_{bus}$  dans la Fig B. 2), les quatre harmoniques en courant du bus continu pour la charge (nommés  $I_{bus}$  dans la Fig B. 2), leur masse ( $mass_S$  et  $mass_L$ ) et un indice de convergence des optimisations locales ( $convS$  et  $convL$ ).
- L'algorithme d'optimisation (NSGA2, [DEB 02]) du modèle global (système) évalue les performances du système (masse globale, respect des contraintes).
- L'algorithme d'optimisation (NSGA2) du modèle global (système) définit en fonction des performances évaluées précédemment de nouvelles cibles pour les sous-optimisations des modèles de source et de charge.

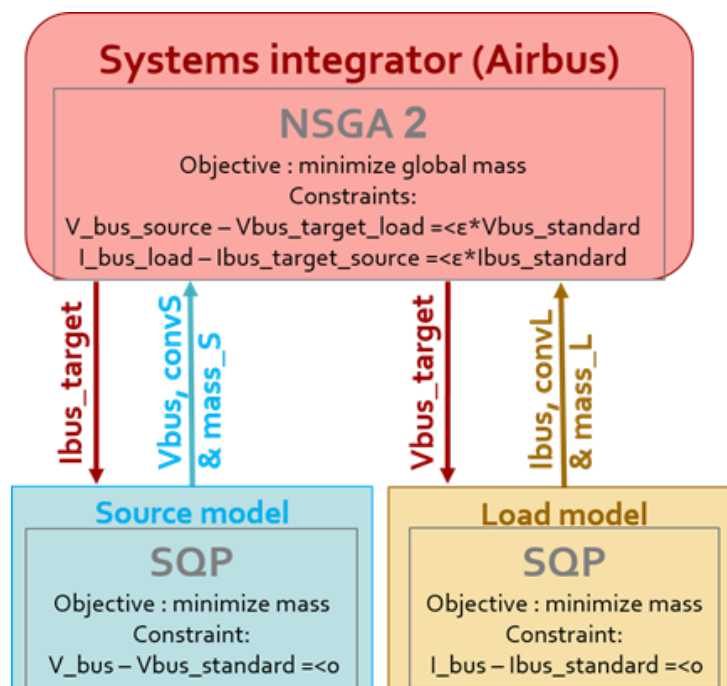


Fig B. 2 Illustration de la stratégie d'optimisation en cascade sur un cas

---

## **Implémentation dans CADES 3.1**

Suite à la période de développement, de débogage et de tests de CADES 3, l'ergonomie de CADES 3.1 est désormais appropriée à l'optimisation en cascade. Par conséquent l'implémentation de la stratégie d'optimisation multiniveau est aisée et se réalise en quelques étapes décrites ci-dessous.

### **Spécification de l'optimisation en cascade dans u outil industriel comme CADES 3.1**

L'une des exigences des équipementiers est que leurs modèles de convertisseurs et de filtres restent confidentiels. Il est donc absolument nécessaire lors de l'implémentation de la stratégie multiniveau dans CADES 3 de répondre à cette requête en créant des modèles de source et de charge en format « *boîtes noires* ». Dans l'approche proposée dans l'outil CADES, ces boîtes noires portent le nom de « *MUSE Optimizer* » et sont des composants logiciels. David Magot donne la définition suivante d'un composant logiciel [MAG 04] : « *un composant logiciel est une entité autonome qui encapsule des codes informatiques, et qui décrit par des interfaces les interactions qu'il autorise avec d'autres composants* ».

#### **Création des MUSE Optimizer**

Ces boîtes noires sont en réalité des composants que l'on nomme « *MUSE Optimizer* », pour la simple raison qu'un modèle dans CADES est un composant « *MUSE<sup>4</sup>* ». Et, à ce composant MUSE, on ajoute un cahier des charges associé à un algorithme d'optimisation. Dans la suite de cette section est décrite la démarche qui permet d'obtenir des MUSE optimizer.

#### **Création du composant : modèle MUSE**

Avant de créer le MUSE Optimizer, il faut créer le composant modèle MUSE [DEL 15b]. Ce composant est un modèle. C'est dès lors le rôle de l'équipementier de réaliser ce modèle. Pour cela, il a à sa disposition trois langages de modélisation disponibles dans CADES 3 : SML (System Modeling Language), C++ et Java. Dans ce cas académique (cf. Fig B. 3), les modèles de source et de charge ont été décrits dans le langage SML (qui a l'avantage d'être déclaratif et non procédural, donc plus simple à utiliser).

Ensuite, via l'interface graphique, l'équipementier crée en un clic son composant modèle MUSE. Effectivement, CADES possède un outil pour le réaliser de manière automatique via un « *wizard* » [DEL 15b].

---

<sup>4</sup> MUSE est une norme pour l'interopérabilité, la capitalisation et la réutilisation de modèles et d'algorithmes [6]

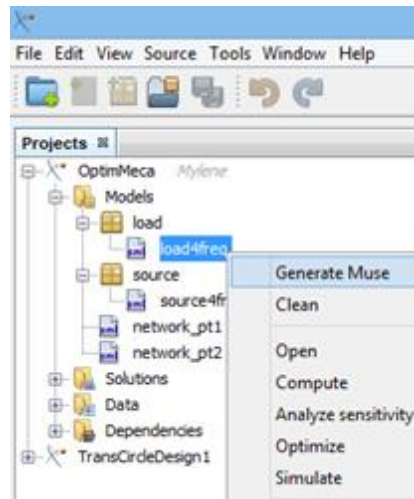


Fig B. 3 Génération du composant MUSE modèle depuis l'interface graphique

### Création du cahier des charges par les équipementiers : fichier de spécifications

Un cahier des charges (degré de liberté des entrées/sorties et fonction objectif à minimiser ou maximiser) et un paramétrage d'algorithme forment un fichier appelé « *fichier de spécifications* ». Encore une fois, l'interface graphique de CADES 3.1 permet de créer aisément (cf. Fig B. 4 et Fig B. 5) ce fichier écrit en langage XML qui pour extension dans CADES « *spec* ».

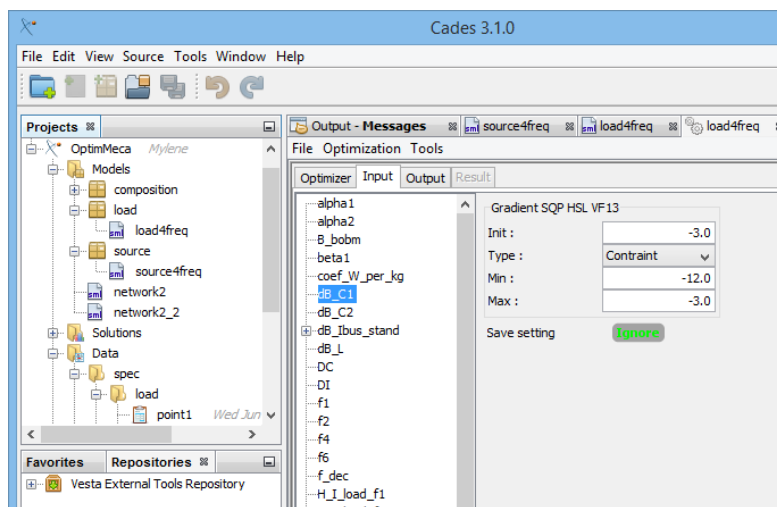


Fig B. 4 Exemple de spécifications du modèle de la charge

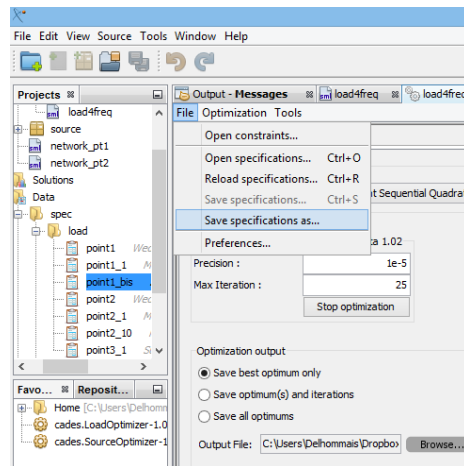


Fig B. 5 Génération du composant spécifications depuis l'interface graphique

Ci-dessous, se trouvent les entrées, les sorties, les cahiers des charges ainsi que les paramétrages des algorithmes d'optimisation des modèles. Ces cahiers des charges et paramétrages sont entièrement définis par les équipementiers sur leurs modèles.

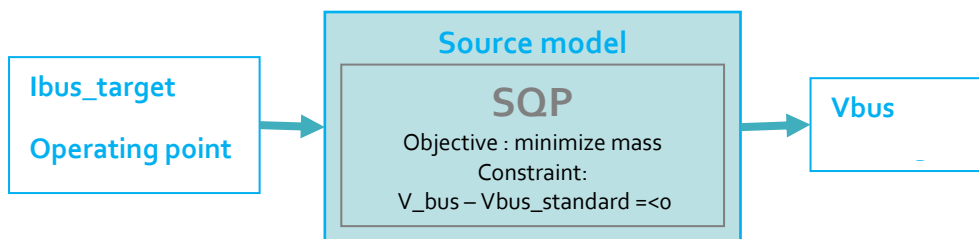


Fig B. 6 Description du sous-modèle de la source

Tab B. 1 Paramètres du sous-modèle de la source

Entrées du sous-modèle de la source		
Ibus_target	Fixés	Valeurs des parties réelles et imaginaires des quatre harmoniques en courant du bus continu
Operating point	Fixés	Valeurs des amplitudes (en % par rapport aux standards) des quatre harmoniques en courant que la source reçoit du côté triphasé, ainsi que le choix des fréquences étudiées.
Cs	[1pF ; 1mF]	Variable de conception du modèle de la source : l'optimiseur cherche pour quelle valeur de Cs il obtient la masse minimale du filtre tout en respectant les contraintes imposées (respect des normes vis-à-vis de la pollution harmonique en tension du bus continu)
Sorties du sous-modèle de la source		
Vbus	[0 ; normes]	Contraintes du modèle de la source : valeurs des parties réelles et imaginaires des quatre harmoniques en tension du bus continu

Mass_S	Minimiser	Fonction objectif du modèle que l'optimiseur cherche à minimiser
Optimiseur :		
Algorithme SQP, précision = $10^{-5}$ , Max Itérations = 25, Sauvegarde : meilleur optimum seulement		

Et pour la charge:

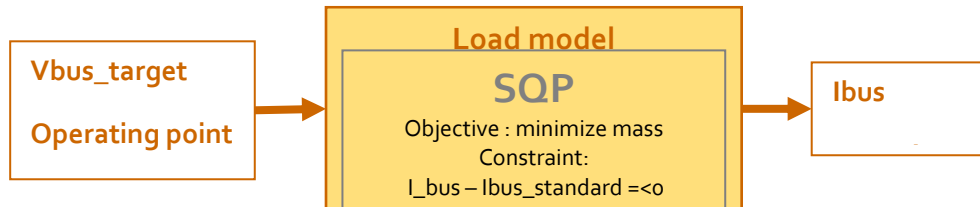


Fig B. 7 Description du sous-modèle de la charge

Tab B. 2 Paramètres du sous-modèle de la charge

Entrées du sous-modèle de la charge		
Vbus_target	Fixés	Valeurs des parties réelles et imaginaires des quatre harmoniques en tension du bus continu
Operating point	Fixés	Valeurs des amplitudes (en % par rapport aux standards) des quatre harmoniques en courant que la charge reçoit du côté triphasé, ainsi que le choix des fréquences étudiées.
C1	[1pF ; 1mF]	Variable de conception du modèle de la charge : l'optimiseur cherche pour quelles valeurs de C1 C2, L et R il obtient la masse minimale du filtre tout en respectant les contraintes imposées (respect des normes vis-à-vis de la pollution harmonique en courant du bus continu)
C2	[1pF ; 1mF]	
L	[1pH ; 5mH]	
R	[0 ; 1000] Ω	
Sorties du sous-modèle de la charge		
Ibus	[0 ; normes]	Contraintes du modèle de la charge : valeurs des parties réelles et imaginaires des quatre harmoniques en courant du bus continu
Mass_L	Minimiser	Fonction objectif du modèle que l'optimiseur cherche à minimiser
Optimiseur:		
Algorithme SQP, précision = $10^{-5}$ , Max Itérations = 25, Sauvegarde : meilleur optimum seulement		

Remarque: Pour les deux modèles, le paramétrage de l'algorithme limite le nombre d'itérations à 25 et à la sauvegarde unique du résultat : cela n'a pas été choisi au hasard. En effet, il faut porter une attention particulière aux temps de calcul du processus. Or, une optimisation multiniveau se réalise en plus de 3000 itérations. Si à chaque itération le logiciel sauvegarde tous les résultats (donc une méthode Java écrit à chaque itération les résultats dans un fichier xml), le temps nécessaire à cette opération n'est pas négligeable. Puisque de toute façon ces sous-optimisations n'ont pas vocations à être analysées durant le processus d'optimisation multiniveau par les ingénieurs, mais après, il n'est pas handicapant de priver le MUSE Optimizer de ces sauvegardes.

Pour ce qui est du nombre d'itérations, une analyse précédente des optimisations a permis de déterminer que 25 itérations (au lieu des 100 par défaut) est largement suffisante pour que les modèles convergent, si une solution existe.

#### Création du composant « MUSE Optimiseur »

Maintenant que les composants modèles MUSE et le fichier de spécifications .spec existent, il suffit de les rassembler pour créer un « MUSE Optimizer ». Cela se fait pour le moment dans un projet MAVEN (projet Java [MAV 15]). Le projet MAVEN permet donc à l'utilisateur de créer les MUSE Optimizer dits « boîtes noires ». Avant de les créer, la Fig B.8 illustre ce à quoi ces boîtes noires doivent ressembler:

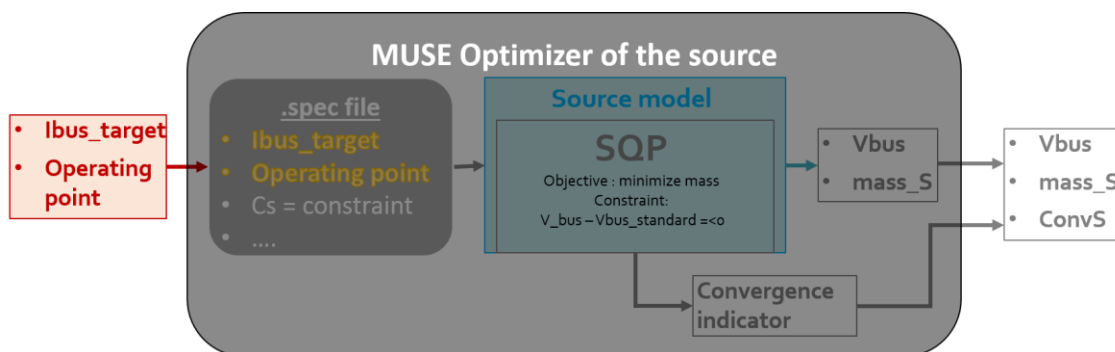


Fig B. 8 Exemple de MUSE Optimizer pour la source

#### 1) Création de l'interfaçage du composant MUSE Optimizer

Comme illustré par la Fig B. 8, l'interfaçage du MUSE Optimizer doit être réalisé avec 5 ports dont 2 entrées (les valeurs des harmoniques en courant du bus continu et le point de fonctionnement) et 3 sorties (les valeurs des harmoniques en tension du bus continu, la masse du filtre de la source et un indice de bonne convergence de la sous-optimisation). Cet interfaçage est réalisé via un fichier écrit en langage xml au sein du projet MAVEN en respectant la norme open source MUSE en rigueur [DEL 15b].

Brièvement, le constructeur muse.xml du projet MAVEN décrit les identités du composants (org.gu.g2elab:caedes.SourceOptimizer:1.0), le nom des ports ainsi que leur utilités (entrée/sortie et taille).

## 2) Implémentation de la modification automatique du cahier des charges des modèles de source et charge au sein du composant MUSE Optimizer

Le point de fonctionnement est constant lors du processus d'optimisation multiniveau mais peut être modifié entre deux optimisations multiniveaux. Mais, à chaque itération de l'optimisation globale, les valeurs de *Ibus\_target* (sur l'exemple précédent de la Fig B. 8) sont amenées à changer (valeurs des harmoniques en courant du bus continu). Ces nouvelles valeurs sont choisies par l'algorithme d'optimisation du système global.

De ce fait, le fichier de spécifications du composant MUSE Optimizer doit être modifié automatiquement au cours des itérations de l'optimisation multiniveau.

Aussi, lors de la création du composant MUSE Optimizer dans le projet MAVEN, il faut réaliser un programme accomplissant cette modification. Ce programme est une classe Java du projet MAVEN. Elle écrit notamment les nouvelles valeurs de *Ibus\_target* et du point de fonctionnement dans le fichier de spécification .spec.

### Assemblage des deux composants : modèle MUSE et spécifications .spec

L'assemblage du composant modèle MUSE et du fichier de spécifications .spec se réalise encore une fois à l'aide d'un programme Java écrit dans la classe nommée « *StaticFacetSourceOptimizer5* » pour l'exemple du MUSE Optimizer de la source. Cette classe est appelée depuis l'interface du MUSE Optimizer et elle appelle elle-même la classe « *SourceOptimizer5* ».

En effet, la classe « *SourceOptimizer5* » ne fait pas que modifier le composant des spécifications, elle charge aussi le composant modèle MUSE, l'associe aux nouvelles spécifications et finalement lance une optimisation et en récupère les résultats.

Lorsque chaque équipementier a réalisé son modèle MUSE Optimizer, il le fournit au systémier (comme Airbus). Le systémier est chargé lui de créer le modèle global par composition des sous-modèles que sont les composants MUSE Optimizer de la source et de la charge.

### Description du modèle systémier

Ce modèle systémier crée par composition de sous-modèle (illustré par la Fig B. 9) a pour objectif les deux points suivants :

- S'assurer que le point de fonctionnement (comme le choix des fréquences étudiées) est bien commun entre les deux sous-modèles
- définir les contraintes et les fonctions objectif

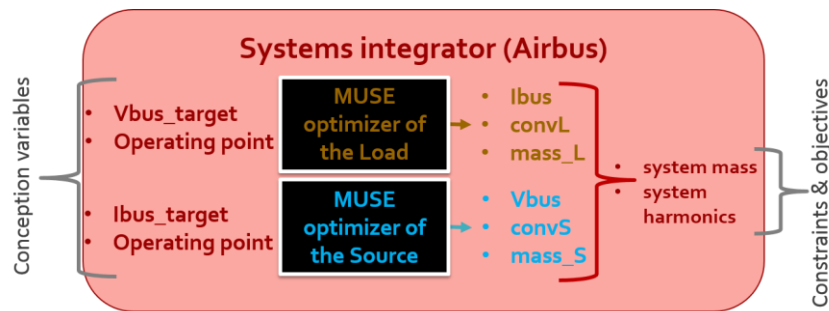


Fig B. 9 Illustration du modèle systémier

```

LOAD = new LoadOptimizer;
// Entrees du muse optimizer
array dB_Ibus_stand[4];
LOAD.dB_Ibus_stand = dB_Ibus_stand;
LOAD.fx = fx;
array H_I1_fx[4];
LOAD.H_I1_fx = H_I1_fx;
LOAD.I_V_busL_fx = Load_I_V_bus;
LOAD.R_V_busL_fx = Load_R_V_bus;

```

Fig B. 10 Exemple d'import

### Création dans CADES 3.1 du modèle systémier

La composition des composants MUSE Optimizer est réalisée classiquement dans CADES 3.1 par instanciation en langage SML. Cela est rendu possible grâce au respect de la norme MUSE de la part des composants MUSE Optimizer.

La Fig B. 10 illustre l'import du composant MUSE Optimizer de la charge dans le modèle systémier ainsi qu'une partie de l'affectation des variables par instanciation.

### Gestion des contraintes et fonctions objectif : différences entre l'implémentation Matlab et CADES 3.1

Le modèle systémier diffère dans CADES 3 par rapport à l'implémentation dans Matlab à cause de l'utilisation d'un algorithme d'optimisation du système global différent.

En effet, n'ayant pour le moment pas la possibilité de d'obtenir la matrice Jacobienne des sous-modèles des équipementiers, il est impossible d'utiliser un algorithme basé sur le calcul du gradient. Il n'y a alors d'autres choix que d'utiliser un algorithme stochastique. Toutefois si ces algorithmes ont une bonne capacité d'exploration, ils ont l'inconvénient d'être peu précis et d'être incapables de gérer un grand nombre de contraintes.

Pour rappel, les contraintes du système global sont les seize variables créés pour vérifier que la différence est quasi-nulle entre les valeurs des harmoniques envoyées comme cibles sur les sous-modèles et les valeurs de leurs duals renvoyées par ces sous-modèles :



Gestion des contraintes dans l'implémentation Matlab :

Elle se fait par la technique de pénalisation de la fonction objectif .

Gestion des contraintes dans l'implémentation CADES 3 :

CADES 3 ne possède pas cet algorithme en particulier. J'ai donc dans un premier temps essayé l'algorithme purement génétique qui est bien moins performant que celui avec nichage. De ce fait ; malgré l'utilisation de la formulation; la masse globale se trouvait noyée dans les contraintes et finalement les résultats d'optimisation obtenus montraient que l'optimiseur cherchait plus à minimiser les variables de contrainte que la masse.

Par conséquent, un autre algorithme génétique multiobjectif a été choisi. Cet algorithme est l'algorithme NSGA2 avec croisement auto-adaptatif [DEB 02]. Cet algorithme utilise la technique d'élitisme permettant de garder les meilleurs individus pendant plusieurs générations et la technique de nichage pour avoir une bonne répartition des individus sur le front de Pareto.

Dans le modèle du système global, grâce à l'utilisation de NSGA-II, on définit deux fonctions objectif à minimiser :

$$F_{obj}^1 = M_{système} \quad \text{Eq. B. 1}$$

$$F_{obj}^2 = \sum cont^2 \quad \text{Eq. B. 2}$$

$F^1$  est la fonction objectif réelle du problème d'optimisation du système (à savoir minimiser la masse globale des filtres).  $F^2$  est une fonction objectif créée pour s'assurer du respect des contraintes. Elle est égale à la somme de toutes les contraintes au carré et doit être minimisée ; c'est-à-dire que l'écart entre les valeurs des harmoniques envoyées comme cibles sur les sous-modèles et les valeurs de leurs duals renvoyées par ces sous-modèles doit être minimisé.

#### Optimisation multiniveau

Les derniers éléments à définir avant de lancer un calcul d'optimisation multiniveau sont le paramétrage de l'algorithme choisi ainsi que le cahier des charges du système global résumés dans le Tab B. 3.

*Tab B. 3 Exemple de paramétrage et de cahier des charges sur le modèle global d'une optimisation multiniveau*

Paramétrage de NSGA-II	
Précision : 10e-04	Pénalisation : 100 000
Nombre population : 100	Probabilité de mutation : 0,05
Nombre Génération : 100	Type de Crossover : Auto-mix
Cahier des charges du modèle globale pour optimisation multiniveau dans CADES 3	
<b>Entrés</b>	Epsilon : 0,01 (soit différence entre les harmoniques inférieure à 1% par rapport aux standards)

	Amplitudes des harmoniques cibles du bus HVDC : contraintes entre [ $1.10^{-7}$ ; standards] V ou A
	Phases des harmoniques cibles du bus HVDC : contraintes entre $[-\pi$ ; $\pi$ ]
	Point de fonctionnement : fixé
<b>Sorties</b>	Masse globale : minimiser [2 ; 4] kg
	Contraintes : [-10 ; 0] V ou A
	Indices de convergence des sous-modèles : fixé à 1 (signifie que les sous-modèles convergent)
	$F_{obj}^2 = \sum cont^2$ : minimiser entre [0 ; 3]

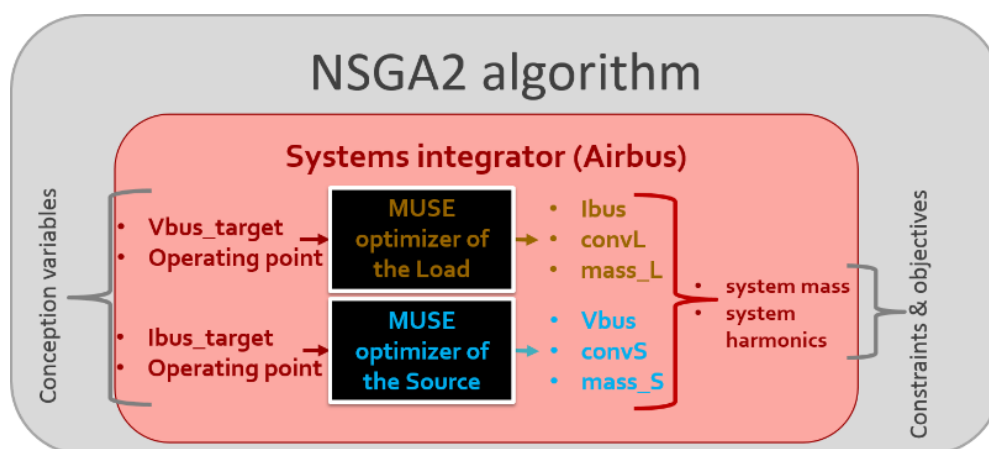


Fig B. 11 Schéma de composition

### Utilisation des résultats de l'optimisation multi-niveaux par les équipementiers

Lorsque l'optimisation est terminée, le systémier doit donner les résultats de l'optimisation multi-niveau aux équipementiers. Ces résultats sont valeurs des cibles envoyés aux sous-modèles (harmoniques en courant du bus continu pour la source et harmoniques en tension du bus continu pour la charge) qui donnent la masse globale minimale.

Avec ces valeurs cibles d'harmonique du bus HVDC, les équipementiers réalisent une optimisation avec le même cahier des charges que celui utilisé pendant l'optimisation cascade. Mais contrairement aux optimisations locales réalisées durant l'optimisation cascade, cette fois, les équipementiers ont, évidemment, accès au contenu entier de leurs modèles. Ainsi, ils obtiennent leurs variables de conceptions des filtres, à savoir les valeurs des capacités et inductances.

# Références

---

## Références web

---

- [ACA] <http://www.acare4europe.com/>
- [AVX] [www.avx.com/](http://www.avx.com/), Manufacturer and supplier of electronic components
- [CAD] <http://www.cades-solutions.com/cades/>, Vesta-System, Cades Solutions,
- [DEL 15b] <http://muse-component.org>, B. Delinchant et S. Bergeon, «*MUSE-Component*» CMS Made Simple, 2014-2015. [En ligne]. Available: [Accès le 27 Juin 2015].
- [MAV 15] <https://maven.apache.org>, The Apache Software Foundation, «*Apache Maven Project*» 2015. [En ligne]. Available: [Accès le 22 July 2015].

## Livres

---

- [LEM 99] J.L. Le Moigne, « *La Modélisation des systèmes complexes* », Editions Dunod, 1999, ISBN : 2 10 004382
- [LEP 07] F. Leplus, "Bobine à noyau de fer en régime variable," Techniques de l'ingénieur D-3040, 2007.

## Thèses

---

- [BAR 05] F. Barruel, « *Analyse et conceptions des systèmes embarqués - Application aux réseaux de bord d'avion* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [BEL 11] M. Beltramini, « *Contribution à l'optimisation de l'ensemble convertisseur/filtres de sortie vis à vis des contraintes CEM avion* », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2011.
- [BER 12] A. Berbecea, « *Multilevel approaches for optimal system design in railway applications* », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille, 2012.
- [DEA 13] A. De Andrade, *Conception intégrée par optimisation multicritère d'un*

- système d'actionnement pour le conditionnement d'air d'un avion plus électrique*, Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2013.
- [DEL 15a] M. Delhomais, « *Développement de modèles, méthodes et outils pour l'optimisation système et multi-niveaux de composants de convertisseurs pour l'aéronautique* », rapport de PFE, INP Grenoble, 2015.
- [GAN 03] G. Gandanegara, « *Méthodologie de conception systémique en Génie électrique à l'aide de l'outil Bond Graph – Application à une chaîne de traction ferroviaire* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [GIR 10] S. GIRINON., « *Étude de la Stabilité et de la Qualité des Réseaux Distribués de Puissance* », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2010.
- [GIR 14] X. GIRAUD , « *Méthodes et outils pour la conception optimale des réseaux de distribution d'électricité dans les aéronefs* », Thèse de doctorat de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2014.
- [HAL 12] T. El Halabi, « *Méthodologies pour la conception optimale des systèmes d'actionnement électromécaniques* », Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 2012.
- [LEI 05] L. T. Leifsson, « *Multidisciplinary Design Optimization of Low-Noise Transport Aircraft* », PhD from Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [LIS 08] S. Liscouet-hanke, « *A model-based methodology for integrated preliminary sizing and analysis of aircraft power system architectures* », Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2008.
- [MAG 04] D. Magot, « *Methodes Et Outils Logiciels D'aide Au Dimensionnement. Application Aux Composants Magnetiques Et Aux Filtres Passifs* », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique De Grenoble, 2004.
- [MOU 09] F. Moussouni-Messad, « *Méthodologie et algorithmes adaptés à l'optimisation multi-niveaux et multi-objectif de systèmes complexes* », Thèse de doctorat de l'École Centrale de Lille, 2009.
- [NGU 08a] H. Nguyen Huu, « *Méthodes et outils pour la conception de composants intégrés dans un réseau électrique embarqué* », Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, 2008.
- [SAU 09] M. Sautreuil, « *La Robustesse : Une nouvelle approche pour l'intégration des systèmes de génération aéronautique* », Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, 2009.
- [TOS 04] S. Tosserams, « *Analytical target cascading: convergence improvement by*

*sub-problem post-optimality sensitivities* », M.Sc. thesis from Eindhoven University of Technology, Eindhoven, June 2004.

- [WUR 08] F. Wurtz, « *Conceptions de la conception pour le génie électrique : de l'approche 'Objets - Savoirs - Méthodes - Outils' à l'approche 'Systèmes - Connaissances - Compétences Organisations'* », Habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2008.

## Articles

---

- [ALL 05] Allison J., Kokkolaras M., Zawislak M., Papalambros P. Y., « *On the Use of Analytical Target Cascading and Collaborative Optimization for Complex System Design* », 6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization Rio de Janeiro, 30 May–03 June, 2005 Brazil.
- [AND 11] A. De Andrade, B. Sareni, X. Roboam, M. Couderc, R. Ruelland, « *Conception intégrée par optimisation multicritère d'un système d'actionnement électrique pour l'aéronautique* », Electroniques du futur, Belfort, 2011
- [BIT 07] M. Bitbol, « *Les lois physiques existent-elles ? – La nature est-elle un puits sans fond ?* », La recherche, N° 405, février 2007, pp.30-36.
- [BRO 01] T. R. Browning, « *Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions* », IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 48, N° 3, August 2001.
- [FRA 12] A. Fraj, M. Budinger, T. El Halabi, J.C. Maré, G.C. Negoita, « *Modelling approaches for the simulation-based preliminary design and optimization of electromechanical and hydraulic actuations systems* », American Institute of Aeronautics and Astronautics, Avril 2012.
- [LIS 13] S. Lisouet-Hanke, K. Huynh, « *A Methodology for Systems Integration in Aircraft Conceptual Design – Estimation of Required Space* », SAE 2013.
- [NGU 08b] H. Nguyen Huu, Retiere N., Wutz F., « *A new approach for building the global Pareto border of an electromagnetic system by using the Pareto borders of each sub-component of the system* », IEEE-CEFC 2008 (International Conference on Electromagnetic Field Computation), ID: OC1-4 in proceeding of the conference.
- [NGU 08c] H. Nguyen-Huu, B. Sareni, F. Wurtz, N. Retiere & X. Roboam, « *Comparison of self-adaptive evolutionary algorithms for multimodal optimization* », In 10th International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism (OIPE'08), Ilmenau, Germany,

- 
- 2008.
- [PAP 00] P.Y. Papalambros and D.J. Wilde. « Principles of Optimal Design: Modeling and Computation », Cambridge University Press, New York, second edition, 2000.
- [PET 96] A. Pérowski, « *A Clearing Procedure as a Niching Method for Genetic Algorithms* ». International conference on evolutionary computation, (pp. 798-803), 1996.
- [ROB 12] X. Roboam., B. Sareni, A. De Andrade, « *More Electricity in the Air: Toward Optimized Electrical Networks Embedded in More- Electrical Aircraft* », Industrial Electronics Magazine, IEEE Volume: 6, Dec. 2012, pp. 6-17.
- [RUB 10] L. Rubino, B. Guida, F. Liccardo, P. Marino, A. Cavallo, « *Buckboost DC/DC converter for aeronautical applications* », IEEE ISIE Conf, Bari, pp 2690 – 2695, Italy, 4-7 Juillet 2010.
- [SAR 04] B. Sareni, J. Regnier, & X. Roboam, « *Recombination and self-adaptation in multi-objective genetic algorithms* », Lecture Notes in Computer Sciences, vol. 2936 (pp. 115-126), 2004.
- [SAR 98] B. Sareni, & L. Krähenbühl, « *Fitness sharing and niching methods revisited* », Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, Vol. 2, n°3, pp. 97-106, 1998.
- [ZHA 06] H. Zhang et Q. Zaho, « *Switching Harmonics in a Three-Phase PWM Inverter* » SAE Technical Paper 2006-01-3078, 11 Juillet 2006.

## Autres

- 
- [BOR 14] D. Boroyevich, « *Présentation des activités de recherche du CPEC de VirginiaTech* », Laboratoire LAPLACE, Toulouse, 18 Aout 2015.