

THÈSE

Présentée
Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

Spécialité : Génie Electrique

Par

Houssem Eddine DEMNI

Ingénieur de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT)
DEA Génie Electrique

Conception en Génie Electrique à l'aide d'éléments caractérisés

Soutenue le 28 octobre 2004 devant le jury composé de :

MM.	H.	MOREL	Président
	L.	GERBAUD	Rapporteur
	A.	BOUSCAYROL	Rapporteur
	H.	PIQUET	Examinateur
	H.	FOCH	Examinateur
	Ph.	LADOUX	Examinateur
	R.	PAULY	Examinateur

Conception en Génie Electrique à l'aide d'éléments caractérisés

Résumé

Ce travail traite de la conception systématique de chaînes de conversion d'énergie dans le domaine du Génie Electrique. Nous proposons une approche dédiée à la conception par association d'éléments caractérisés. A partir d'exigences formulées dans un cahier des charges, les objectifs sont de définir une structure saine à l'aide d'éléments prédéfinis.

Dans ce cadre, nous avons adopté une méthode de caractérisation qui prend en compte différents points de vues nécessaires pour la conception. Cette caractérisation permet la mise en place de règles dont le respect garantit l'adéquation de la structure proposée avec les objectifs du cahier des charges et la compatibilité en terme d'échanges énergétiques entre les composants. Nous avons ensuite exploité l'approche de caractérisation adoptée pour élaborer des méthodologies de conception systématiques des structure de conversion de l'énergie électrique. Ces méthodologies nous ont servis de base pour élaborer une application informatique d'aide à la conception, s'articulant principalement sur trois outils : une base de donnée qui joue le rôle de bibliothèque d'éléments caractérisés, un outil graphique permettant la construction de structures à l'aide d'éléments caractérisés, un module d'expertise destiné à l'aide à la conception.

Mots-clés

- Conception
- Eléments caractérisés
- Génie Electrique
- Caractérisation énergétique
- Conversion d'énergie
- Règles d'association d'éléments

Electrical Engineering design using characterized elements

Abstract

This work treats systematic design of energy transformation structures used in Electrical Engineering. We propose an approach dedicated to design by association of characterized elements. Starting from a set of specifications, the designer has to define a coherent structure by assembling predefined elements.

Within this framework, we adopt a characterization approach that takes into account various criteria necessary for design. Then, this approach allowed us to develop methodologies for designing electric energy transformation structures. These methodologies were used to implement a software application based on three tools : a data base as an elements library, a graphic tool allowing the construction of energy transformation structures, an expert module which helps the designer in his work.

Keywords

- Design
- Characterized elements
- Electrical Engineering
- Energetic characterization
- Energy transformation
- Elements association rules

Avant-propos

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du groupe "Systèmes" du Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle (LEEI), Unité Mixte de Recherche au CNRS n°5828 de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique et de Télécommunications (ENSEEIH).

Au terme de ces années de recherche, je tiens à remercier :

- Monsieur H. MOREL pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.
- Monsieur L. GERBAUD et Monsieur A. BOUSCAYROL pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.
- Monsieur Ph. LADOUX et Monsieur R. PAULY pour avoir accepté de participer au jury de cette thèse.

Je tiens aussi à remercier particulièrement Monsieur H. PIQUET pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de m'encadrer dans le cadre cette thèse. Toute au long de ces années, il a été toujours disponible pour répondre à mes questions, m'encourager et m'aider à résoudre les problèmes rencontrés dans ce travail. Ses conseils pertinents et son aide étaient d'une importance capitale dans la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance.

Je remercie également Monsieur H. FOCH pour sa disponibilité, son aide précieuse et les remarques utiles qu'il m'a procurées durant les discussions intéressantes au sujet de cette thèse.

Je remercie aussi Monsieur Y. CHERON, directeur du LEEI, pour avoir accepté de m'accueillir au sein de son laboratoire ; ainsi que Monsieur X. ROBOAM responsable du groupe "Système", pour son accueil au sein du groupe.

Par ailleurs, je ne saurais oublier dans mes remerciements les enseignants, les chercheurs et les personnels techniques et administratifs du LEEI et du groupe "Système".

Merci également à tous mes amis et collègues thésards avec qui j'ai eu des discussions enrichissantes et des moments inoubliables. Merci pour leur sympathie à : Jérémi, Martin, Yasser, Rafik, Ali, Houda, Afef, Grace, Laurent, Lauric, Jérôme, ... ; sans oublier les nouveaux thésards : Bayram, Ali, Christophe, Ayaz, ...

Mes remerciements ne seraient pas complets si j'oublie mes amis Cetin, Zohra, Sami, Fathi, Kamel, Rached, ...

Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à tous les membres de ma famille, et surtout à mes parents et ma sœur. Sans eux je ne serais arrivé là où je suis. Je leur dédie ce mémoire.

A ma famille.

Table des matières

Introduction générale	5
Chapitre 1 - Conception en Génie Electrique.....	9
1.1. L'activité de conception	9
1.1.1. Définition.....	9
1.1.2. Le déroulement d'un problème de conception.....	10
1.1.2.1. Définition du cahier des charges	11
1.1.2.2. Analyse du cahier des charges.....	11
1.1.2.3. Définition et modification de la structure.....	12
1.1.3. Les différentes techniques de conception.....	13
1.1.3.1. La conception par similitude ou par variantes.....	14
1.1.3.2. La conception innovante.....	14
1.1.3.3. La conception créatrice ou "à partir de rien"	15
1.1.3.4. La conception par assemblage ou composition.....	15
1.2. Etat de l'art de la conception en Génie Electrique	15
1.2.1. Les approches adoptées	15
1.2.1.1. Les approches purement électriques.....	15
1.2.1.1.1. Utilisation des cellules de commutation.....	15
1.2.1.1.2. L'approche matricielle	18
1.2.1.2. Les approches systémiques.....	22
1.2.1.2.1. Le formalisme Bond Graph.....	23
1.2.1.2.2. Macro modélisation des conversions électromécaniques.....	26
1.2.1.2.3. L'analyse fonctionnelle.....	28
1.2.1.3. Conclusion	32
1.2.2. Les outils utilisés	32
1.2.2.1. Les outils spécifiques	33
1.2.2.2. Les outils génériques	33
1.2.2.2.1. Les outils d'optimisation.....	34
1.2.2.2.2. Les systèmes experts	34
1.2.2.3. Les outils méta-génériques	35
1.3. Notre démarche.....	36

Chapitre 2 – L'approche de caractérisation et son exploitation en vue de la conception 39

2.1.	Introduction	39
2.2.	La caractérisation énergétique	40
2.2.1.	Principe	40
2.2.2.	Classification énergétique.....	43
2.2.2.1.	Les dipôles	43
2.2.2.2.	Les quadripôles.....	44
2.2.2.3.	Les éléments de connexion.....	44
2.3.	Les autres critères de caractérisation	45
2.3.1.	Transformations des grandeurs physiques par les éléments.....	45
2.3.1.1.	Les dipôles	45
2.3.1.1.1.	Les sources de tension	45
2.3.1.1.2.	Les intégrateurs de courant (capacités)	45
2.3.1.1.3.	Les impédances.....	46
2.3.1.1.4.	Les sources de courant.....	46
2.3.1.1.5.	Les intégrateurs de tension (capacités).....	47
2.3.1.1.6.	Les admittances	47
2.3.1.2.	Les quadripôles.....	47
2.3.1.2.1.	Les transformateurs	47
2.3.1.2.2.	Les gyrateurs courant-tension.....	48
2.3.1.2.3.	Les gyrateurs tension-courant.....	48
2.3.1.3.	Les éléments de connexion.....	49
2.3.1.3.1.	Les connexions équi-tension	49
2.3.1.3.2.	Les connexions équi-courant.....	49
2.3.2.	Réversibilités des grandeurs échangées.....	50
2.3.3.	Point de vue fréquentiel	52
2.3.3.1.	Domaine de validité fréquentiel	52
2.3.3.2.	Propriétés fréquentielles des grandeurs échangées.....	54
2.3.4.	Propriétés fonctionnelles	55
2.3.5.	Caractérisation d'un élément par association d'autres éléments.....	56
2.3.6.	Modèle mathématique d'un macro-élément.....	59
2.3.7.	Extension à d'autres domaines de la physique.....	63
2.4.	Éléments de comparaison avec d'autres approches	65
2.4.1.	Comparaison avec la représentation filaire	65
2.4.2.	Comparaison avec le formalisme Bond Graph.....	66
2.5.	Exploitation de l'approche de caractérisation en vue de la conception	68
2.5.1.	Règles d'association d'éléments	68
2.5.2.	Caractérisation d'un élément à partir de ses voisins.....	69
2.5.2.1.	Recherche d'un élément compatible avec un autre élément	69
2.5.2.2.	Recherche d'un élément compatible avec deux autres éléments	71
2.5.2.3.	Généralisation	72
2.5.3.	Méthodes de construction en vue de la conception	72
2.5.3.1.	Construction par recherches successives.....	73
2.5.3.1.1.	Principe.....	73
2.5.3.1.2.	Exemple.....	75
2.5.3.2.	Construction par décomposition.....	77
2.5.3.2.1.	Principe.....	77

2.5.3.2.2. Exemple	80
2.5.3.3. Comparaison des deux méthodes	82
2.6. Conclusion	83

Chapitre 3 – Outils de conception..... 87

3.1. Introduction	87
3.2. Description a priori d'une session de conception	87
3.3. Identification des fonctionnalités nécessaires au concepteur	88
3.3.1. Bibliothèque d'éléments.....	89
3.3.2. Définition du cahier des charges	90
3.3.3. Construction graphique de structures	90
3.3.4. Vérification de la construction	90
3.3.5. Aide à la construction	90
3.3.6. Règles de bon usag	91
3.3.7. Historique de la construction.....	91
3.3.8. Archivage.....	91
3.4. Description des outils de conception	91
3.4.1. La base de données	92
3.4.1.1. Contenu de la base.....	92
3.4.1.2. Organisation du contenu de la base de données	92
3.4.1.3. Accès au contenu de la base de données	94
3.4.1.3.1. Les formulaires de "navigation"	95
3.4.1.3.2. Les formulaires de recherche.....	96
3.4.2. Définition du cahier des charge	99
3.4.3. L'éditeur graphique	100
3.4.4. Le module d'expertise.....	101
3.4.4.1. Développement des règles d'aide à la conception	102
3.4.4.1.1. Les règles.....	103
3.4.4.1.2. Contrôle de l'exécution des règles	104
3.4.4.2. Organisation des règles du module d'expertise	104
3.4.4.2.1. Analyse préliminaire.....	104
3.4.4.2.2. Analyse de la structure en cours de construction	104
3.4.4.2.3. Détection des erreurs	105
3.4.4.2.4. Règles de recherche	105
3.4.5. Historique de la construction.....	106
3.4.6. Panneau de messages.....	107
3.5. Utilisation des outils pour la conception	108
3.5.1. L'interface utilisateur de l'application.....	108
3.5.2. Exemple d'une session de conception.....	109
3.6. Mise en oeuvre informatique.....	114
3.6.1. Approche et langage de programmation.....	114
3.6.2. Plate-forme d'exécution	115
3.7. Conclusion	117

Chapitre 4 – Exemples d'application	121
4.1. Alimentation d'une bobine supraconductrice	121
4.1.1. Données du problème	121
4.1.2. Analyse des données.....	122
4.1.3. Formulation du cahier des charges	123
4.1.4. Résolution du problème.....	125
4.2. Alimentation du tube à rayons X d'un scanner médical	128
4.2.1. Données du problème	128
4.2.2. Analyse des données.....	128
4.2.3. Formulation du cahier des charges	129
4.2.4. Résolution du problème.....	130
4.3. Alimentation sans interruption (ASI)	141
4.3.1. Données du problème	141
4.3.2. Analyse des données.....	142
4.3.3. Formulation du cahier des charges	142
4.3.4. Résolution du problème.....	144
4.4. Chaîne de conversion électromécanique : système de levage	157
4.4.1. Données du problème	157
4.4.2. Analyse des données.....	157
4.4.3. Formulation du cahier des charges	157
4.4.4. Résolution du problème.....	158
Conclusion générale	169
Annexes	173
Bibliographie	199

Introduction générale

Les concepteurs en Génie Electrique disposent actuellement d'un nombre important de méthodes et d'outils susceptibles de les aider dans leur démarche.

Beaucoup de progrès ont été effectués en matière d'algorithmes et codes de calculs, permettant ainsi de simuler de manière fiable les comportements des structures de conversion de l'énergie électrique.

Néanmoins, essentiellement dédiés à l'analyse du fonctionnement des structures évoquées, ces algorithmes et codes ne permettent pas à eux seuls de résoudre le problème de synthèse que constitue l'opération de conception ; celle-ci consiste à déterminer les paramètres structurels et matériels des dispositifs recherchés.

Il est évident que les méthodes et outils d'analyse occupent une place importante dans un processus de conception, ne serait-ce que pour valider et affiner les solutions élaborées ; il n'en demeure pas moins que la complexité et la diversité des problèmes à résoudre doit nous pousser à mettre en œuvre des méthodologies adaptées.

Dans le travail présenté dans ce manuscrit, nous proposons des méthodes et des outils de conception de dispositifs de conversion d'énergie utilisables dans le domaine du génie électrique, par association d'éléments caractérisés. En réponse à un cahier des charges, les objectifs sont de synthétiser une structure dont chacun des éléments constitutifs fonctionne dans de bonnes conditions et de permettre la mise en évidence des interactions entre ces constituants.

Pour ce faire, nous proposons un mode de caractérisation de ces éléments, utilisable pour construire le système étudié et susceptible de couvrir les différents points de vue à prendre en compte au cours de la conception.

A partir du mode caractérisation adopté, nous avons élaboré un formalisme permettant de représenter les éléments par des pièces graphiques, de façon à ce que la construction et l'étude d'une structure s'apparentent à un jeu de puzzle constitué des pièces représentant les éléments. Pour résoudre un problème donné, le concepteur, guidé par le cahier des charges doit choisir et assembler correctement des pièces dont les contours expriment les règles d'association des éléments correspondants.

Dans le premier chapitre du manuscrit, nous abordons, au travers des informations recueillies dans la littérature, différentes notions relatives à l'activité de conception en général et notamment les principales étapes d'un processus de conception, ainsi que les différentes techniques de conception. Ensuite, nous évoquons quelques approches de conception spécifiques au génie électrique, dont nous nous sommes inspirés dans notre démarche.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons notre approche de caractérisation des éléments utilisés dans le domaine du Génie Electrique. Nous démontrons ensuite comment nous exploitons cette approche pour élaborer des méthodes de conception systématiques des structure de conversion de l'énergie électrique.

Le troisième chapitre décrit les différents outils informatiques que nous avons élaborés pour exploiter, en vue de l'aide à la conception, les méthodes développées et montre les modes d'utilisation de ces outils.

Dans le dernier chapitre, nous appliquons les méthodes et les outils que nous avons élaborés à travers quelques exemples significatifs.

Chapitre 1 - Conception en Génie Electrique

Chapitre 1 - Conception en Génie Electrique

1.1. L'activité de conception :

1.1.1. Définition :

La conception est une activité cognitive inhérente à l'Homme. Un sujet humain conçoit quelque chose quand il forge une idée, quand il façonne un objet, quand il compose une forme (un entrechat, une mélodie, un plat, un tracé, etc.), quand il accomplit une action un tant soit peu inédite.

Dès lors qu'il est confronté à des exigences particulières (cahier des charges) qu'il ne peut satisfaire immédiatement, il lui faut alors s'engager dans un processus par lequel il synthétise (détermine une structure) et dimensionne (détermine des paramètres) un produit répondant à ces exigences, tout en anticipant, par la simulation et l'analyse du produit en cours de conception, les performances et les contraintes de réalisation. Ceci est illustré dans le diagramme de la Figure 1.1.

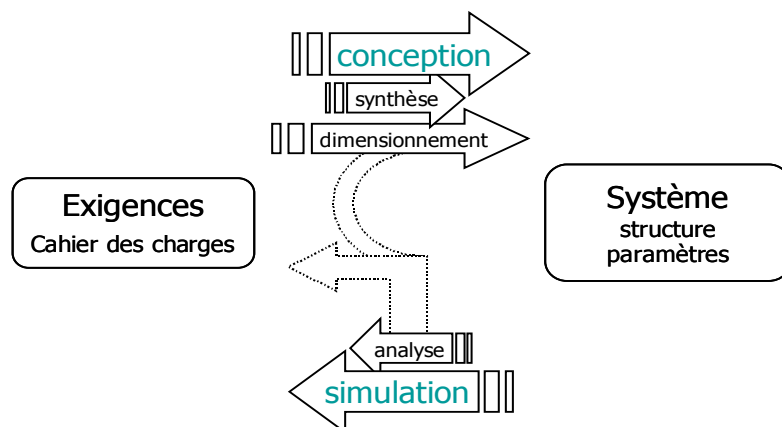


Figure 1.1 – Schéma de principe de l'activité de conception

1.1.2. Le déroulement d'un problème de conception :

Un processus de conception se déroule généralement selon l'organigramme décrit par la Figure 1.2.

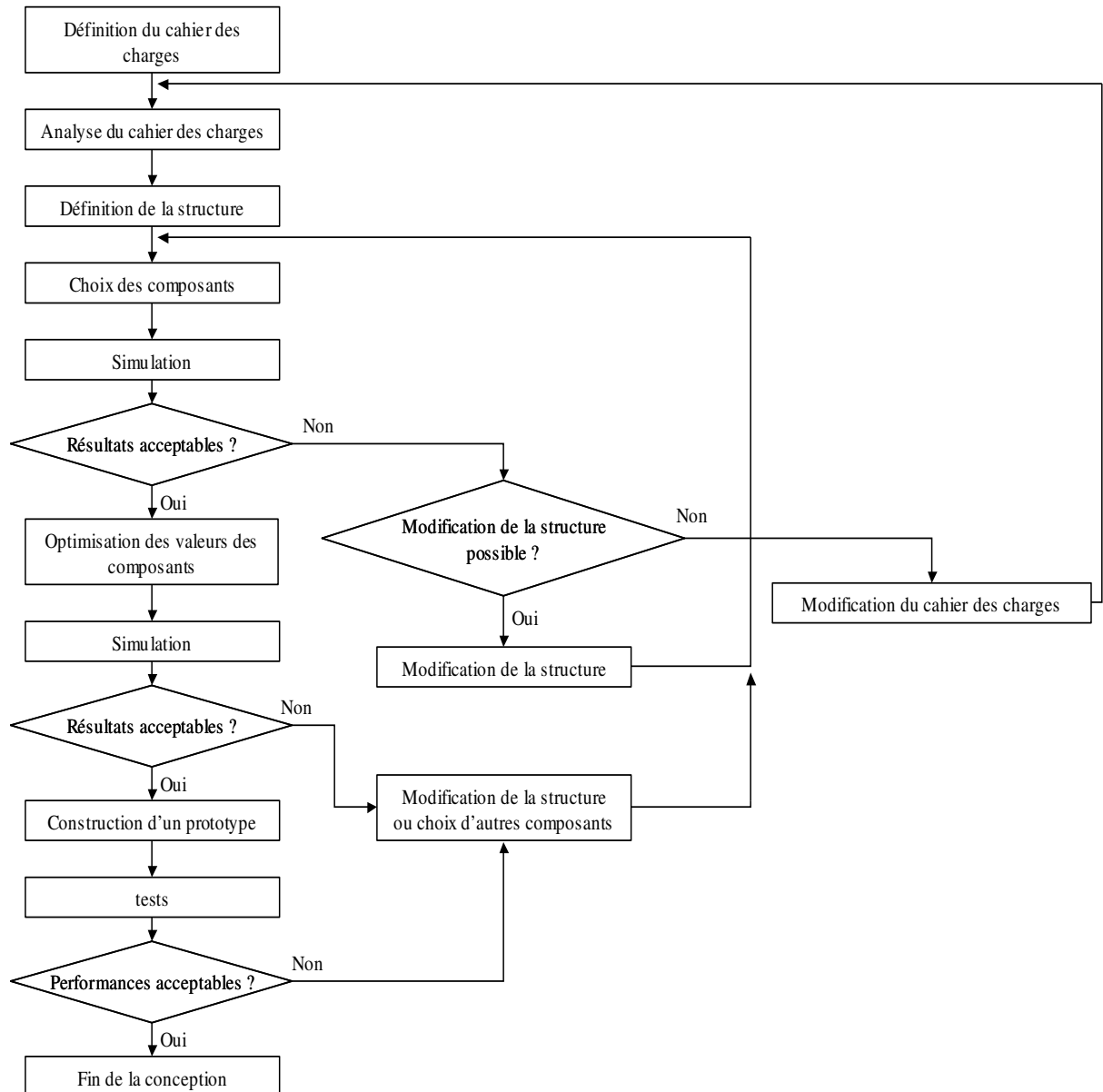


Figure 1.2 - Schéma général d'un processus de conception

Dans ce diagramme, nous distinguons principalement les étapes suivantes :

1.1.2.1. Définition du cahier des charges :

La définition du cahier des charges est l'étape fondamentale du processus de conception. Elle permet au concepteur du produit de définir les exigences de l'utilisateur final qui seront traduits en besoins et contraintes sur le produit à concevoir.

Les besoins expriment généralement des exigences qualitatives qui décrivent les fonctionnalités que doit assurer le dispositif conçu, alors que les contraintes sont plutôt des critères quantitatifs qui fixent les limites que doit respecter le système pendant son fonctionnement [Bel00].

Voici un exemple de cahier des charges du domaine du Génie Electrique, il s'agit de synthétiser un convertisseur statique à partir des exigences suivantes [Lec98] :

Le convertisseur doit fournir une tension continue de 48 V à partir du réseau monophasé (230 V, 50 Hz) en tenant compte des exigences qualitatives suivantes :

- **le convertisseur doit être le plus léger possible,**
- **le taux d'harmonique rejetées sur le secteur doit être réduit,**
- **le bruit émis par le convertisseur doit être réduit,**
- **le rendement doit être élevé.**

Dans cet exemple, les contraintes concernent la nature et les valeurs des tensions de la source d'alimentation et de la charge ; alors que les besoins sont exprimés par les autres exigences fonctionnelles.

Chaque cahier des charges peut être défini à priori, mais peut aussi être remis en cause pendant le processus de conception en cas d'échec dans la recherche de la structure ou d'impossibilité à respecter tous les critères. Dans ce cas il est nécessaire de modifier ou de relâcher des contraintes ou des besoins.

1.1.2.2. Analyse du cahier des charges :

Il s'agit d'extraire du cahier des charges les données nécessaires au traitement du problème. En effet, le concepteur a besoin de transformer la première version du cahier des charges en un cahier de charges "exploitable", plus réaliste et adapté à son approche et à sa méthodologie [Bel00].

Le concepteur doit faire le tri de l'information fournie dans le cahier des charges et la structurer (classification des données, choix des paramètres d'entrée, etc.). Il extrait ensuite du cahier des charges les paramètres nécessaires à l'initialisation de son raisonnement (les performances électriques souhaitées, les zones de fonctionnement du produit, etc.).

Une fois le problème de conception explicité, le travail propre à la conception peut alors commencer.

L'analyse de l'exemple du cahier des charges du convertisseur statique cité dans le paragraphe précédent (paragraphe 1.1.2.1) nous permet d'extraire et classer les données suivantes :

- les données relatives à l'entrée et la sortie du dispositif : le type des courants et tensions d'entrée et de sortie (continu ou alternatif), le nombre de phases au niveau de l'entrée et de la sortie, les valeurs maximales des tensions d'entrée et de sortie, etc. ;
- les données relatives aux performances requises du dispositif comme, par exemple, le choix des limites fréquentielles de fonctionnement selon le taux d'harmoniques toléré, etc.

1.1.2.3. Définition et modification de la structure :

La phase de définition de la structure est une phase d'assemblage des éléments requis pour réaliser le produit permettant de satisfaire le cahier des charges. Par exemple en Génie Electrique, on peut définir la structure d'un convertisseur statique en suivant ces étapes [Lec98] :

- **Définition des transformations d'énergie à réaliser :** il s'agit de spécifier les fonctionnalités (redressement, ondulation, etc.) que doit remplir le convertisseur. Ceci dépend des propriétés des sources et charges du système.

Dans l'exemple du convertisseur cité dans les paragraphes 1.1.2.1 et 1.1.2.2, on peut estimer que le circuit recherché doit contenir un dispositif de redressement puisque la tension d'entrée est alternative alors que la tension de sortie est continue. Il faut aussi envisager d'introduire une fonction "transformateur" puisque les tensions maximales d'entrée et de sortie sont différentes. Un dispositif de filtrage devrait être introduit pour la limitation des harmoniques.

- **Spécification de tous les éléments requis en fonction d'une technologie** : une fonctionnalité déterminée dans l'étape précédente n'est qu'une représentation abstraite d'un élément réel ; c'est le choix d'une technologie qui déterminera quel est le ou les composants réels pouvant la remplir. Une fois que les composants sont choisis, il faut les dimensionner en déterminant les valeurs numériques de leurs paramètres (les valeurs des résistances, des inductances et des capacités des dispositifs de filtrage par exemple).
- **Assemblage des composants** : il est nécessaire d'assembler les composants en respectant les contraintes imposées pour réaliser un assemblage cohérent permettant de satisfaire les performances requises.

Les étapes que nous venons de décrire sont les étapes essentielles de la résolution d'un problème de conception. Elles permettent à l'expert chargé de la résolution d'aboutir aux choix nécessaires pour satisfaire les performances requises.

Cependant, les étapes de simulation, d'optimisation et les divers tests restent d'une importance capitale pour valider ces choix. Avant la réalisation à l'échelle industrielle de la solution, il sera judicieux de simuler et d'optimiser le comportement de la solution adoptée avec les outils et les paramètres adéquats. Une fois que cette étape est franchie avec succès, il faut réaliser un prototype de la solution, ce qui permettra de déceler les difficultés qui pourraient être rencontrées pendant la production et de tester le comportement réel du produit pour une validation "définitive" des choix.

Maintenant que nous avons décrit de manière générale le déroulement d'un processus de conception, nous allons présenter dans ce qui suit différentes techniques de cette activité.

1.1.3. Les différentes techniques de conception :

Dans cette section, nous présentons un classement des différentes techniques de conception. Ce classement, recueilli dans la littérature ([Bel00]), est décrit par la matrice bi-dimensionnelle de la Figure 1.3. Dans cette matrice, les différentes techniques sont classées selon deux critères : le premier correspond aux connaissances préalablement disponibles sur le produit à concevoir, le second correspond à l'investissement à effectuer pour sa réalisation [Bel00].

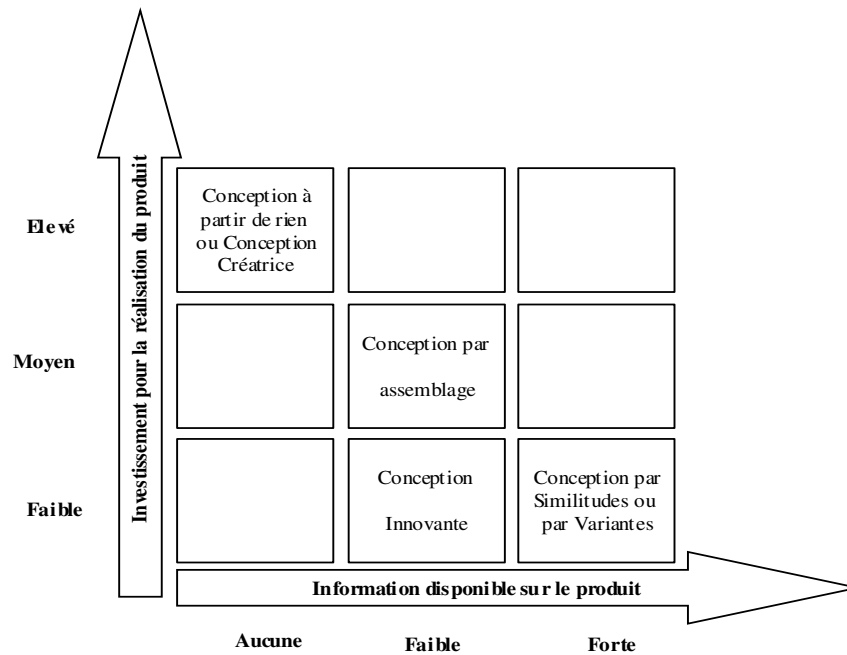


Figure 1.3 - Matrice des différentes techniques de conception [Bel00]

Dans ce qui suit, nous décrivons les différentes cases de la matrice décrite par la Figure 1.3.

1.1.3.1. La conception par similitude ou par variantes :

Il s'agit d'adapter un produit déjà existant à de nouveaux besoins en gardant son concept de base. Les experts s'appuient alors principalement sur leurs précédentes expériences de sa réalisation et réutilisent leur savoir-faire pour déterminer une solution similaire au produit en question [Bel00].

Dans ce cas, ce dernier garde l'essentiel de ses caractéristiques fonctionnelles, structurelles et comportementales.

La conception du produit consiste alors [Bel00] :

- soit à reconduire une solution adoptée lors d'une précédente réalisation,
- soit à modifier certains paramètres du produit sans modifier sa structure.

1.1.3.2. La conception innovante :

Les experts doivent formuler un nouveau concept du produit à réaliser. Ceci nécessite généralement l'ajout ou la suppression d'une ou plusieurs caractéristiques du

produit afin de répondre à un besoin insatisfait par la première version du produit. L'objet conçu est donc un nouveau produit à l'échelle de l'entreprise [Bel00].

1.1.3.3. La conception créatrice ou "à partir de rien" :

Elle consiste à inventer un nouveau produit en définissant la totalité de ses caractéristiques. L'objet conçu est donc perçu comme un nouveau produit que ce soit au niveau du marché ou à l'échelle de l'entreprise [Bel00].

1.1.3.4. La conception par assemblage ou composition :

Elle consiste à associer des sous-ensembles bien connus pour construire un ensemble cohérent [Bel00]. Par exemple, un variateur de vitesse d'une machine asynchrone peut être constitué en associant un redresseur et un onduleur. Ces convertisseurs sont de leur côté composés d'interrupteurs.

1.2. Etat de l'art de la conception en Génie Electrique :

1.2.1. Les approches adoptées :

1.2.1.1. Les approches purement électriques :

Ce sont des approches utilisées notamment dans les problèmes de conception en électronique de puissance [Lec98]. Dans ce domaine, il s'agit en général de concevoir un circuit de type "source + convertisseurs + filtres + charge", les propriétés de la source et de la charge étant connues. Dans ce qui suit on décrit des approches spécifiques pour la conception des convertisseurs, de leur commande et des filtres.

1.2.1.1.1. Utilisation des cellules de commutation :

C'est l'approche la plus répandue pour la conception des convertisseurs. Elle consiste à les modéliser comme un ensemble de structures de base : les cellules de commutation.

Une cellule de commutation permet de relier une source de tension à une ou plusieurs sources de courant, ou une source de courant à une ou plusieurs sources de

tension en respectant les règles du transfert énergétique [Hau99]. Le respect de ces règles permet d'assurer la continuité énergétique d'une association de sources. Ces règles sont énoncées dans ce qui suit [Hau99] :

- Une source de tension, dont la différence de potentiel n'est pas nulle, ne peut être mise en court-circuit lors de la fermeture d'un interrupteur.
- Une source de courant, dont l'intensité n'est pas nulle, ne peut être mise en circuit ouvert lors de l'ouverture d'un interrupteur.
- On ne peut pas connecter deux sources de tension en parallèles ou deux sources de courant en série, suite à la fermeture d'un interrupteur.

On distingue notamment :

- **La cellule de commutation élémentaire**, illustrée par la Figure 1.4, permet de connecter une source de tension à une source de courant et comporte deux interrupteurs fonctionnant de manière complémentaire.

Dans la cellule présentée dans Figure 1.4, la fermeture de l'interrupteur I1 et l'ouverture de l'interrupteur I2 permet le transfert de puissance de la source de tension vers la source de courant. L'ouverture de I1 et la fermeture de I2 permet la circulation du courant sans discontinuité.

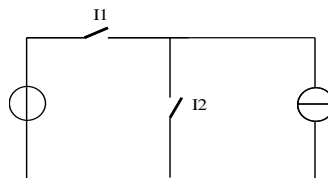


Figure 1.4 - Cellule de commutation élémentaire

Ce type de cellule est un cas particulier de la catégorie suivante.

- **La cellule polyphasée**, qui permet de régler les échanges d'énergie entre $n-1$ sources de tension et une source de courant, et qui est composée de n interrupteurs ($n \geq 2$). Chaque interrupteur est connecté, d'une part, à une source de tension et, d'autre part, à la source de courant (voir Figure 1.5).

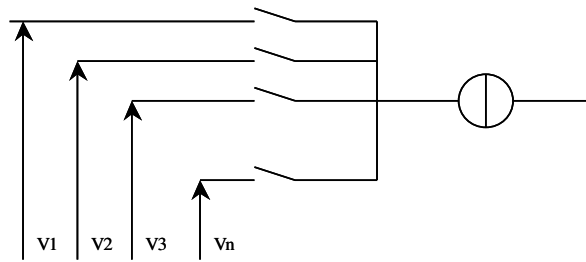


Figure 1.5 - Cellule polyphasée

La cellule considérée garantit la circulation du courant (la fermeture des mailles) et définit un décalage temporel dans le fonctionnement des interrupteurs [Lec98].

- **La cellule multiniveaux :**

La cellule de commutation polyphasée (Figure 1.6.a), que nous venons de présenter, permet de connecter une source de courant à un groupe de sources de tension. L'existence d'un tel groupe est fréquente pour des sources alternatives (réseau triphasé par exemple). Par contre, on ne dispose quasiment jamais d'un tel groupe de sources de tension continue. Dans ce cas, la seule solution réellement envisageable consiste à recréer des niveaux de tension intermédiaires régulièrement espacés à partir d'une unique source de tension continue (Figure 1.6.b) [Foc98].

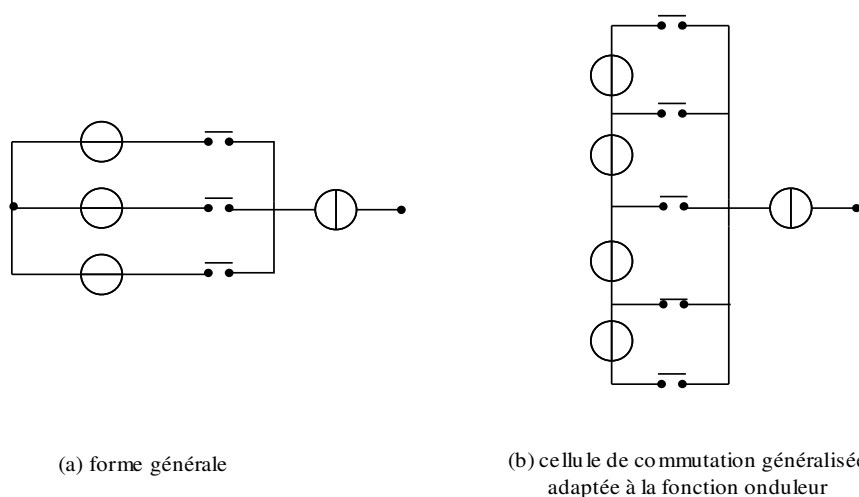


Figure 1.6 – Cellules de commutation généralisées [Foc98]

La notion de cellule de commutation peut être utilisée pour concevoir des structures de convertisseurs statiques saines, notamment grâce aux avantages suivants [Lec98] :

- les problèmes de cohérence énergétique (l'impossibilité d'une association en parallèle de deux sources de tension et d'une association en série de deux sources de courant) sont gérés de façon implicite par les cellules,
- le nombre de configurations possibles est directement réduit. En effet, si un convertisseur est décomposé en cellules, alors le mode de fonctionnement est une combinaison des fonctionnements des différentes cellules.

A l'aide de la notion de cellule, il est possible de mettre en place des outils orientés système expert. C'est ce qu'a proposé par exemple D. Fezzani [Fez96] pour la conception des alimentations sans interruption (voir paragraphe 1.2.2.2.2).

1.2.1.1.2. *L'approche matricielle :*

L'approche matricielle, qui a été développée au L2EP de Lille, est une approche dédiée à la conception de la commande rapprochée des convertisseurs statiques ([Fra96A], [Fra96B]).

Elle consiste à modéliser les interrupteurs d'un convertisseur statique par ce qu'on appelle des "fonctions de connexion". En effet, un interrupteur, dans son fonctionnement idéal, peut être considéré comme un dipôle énergétiquement neutre (il n'est le siège d'aucune perte d'énergie) pouvant établir une connexion binaire (ouvert – fermé) dans un circuit électrique ou il est inséré. On admet ainsi que la chute de tension aux bornes d'un interrupteur fermé est nulle, que le courant s'annule quand l'interrupteur est ouvert, et que les commutations sont instantanées (durées nulles).

A partir de ces hypothèses, on associe à chaque interrupteur une "fonction de connexion", notée f , décrite par ce qui suit :

Un interrupteur est considéré parfaitement contrôlable (à l'ouverture et à la fermeture) et bidirectionnel en tension et courant avec :

$$f = 0 \quad \text{quand l'interrupteur est ouvert}$$

$$f = 1 \quad \text{quand l'interrupteur est fermé}$$

Cette fonction permet de lier les grandeurs électriques propres à l'interrupteur (u , i) entre elles et avec les grandeurs converties, déterminées par l'environnement de cet interrupteur (us , is).

On obtient ainsi :

$$\begin{aligned}i(t) &= f(t) \cdot is(t) \\u(t) &= (1 - f(t)) \cdot us(t)\end{aligned}\tag{E1}$$

avec i et u les grandeurs dites modulées, is et us les grandeurs dites commutées pour lesquelles la lettre "s" rappelle qu'elles sont issues des sources.

Cette approche, qui permet de prendre en compte le fonctionnement discret d'un convertisseur (voir l'exemple de la Figure 1.7), peut être utilisée pour modéliser ce dernier comme une matrice d'interrupteurs (fonctions de connexion) reliant L sources de tension avec C sources de courant.

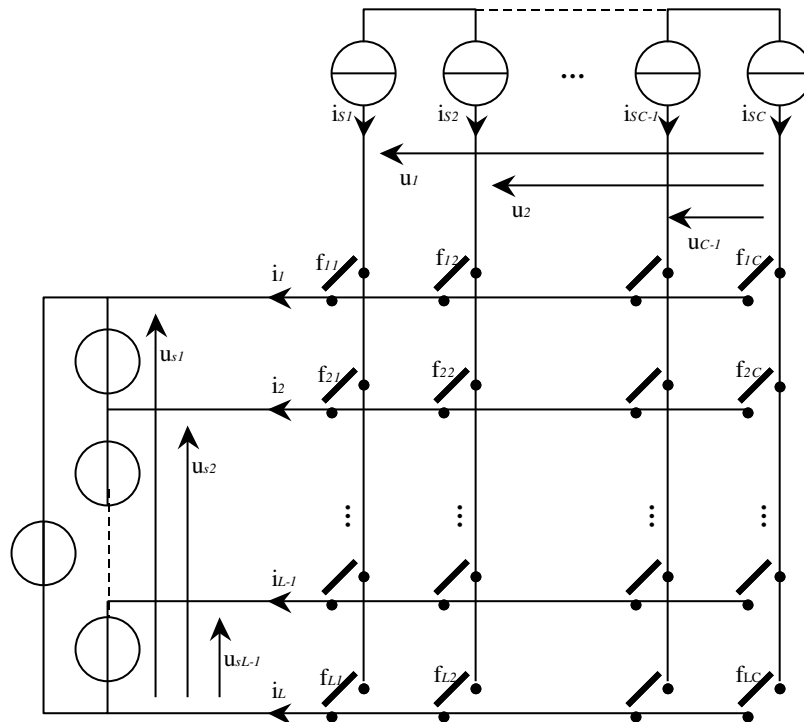


Figure 1.7 – Représentation matricielle d'un convertisseur statique
*L*phasé en tension / *C*phasé en courant [Fra96A]

Dans le schéma de la Figure 1.7, la fonction de connexion associée à l'interrupteur se trouvant à l'intersection de la ligne j et de colonne k est notée f_{jk} .

On adopte aussi les notations suivantes :

- $i_{s1}, i_{s2}, \dots, i_{sk}, \dots, i_{sc}$ désignent les courants commutés issus des sources de courants.
- $u_{s1}, u_{s2}, \dots, u_{sj}, \dots, u_{sL-1}$ désignent les tensions commutées issues des sources de tensions.
- $i_1, i_2, \dots, i_j, \dots, i_L$ désignent les courants modulés.
- $u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_{c-1}$ désignent les tensions modulées.

On appelle $[F]$ la matrice fonctionnelle (tous ses éléments sont des fonctions) regroupant toutes les fonctions de connexion du convertisseur considéré :

$$[F] = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{1C} \\ f_{21} & f_{22} & f_{2C} \\ f_{L1} & f_{L2} & f_{LC} \end{bmatrix} \quad (E2)$$

Ensuite, on désigne :

- $[I_s] = [i_{s1} \dots i_{sk} \dots i_{sC}]^T$ est un vecteur contenant les C courants commutés,
- $[I] = [i_1 \dots i_j \dots i_C]^T$ est un vecteur contenant les L courants modulés,

On peut exprimer la relation entre ces deux vecteurs par :

$$[I] = [F] [I_s] \quad (E3)$$

En outre, la somme des courants commutés ou modulés est nulle, on peut alors éliminer la dernière composante dans les vecteurs $[I]$ et $[I_s]$, ce qui permet d'obtenir :

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_{(L-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (f_{11} - f_{1C}) & (f_{1(C-1)} - f_{1C}) \\ \vdots & \vdots \\ (f_{(L-1)1} - f_{LC}) & (f_{(L-1)(C-1)} - f_{LC}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ \vdots \\ i_{s(C-1)} \end{bmatrix} \quad (E4)$$

que l'on note :

$$[Im] = \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_{(L-1)} \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} i_{s1} \\ \vdots \\ i_{s(C-1)} \end{bmatrix} = [M] [I_c] \quad (E5)$$

De même, on montre que les relations entre les tensions commutées et modulées s'expriment selon l'équation suivante :

$$[Um] = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_{(C-1)} \end{bmatrix} = [M]^T \begin{bmatrix} u_{s1} \\ \vdots \\ u_{s(L-1)} \end{bmatrix} = [M]^T [Uc] \quad (E6)$$

La matrice $[M]$, de dimension $(L-1) \times (C-1)$, est appelée matrice de conversion.

Les vecteurs U_m et I_m sont les vecteurs des tensions et des courants modulés alors que les vecteurs U_c et I_c sont les vecteurs des tensions et des courants commutés.

A partir de l'équation (E6) on peut écrire :

$$[GM] = \begin{bmatrix} [U_m] \\ [I_m] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [M]^T & [0] \\ [0] & [M] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [U_c] \\ [I_c] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [M]^T & [0] \\ [0] & [M] \end{bmatrix} [GC] \quad (E7)$$

On obtient ainsi une équation (E7) qui décrit les relations entre les grandeurs modulées (vecteur $[GM]$) et les grandeurs commutées ((vecteur $[GC]$). On peut insérer ces relations dans les équations d'état du convertisseur (qui fait intervenir le vecteur $[GM]$) et effectuer un raisonnement formel pour déduire la commande du convertisseur.

L'approche qu'on vient de présenter permet principalement de prendre en compte mathématiquement le fonctionnement discret d'un convertisseur statique, pour déterminer de manière systématique sa commande.

Cette approche a été par exemple exploitée dans la conception de la commande d'un onduleur de tension MLI [Fra96B].

1.2.1.2. Les approches systémiques :

La conception en Génie Electrique ne concerne pas que des systèmes purement électriques, elle traite aussi des systèmes qui s'appuient sur des technologies issues de plusieurs disciplines physiques au cœur desquelles le Génie Electrique joue un rôle central : Electronique, Electricité, Mécanique, Hydraulique, Electrochimie, etc. Ainsi, pour concevoir par exemple un véhicule fonctionnant à l'énergie solaire, on fait collaborer des spécialistes de différents domaines tels que la mécanique, la thermique, l'électrotechnique, etc. Pour se comprendre, ces spécialistes de différents domaines doivent adopter des approches de conception adaptées à cet aspect multidisciplinaire en prenant en compte un système dans sa globalité. Dans ce qui suit nous décrivons des exemples de ce type d'approches.

1.2.1.2.1. Le formalisme Bond Graph :

Le Bond Graph est un formalisme permettant la modélisation de systèmes multidisciplinaires ; c'est d'ailleurs cet aspect multidisciplinaire et d'autres aspects, que nous allons traiter ultérieurement, qui sont intéressants pour la conception de systèmes en Génie Electrique.

Le formalisme Bond Graph consiste en un langage de représentation des transferts de puissance entre les différents constituants d'un système. On considère qu'entre deux sous systèmes un transfert de puissance s'effectue par l'intermédiaire d'un couple de grandeurs effort/flux qui est l'équivalent en électricité du couple tension/courant, en mécanique de translation du couple force/vitesse, etc (voir Figure 1.8).

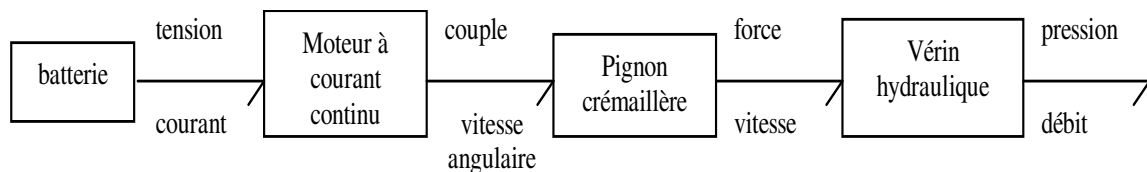


Figure 1.8 - Principe du Bond Graph [Tan00]

Un schéma Bond Graph est composé "d'éléments" et de "bonds" (voir Figure 1.9). Il y a plusieurs types d'éléments ; chacun d'entre eux joue un rôle analogue dans les différents domaines énergétiques.

On distingue les éléments passifs 1-port (C, I, R) qui ne sont pas des sources de puissance ; ils transforment la puissance qui leur est fournie en énergie dissipée en chaleur ou stockée. Ces éléments sont les équivalents respectifs des résistances, des inductances et des capacités en électricité.

Il y a aussi les éléments actifs 1-port S_e et S_f qui sont les sources d'effort et de flux (sources de tension et de courant en électricité).

On distingue ensuite les éléments 2-ports TF et GY qui sont les gyrateurs et les transformateurs. Ces éléments conservent la puissance.

La dernière catégorie est celle des jonctions 0 et 1 qui permettent de connecter les éléments en parallèle ou en série (nœuds et mailles en électricité).

Les bonds (ou liens) représentent les transferts de puissance.

Le formalisme Bond Graph permet aussi de faire apparaître explicitement les relations de cause à effet (causalité) grâce à un "trait causal" placé perpendiculairement à chaque lien du Bond Graph (voir Figure 1.9), en suivant la convention suivante :

"Le trait causal est placé près de l'élément pour lequel l'effort est une donnée" [Tan00]

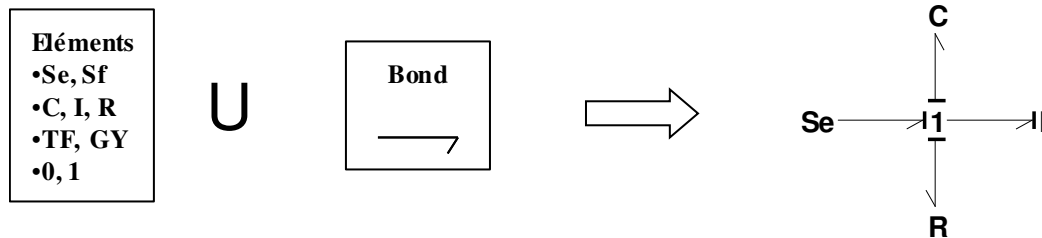


Figure 1.9 - les éléments d'un schéma Bond graph [Fan01]

Comme exemple de méthode de conception se basant sur le Bond Graph on peut citer la méthode développée dans [Fan01]. Il s'agit d'une approche pour la conception de filtres en combinant le formalisme Bond Graph et les algorithmes génétiques. Cette méthode permet par exemple de déterminer des structures de filtres de types passe-bas, passe-haut et passe-bande. Le filtre à déterminer est décrit par le schéma de la Figure 1.10 ; le cahier des charges de la conception se base sur les performances fréquentielles à la sortie du circuit.

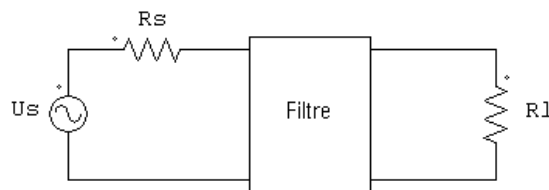


Figure 1.10 – Schéma du circuit du filtre à déterminer

A partir du circuit global on extrait un circuit "embryon" et on le convertit en schéma Bond Graph. Le circuit embryon est le circuit global sans le dispositif de filtrage. Donc, dans notre exemple, c'est l'association série entre la source de tension et la résistance

R_s , l'ensemble étant associé en parallèle avec la résistance R_L . L'équivalent en Bond Graph est illustré par la figure suivante :

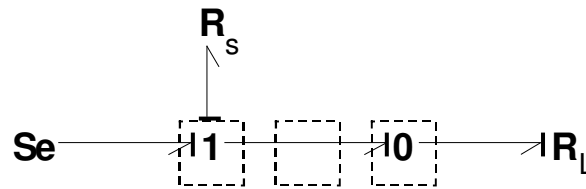


Figure 1.11 - *Le circuit embryon : les parties encadrées par des pointillés sont les endroits où vont s'insérer les composants du filtre à déterminer*

Le formalisme Bond Graph a été adopté dans cette approche parce que l'utilisation des jonctions 0 et 1 permet d'obtenir des représentations sans maille des circuits électriques, ce qui constitue un avantage car les mailles rendent parfois la représentation filaire classique compliquée. De plus, l'utilisation de ces jonctions donne au circuit une dualité de type logique 0-1 intéressante pour la programmation.

En outre, les schémas Bond Graph sont des structures arborescentes, ce qui facilite leur traitement par des algorithmes génétiques dont les étapes d'exécution s'enchaînent elles aussi de manière arborescente. Ainsi, il suffit d'appliquer un processus génétique sur le circuit embryon et faire évoluer ce dernier en ajoutant des éléments Bond Graph dans les endroits adéquats appliquant les opérateurs génétiques jusqu'à l'obtention d'un circuit assurant les performances recherchées.

Dans cette démarche, on n'utilise que l'ensemble d'éléments Bond Graph suivant : $\{Se, Sf, C, I, R, 0, 1\}$; cet ensemble est suffisant pour le problème de conception de filtre. Les principaux opérateurs génétiques utilisés dans cette méthode permettent principalement l'ajout d'éléments Bond Graph dans les parties "libres" du circuit embryon (les parties encadrées par des pointillés dans l'exemple de la Figure 1.11) ou le remplacement d'éléments déjà existants dans le circuit en cours de construction par de nouveaux éléments.

L'intérêt de cette démarche réside dans l'adoption d'un ensemble fini d'opérations ou d'actions qui sont appliquées de manière systématique dans l'algorithme génétique jusqu'à la résolution du problème de conception.

On peut s'inspirer de cette démarche pour mettre à la disposition du concepteur une "boîte à outils" qui rassemble différentes opérations et fonctionnalités ; et c'est à ce dernier de les exploiter pour faire évoluer son raisonnement en choisissant des stratégies adaptées au problème traité, jusqu'à l'aboutissement à une solution.

1.2.1.2.2. *Macro modélisation des conversions électromécaniques :*

C'est une approche de modélisation dédiée à la conception de structures de commande pour les conversions électromécaniques. Elle a été élaborée principalement au L2EP de Lille (voir [Bou00] et [Bou02]).

La macro modélisation permet de représenter les chaînes de conversion électromécanique en s'appuyant sur les deux formalismes suivants [Bou02] :

▪ **Le formalisme SMM (Système multimachine multiconvertisseur) :**

Généralement, une chaîne de conversion électromécanique monomachine relie une source électrique SE à une source mécanique SM comme le montre la Figure 1.12.

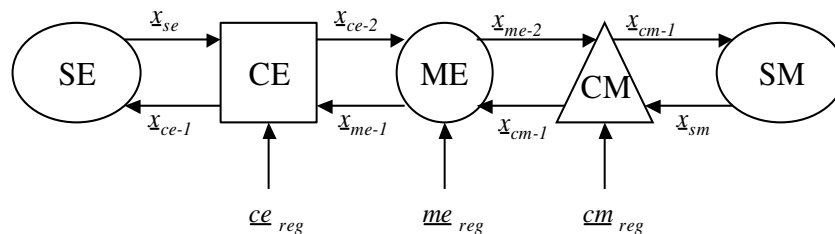


Figure 1.12 – Représentation SMM d'un système monomachine [Bou02]

La conversion générique décrite par ce modèle est effectuée à l'aide des trois éléments suivants [Bou02] :

- le convertisseur électrique CE (adaptation électrique),
- la machine électrique ME (conversion électromécanique),
- le convertisseur mécanique CM (adaptation mécanique).

La représentation SMM met en évidence les relations d'action et réaction entre les composantes à travers leurs variables d'échange \underline{x}_i . Les indices de ces variables

correspondent aux éléments qui leurs donnent naissance. Chaque composantes de la représentation peut aussi posséder un vecteur de réglage \underline{v}_{reg} .

Le formalisme SMM permet aussi de représenter des conversions multimachines qui incluent des éléments de couplages assurant une répartition énergétique entre plusieurs chaînes de conversion. Chaque type d'élément de conversion (CE, ME et CM) possède son propre type de couplage (électrique, magnétique et mécanique) représenté par des formes imbriquées comme le montre l'exemple de la Figure 1.13.

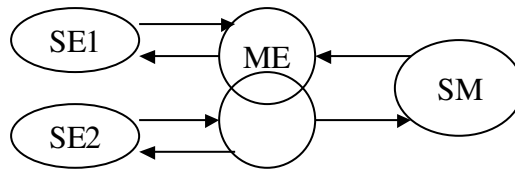


Figure 1.13 – Exemple de couplage magnétique [Bou02]

- **Le formalisme REM (Représentation Energétique Macroscopique) :**

La REM a été développée en s'inspirant du Graphe Informationnel Causal (GIC) [Hau99] pour proposer une représentation causale macroscopique. Ce formalisme intègre les règles d'inversion du GIC pour la détermination de la commande d'un système.

Le formalisme SMM, basé sur la principe d'action et réaction, a l'avantage d'être synthétique mais ne met pas toujours en évidence certaines informations importantes qui concernent les échanges énergétiques. A l'inverse, le GIC, basé sur le principe de cause à effet, permet de décrire de manière détaillée les échanges énergétiques mais avec une perte lisibilité pour des processus complexes.

La REM a été ainsi développée pour permettre la complémentarité entre les formalismes SMM et GIC.

Une représentation REM se distingue d'une représentation SMM par les éléments d'adaptation (EA). Ces derniers assurent un stockage énergétique avec perte possible ; ils sont représentés par un rectangle contenant un rectangle oblique. Une représentation REM utilise aussi les éléments de conversion proposés dans le formalisme SMM.

Ainsi, la chaîne de conversion électromécanique monomachine générique (voir Figure 1.14) est constituée d'une alternance d'éléments de conversion et d'accumulation. Ces derniers assurent une adaptation entre les sources et les éléments de conversion.

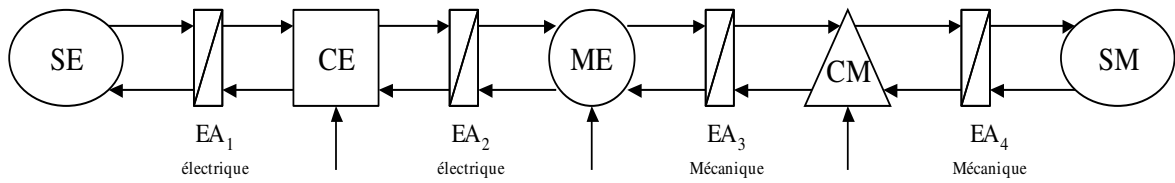


Figure 1.14 – REM d'un système monomachine [Bou02]

Les variables d'échange entre deux éléments associés (action et réaction) correspondent ainsi à des variable d'échange énergétique [Bou02] :

- si l'une est de nature potentielle, l'autre est cinétique (exemple : tension u et courant i dans le domaine électrique),
- leur produit donne la puissance instantanée véhiculée entre les deux éléments (exemple : $p = u.i$ dans le domaine électrique).

Les structures de commande d'une chaîne de conversion électromécanique sont déduites par inversion de son macro modèle établi à l'aide des formalisme SMM et REM.

L'intérêt de la macro modélisation est l'organisation d'une structure de conversion électromécanique en modules élémentaires (éléments de conversion et d'adaptation) caractérisés par leur variables d'échange énergétique avec l'extérieur, ce qui permet d'obtenir une représentation synthétique qui tient compte des règles de causalité et de cohérence énergétique.

1.2.1.2.3. L'analyse fonctionnelle :

Cette méthode permet de résoudre un problème de conception en se focalisant sur les fonctions que doit assurer une solution du problème, sans se soucier au départ de la manière de réaliser technologiquement ces fonctions. C'est une approche très utilisée dans la conception de logiciels informatiques. Elle a été développé au LEG de Grenoble en vue de la conception de convertisseurs statiques [Lec98].

La notion de "fonction" constitue l'élément de base de la modélisation fonctionnelle utilisée dans ces travaux. Elle peut être considérée comme une boîte noire ayant un rôle essentiel dans le système. On appelle "fonctionnalité" ce rôle.

Dans un convertisseur statique par exemple, on peut définir les fonctionnalités principales suivantes : "fournir l'énergie" (pour modéliser les sources d'énergies), "recevoir l'énergie" (pour modéliser les charges), "stocker l'énergie" (pour modéliser les capacités par exemple), etc.

Une fonction a une seule fonctionnalité et peut être décomposée en plusieurs fonctions.

La modélisation fonctionnelle d'un système le décrit comme une structure de fonctions liées par des liens énergétiques permettant d'échanger des couples de grandeurs effort/flux appelés "interfaces".

Une telle structure peut être représentée par ce qu'on appelle un graphe fonctionnel (voir Figure 1.15).

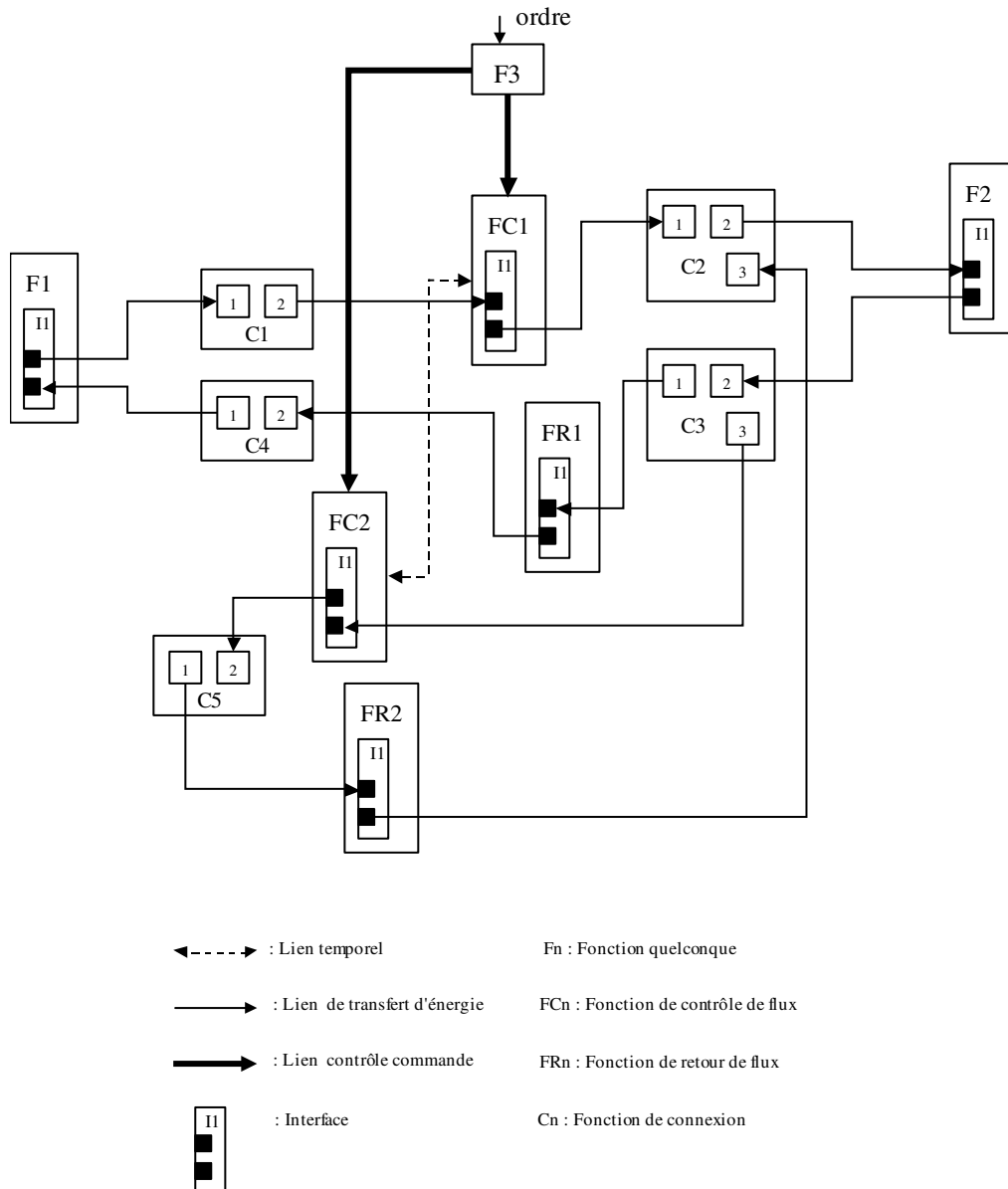


Figure 1.15 - Graphe fonctionnel de principe d'une cellule de commutation [Lec98]

La Figure 1.15 présente un graphe fonctionnel de principe d'une cellule de commutation élémentaire, à deux interrupteurs commandés (voir Figure 1.16).

Les fonctions F1, F2 représentent respectivement la source de tension et la source de courant. Elles échangent de l'énergie sous le contrôle des fonctions FC1 et FC2 représentant les interrupteurs commandés de la cellule.

La fonction F3 envoie des informations à ces deux dernières afin de contrôler leurs actions dans le temps ; c'est une fonctionnalité de commande.

Les fonctions FR1 et FR2 sont des fonctions de retour qui garantissent la continuité de la circulation du flux ; alors que les fonctions C1, ..., C5 sont des fonctions de connexion.

Voici la représentation filaire de la cellule de commutation (sans la commande) décrite par le graphe fonctionnel de la Figure 1.15.

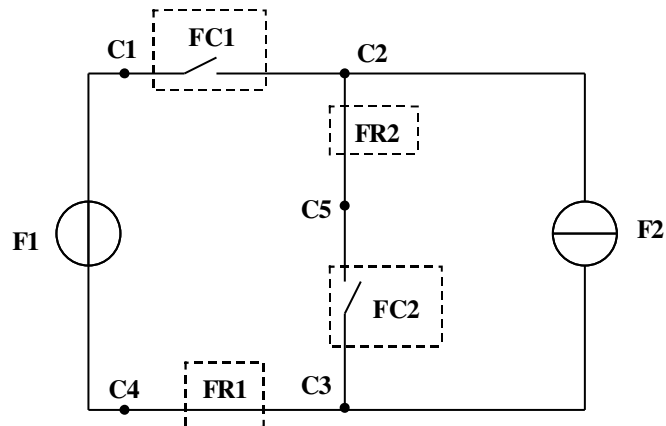


Figure 1.16 - Représentation filaire de la cellule de commutation

Après l'analyse des données du cahier des charges pour déterminer les fonctionnalités que doit remplir le dispositif à concevoir, on peut utiliser l'approche fonctionnelle pendant l'étape de définition et de modification de la structure du produit recherché en raisonnant non pas en terme de composant mais en terme de "fonction".

Ainsi, on dégage les "fonctions" susceptibles de réaliser les différentes "fonctionnalités" déterminées suite à l'analyse du cahier des charges. On assemble ensuite ces "fonctions" en spécifiant les chemins d'énergie entre elles (voir Figure 1.15) pour aboutir à la "fonction" globale qui n'est autre que la structure recherchée.

On obtient alors une structure d'éléments représentés abstraitement par des "fonctions", et c'est le choix d'une technologie qui permet de déterminer quel est le composant ou l'ensemble de composants pouvant réaliser ces fonctions.

L'avantage de cette approche réside dans le fait qu'elle s'intéresse principalement aux fonctions que réalise le système à concevoir, ce qui lui procure un niveau d'abstraction lui permettant d'être relativement détaché des technologies de fabrication. Ceci permet

d'envisager plus facilement l'adoption de nouvelles structures et la prise en compte des évolutions technologiques.

1.2.1.3. Conclusion :

L'intérêt des approches que nous venons d'évoquer résident dans les points suivants :

- La caractérisation des éléments par leurs échanges énergétiques facilite la vérification de la cohérence des structures qui les utilisent (paragraphe 1.2.1.2.1 et 1.2.1.2.2).
- La description des structures à l'aide modules élémentaires permet d'avoir une vision synthétique des systèmes et rend possible leur étude de manière progressive (paragraphe 1.2.1.2.2).
- L'adoption d'un raisonnement fonctionnel (paragraphe 1.2.1.2.3) : il s'agit de se focaliser sur les services que doit fournir le système à concevoir pour dégager les fonctionnalités qui doivent être assurées par le système recherché, ce qui permet de fractionner un problème compliqué en sous problèmes plus simples. En effet, les fonctions recherchées constituent des cahiers des charges partiels ; la résolution de chacun de ces derniers conduit à la résolution du problème global.
- L'utilisation pendant la résolution d'actions élémentaires appliquées de manière systématique selon les besoins, peut être utile en vue de l'automatisation du raisonnement (paragraphe 1.2.1.2.1).
- Il est nécessaire de ne pas négliger les approches spécifiques qui peuvent être utiles pour affiner les performances d'une solution dans un domaine d'expertise donné, comme par exemple l'utilisation des cellules de commutation ou des convertisseurs matriciels (paragraphe 1.2.1.1.1 et 1.2.1.1.2).

1.2.2. Les outils utilisés :

Dans ce paragraphe, nous exposons les catégories d'outils de conception les plus utilisés dans le domaine du Génie Electrique [Bel00].

1.2.2.1. Les outils spécifiques :

Ce sont des outils destinés à des problèmes bien spécifiques et qui apportent une aide ponctuelle au concepteur dans un domaine précis. Ils dépendent donc complètement de la connaissance traitée dans le problème de conception [Bel00].

Ces outils ne sont généralement adaptés qu'à une conception séquentielle et ils ne peuvent pas gérer plusieurs alternatives de solutions.

Comme exemple de ces outils, on peut citer des outils de CAO tels que les logiciels d'aide à la conception des circuits électroniques. Ces outils permettent de construire, à partir d'une bibliothèque de composants électroniques (résistances, capacités, diodes, etc.), un circuit électronique en détectant les éventuelles erreurs (pistes discontinues par exemple) commises par l'utilisateur durant la construction.

1.2.2.2. Les outils génériques :

Un outil générique ne dépend que partiellement de la connaissance qu'il véhicule [Bel00]. Contrairement aux outils spécifiques, les outils génériques ne sont pas destinés à une application particulière. C'est pour réaliser cet objectif que les concepteurs d'outils ont cherché à promouvoir des outils généraux. Le but étant de développer un seul outil de conception, dont la version unique permet de supporter des applications issues de différentes disciplines (électrique, mécanique, etc.).

Dans ce type d'outils, le déroulement du raisonnement (mécanisme d'amorçage du raisonnement, gestion des connaissances, enchaînement du raisonnement) est invariant. Le concepteur doit adapter l'outil en lui ajoutant les connaissances spécifiques à son domaine de conception. Dans le cas d'une évolution dans le problème de conception traité, il suffit d'apporter quelques modifications à l'outil, alors que dans le cas d'un outil spécifique il faut souvent re-développer l'outil.

Comme exemple d'outils génériques on peut citer les outils d'optimisation et les systèmes experts.

1.2.2.2.1. *Les outils d'optimisation :*

Les outils de conception s'appuyant sur des techniques d'optimisation peuvent traiter des problèmes de natures diverses. Ce sont des outils bien adaptés au dimensionnement des systèmes multidisciplinaires.

Un problème d'optimisation consiste à reformuler les exigences d'un cahier des charges en des fonctions mathématiques, en prenant le soin de bien choisir les variables de conception (c'est une étape de modélisation). Pour résoudre le problème il faut fixer un certain nombre de critères et déterminer les valeurs minimales ou maximales (les valeurs optimales) des fonctions d'optimisations en respectant les critères fixés. Les différents calculs peuvent s'effectuer à l'aide de différentes méthodes d'optimisation (monocritères, multicritères, déterministes, stochastiques, etc.).

Comme exemple de travaux s'appuyant sur les techniques d'optimisation, on peut citer l'outil développé par S. BERGEON au LEG qui permet un dimensionnement optimisé de convertisseurs statiques [Ber98].

1.2.2.2.2. *Les systèmes experts :*

Les systèmes experts permettent de résoudre les problèmes de conception dont les connaissances sont heuristiques [Bel00]. En effet, toute la connaissance à traiter, aussi bien celle qui se rapporte au produit, que celle qui concerne le processus de conception, doit s'écrire sous la forme de règle de production :

SI (Condition(s) vraie(s)) ALORS (faire Action(s)))

Le moteur d'inférence du système expert gère le choix des règles à exécuter selon les données dont il dispose, et gère aussi l'enchaînement du raisonnement.

Il y a trois types d'enchaînement : le chaînage avant, le chaînage arrière et le chaînage mixte. Dans le cas du chaînage avant ou progressif, le moteur exécute, au fur et à mesure de l'évolution des données, les actions des règles dont les conditions sont vérifiées. Alors que dans le cas du chaînage arrière ou régressif le moteur part du but à atteindre et tente à travers les règles de démontrer les sous buts de l'objectif fixé. Le chaînage mixte est une combinaison des deux types précédents.

Plusieurs travaux ont été menés pour développer des systèmes experts pour la conception des systèmes électriques comme les travaux de D. FEZZANI [Fez96] dans le cadre de la conception d'alimentations sans interruption.

Dans ses travaux, D. FEZZANI a adopté une structure de départ figée (voir Figure 1.17) ; la conception s'effectue à l'aide d'un système expert modulaire selon les étapes suivantes :

- la synthèse des convertisseurs statiques : il s'agit de déterminer, à l'aide d'un module expert, la technologie des interrupteurs qui constituent les convertisseurs, en se basant sur les formes d'onde des sources et de la charge ;
- la définition de la commande des convertisseurs ;
- le choix et le dimensionnement des circuits d'aide à la commutation en fonction des interrupteurs choisis et de leur commande ;
- les choix et dimensionnement des dispositifs de filtrage.

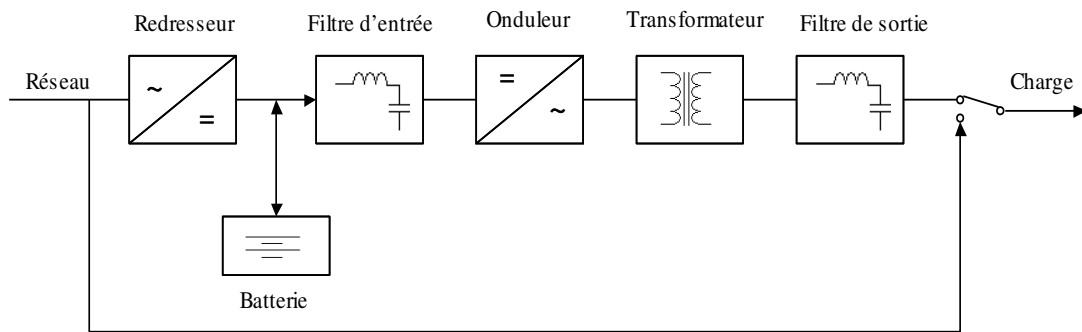


Figure 1.17 – Schéma structurel de l'ASI à concevoir [Fez96]

1.2.2.3. Les outils méta-génériques :

Ceux sont des outils d'un niveau d'abstraction au-dessus des outils génériques, d'où la convention de les qualifier d'outils méta-génériques [Bel00].

Ce type d'outils permet au concepteur non seulement de développer des outils indépendants de la connaissance traitée mais aussi de choisir le modèle de la démarche de conception. Il s'agit dans ce cas de développer des outils complètement indépendants du contenu.

Les outils méta-génériques mettent à la disposition de leurs utilisateurs un contenant vide mais potentiellement prêt à supporter leurs démarches de conception et à les guider dans leurs recherches de solutions à leurs problèmes. Ils permettent ainsi la mise en

œuvre d'outils efficaces pour la gestion de connaissances multidisciplinaires, tout en veillant à ce que les outils développés restent indépendants de toute application.

Les plates formes d'intégration d'outils en vue de la conception appartiennent à la catégorie d'outils méta-génériques. On peut ici citer l'exemple de la plate forme, dédiée à la conception en Génie Electrique, développée par B. Belhabib [Bel00].

1.3. Notre démarche :

Dans notre étude, nous souhaitons mettre en œuvre des méthodes et des outils de conception en Génie Electrique à l'aide "d'éléments caractérisés".

Nous souhaitons nous limiter dans un premier temps à l'aspect qualitatif de la conception, c'est à dire à la détermination de structures de conversion d'énergie en réponse à un cahier des charges.

Après avoir étudié les différents concepts présentés dans ce chapitre, nous avons estimé que le type de démarche le plus adéquat pour notre problématique est la conception par association. En effet, une structure de conversion peut être décomposée en sous structures plus élémentaires qui ne seront autres que nos "éléments caractérisés". Ces derniers une fois connus (et donc caractérisés) et énumérés, constituent une sorte de "magasin de composants" qu'on peut assembler pour construire des structures répondant à des besoins données. Ce "magasin" peut être enrichi avec d'autres éléments caractérisés, au fur et à mesure de l'accumulation du savoir-faire des concepteurs.

Il nous a fallu élaborer une méthode de caractérisation de ces éléments en dégageant d'abord les critères qui correspondent à la problématique posée. C'est ce que nous présentons dans le chapitre suivant.

L'approche adoptée se base sur les propriétés des échanges énergétiques au niveau des liaisons entre les éléments associés dans une chaîne de conversion d'énergie. Elle s'inspire des approches systémiques, présentées au paragraphe 1.2.1.2, pour mettre à la disposition du concepteur dans le domaine du Génie Electrique un formalisme graphique simple, permettant la mise en œuvre de méthodes de conception simples et génériques. Nous exploiterons ensuite ces méthodes pour développer différents types d'outils (modules experts, bases de données, etc.) que nous ferons collaborer dans un environnement de conception modulaire et extensible.

**Chapitre 2 - L'approche de
caractérisation et son exploitation
en vue de la conception**

Chapitre 2 – L'approche de caractérisation et son exploitation en vue de la conception

2.1. Introduction :

Concevoir un système c'est définir les solutions possibles d'un problème exprimé par un cahier de charges. En Génie Electrique, une solution est un système de conversion d'énergie, parfois multidisciplinaire, constitué de composants connus et bien définis (capacité, transformateur, convertisseur statique, machine électrique, pile à combustible...). Une telle structure doit assurer le transfert d'énergie (ou de puissance) entre une source d'alimentation et une charge à alimenter. Le cahier des charges précise les caractéristiques de la source et de la charge et définit les conditions du transfert d'énergie.

Ainsi, pour déterminer une solution à un problème de ce type, il faut déterminer les composants susceptibles de constituer la structure recherchée et les assembler en s'assurant de la validité de cet assemblage et de l'adéquation de son comportement avec les spécifications. La connaissance du comportement d'une structure donnée nécessite la connaissance des caractéristiques des éléments qui la composent et des relations entre ses éléments au sein de la structure.

Ceci nous a conduit à penser que, pour ce type de problème, une approche de conception par association de composants semble être la plus adéquate.

Il faut maintenant caractériser les composants selon des critères adaptés à la problématique traitée. Etant donné que les différents composants d'une structure transforment l'énergie et l'échangent avec d'autres composants, il est judicieux de les caractériser par les propriétés des transformations et des échanges énergétiques qu'ils effectuent. Ainsi, chaque composant d'un dispositif électrique sera représenté par un ou plusieurs éléments, caractérisés par un certain nombre de propriétés relatives à leur façon d'échanger l'énergie avec les autres éléments du système.

La choix de baser la caractérisation des éléments sur les échanges d'énergie permet aussi d'étudier les structures de conversion en adoptant le point de vue le plus général, permettant ainsi de traiter des systèmes multidisciplinaires qui peuvent intégrer des composants tels que les machines électriques, les cellules photovoltaïques, les composants électrochimiques, etc.

Nous allons maintenant exposer en détail notre approche de caractérisation des éléments d'un système électrique.

2.2. La caractérisation énergétique :

2.2.1. Principe :

C'est une représentation qui se base sur les grandeurs physiques échangées entre les différents éléments d'un système électrique.

Prenons l'exemple de la structure bien connue de conversion électromécanique présentée sur la Figure 2.1 : une source de tension filtrée alimentant un hacheur qui pilote un moteur à courant continu.

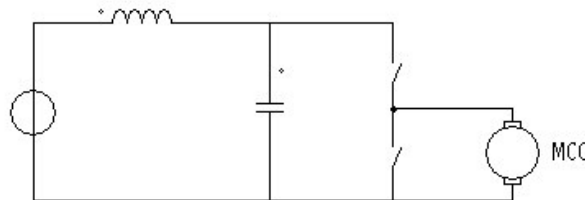


Figure 2.1 - Chaîne de conversion électromécanique

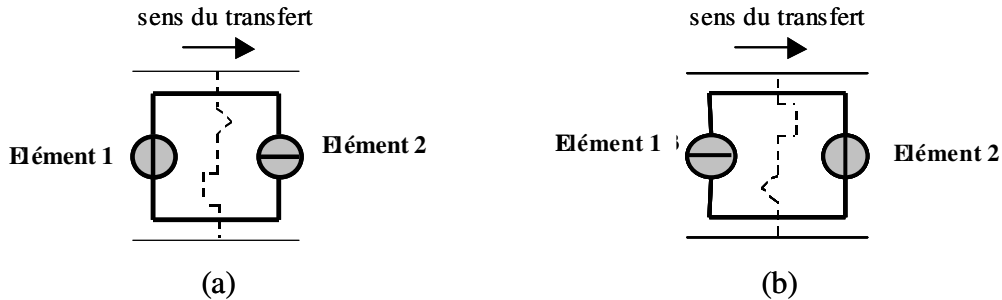
Essayons maintenant de représenter les éléments de cette chaîne par des blocs indépendants selon la façon dont ils effectuent des échanges de puissance.

Un élément qui échange de l'énergie électrique avec un autre ne peut réaliser cet échange que selon un des termes de l'alternative suivante :

- soit il impose dans cet échange la tension et de ce fait subit le courant défini par son voisin,
- soit il impose le courant et subit la tension définie par son voisin.

On appellera "interface" le "lieu" où s'effectue l'échange de puissance.

Une "interface" est caractérisée par un couple (tension, courant) de grandeurs échangées par deux éléments en ce lieu. La Figure 2.1 montre une représentation graphique des deux alternatives possibles pour une interface, du point de vue de l'élément de gauche (élément 1) :



**Figure 2.2 - Caractérisation énergétique : à « tension imposée » (a)
et à « courant imposé » (b)**

Ce schéma utilise les conventions graphiques suivantes:

- l'excroissance ayant la forme triangulaire rappelant "V" représente une tension.
- l'excroissance ayant la forme rectangulaire rappelant "I" représente un courant.

A travers l'interface (a), l'élément 1 impose la tension et accepte le courant que lui impose l'élément 2. Ce dernier impose le courant et accepte la tension définie par l'élément 1.

A travers l'interface (b), l'élément 1 impose le courant et accepte la tension que lui impose l'élément 2. Ce dernier impose le courant et accepte la tension définie par l'élément 1.

Retournons maintenant au circuit de la Figure 2.1 et faisons apparaître les différents types d'échanges en courant et en tension, pour caractériser chaque élément du circuit par les transferts d'énergie qu'il effectue.

Ainsi, on obtient la représentation de chaque élément selon les conventions graphiques qu'on vient de citer, comme le montre la Figure 2.3.

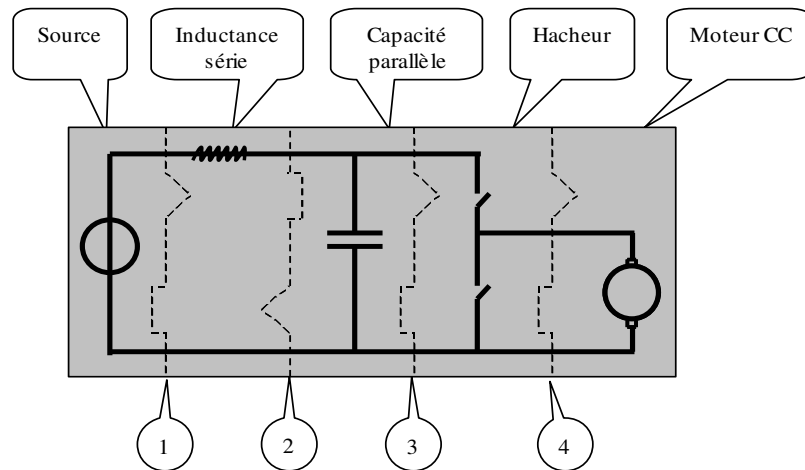


Figure 2.3 - Représentation du circuit de la Figure 2.1 en se basant sur la caractérisation énergétique

La représentation de la Figure 2.3 est déduite des considérations suivantes :

- au niveau de la connexion source de tension – inductance série, c’est à dire au niveau de l’interface (1), le transfert de puissance s’effectue à tension imposée par la source de tension,
- l’inductance série du filtre LC impose le courant au niveau des interfaces (1) et (2), puisqu’elle se comporte en source de courant instantané,
- la capacité parallèle du même filtre, considérée comme source de tension instantanée, impose la tension au niveau des interfaces (2) et (3),
- le hacheur impose au niveau de l’interface (4) une tension qui varie selon l’amorçage ou le blocage de ses interrupteurs,
- le moteur à courant continu, considéré comme source de courant à cause de son inductance de son induit, impose le courant au niveau de l’interface (4).

En essayant maintenant de séparer des blocs indépendants délimités par les interfaces d’échange on peut distinguer :

- un premier bloc représentant la source de tension,
- un deuxième bloc qui est l’inductance série du filtre LC,
- un autre bloc qui est la capacité parallèle du filtre LC,
- un quatrième bloc représentant le hacheur,
- un dernier bloc source de courant symbolisant le moteur à courant continu.

Chacun de ces blocs représente une pièce dont les profils en "V" et en "I" sont à l'image des échanges énergétiques qu'il est susceptible d'effectuer au niveau d'une interface commune avec un autre bloc. Dorénavant, nous appellerons ces blocs des "éléments" et leurs profils des "interfaces d'échanges d'énergie" (chaque élément possède une ou plusieurs interfaces d'échange d'énergie).

La caractérisation énergétique que nous venons de présenter nous permet déjà de faire une première classification se basant sur le nombre d'interfaces et le type de conversion d'énergie.

2.2.2. Classification énergétique :

En se basant sur le nombre d'interfaces d'échange d'énergie, on peut classer les éléments dans les familles suivantes :

2.2.2.1. Les dipôles :

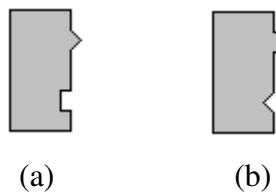


Figure 2.4 - Les éléments dipôles

Ce sont les éléments qui possèdent une seule interface d'échange d'énergie. On distingue deux catégories de dipôles :

- les dipôles à tension imposée (Figure 2.4.a) qui incluent les sources de tension, les intégrateurs de courant (les capacités) et les résistances.
- les dipôles à courant imposé (Figure 2.4.b) qui incluent les sources de courant, les intégrateurs de tension (les inductances) et les admittances.

2.2.2.2. Les quadripôles :

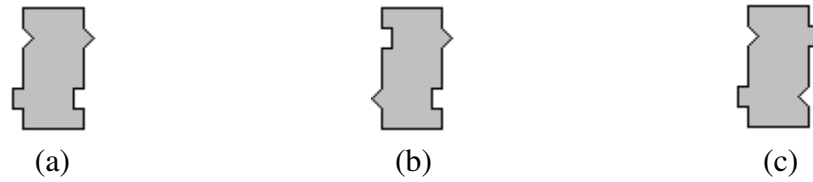


Figure 2.5 - Les éléments quadripôles

Ce sont les éléments qui possèdent deux interfaces d'échange d'énergie. On distingue deux catégories de quadripôles :

- les transformateurs (Figure 2.5.a) qui effectuent des conversions tension-tension (de gauche à droite) et courant-courant (de droite à gauche),
- les gyrateurs qui effectuent des conversions courant-tension (Figure 2.5.b) ou tension-courant (Figure 2.5.c).

2.2.2.3. Les éléments de connexion :



Figure 2.6 - Les éléments de connexion

- les connexions équi-tension sont les éléments de connexion à tension imposée (Figure 2.6.a).
- les connexions équi-courant sont les éléments de connexion à courant imposé (Figure 2.6.b).

Chacun de ces éléments possède une interface particulière ("l'entrée") et un nombre quelconque de "sorties".

Ainsi, une connexion équi-tension possède une interface "d'entrée" à tension imposée et des interfaces de "sortie" à courant imposé ; alors qu'une connexion équi-courant possède une interface "d'entrée" à courant imposé et des interfaces de "sortie" à tension imposée.

Les éléments de connexion expriment les équivalents des lois de Kirschhoff (nœuds et mailles) pour un circuit électrique.

2.3. Les autres critères de caractérisation :

L'aspect énergétique, qui concerne les grandeurs assurant le transfert d'énergie entre éléments a été matérialisé par la représentation en pièces de puzzle décrite au paragraphe précédent.

Mais cet aspect n'est qu'un critère parmi d'autres qui ont une influence décisive sur les choix effectués en conception. En effet, plusieurs critères qualitatifs doivent être pris en compte lors de la conception pour qu'avant le dimensionnement, la structure de conversion choisie soit saine et cohérente. C'est ce que nous décrivons dans ce qui suit.

2.3.1. Transformations des grandeurs physiques par les éléments :

2.3.1.1. Les dipôles :

2.3.1.1.1. Les sources de tension :

Un élément de type "source de tension" impose une tension indépendante a priori du courant qu'il accepte. Ainsi, on peut caractériser l'élément de la Figure 2.7 par la valeur instantanée "V" de la tension imposée par cet élément. Ceci se traduit par l'équation suivante :

$$V_s = V$$

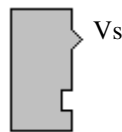


Figure 2.7 – Source de tension

2.3.1.1.2. Les intégrateurs de courant (capacités) :

Il s'agit d'éléments de stockage qui imposent une tension proportionnelle à l'intégrale du courant qu'ils acceptent.

Ainsi, on peut caractériser la transformation réalisée par l'intégrateur de courant de la Figure 2.8 par le paramètre C (valeur de la capacité) et l'équation suivante :

$$V = (1/C) \cdot \int I$$

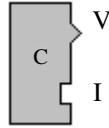


Figure 2.8 – Intégrateur de courant

2.3.1.1.3. *Les impédances :*

Il s'agit d'éléments dissipatifs (résistances) qui imposent une tension proportionnelle au courant qu'ils acceptent. Ainsi, la transformation réalisée par la résistance de la Figure 2.9 peut être caractérisée par le paramètre R (valeur de la résistance) et l'équation suivante :

$$V = R \cdot I$$

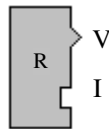


Figure 2.9 – Impédance

2.3.1.1.4. *Les sources de courant :*

Un élément de type "source de courant" impose un courant indépendant de la tension qu'il accepte. Ainsi, on peut caractériser l'élément de la Figure 2.10 par la valeur instantanée "I" du courant imposé par cet élément. Ceci se traduit par l'équation suivante :

$$I_s = I$$

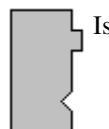


Figure 2.10 – Source de courant

2.3.1.1.5. *Les intégrateurs de tension (inductances) :*

Il s'agit d'éléments de stockage qui imposent un courant proportionnel à l'intégrale de la tension qu'ils acceptent.

Ainsi, on peut caractériser la transformation réalisée par l'intégrateur de tension de la Figure 2.11 par le paramètre L (valeur de l'inductance) et l'équation suivante:

$$I = (1/L) \cdot \int V$$

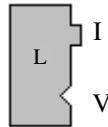


Figure 2.11 – Intégrateur de tension

2.3.1.1.6. *Les admittances :*

Il s'agit d'éléments dissipatifs qui imposent un courant proportionnel à la tension qu'ils acceptent. Ainsi la transformation réalisée par l'admittance de la Figure 2.12 peut être caractérisée par le paramètre R (valeur de la résistance) et l'équation suivante :

$$I = (1/R) \cdot V$$

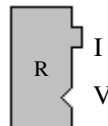


Figure 2.12 - Admittance

2.3.1.2. Les quadripôles :

Les transformations réalisées par ces éléments s'effectuent en conservant la puissance, sauf en cas de présence d'un stockage d'énergie (voir paragraphe 2.3.5).

On distingue les transformations suivantes selon les catégories de quadripôles :

2.3.1.2.1. *Les transformateurs :*

Ils réalisent des transformations tension-tension et courant-courant (voir Figure 2.13). Ces transformations sont caractérisées par les relations suivantes :

$$V_s = K \cdot V_e$$

$$I_e = K \cdot I_s$$

Le paramètre K , qui est le gain de la transformation réalisée par l'élément transformateur considéré, peut être :

- constant : dans ce cas la pièce considérée correspond au transformateur idéal,
- modulé, avec des valeurs valant soit 0 soit 1 : la pièce ainsi définie correspond à une cellule de commutation dont la fonction de connexion prend pour valeur instantanée ce gain modulé ; on retrouve ici la caractéristique du hacheur.

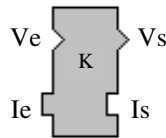


Figure 2.13 – *Transformateur*

2.3.1.2.2. *Les gyrateurs courant-tension :*

Ils se comportent en impédances, en réalisant des transformations courant-tension (voir Figure 2.14) caractérisées par les relations suivantes :

$$V_s = Z \cdot I_e$$

$$V_e = Z \cdot I_s \quad (Z : \text{impédance})$$

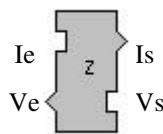


Figure 2.14 – *Gyrateur courant-tension*

2.3.1.2.3. *Les gyrateurs tension-courant :*

Ils se comportent en admittances, en réalisant des transformations tension-courant (voir Figure 2.15) qui se traduisent par les relations suivantes :

$$I_s = G \cdot V_e$$

$$I_e = G \cdot V_s \quad (G : \text{admittance})$$

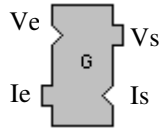


Figure 2.15 - Gyrateur tension-courant

2.3.1.3. Les éléments de connexion :

Les éléments de connexions permettent d'associer des éléments sans transformer les grandeurs physiques qu'ils imposent ou acceptent, et sans dissipation ou stockage.

On distingue :

2.3.1.3.1. Les connexions équi-tension :

Une connexion équi-tension permet de connecter des éléments en leur imposant des tensions égales à la tension acceptée sur son interface "d'entrée" (voir Figure 2.16). Le courant imposé sur cette interface est égal à la somme algébrique des courants acceptés sur les autres interfaces. Ceci se traduit par les relations suivantes :

$$V0 = V1 = V2 = V3$$

$$I0 = \sum I_k \quad k=1..3$$

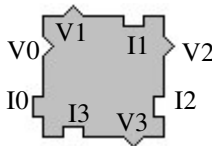


Figure 2.16 – Connexion équi-tension

2.3.1.3.2. Les connexions équi-courant :

Une connexion équi-courant permet de connecter des éléments en leur imposant des courants égaux au courant acceptée sur son interface "d'entrée" (voir Figure 2.17). La tension imposée sur cette interface est égale à la somme algébrique des tensions acceptées sur les autres interfaces. Ceci se traduit par les relations suivantes :

$$I_0 = I_1 = I_2 = I_3$$

$$V_0 = \sum V_k \quad k=1..3$$

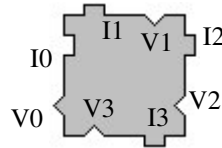


Figure 2.17 – Connexion équi-courant

2.3.2. Réversibilités des grandeurs échangées :

Considérons l'exemple de la Figure 2.18 qui illustre une association source de tension/transformateur bobiné/charge. Cette association est tout à fait acceptable si on se réfère aux principes définis au début du chapitre, mais elle peut poser problème au niveau de l'interface d'échange source de tension/transformateur si la tension délivrée par la source est unidirectionnelle (c'est à dire toujours positive ou toujours négative) ; du fait du phénomène de saturation qui s'en suivra. En effet, la source de tension impose, dans ce cas, une composante continue aux bornes du transformateur, ce qui entraîne le phénomène de saturation évoqué. La structure proposée peut donc être rejetée de façon immédiate.

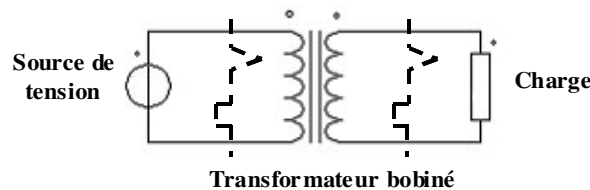


Figure 2.18 - Association source de tension – transformateur

De même, l'association d'un transformateur et d'une charge peut poser problème si cette dernière interdit la réversibilité de la tension comme dans le cas de la Figure 2.19.

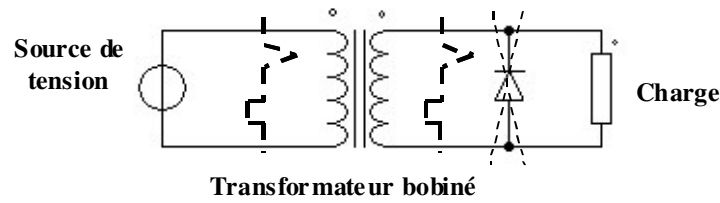


Figure 2.19 - Association transformateur – charge unidirectionnelle en tension

Les réversibilités des grandeurs échangées au niveau des interfaces doivent donc être prises en compte. Une grandeur imposée par un élément au niveau d'une interface peut être : toujours positive, toujours négative ou bidirectionnelle. Le tableau suivant décrit, selon les caractéristiques d'une grandeur qu'un élément ("élément de référence") impose, quelles sont les caractéristiques de la grandeur subie et attendue par les pièces ("élément connectable") qui peuvent être connectées à la première.

Grandeur imposée par l'élément de référence	Grandeur acceptable par un élément connectable
toujours positive	toujours positive ou bidirectionnelle
toujours négative	toujours négative ou bidirectionnelle
bidirectionnelle	bidirectionnelle

Tableau 2.1 - Polarités compatibles

Les règles d'interconnexion relatives aux polarités des éléments présentées dans le tableau précédent peuvent être exprimées de façon graphique.

Nous proposons la représentation de la Figure 2.20, pour le cas d'une interface où le courant acceptée peut être bidirectionnel ; les différentes possibilités pour la polarité de la tension imposée sont envisagées ; l'association de pièces compatibles permet maintenant de garantir une compatibilité au niveau des polarités des grandeurs échangées sur leurs interfaces communes.

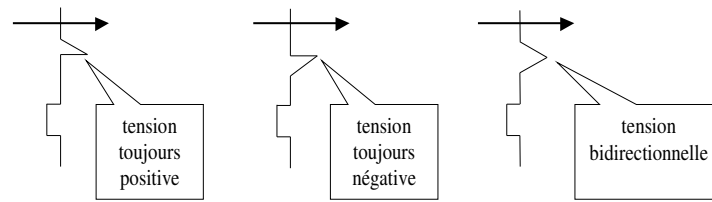


Figure 2.20 - Polarité des grandeurs sur une interface

Les flèches indiquent le sens du transfert d'énergie : l'élément considéré impose, au niveau de son interface, la tension à un autre élément à la droite de cette dernière.

A titre d'exemple de l'utilisation des caractéristiques des interfaces en terme de polarité, la Figure 2.21 décrit la modélisation d'un hacheur (dont la fonction de modulation est $F_m(t)$) réversible en courant et non réversible en tension.

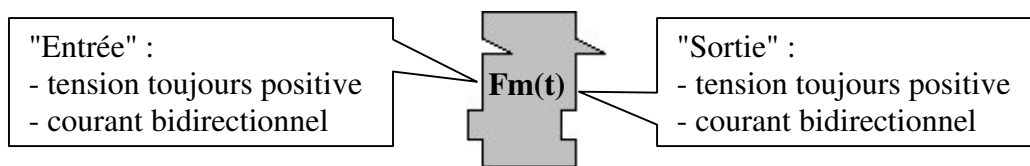


Figure 2.21 - Modélisation d'un hacheur réversible en courant non réversible en tension

On peut exploiter les réversibilités des grandeurs échangées dans un transfert d'énergie pour étudier les réversibilités en puissance apportées dans ce transfert. Ce sujet sera abordé dans le troisième exemple du chapitre 4.

2.3.3. Point de vue fréquentiel :

2.3.3.1. Domaine de validité fréquentiel :

La caractérisation énergétique d'un composant peut varier selon le domaine fréquentiel de fonctionnement. Un composant peut basculer d'un comportement en source de tension à un comportement en source de courant ou vice-versa en fonction de la fréquence.

En effet, une inductance se comporte en hautes fréquences comme une source de courant, et donc impose le courant à un élément voisin ; mais rien n'empêche de lui imposer le courant en basses fréquences.

Cette propriété est exploitée dans l'exemple de la Figure 2.22 qui illustre un hacheur dévolteur non réversible en courant et en tension, régulé en courant.

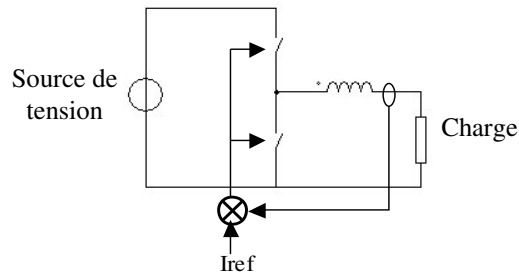


Figure 2.22 - Hacheur dévolteur régulé en courant

Il est possible de caractériser le hacheur comme un élément transformateur modulé par une fonction $F_m(t)$ (elle vaut 0 ou 1 et représente le gain en valeur instantanée de cet élément). Comme la fonction de modulation du hacheur $F_m(t)$ résulte du calcul issu d'une boucle de courant, les caractéristiques résultantes de l'association source de tension/hacheur/inductance sont celles d'une source de courant comme le montre la Figure 2.23.

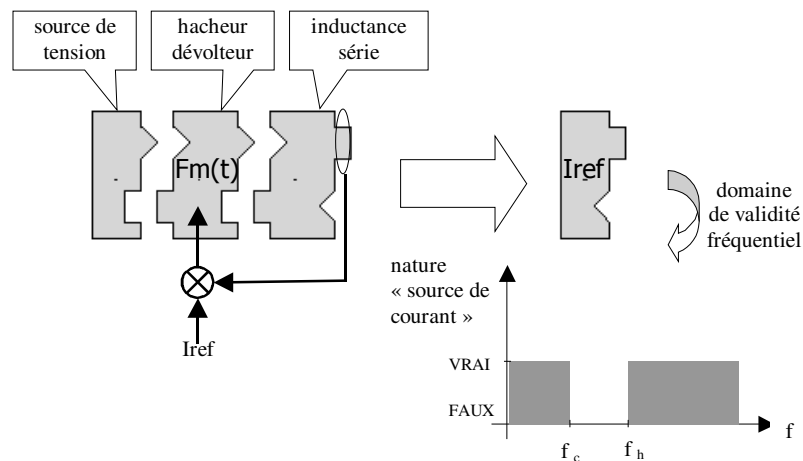


Figure 2.23 - Caractérisation énergétique d'un hacheur régulé en courant

La caractérisation en source de courant du circuit de la figure précédente varie selon les domaines fréquentiels suivants :

- en basses fréquences (limité par la fréquence de coupure du correcteur f_c), la boucle de régulation assure la validité de la caractérisation sous forme d'une source de courant,
- en hautes fréquences (au delà de la fréquence de commutation du hacheur f_h), l'inductance joue son rôle de source de courant instantanée,
- entre ces deux domaines fréquentiels, la caractérisation en terme de source de courant perd a priori sa validité.

REMARQUE. – le choix d'une large bande passante pour la régulation de courant et d'une valeur élevée pour l'inductance permet de garantir le comportement comme source de tension du système global sur tous les domaines de fréquence.

2.3.3.2. Propriétés fréquentielles des grandeurs échangées :

Reprenons l'exemple de la Figure 2.18 (paragraphe 2.3.2) représentant l'association source de tension/transformateur bobiné/charge. Supposons que la source d'alimentation délivre une tension bidirectionnelle mais possédant une composante continue. Dans ces conditions, le problème de saturation au niveau du transformateur est encore présent et peut, de ce point de vue, mettre en cause la cohérence de l'association de la source et du transformateur.

Il est ainsi nécessaire de savoir si une grandeur imposée ou acceptée par un élément donné possède une composante continue pour anticiper ce type de problème. Il est aussi utile de savoir si cette grandeur est alternative, et donc possède une fréquence fondamentale, car elle peut être unidirectionnelle mais aussi alternative avec une composante continue.

De même, la présence d'harmoniques, au niveau d'une grandeur échangée dans un circuit, est aussi une information importante pour juger de l'opportunité de l'insertion dans le circuit d'éléments, comme certains convertisseurs statiques qui peuvent polluer le réseau en injectant des harmoniques de courant.

Les informations concernant la présence d'une composante continue, d'une fréquence fondamentale et/ou d'harmoniques au niveau d'une grandeur échangée, nous renseigne globalement sur le domaine fréquentiel couvert par cette grandeur ; ainsi que sur la compatibilité de ce domaine avec ceux des autres grandeurs échangées.

En effet, une association d'un élément qui impose une fréquence fondamentale à un autre qui n'accepte pas de fréquence fondamentale n'est pas envisageable ; alors qu'une association entre un élément qui n'impose pas de fréquence fondamentale à un autre qui accepte une fréquence fondamentale ne pose pas de problème de ce point de vue. Il en est de même pour le cas de la composante continue et pour les harmoniques.

2.3.4. Propriétés fonctionnelles :

Ce sont des propriétés qualitatives qui traduisent les caractéristiques des transformations énergétiques des grandeurs échangées, effectuées par les éléments d'un circuit.

Un élément dans une chaîne de conversion d'énergie peut remplir l'une des fonctions suivantes : fournir, stocker, dissiper ou transformer l'énergie.

Les trois premières fonctions nous permettent de distinguer parmi les dipôles les catégories suivantes (voir aussi Tableau 2.2, paragraphe 2.3.6) :

- Les sources de courant ou de tension, dont le rôle est de fournir ou de recevoir l'énergie en imposant le courant ou la tension à une charge.
- Les éléments intégrateurs de courant et de tension, comme les capacités et les inductances, dont le rôle est le stockage d'énergie afin de permettre la gestion des échanges de puissance fluctuante.
- Les éléments de type gain qui sont des éléments dissipateurs d'énergie. Ils expriment une relation de proportionnalité entre le courant et la tension et peuvent se comporter en impédance (si on leur impose le courant) ou en admittance (si on leur impose la tension). On peut citer ici l'exemple des résistances.

La dernière fonction, c'est à dire transformer l'énergie sous une autre forme (par exemple la conversion alternatif-continu), est principalement le rôle des quadripôles, qui possèdent deux interfaces d'échange d'énergie. Ils peuvent présenter des propriétés fonctionnelles particulières tels que :

- la réversibilité en courant ou en tension,
- la présence ou non d'un isolement galvanique,
- le caractère élévateur (en tension ou en courant) ou abaisseur d'un élément,
- le filtrage d'un domaine particulier de fréquence, etc.

La gestion de ces propriétés permet de s'assurer (a posteriori ou en cours d'assemblage) de la satisfaction de certaines exigences du cahier des charges et de la validité de la construction en cours.

2.3.5. Caractérisation d'un élément par association d'autres éléments :

La "bibliothèque" d'éléments peut être enrichie par des macro – éléments construits et caractérisés à partir de pièces élémentaires.

La figure suivante présente les schémas équivalents d'une capacité parallèle et d'une inductance série.

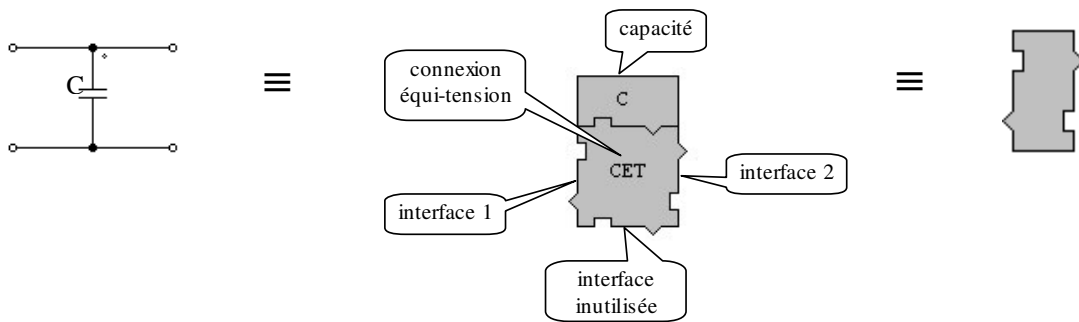


Figure 2.24 - Exemple de macro – élément : capacité parallèle

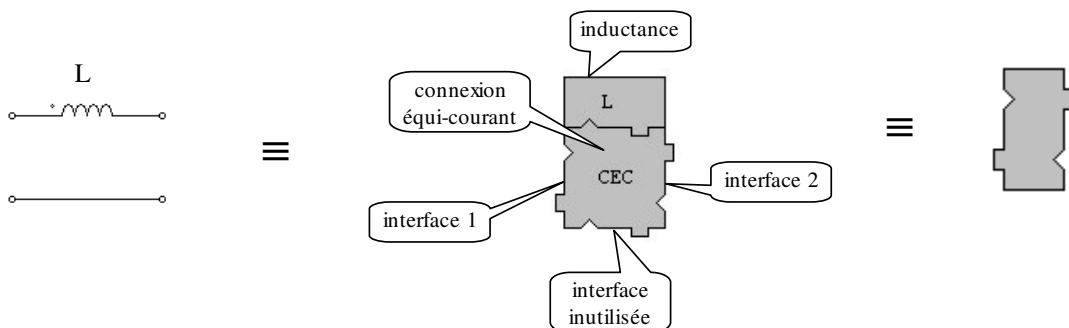


Figure 2.25 - Exemple de macro – élément : inductance série

Sur la Figure 2.24 (capacité parallèle) on peut observer :

- les interfaces "d'entrée" et de "sortie" sont à tension imposée,
- un élément de connexion équi-tension dont la dernière interface reste inutilisée.

On a ainsi construit un élément de type gyrateur courant-tension.

Sur la Figure 2.25 (inductance série) on peut observer :

- les interfaces "d'entrée" et de "sortie" sont à courant imposé,
- un élément de connexion équi-tension dont la dernière interface reste inutilisée.

On obtient ainsi un élément de type gyrateur tension-courant.

On peut aussi utiliser la notion de macro-élément dans le "sens inverse" de la construction pour décrire un élément donnée par association d'un ensemble de sous-éléments, et procéder ainsi à sa modélisation.

Pour illustrer cela, prenons l'exemple d'un onduleur de tension assurant une conversion continu-alternatif entre une source de tension continue E et une charge identifiée comme une source de courant alternatif J (voir Figure 2.26).

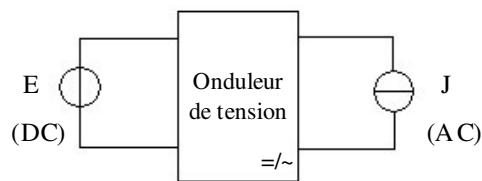


Figure 2.26 - Exemple de macro-élément

Comme le montre la Figure 2.27.a, la source E est caractérisée par un dipôle à tension imposée, la charge J est caractérisée par un dipôle à courant imposé, l'onduleur en question est donc caractérisé par un élément de type "Transformateur" noté Tr .

Pour affiner la caractérisation de l'onduleur, l'élément Tr peut se décomposer successivement en deux bras considérés comme deux éléments "Transformateurs", notés $Br1$ et $Br2$. Chaque bras est alimenté par une connexion équi-tension à partir de la source de tension et interconnecté avec la charge par une connexion équi-courant (voir Figure 2.27.b).

Chaque branche peut, à son tour, être explicitée sous forme d'une cellule de commutation, associant deux interrupteurs en série, chaque interrupteur peut être représenté par un schéma équivalent faisant apparaître ses imperfections, les imperfections du câblage, etc. (voir Figure 2.27.c et Figure 2.28).

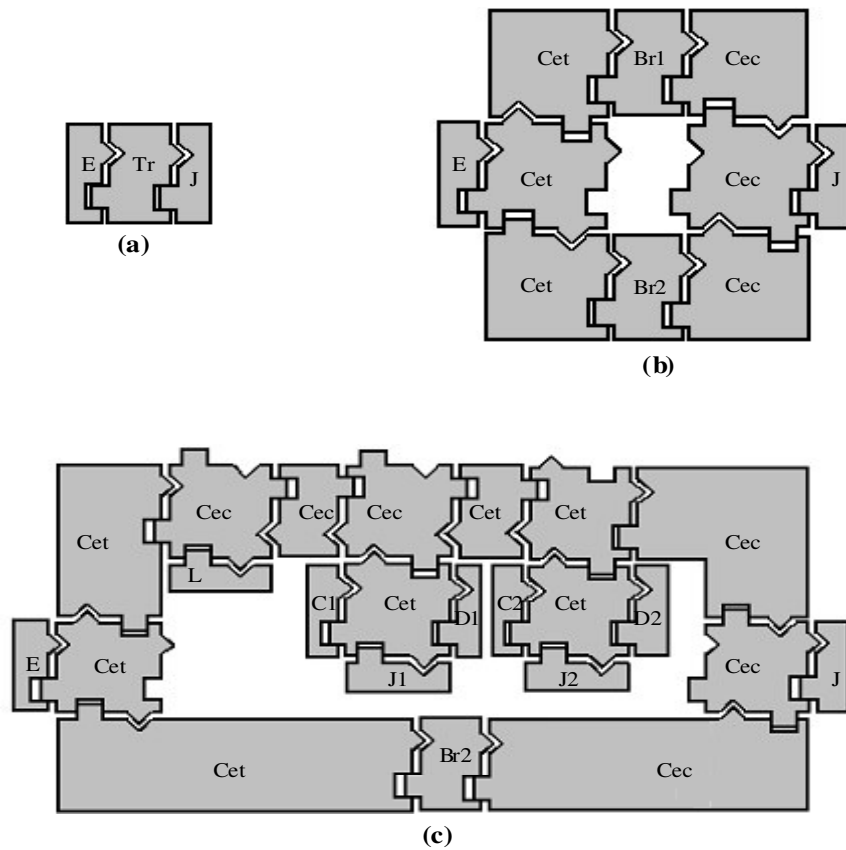


Figure 2.27 – Décomposition d'un élément en sous-éléments (nous avons rajouté des connexions équi-tension et équi-courant pour rendre le schéma plus lisible)

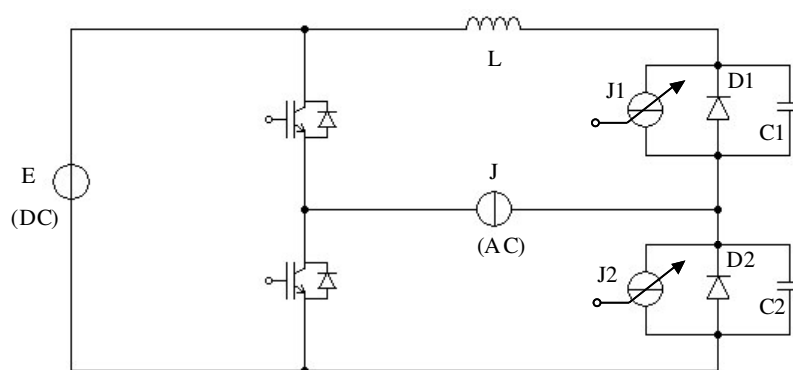


Figure 2.28 - Schéma filaire : seule la cellule de commutation de droite est décomposée en détail

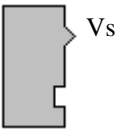
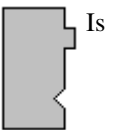
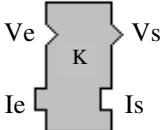
Nous venons de définir ainsi la notion de « zoom » qui permet de représenter un macro-élément, avec différents degrés de grossissements, tout en gardant la cohérence (vue des bornes du macro-élément) avec son environnement.

Le niveau de finesse requis lors de la décomposition d'un macro-élément décrivant une chaîne de conversion dépend évidemment des buts poursuivis, mais il faut d'ores et déjà remarquer que ces niveaux de finesse peuvent être modulés soit globalement si l'on désire avoir des vues plus ou moins fines de l'ensemble de la chaîne, soit localement si l'on souhaite mettre en évidence l'effet de l'ensemble de la chaîne sur un élément particulier de celle-ci (cas du développement de la modélisation du bras "Br1" lors du passage du schéma de la .b à celui de la .c).

2.3.6. Modèle mathématique d'un macro-élément :

La détermination du modèle mathématique d'un élément, ou d'un modèle constitué d'une association d'éléments, est facilitée par l'approche adoptée, car elle prend en compte les relations de cause à effet (relations de causalité). En effet, il s'agit d'exprimer les relations entre les entrées (les causes), qui ne sont autres que les grandeurs acceptées par l'élément et les sorties (les effets) qui sont les grandeurs imposées par celui-ci, tout en tenant compte des paramètres caractéristiques de l'élément (voir paragraphe 2.3.1).

Dans le Tableau 2.2 qui suit, nous rappelons les paramètres des éléments de base décrits au début du chapitre, et leurs équations caractéristiques.

	Source de tension paramètres : Amplitude V $V_s = V$
	Source de courant paramètres : Amplitude I $I_s = I$
	Transformateur paramètres : Gain K $V_s = K.V_e$ $I_e = K.I_s$

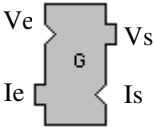
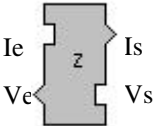
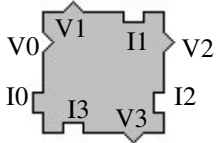
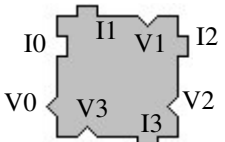
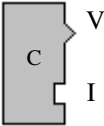
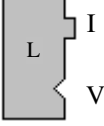
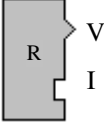

	<p>Gyrateur tension – courant paramètres : Admittance G $I_s = G.V_e$ $I_e = G.V_s$</p>
	<p>Gyrateur courant – tension paramètres : Impédance Z $V_s = Z.I_e$ $V_e = Z.I_s$</p>
	<p>Connexion équi-tension $V_1 = V_2 = V_3 = V_0$ $I_0 = \sum I_k \quad k=1..3$</p>
	<p>Connexion équi-courant $I_1 = I_2 = I_3 = I_0$ $V_0 = \sum V_k \quad k=1..3$</p>
	<p>Capacité : intégrateur de courant paramètres : Capacité C $V = (1/C) \cdot \int I$</p>
	<p>Inductance : intégrateur de tension paramètres : Inductance L $I = (1/L) \cdot \int V$</p>
	<p>Résistance (impédance) paramètres : Résistance R $V = R.I$</p>
	<p>Résistance (admittance) paramètres : Résistance R $I = V/R$</p>

Tableau 2.2 - Equations caractéristiques des pièces

On peut effectuer la mise en équation d'un macro-élément, décrit par assemblage de ces pièces, en utilisant l'ensemble des relations propres à chacun des éléments constitutifs.

Considérons l'exemple de la Figure 2.29 correspondant à la structure d'un convertisseur à résonance série. Sa représentation énergétique est illustrée par la Figure 2.30.

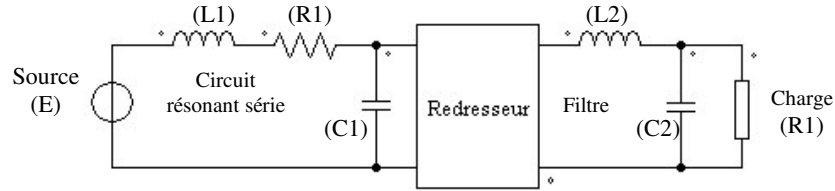


Figure 2.29 - Convertisseur à résonance série

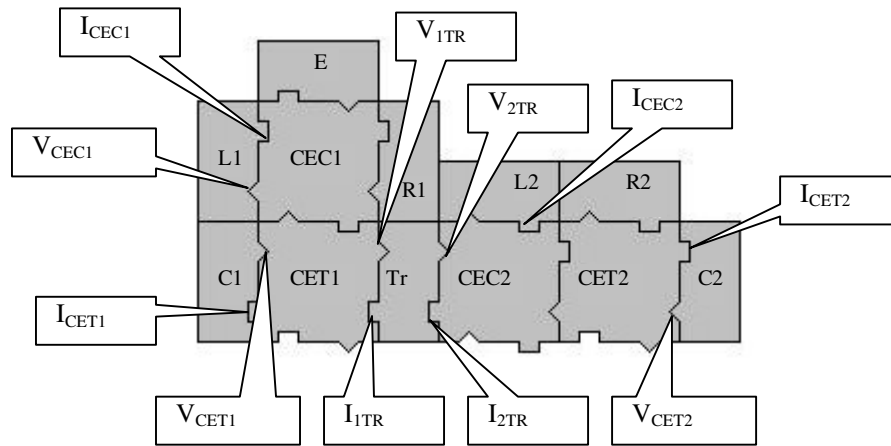


Figure 2.30 – Caractérisation énergétique du convertisseur à résonance

L'écriture des relations propres à chaque élément de connexion (CEC1, CET1, CEC2, CET2) du circuit produit les équations du tableau suivant :

Pour la connexion équi-courant CEC1	$I_{CEC1} = I_{L1}$ $I_E = I_{CEC1}$ $I_{R1} = I_{CEC1}$ $V_{CEC1} = V_{L1} = V_{CET1} + V_{R1} + V_E$
Pour la connexion équi-tension CET1	$V_{CET1} = V_{C1}$ $V_{1TR} = V_{CET1}$ $I_{CET1} = I_{C1} = I_{CEC1} + I_{1TR}$
Pour la connexion équi-courant CEC2	$I_{CEC2} = I_{L2}$ $I_{2TR} = I_{CEC2}$ $V_{CEC2} = V_{L2} = V_{CET1} + V_{2TR}$
Pour la connexion équi-tension CET2	$V_{CET2} = V_{C2}$ $V_{R2} = V_{CET12}$ $I_{CET2} = I_{C2} = I_{CEC2} + I_{R2}$

Tableau 2.3 - Mise en équation du convertisseur à résonance : transferts d'énergie

On exprime ensuite les équations propres à chaque élément (loi d'Ohm et relations de transfert).

L'ensemble de ces équations peut être réduit en éliminant les variables liées aux éléments de connexion (V_{CEC1} , I_{CEC1} , V_{CET1} , I_{CET1} , V_{CEC2} , I_{CEC2} , V_{CET2} , I_{CET2}) et aux éléments résistance (V_{R1} , I_{R1} , V_{R2} , I_{R2}) ; et en utilisant les équations propres des éléments, décrites dans le Tableau 2.4.

Pour l'inductance L1	$V_{L1} = L1.dI_{L1}/dt$
Pour la résistance R1	$V_{R1} = R.I_{R1}$
Pour la capacité C1	$I_{C1} = C1.dV_{C1}/dt$
Pour le redresseur TR	$I_{1TR} = Fm(t).I_{2TR}$ $V_{2TR} = Fm(t).V_{1TR}$
Pour l'inductance L2	$V_{L2} = L2.dI_{L2}/dt$
Pour la résistance R2 (considérée Comme une admittance)	$I_{R2} = V_{R2}/R2$
Pour la capacité C2	$I_{C2} = C1.dV_{C1}/dt$

Tableau 2.4 - Mise en équation du convertisseur à résonance :
équations propres des éléments

Les variables restantes permettent de construire le vecteur d'état du système. Il s'agit, dans notre cas, du vecteur $X = [I_{L1} \quad V_{C1} \quad I_{L2} \quad V_{C2}]^T$.

Les variables d'états apparaissent dans les équations suivantes en causalité intégrale :

$$dI_{L1}/dt = (1/L1) \cdot V_{C1} + (R1/L1) \cdot I_{L1} + (1/L1) \cdot V_E$$

$$dV_{C1}/dt = (1/C1) \cdot I_{L1} + (Fm(t)/C1) \cdot I_{L2}$$

$$dI_{L2}/dt = (1/L2) \cdot V_{C2} + (Fm(t)/L2) \cdot V_{C1}$$

$$dV_{C2}/dt = (1/C2) \cdot I_{L2} + (Fm(t)/(R2.C2)) \cdot V_{C2}$$

REMARQUE. – Les règles de compatibilité énergétique, garanties par l'usage des interfaces des pièces, permettent d'éviter les particularités topologiques difficiles à gérer durant la mise en équations d'un circuit électrique : ainsi il ne pourra apparaître ni maille capacitive ni coupure inductive [Piq89]. Par conséquent, toutes les tensions capacitives et tous les courants inductifs sont variables d'état.

2.3.7. Extension à d'autres domaines de la physique :

Les exemples que nous avons présentés jusqu'ici ne concernent que des éléments considérés sous l'angle de leur propriétés électriques. L'approche que nous proposons peut cependant être généralisée à d'autres domaines de la physique (magnétique, thermique,

mécanique, etc.) si on généralise les échanges tension – courant en échanges effort – flux, comme dans le formalisme Bond Graph.

Ainsi, un élément peut posséder des interfaces appartenant à des domaines physiques différents, ce qui permet de gérer des systèmes multiphysiques comme les systèmes électromécaniques.

En effet, si on prend l'exemple d'une machine à courant continu, sans tenir compte de son inductance interne, on peut la modéliser par l'élément gyrateur électrique – mécanique présenté sur la Figure 2.31.

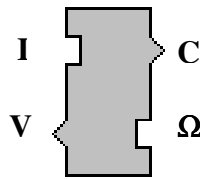


Figure 2.31 - *Modèle multiphysique de la machine à courant continu : l'inductance de l'induit est considérée "à l'extérieur" de ce modèle. C'est elle qui définit le courant I*

Le courant I imposé à l'élément sur son interface électrique produit un couple proportionnel C sur l'interface mécanique ($C = K.I$). Compte tenu de la charge mécanique de la machine, la vitesse de rotation Ω qui en résulte induit l'apparition d'une tension V , correspondant à la force contre électromotrice, proportionnelle à Ω , sur l'interface électrique ($V = K.\Omega$).

Si on tient compte de l'inductance de l'induit, on peut caractériser la machine par l'élément "Transformateur" électrique – mécanique illustré par la Figure 2.32.

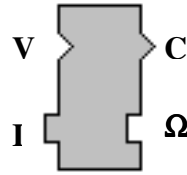


Figure 2.32 - *Modèle multiphysique de la machine à courant continu, en tenant compte de l'inductance de l'induit*

Ainsi, on est amené à préciser le domaine physique de chaque interface d'échange d'énergie qui sera dorénavant, et en choisissant le point de vue le plus général, "à effort" (tension, couple par exemple) imposé ou "à flux" (courant, vitesse par exemple) imposé.

2.4. Eléments de comparaison avec d'autres approches :

2.4.1. Comparaison avec la représentation filaire :

Considérons l'exemple du circuit raisonnant RLC de la Figure 2.33. Dans ce circuit nous nous focalisons sur la représentation filaire et la caractérisation énergétique de l'inductance série L .

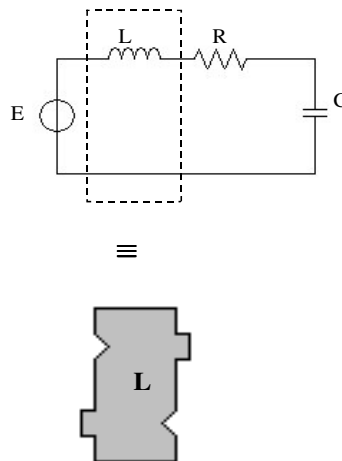


Figure 2.33 - *Différentes représentations d'une inductance série dans un circuit*

Comme on peut le constater sur le schéma, notre approche permet de considérer ce composant comme un bloc ou un système indépendant avec des entrées qui sont ses grandeurs acceptées et des sorties qui sont ses grandeurs imposées, ce qui n'est pas le cas de la représentation filaire qui raisonne plutôt en composant et non en système. Ceci ne leur permet de considérer le comportement d'un élément dans sa globalité.


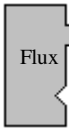

Dans notre exemple, si on adopte une approche filaire, on sera tenté de négliger l'importance du fil de retour dans le comportement énergétique de l'inductance au sein du système global puisqu'on se focalisera seulement sur le composant alors que son fil de retour permet de boucler le flux énergétique qui circule dans le système global.

Ainsi, en considérant les composants comme des "systèmes", notre approche de caractérisation permet de les décomposer en "sous-systèmes". C'est le cas de l'inductance série qui n'est d'autre qu'un macro-élément qui a été construit en assemblant d'autres éléments comme on l'a montré au paragraphe 2.3.5 (voir Figure 2.25).

2.4.2. Comparaison avec le formalisme Bond Graph :

Energétiquement parlant, la caractérisation énergétique et le formalisme Bond Graph, représente de manière équivalente les différents composants.

On a ainsi établi l'équivalence entre les pièces de bases de la caractérisation énergétique et le formalisme Bond Graph selon le Tableau 2.5.

Pièce de base	Elément Bond Graph équivalent
Source de tension (source d'effort) : 	$Se \longrightarrow 0$
Source de courant (source de flux) : 	$Sf \longrightarrow 1$
Inductance (intégrateur d'effort) : 	I

Capacité (intégrateur de flux) :		C
Résistance (gain à effort imposé) :		R
Admittance (gain à flux imposé) :		R
Transformateur :		TF
Gyrateur tension-couant (gyrateur effort-flux) :		GY
Gyrateur couant-tension (gyrateur flux-effort) :		GY
Connexion équi-tension (connexion équi-effort) :		0
Connexion équi-courant (connexion équi-flux) :		1

Tableau 2.5 - *Tableau d'équivalence de la caractérisation énergétique et du formalisme Bond Graph*

Cependant, notre approche de caractérisation nous semble plus adaptée à la conception que le formalisme Bond Graph, grâce à sa représentation graphique simple et pratique qui permet de distinguer les éléments en tant que systèmes à part entière (ce qui n'est pas évident avec le Bond Graph), et grâce au fait qu'elle prend en compte plusieurs points de vue (polarités, propriétés fréquentielles, etc.).

L'avantage du Bond Graph reste lié à l'aspect quantitatif puisque chaque élément d'un schéma Bond Graph possède une valeur numérique, ce qui peut être utile dans le dimensionnement du système représenté par le schéma en question.

On peut donc envisager de coupler notre approche de caractérisation énergétique avec le formalisme Bond Graph pour analyser les solutions issues de cette approche avec les outils d'analyse du formalisme Bond Graph.

2.5. Exploitation de l'approche de caractérisation en vue de la conception :

2.5.1. Règles d'association d'éléments :

L'approche qu'on vient d'exposer permet d'éviter, pendant la construction d'une chaîne de conversion d'énergie, l'assemblage d'éléments énergétiquement incompatibles. En effet, on ne peut lier un élément qui impose la tension qu'avec un élément qui accepte la tension et on ne peut lier un élément qui impose le courant qu'avec un élément qui accepte le courant (voir Figure 2.34), ce qui permet de respecter une des règles de base de l'électronique de puissance.

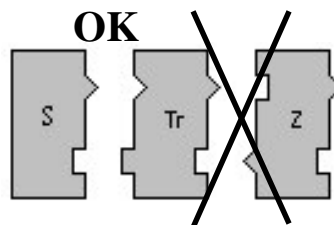


Figure 2.34 - Associations entre les éléments

En plus de l'aspect énergétique, il faut s'assurer de la compatibilité des polarités et des propriétés fréquentielles des différentes grandeurs échangées par les éléments de la chaîne de conversion d'énergie à concevoir (voir paragraphes 2.3.2 et 2.3.3.2).

2.5.2. Caractérisation d'un élément à partir de ses voisins :

Supposons que nous ayons entamé la synthèse d'un circuit et qu'on doive associer un élément indéterminé à un ou plusieurs éléments caractérisés déjà introduits dans la structure.

Nous pouvons effectuer cette opération en exploitant les règles d'association d'éléments rappelés au paragraphe 2.5.1.

2.5.2.1. Recherche d'un élément compatible avec un autre élément :

Pour déterminer un élément "Ec" compatible avec un autre élément de référence "Er", c'est à dire un élément qui peut s'associer à "Er" à travers son interface d'échange d'énergie libre "Ir" (voir Figure 2.35) ; il faut d'abord sélectionner parmi les éléments candidats à cette association ceux qui possèdent au moins une interface d'échange d'énergie compatible avec "Ir", en tenant compte du point de vue énergétique ainsi que des polarités et des propriétés fréquentielles. Après cette phase de sélection, il suffit d'identifier l'élément recherché à l'un des éléments sélectionnés.

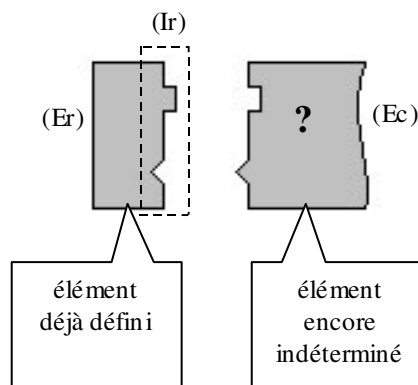


Figure 2.35 – Recherche d'éléments compatibles avec un autre élément

Considérons l'exemple de la Figure 2.36.a. Dans cet exemple, il faut déterminer un élément "Elem" susceptible de s'associer à l'élément "E" représentant une source de tension alternative.

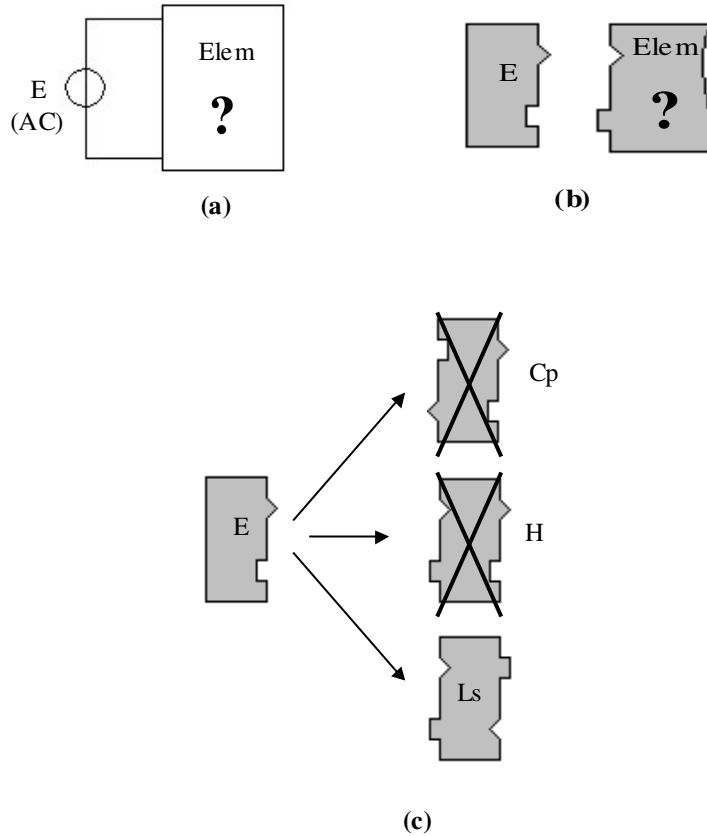


Figure 2.36 - Recherche d'éléments compatibles avec un autre élément : exemple

Les éléments candidats doivent posséder une interface d'échange d'énergie à courant imposé, compatible avec l'interface libre de l'élément "E" (Figure 2.36.b).

Ainsi, on peut écarter l'élément "Cp" représentant une capacité parallèle car il impose la tension. Parmi les éléments restants, on peut écarter l'élément "H" représentant un hacheur buck puisque cet élément accepte à son "entrée" une interface à tension imposée continue. On peut donc identifier l'élément "Elem" à l'inductance série "Ls" (Figure 2.36.c).

2.5.2.2. Recherche d'un élément compatible avec deux autres éléments :

On peut déterminer, de manière analogue à celle présentée au paragraphe précédent, un élément susceptible de s'associer à deux éléments d'une chaîne de conversion d'énergie (voir Figure 2.37).

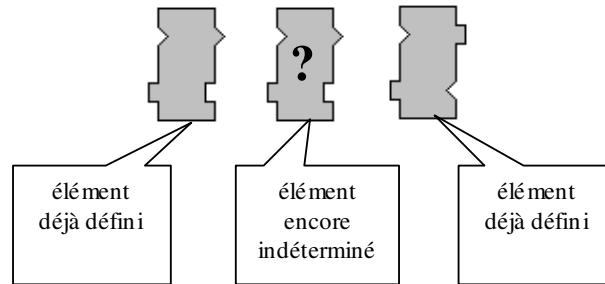


Figure 2.37 - Recherche d'éléments compatibles avec deux autres éléments

Tout d'abord le profil graphique des pièces connues nous permet de déterminer le profil des interfaces d'échange d'énergie et donc la caractérisation énergétique des éléments candidats. Ensuite, les polarités et les propriétés fréquentielles des interfaces libres de la structure permettent de déterminer les polarités et les propriétés fréquentielles des interfaces de ces éléments, puisqu'elles doivent être compatibles avec les propriétés des interfaces libres. Ceci permet de compléter la caractérisation et l'identification de l'élément manquant.

Considérons l'exemple du circuit de Figure 2.38.a illustrant l'association d'une source de tension alternative E avec une inductance série L , un élément inconnu $Elem$, une capacité parallèle C et d'une charge inductive J imposant un courant continu. Les interfaces libres de L et C sont respectivement à courant imposé et à tension imposée. L'élément qui doit s'insérer entre L et C doit donc posséder une interface à tension imposée et une autre à courant imposée. L'élément est donc de type "Transformateur".

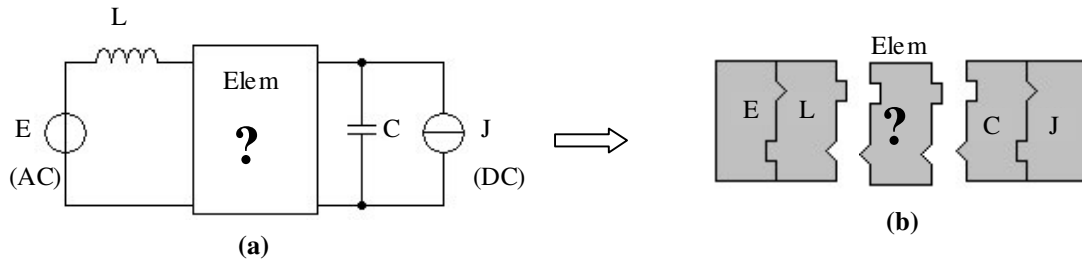


Figure 2.38 - Recherche d'éléments compatibles avec deux autres éléments : exemple

Maintenant il faut déterminer les polarités et les propriétés fréquentielles de l'élément *Elem*.

L'élément *L* impose un courant possédant une fréquence fondamentale, donc alternatif, alors que l'élément *C* impose une tension ne possédant pas de fréquence fondamentale, donc continue. L'élément *Elem* doit donc avoir une interface d'entrée à courant accepté alternatif et une interface de sortie à tension acceptée continue (Figure 2.38.b). Un redresseur MLI peut être la solution de ce problème.

2.5.2.3. Généralisation :

On peut généraliser les procédures présentées dans les paragraphes 2.5.2.1 et 2.5.2.2 pour déterminer un élément susceptible de s'associer avec n éléments ($n > 2$).

Dans ce cas, les propriétés des interfaces libres des n éléments déterminés peuvent constituer les critères d'une requête destinée à une bibliothèque d'éléments. On peut alors identifier l'élément indéterminé à l'un des résultats de cette requête.

2.5.3. Méthodes de construction en vue de la conception :

Dans cette section nous utilisons les différentes notions dégagées aux paragraphes 2.5.1 et 2.5.2 pour développer des méthodes de constructions en vue de la conception de chaîne de conversion d'énergie, permettant le transfert de puissance entre une source et une charge, en respectant des exigences formulées de manière spécifique dans un cahier des charges.

Ce dernier peut être décrit par :

- les propriétés d'un élément dipôle représentant la source d'énergie disponible,
- celles d'un autre dipôle représentant la charge,

- les propriétés des éléments de la chaîne qui doit assurer le transfert et la conversion d'énergie entre la source et la charge :
 - la présence d'un isolement galvanique (en tenant compte ou non de l'encombrement du dispositif),
 - la tenue d'un courant de court circuit,
 - l'élévation, l'abaissement ou le maintien du niveau de la tension entre la source et la charge.
 - la réversibilité en puissance du dispositif.

Dans ce cadre, nous avons dégagé deux modes de raisonnement en vue de la conception, basés sur deux méthodes de construction de chaînes de conversion énergétique en partant des propriétés d'un cahier des charges.

Ces modes de raisonnements prennent en compte les différents points de vue décrits dans le chapitre précédent, ce qui permet d'assurer la cohérence des dispositifs construits.

Dans les paragraphes suivants, nous présentons les deux modes de raisonnement évoqués en se basant sur des exemples.

2.5.3.1. Construction par recherches successives :

2.5.3.1.1. Principe :

Considérons le schéma de principe décrit par la Figure 2.39. Il s'agit de construire une chaîne de conversion permettant le transfert d'énergie entre le dipôle source "S", et le dipôle charge "Ch".

Le point de départ du raisonnement réside dans les propriétés des interfaces d'échange d'énergie de la source et de la charge.

Comme on l'a exposé dans le paragraphe 2.5.2, on peut déterminer à partir de ces propriétés les éléments quadripôles susceptibles de s'associer à la source ou à la charge ou aux deux ensemble.

Si on trouve un quadripôle susceptible de s'insérer entre la source et la charge, le problème de conception est résolu. Sinon, si on trouve un quadripôle tel que l'élément de type Transformateur "Q1", qu'on peut associer à la source seulement par exemple, on obtient à partir de cette association un macro-élément dipôle dont l'interface d'échange "Int" n'est

autre que l'interface restée libre du quadripôle "Q1". Ceci revient à adopter un nouveau cahier des charges décrit par :

- les propriétés d'une nouvelle source représentée par le macro-élément de type dipôle résultant de l'association "S+Q1". Ce dipôle est caractérisé par les propriétés de l'interface d'échange d'énergie "Int",
- les propriétés de la charge décrites par les spécifications de départ,
- les exigences fonctionnelles décrites aussi par les spécifications de départ.

On peut exploiter cette idée pour élaborer une mode de raisonnement qui consiste à réduire progressivement le cahier des charges en associant, sur différentes étapes, à la source ou à la charge ou aux deux, des quadripôles réalisant une ou plusieurs fonctions exigées jusqu'à la satisfaction de toutes le spécifications.

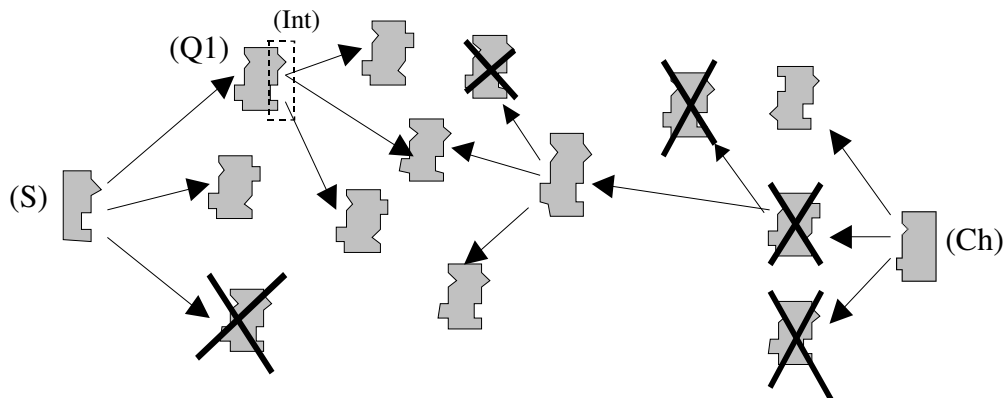


Figure 2.39 - Schéma de principe de la construction par recherches successives

Ainsi, comme le montre la Figure 2.39, on part des interfaces respectives de la source et de la charge, et on essaie de chercher les éléments candidats pouvant s'insérer entre elles. Si de tels éléments existent, le problème de conception posé est résolu. Sinon, on "change" les propriétés de la source en lui associant un élément compatible avec son interface d'échange d'énergie et on applique l'opération de recherche précédente au nouveau cahier des charges. Ces recherches peuvent s'effectuer en partant de la source ou de la charge, pour construire progressivement deux structures qui, lorsqu'elles se "rejoignent", fusionnent en une solution répondant aux spécifications exigée. En effet, à la fin du raisonnement, il restera forcément un seul élément à déterminer qui, tel une clé de voûte, devra s'insérer entre les deux interfaces vacantes des deux structures évoquées.

Seuls les quadripôles qui sont compatibles avec ces interfaces permettront d'achever la synthèse d'une des solutions recherchées.

L'ensemble des opérations que nous venons de décrire peuvent s'effectuer de manière récursive, selon l'algorithme de la Figure 2.40, à l'aide de règles de savoir-faire, afin de guider le raisonnement.

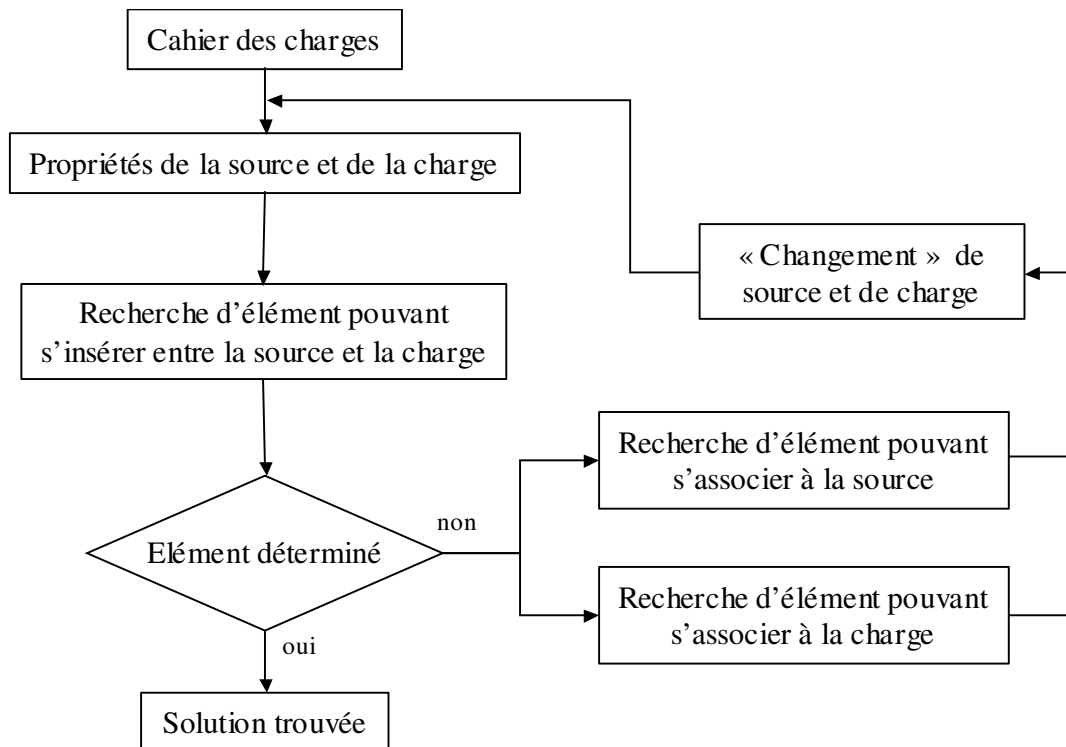


Figure 2.40 - *Algorithme de la construction par recherches successives*

2.5.3.1.2. *Exemple :*

Considérons le cahier des charges suivant :

- Source : réseau d'alimentation DC inductif, caractérisé par un dipôle à courant imposé.
- Charge inductive, caractérisée par un dipôle à courant imposé.
- Fonctions exigées : tenu d'un courant de court circuit, isolement galvanique et fournir une tension alternative à la charge.

Appliquons la méthode de construction que nous venons d'exposer au problème posé (voir Figure 2.41).

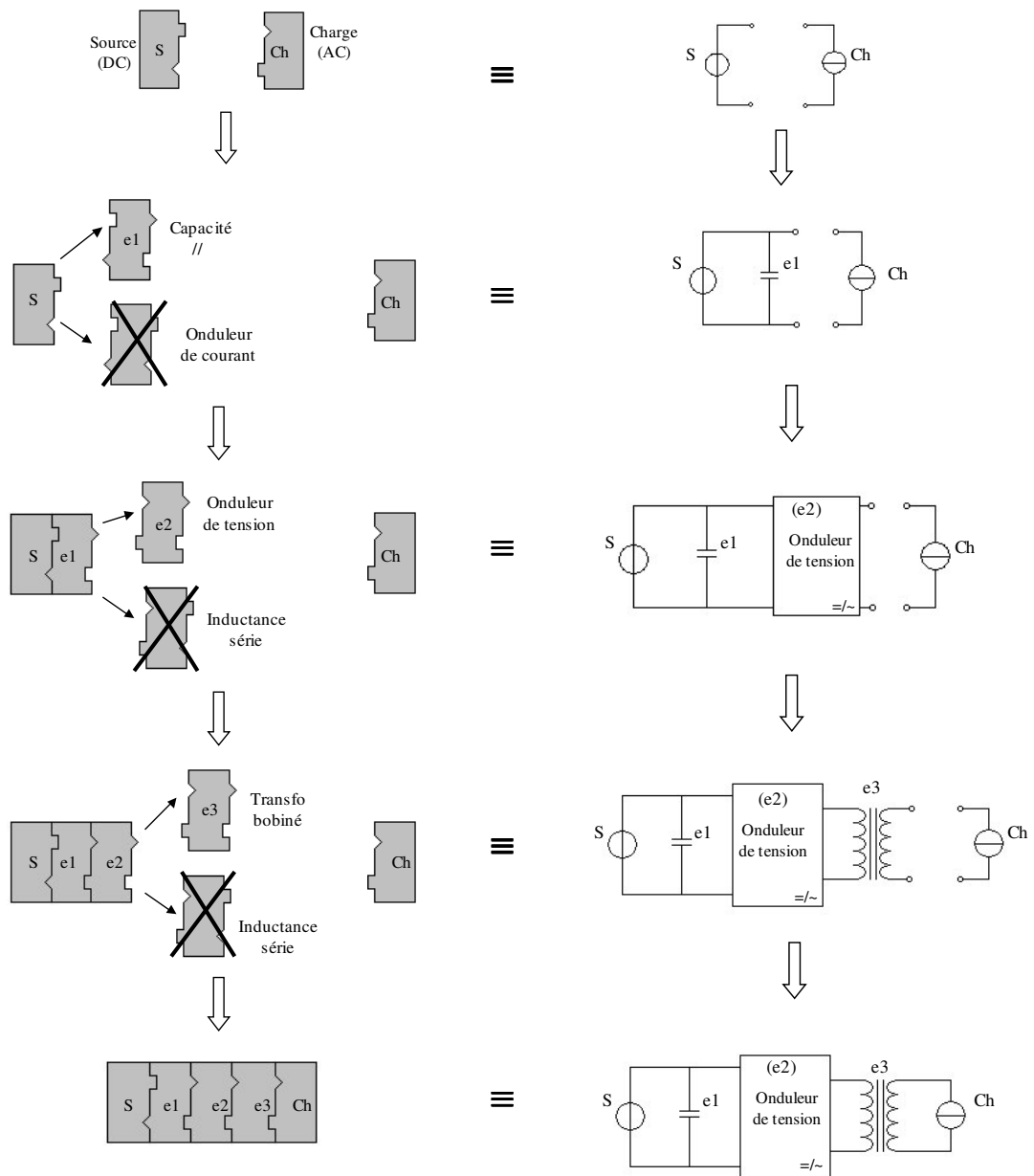


Figure 2.41 - Exemple de conception par recherches successives

Si on considère le point de vue énergétique, on peut associer à la source (élément "S") un élément qui impose la tension comme un onduleur de courant, une capacité parallèle, etc. Choisissons par exemple la capacité parallèle (élément "e1"). Ceci est équivalent à "remplacer" la source de courant continue par une source de tension également continue.

Maintenant, on reprend les recherches en partant des propriétés de la "nouvelle source" caractérisée par l'interface libre de "e1". Cette dernière peut être associée entre autres à un

onduleur de tension ou à une inductance série, etc. Nous pouvons choisir d'intégrer au dispositif en construction l'onduleur de tension "e2" qui est un élément dévolteur et qui permet de satisfaire l'exigence de la tenue d'un courant de court circuit.

De la même façon, on peut associer "e2" à un transformateur bobiné, ce qui permet de compléter la chaîne de conversion recherchée et d'assurer la fonction d'isolement galvanique requise par le cahier des charges décrit au début du paragraphe.

2.5.3.2. Construction par décomposition :

2.5.3.2.1. Principe :

Comme on l'a indiqué précédemment, le cahier des charges de la conception d'une chaîne de conversion d'énergie peut être caractérisé par deux éléments de type « dipôle » représentant la source d'alimentation et la charge à alimenter, ainsi que les propriétés fonctionnelles (réversibilité en puissance, isolement galvanique, tenue d'un courant de court-circuit, etc.) qui doivent être satisfaites par les solutions.

Pour synthétiser une solution, il suffit de déterminer un élément ou un macro-élément de type « quadripôle » pouvant s'associer à la source et à la charge tout en remplissant les fonctionnalités requises comme le montre l'exemple de la Figure 2.42.

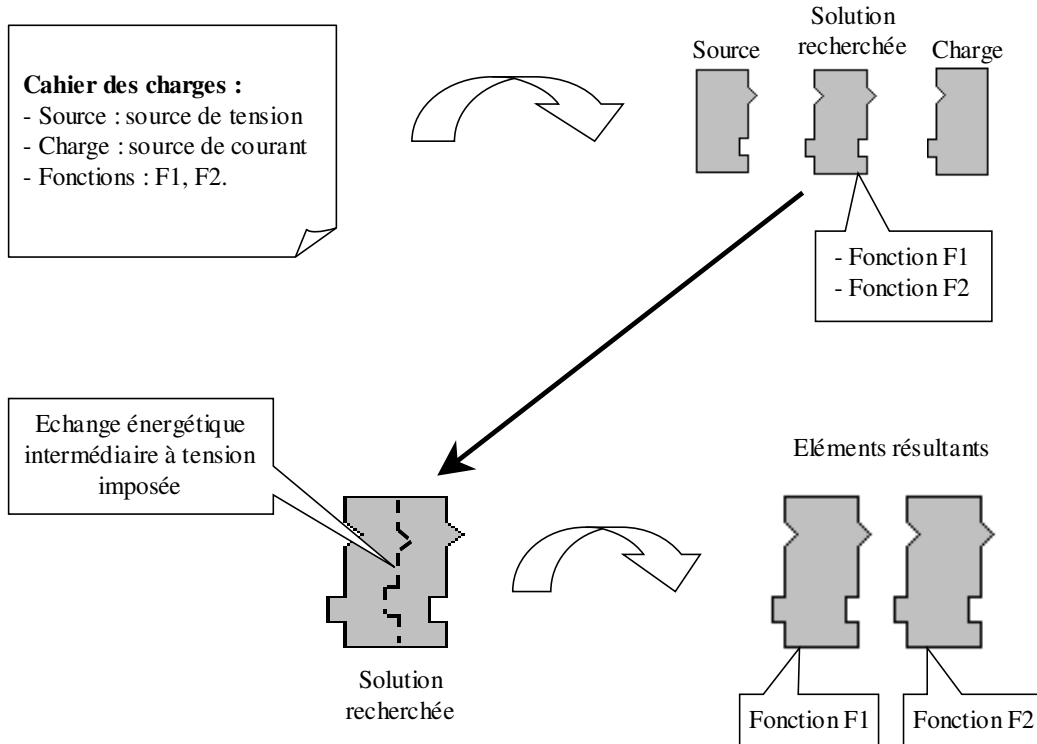


Figure 2.42 - Schéma de principe de la construction par décomposition

La solution au cahier des charges décrit dans cette figure doit être un élément transformateur puisque :

- elle doit accepter la tension imposée par la source sur son interface "d'entrée",
- elle doit accepter le courant imposé par la charge sur son interface de "sortie".

De plus cet élément doit réaliser les fonctions F1 et F2.

Généralement, le quadripôle qui va assurer le transfert d'énergie entre les deux dipôles source et charge est un macro-élément, qu'on peut décrire par une association de blocs élémentaires, car il est souvent difficile, voire impossible, de réaliser les différentes fonctions par l'intermédiaire d'un seul élément. En effet, le cahier de charges peut demander deux fonctions qui s'excluent l'une l'autre et qui donc ne peuvent pas être portées par un seul élément. La structure recherchée doit alors contenir au moins deux éléments.

Par exemple, une chaîne qui doit assurer à la fois une élévation et un abaissement de la tension est forcément un assemblage d'au moins deux éléments, puisqu'un bloc élémentaire ne peut pas être à la fois abaisseur et élévateur de la tension.

Ainsi, pour définir un macro-élément répondant aux spécifications, il faut déterminer les éléments qui le constituent.

Pour atteindre cet objectif, nous proposons de décomposer chaque solution recherchée d'un cahier des charges en éléments complètement caractérisés, dont les propriétés peuvent être extraites d'une base de données, selon le procédé exposé au paragraphe 2.5.2.

La décomposition peut s'effectuer par l'introduction d'un échange énergétique intermédiaire (voir Figure 2.42), et donc d'une interface, entre les interfaces qui caractérisent le quadripôle, ce qui engendre l'apparition de deux éléments sur lesquels on répartit les fonctions que doit assurer l'élément décomposé.

Cette approche permet de fractionner un problème complexe, caractérisé par un quadripôle qui doit remplir toutes les spécifications, en sous problèmes plus simples, caractérisés chacun par un quadripôle élémentaire qui doit réaliser une partie des exigences.

On peut appliquer cette opération de manière récursive, selon l'algorithme décrit par la Figure 2.43, en prenant soin de répartir de manière judicieuse les fonctionnalités exigées sur les éléments issues des décompositions, et en tenant compte des règles de savoir-faire, jusqu'à ce que ces derniers soient des éléments connus et caractérisés. Ainsi, à la fin du raisonnement, on obtient une solution sous forme de macro-élément de type quadripôle qui est l'association de blocs élémentaires complètement caractérisés.

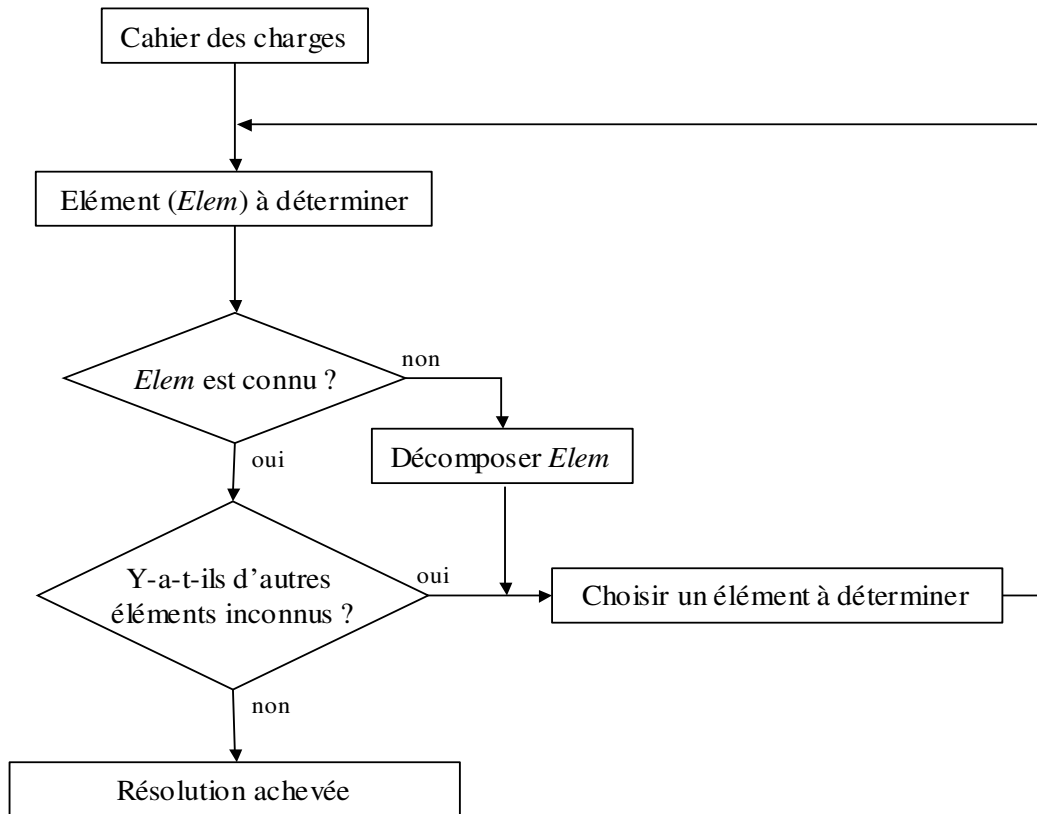


Figure 2.43 - Conception par décompositions successives

2.5.3.2.2. Exemple :

Reprenons l'exemple traité dans le paragraphe 2.5.3.1.2, qui décrit le cahier des charges suivant :

- Source : réseau d'alimentation DC inductif, caractérisé par un dipôle à courant imposé.
- Charge inductive, caractérisée par un dipôle à courant imposé.

Fonctions exigées : tenue d'un courant de court circuit, isolement galvanique et fournir une tension alternative à la charge.

Appliquons la méthode de construction par décompositions successives exposée, au problème posé par ce cahier des charges (voir Figure 2.44 et Figure 2.45).

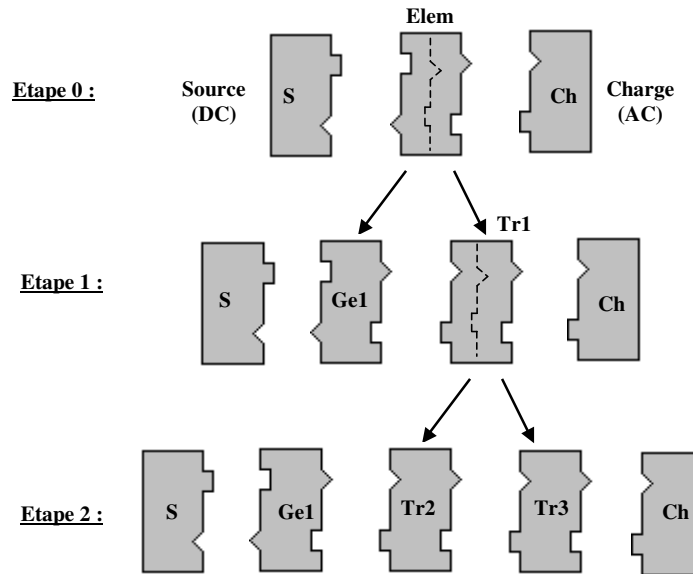


Figure 2.44 - Exemple de conception par décompositions successives

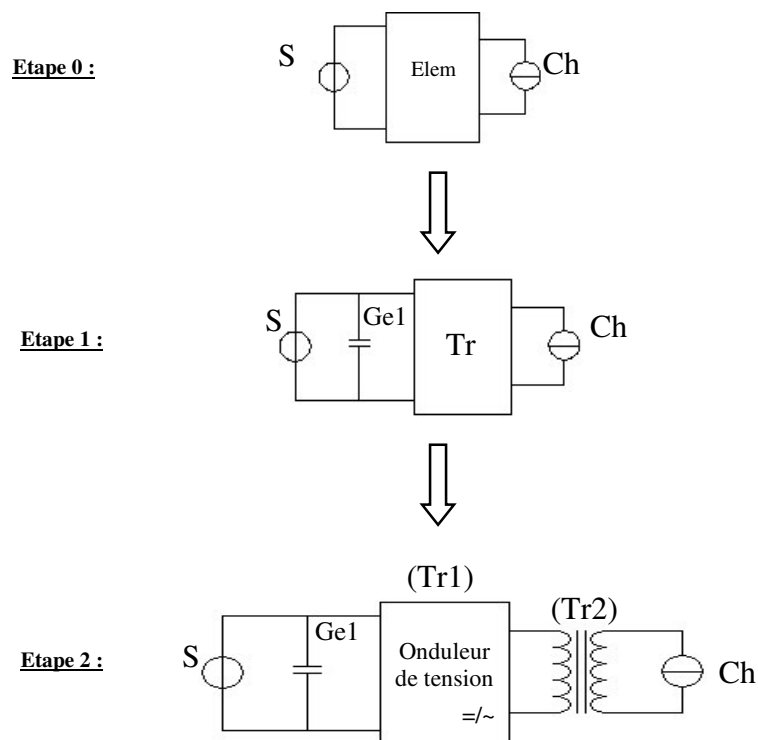


Figure 2.45 - Evolution du schéma filaire de l'exemple

La structure recherchée est le macro-élément de type "gyrateur courant-tension" désigné par *Elem* sur Figure 2.44 et Figure 2.45 (étape 0). Ce dernier doit assurer, outre

l'isolement galvanique et la tenue d'un courant de court-circuit (fonctions exigées dans le cahier des charges), une conversion continu-alternatif puisque la source S est continue et la charge Ch est alternative. La structure doit alors contenir, entre autres, un élément onduleur.

Si on décompose $Elem$ en introduisant un échange d'énergie intermédiaire à tension imposée continue (étape 1), on obtiendra deux quadripôles : l'un de type "gyrateur courant-tension" (désigné par $Ge1$) et un autre de type "Transformateur" (l'élément $Tr1$).

L'élément $Ge1$ peut être identifié comme une capacité parallèle.

Ensuite, si on "éclate" l'élément ($Tr1$) par l'intermédiaire d'une interface à tension imposée alternative (étape 2), on obtiendra deux éléments de type "Transformateur" désignés par $Tr2$ et $Tr3$. On peut par exemple affecter les propriétés fonctionnelles "onduleur" et "dévolteur" à l'élément $Tr2$ pour l'identifier comme un onduleur de tension ; et la propriété fonctionnelle "isolement galvanique" à l'élément $Tr3$ pour le considérer comme un transformateur bobiné.

2.5.3.3. Comparaison des deux méthodes :

Nous avons exposé deux modes de raisonnement en vue de la conception qui décrivent deux algorithmes de conception que nous pouvons mettre en œuvre au sein d'outils informatiques.

Nous avons plutôt préféré exploiter la méthode de construction "par décompositions" que celle "par recherches successives", et ceci pour plusieurs raisons.

D'abord, la méthode de conception par recherches est assez aléatoire puisqu'elle consiste à faire évoluer deux structures en partant de la source et de la charge en espérant qu'à la fin du raisonnement, ces deux structures puissent s'associer pour composer une solution (on procède par chaînage avant). Ainsi le nombre de recherches peut se multiplier au risque d'avoir un processus qui dure longtemps sans savoir s'il va vraiment déboucher sur une solution.

Ceci n'est pas le cas de la méthode de conception par décompositions, puisque à chaque étape l'utilisateur choisit les critères de recherche en choisissant les propriétés des interfaces intermédiaires introduites pendant les décompositions. Ceci peut permettre de restreindre l'espace des recherches si le choix des propriétés des interfaces intermédiaires et les fonctions remplies par les éléments résultants des décompositions sont effectués de manière judicieuse. De plus, cette méthode permet à l'utilisateur de ne pas perdre au cours

du raisonnement la finalité recherchée (on procède par chaînage arrière), puisque à chaque étape on garde une vue globale sur les caractéristiques du circuit recherché et de son cahier des charges (notamment la source et la charge).

2.6. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre un mode de caractérisation des éléments qui interviennent dans la construction de systèmes de conversion en Génie Electrique. Cette caractérisation s'appuie sur plusieurs points de vue qualitatifs qui doivent être pris en compte que ce soit au niveau de l'analyse, qu'au niveau de la conception des systèmes.

En effet, l'approche adoptée paraît plus adaptée à la conception de chaînes de conversion électriques que la représentation filaire classique des circuits et le formalisme Bond Graph. Elle permet en effet une vision systémique des circuits puisque pour les décrire, on associe des éléments qui sont des blocs indépendants où on trouve, à travers les interfaces d'échange d'énergie, les notions "d'entrées" et de "sorties".

Le formalisme graphique proposé dans notre approche permet de représenter les propriétés des éléments de manière simple et visible en s'appuyant sur les propriétés des échanges au niveau des interfaces entre éléments assemblés. Il permet aussi d'assurer la cohérence d'un système en cours de conception puisqu'il interdit l'assemblage de pièces dont les profils des interfaces sont incompatibles.

Ce formalisme nous a permis de dégager un certain nombre de fonctionnalités que nous avons exploitées pour élaborer deux modes de raisonnement en vue de la conception en se basent sur deux méthodes de construction des chaînes de conversion énergétique. Ce sont les méthodes de construction "par recherches successives" et "par décomposition". Nous avons ensuite comparé ces deux méthodes, ce qui nous a emmené à préférer la deuxième méthode car elle est moins aléatoire que la première et permet de garder en vue, tout au long du raisonnement, l'objectif recherché.

Nous allons maintenant montrer comment nous avons exploité les différentes notions dégagées dans ce chapitre, et notamment la méthode de conception "par décomposition", pour développer différents outils informatiques dédiés à la conception.

Chapitre 3 – Outils de conception

Chapitre 3 – Outils de conception

3.1. Introduction :

Après avoir élaboré un algorithme de conception (la méthode de construction par décomposition) qui exploite les fonctionnalités issues de notre approche de caractérisation énergétique, notre objectif est maintenant de mettre en oeuvre cet algorithme pour construire une application informatique faisant collaborer différents outils, qui vont assister et aider le concepteur en génie électrique tout en le laissant jouer le rôle principal. En effet, l'expertise humaine reste toujours plus efficace que la décision d'une machine ou d'un programme, si performants soient ils, surtout dans les problématiques de conception où la connaissance est plutôt empirique.

Il faut maintenant déterminer ces outils et les organiser de manière raisonnée. Pour ce faire, nous spécifions d'abord les fonctionnalités pratiques qui peuvent être apportées au concepteur et nous déterminons les outils informatiques susceptibles de les réaliser. Ensuite, nous décrivons les outils développés et leurs modes d'utilisation.

Ces deux parties sont susceptibles d'intéresser plus le concepteur en Génie Electrique. Dans une dernière partie plutôt destinée aux développeurs, nous abordons la mise en oeuvre informatique des outils décrits.

3.2. Description a priori d'une session de conception :

Durant une session de conception, tel que nous l'imaginons, un concepteur doit pouvoir construire une structure de conversion d'énergie en se basant sur l'approche de caractérisation que nous avons adoptée. Pour ce faire, l'utilisateur doit pouvoir manipuler graphiquement les éléments de base décrits dans le chapitre 2 pour les assembler en une construction représentant la structure recherchée.

Cette dernière doit assurer le transfert d'énergie entre une source et une charge, en réalisant un certain nombre de transformations. L'utilisateur doit avoir le moyen de décrire ces caractéristiques, qui constituent le cahier des charges de la conception, pour en tenir

compte ensuite durant la construction. Les éléments assemblés doivent être identifiés à des éléments connus, stockés dans une bibliothèque d'éléments.

L'utilisateur doit disposer de différentes aides pour tenir compte des différents points de vues introduits dans le chapitre 2, et respecter les règles d'association d'éléments et les règles de savoir-faire.

De plus, le concepteur doit pouvoir "naviguer" entre les différentes étapes de sa construction pour en rectifier la structure ou orienter la résolution du problème vers d'autres directions, pour aboutir éventuellement à plusieurs solutions.

Enfin, l'utilisateur doit pouvoir sauvegarder le résultat de son travail, ce qui permettra entre autres de capitaliser le savoir-faire accumulé durant la session.

3.3. Identification des fonctionnalités nécessaires au concepteur :

Sur la base de la description du paragraphe précédent, nous pensons que le concepteur aura besoin des différentes fonctionnalités présentées dans l'organigramme suivant ; nous examinons tour à tour chacune d'entre elles, et décrivons les échanges qui sont introduits dans la Figure 3.1.

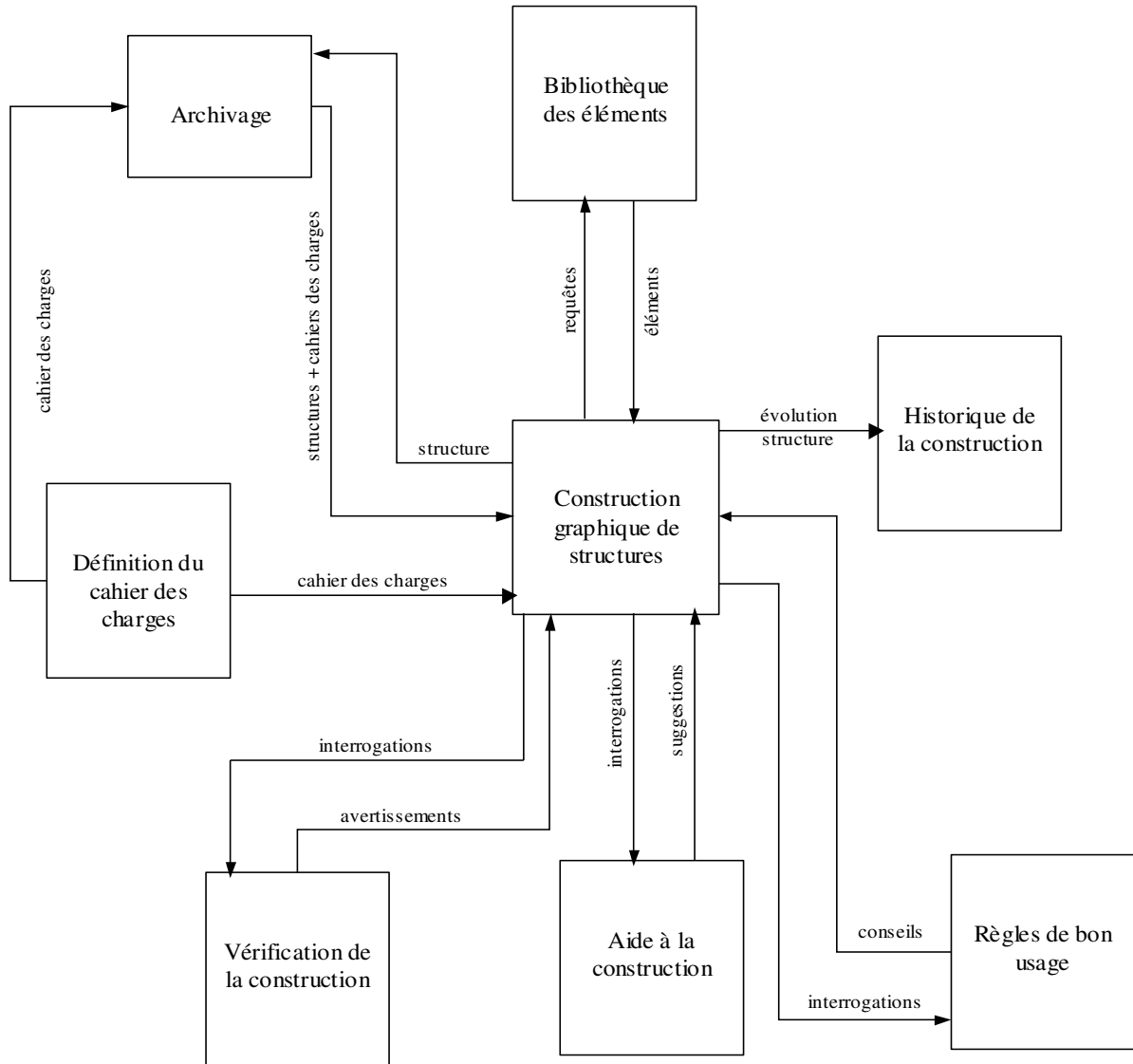


Figure 3.1 – Les fonctionnalités nécessaires au concepteur

3.3.1. Bibliothèque d'éléments :

Cette fonctionnalité permet de stocker les propriétés des éléments caractérisés et notamment les propriétés de leurs interfaces d'échange d'énergie (polarités et propriétés fréquentielles). Elle joue le rôle d'une boîte à outils qui fournit au concepteur des ingrédients de base pour construire des structures de conversion d'énergie.

Nous associons à cette bibliothèque un ensemble de requêtes pour effectuer l'identification des éléments d'une structure en construction.

3.3.2. Définition du cahier des charges :

Cette fonctionnalité permet de décrire les propriétés des éléments de type "Dipôle" représentant la source d'alimentation et la charge à alimenter, et de spécifier les transformations qui doivent être effectuées par la structure qui va être construite pour assurer le transfert d'énergie entre ces deux éléments.

3.3.3. Construction graphique de structures :

C'est la fonctionnalité qui va permettre au concepteur de construire graphiquement des structures de conversion d'énergie en assemblant des éléments qu'il extrait à partir d'une palette de pièces.

L'utilisateur doit aussi pouvoir effectuer la construction de structures à partir d'éléments représentant une source et une charge, issus de la fonction de "Définition du cahier des charges" (voir paragraphe 3.3.2), en introduisant les éléments assurant les transformations exigées. L'identification de ces éléments s'effectue à l'aide des requêtes destinées à la bibliothèque d'éléments (voir paragraphe 3.3.1).

3.3.4. Vérification de la construction :

Les profils graphiques des pièces utilisées dans la construction de structures constituent ce qu'on peut considérer comme le "système expert du pauvre" qui permet de respecter les règles de compatibilité énergétique.

Pour tenir compte des autres points de vue, il faut respecter les règles de compatibilité des polarités et des propriétés fréquentielles des grandeurs échangées par les éléments dans une structure (voir paragraphe 2.5.1).

Pour ce faire, le concepteur peut interroger la fonctionnalité de "Vérification de la construction" qui analysera les différents éléments de la structure pour avertir le concepteur en cas de non respect des règles de compatibilité.

3.3.5. Aide à la construction :

Le concepteur peut aussi faire appel à la fonctionnalité "d'aide à la construction" qui va éventuellement lui suggérer, selon les transformations qui doivent être réalisées par la structure recherchée, d'effectuer des opérations telles que :

- l'introduction de fonctions selon les propriétés du cahier des charges et l'évolution de la structure,

- la répartition des fonctions entre les éléments selon les propriétés de leurs interfaces d'échange d'énergie,
- l'introduction d'interfaces par décompositions des éléments selon les fonctions qui manquent à la structure et les propriétés des interfaces de ces éléments.

3.3.6. Règles de bon usage :

Les règles de savoir-faire se traduisent par les règles d'aide à la construction abordées dans le paragraphe 3.3.5 (qui sont des règles générales) ; et par des règles de bon usage spécifiques, associées à certains éléments caractérisés. Ces règles peuvent être consultées et exploitées par le concepteur, selon le contexte et l'avancement de la construction.

3.3.7. Historique de la construction :

Toutes les étapes de construction peuvent être sauvegardées, durant une session de conception, à l'aide de la fonctionnalité "Historique de la construction". Ceci permettra de revenir à des étapes ultérieures du travail afin de modifier l'état de la structure à une étape donnée, et la faire ainsi évoluer pour aboutir à d'autres solutions.

3.3.8. Archivage :

A la fin d'une session de conception, le concepteur peut sauvegarder les données de son travail (cahier des charges, structure, etc.) à l'aide de la fonctionnalité "d'Archivage".

3.4. Description des outils de conception :

Après avoir choisi un algorithme de conception des structures de conversion, nous avons identifié les fonctionnalités qui doivent être assurées par sa mise en œuvre informatique.

Dans ce qui suit, nous présentons les différents outils que nous avons développé dans le cadre de cette mise œuvre ; et nous décrivons la répartition des fonctionnalités identifiées au sein de ces outils.

3.4.1. La base de données :

Nous avons mis en oeuvre une base de données pour qu'elle joue le rôle de "bibliothèque d'éléments" et permettre ainsi la capitalisation et la réutilisation du savoir-faire acquis par les différents utilisateurs des outils de conception de l'application.

Nous avons choisi de développer cette base en Microsoft Access [Jon01] pour la simplicité de son utilisation et la richesse des fonctions qu'il met à disposition du développeur (requêtes, formulaires, etc.).

Notre base de données a été conçue comme une application autonome pour faciliter l'accès à son contenu, en lecture ou en écriture (pour consulter la base ou l'enrichir), sans être obligé de passer par l'outil de construction de structures.

3.4.1.1. Contenu de la base :

Notre base de données contient principalement les données suivantes :

- *Les propriétés des éléments caractérisés* : il s'agit notamment des polarités et des propriétés fréquentielles des interfaces de ces éléments, ainsi que leurs propriétés fonctionnelles.
- *Les propriétés des cahiers des charges* : il s'agit des données relatives aux cahiers des charges abordés par les différents utilisateurs de notre application.

A chaque cahier des charges correspond les propriétés d'un élément représentant une source et d'un autre représentant une charge, ainsi que des exigences fonctionnelles tels que l'isolement galvanique, encombrement minimal, etc.

- *Les propriétés des macro-éléments* : il s'agit des données relatives aux macro-éléments construits par les différents utilisateurs de notre application.

Chaque macro-élément est identifié par les éléments caractérisés utilisés pour sa construction, ainsi que les associations entre ces éléments.

3.4.1.2. Organisation du contenu de la base de données :

Le contenu de la base de données a été répertorié dans les tables suivantes (voir Figure 3.2, réalisée en formalisme UML [Mul00]) :

- *La table "Elements"* : elle contient les propriétés des éléments caractérisés.

Chaque enregistrement de cette table correspond à un élément particulier et est distingué notamment par la valeur des champs suivants :

- le nom de l'élément,
- la pièce graphique représentant la caractérisation énergétique de l'élément,
- le domaine de validité fréquentiel de la caractérisation énergétique de l'élément,

Nous avons intégré aussi des champs informationnels qui peuvent être utiles pendant un processus de conception tels que :

- la caractéristique propre de l'élément, comme par exemple le rapport de transformation d'un élément transformateur,
- les règles de bon usage de l'élément.

Par exemple, un filtre AC/AC doit être soumis à une fréquence d'utilisation inférieure à sa fréquence de coupure.

Ceci permet de réaliser la fonctionnalité "Règles de bon usage" (paragraphe 3.3.6). Nous avons choisit de l'affecter aux enregistrements relatifs éléments car les règles de bon usages constituent des propriétés spécifiques aux éléments caractérisés.

On distingue aussi des champs qui permettent de décrire des informations historiques concernant la date d'introduction de l'élément dans la base de données et le nom de la personne qui a effectué cette opération, ce qui permet la traçabilité du contenu de la table.

Les propriétés fonctionnelles de chaque élément sont stockées dans la table "Proprietes_fonctionnelles", alors que les propriétés de ses interfaces sont sauvegardées dans la table "Interfaces_element" décrite dans la section suivante.

- *La table "Interfaces_element"* : elle contient les propriétés des interfaces d'échange d'énergie.

Chaque enregistrement de cette table décrit les propriétés d'une interface et contient une référence à l'enregistrement de l'élément la possédant.

Les autres champs de chaque enregistrement correspondent au type de l'interface, à savoir la grandeur qu'elle impose (effort ou flux), ainsi qu'aux polarités et aux propriétés fréquentielles imposées et acceptées par l'interface considérée.

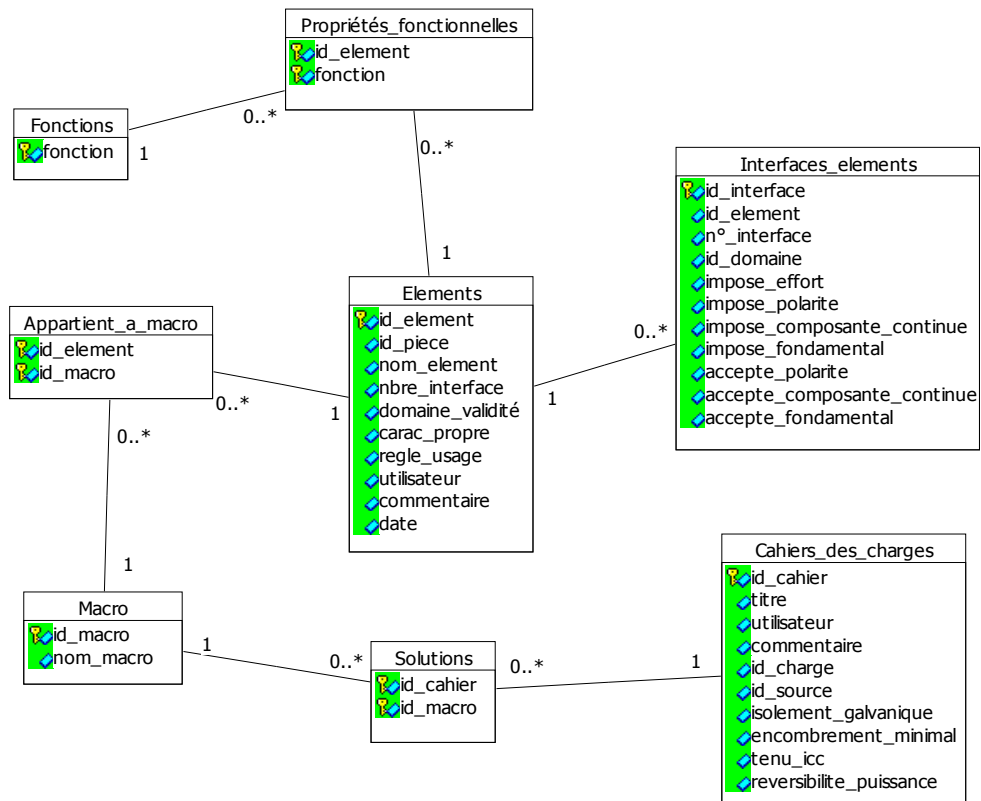


Figure 3.2 - Les principales tables de la base de donnée

Notre base de données contient aussi les tables "Cahiers_des_charges" et "Macros" correspondants respectivement aux cahiers des charges et aux macro-éléments. Ceci permet de réaliser la fonctionnalité "d'archivage".

Pour établir la liaison entre un cahier des charges et les macro-éléments qui caractérisent ses éventuelles solutions, nous avons créé la table "Solution" dont chaque enregistrement contient une référence à un cahier des charges et une autre à un macro-élément décrits dans la base.

3.4.1.3. Accès au contenu de la base de données :

Comme on l'a indiqué au début du paragraphe 3.4.1, notre base de données fonctionne de manière autonome et permet à l'utilisateur d'accéder (en lecture ou en écriture) à ses données, en dehors d'une session de conception, à travers les formulaires suivants :

3.4.1.3.1. Les formulaires de "navigation" :

Ce sont des formulaires permettant de consulter (en lecture ou en écriture) les différents enregistrements des principales tables de la base.

Nous avons développé des formulaires pour accéder aux principales tables de la base, notamment les tables *Elements*, *Macros* et *Cahiers_des_charges*.

Par exemple, pour accéder aux propriétés des éléments caractérisés, sauvegardés dans la table *Elements*, nous avons mis à la disposition de l'utilisateur le formulaire de la Figure 3.3.

Figure 3.3 - Formulaire d'accès à la table "Elements"

Dans ce formulaire, nous pouvons consulter les différentes informations nécessaires pour caractériser l'élément affiché. Nous distinguons notamment :

- le *nom de l'élément* : l'élément affiché est un filtre AC/AC,
- la pièce graphique représentant sa *caractérisation énergétique* : l'exemple montre un élément de type "Transformateur",
- les propriétés de ses interfaces : les onglets "*interface 1 et 2*",

- l'énumération de ses propriétés fonctionnelles : l'élément considéré est un filtre passe-bas dévolteur,
- sa caractéristique propre : *fréquence de coupure*,
- sa règle de bon usage : "la fréquence d'utilisation doit être inférieure à la fréquence de coupure",
- les informations liées à l'historique de la création de l'élément (auteur, date, etc.).

Toutes les informations de caractérisation d'un élément figurant sur le formulaire de la Figure 3.3 peuvent être éditées dans un document imprimable appelé "état" (voir annexes). Ce document est généré de manière automatique quand l'utilisateur agit sur le bouton "créer état".

3.4.1.3.2. Les formulaires de recherche :

Ils permettent de consulter, selon des critères de sélection, le contenu de tables principales qui sont : *Elements*, *Macros*, *Cahiers_des_charges*.

Par exemple, pour les recherches dans la table *Elements*, nous avons mis à la disposition de l'utilisateur deux formulaires :

- Le premier formulaire (Figure 3.6) permet de chercher des éléments en se basant sur une requête portant sur les propriétés d'une interface (voir paragraphe 2.5.2.1 et Figure 3.4).

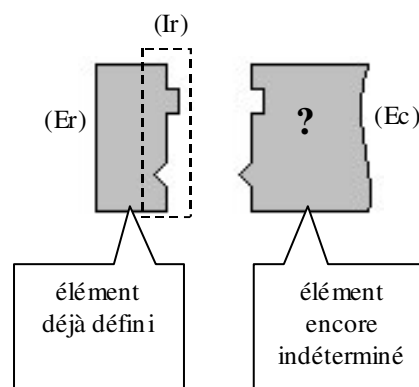


Figure 3.4 – Recherche d'éléments à partir des propriétés d'une interface

Cette requête peut être exploitée dans le mode de construction par recherches successives surtout (voir paragraphe 2.5.3.1.1).

Dans le formulaire de la Figure 3.6, nous pouvons distinguer les champs permettant d'introduire les polarités et les propriétés fréquentielles de l'interface considérée.

- Le deuxième formulaire (Figure 3.7) permet de chercher des éléments en se basant sur une requête portant sur les propriétés de deux interfaces (voir paragraphe 2.5.2.2 et Figure 3.5).

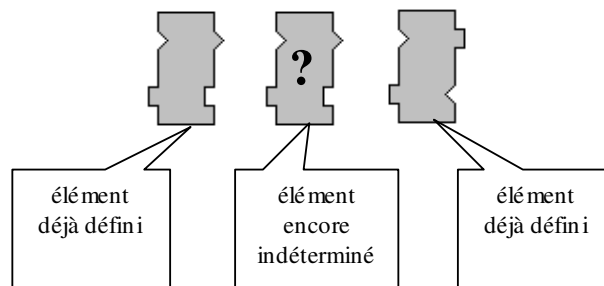


Figure 3.5 - Recherche d'éléments à partir des propriétés de deux interfaces

Cette requête peut être exploitée dans le mode de construction par décompositions successives surtout (voir paragraphe 2.5.3.2).

Le formulaire de la Figure 3.7 contient deux onglets similaires au premier formulaire, permettant de fixer les propriétés des deux interfaces exigées.

Domaine de l'interface électrique

grandeur imposée Effort

impose polarité bidirectionnel

impose comp. continue oui

impose fondamental oui

impose harmoniques oui

grandeur acceptée Flux

accepte polarité bidirectionnel

accepte comp. continue oui

accepte fondamental oui

accepte hamoniques oui

Figure 3.6 - Formulaire de recherche d'éléments à partir des propriétés d'une interface

interface 1 | interface 2

Domaine de l'interface électrique

grandeur imposée Effort

impose polarité bidirectionnel

impose comp. continue oui

impose fondamental oui

impose harmoniques oui

grandeur acceptée Flux

accepte polarité bidirectionnel

accepte comp. continue oui

accepte fondamental oui

accepte harmoniques oui

Pour accéder aux propriétés d'une interface, choisir l'onglet correspondant

Figure 3.7 - Formulaire de recherche d'éléments à partir des propriétés de deux interfaces

Les résultats des différentes recherches d'éléments s'affichent sur un formulaire identique au formulaire de navigation destiné à la table *Elements* (voir Figure 3.3).

3.4.2. Définition du cahier des charges :

La fonctionnalité de "Définition du cahier des charge" est réalisée par la fenêtre illustrée par la Figure 3.8.

The dialog box is titled "Définition du cahier des charges" and is organized as follows:

- Source:**
 - Domaine: électrique
 - Grandeur imposée: Effort
 - Polarité imposée: positif
 - Impose cc: oui
 - Impose fondamental: oui
 - Impose harmoniques: oui
 - Polarité acceptée: positif
 - Accepte cc: oui
 - Accepte fondamental: oui
 - Accepte harmoniques: oui
- Charge:**
 - Domaine: électrique
 - Grandeur imposée: Effort
 - Polarité imposée: positif
 - Impose cc: oui
 - Impose fondamental: oui
 - Impose harmoniques: oui
 - Polarité acceptée: positif
 - Accepte cc: oui
 - Accepte fondamental: oui
 - Accepte harmoniques: oui
- Comparaison des niveaux de tension entre source et charge:**
 - vs > ve
 - vs < ve
 - vs = ve
- Fonctions:**
 - Isolement Galvanique
 - Tenu lcc
 - Encombrement minimal
 - Héversibilité de la puissance

An "Ok" button is located at the bottom center of the dialog.

Figure 3.8 - Définition du cahier des charges

Cette fenêtre permet de fixer :

- Les propriétés des échanges énergétiques de la source et de la charge : c'est à dire les polarités et les propriétés fréquentielles des interfaces d'échange d'énergie de la source d'une part et de la charge d'autre part. Parmi ces propriétés on peut citer par exemple :
 - polarités imposées et acceptées,
 - l'acceptation ou non de fondamental,
 - l'acceptation ou non d'une composante continue (cc), etc.

- Les fonctions et transformations énergétiques que doit effectuer la structure recherchée :
 - l'élévation, l'abaissement ou le maintien du niveau la tension entre la source et la charge (est ce que $v_s > v_e$, $v_s < v_e$ ou $v_s = v_e$?),
 - isolement galvanique,
 - tenu d'un courant de court circuit (icc),
 - encombrement minimal,
 - réversibilité en puissance.

3.4.3. L'éditeur graphique :

Cet outil réalise la fonctionnalité de "construction graphique de structures" évoquée au paragraphe 3.3.3. Comme le montre son interface graphique de la Figure 3.9, il s'agit d'un outil graphique permettant de construire des structures sur une "feuille de travail", à l'aide de pièces issues d'une "palette", à la manière des logiciels de simulation comme Psim ou Matlab-Simulink.

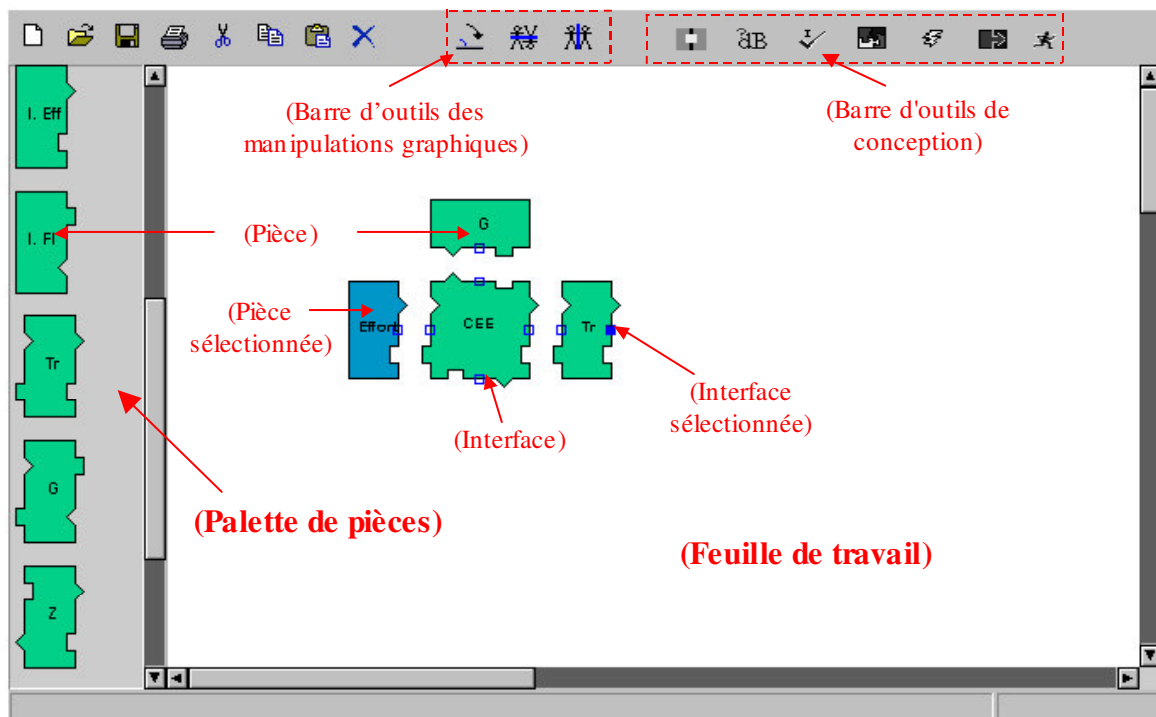


Figure 3.9 - L'éditeur graphique

Cette interface graphique, réalisée principalement par S. DELSOL dans le cadre d'un stage de 2^{ème} année Génie Electrique de l'ENSEEIH, se compose essentiellement

d'une "palette de pièces" constituée d'une liste de "pièces", correspondants aux différentes caractérisations énergétiques que nous avons exposées dans le chapitre précédent. L'utilisateur peut construire des structures en glissant des copies de ces objets sur la feuille de travail. Il peut sélectionner des éléments d'une structure pour :

- effectuer des opérations graphiques (rotation d'une pièce, effet miroir, etc.) selon les besoins de construction, à l'aide de la barre d'outils "Manipulations graphiques",
- consulter ou modifier les attributs des éléments.

Il peut aussi sélectionner et accéder en lecture ou en écriture aux propriétés des objets de type "Interface" qui représentent les interfaces d'échange d'énergie des éléments.

L'outil de construction de structures peut aussi être exploité dans la résolution d'un problème de conception à l'aide des fonctionnalités de la "barre d'outils de conception" (voir paragraphe 3.5).

3.4.4. Le module d'expertise :

Cet outil remplit les fonctionnalités de "vérification de la construction" et "d'aide à la construction" (voir paragraphes 3.3.4 et 3.3.5).

Etant donné que les connaissances mises en jeu par ces deux fonctionnalités peuvent s'exprimer à l'aide de règles de savoir-faire, nous avons choisi de développer un module d'expertise en nous basant sur une approche de type système expert [Far90].

Pour réaliser cela, notre choix s'est porté sur le générateur de système à base de règles ILOG JRULES [Ilo02], pour les raisons suivantes :

- c'est un générateur qui traite des connaissances orientées objet et dont les règles s'expriment à l'aide de classes développées en langage JAVA, ce qui assure la compatibilité des différents outils de conception,
- la modularité des systèmes à base de règles générés à partir de ce générateur, ce qui permet d'obtenir des modules experts réutilisables et extensibles,
- le langage de développement des règles utilisé est très simple et proche du langage naturel, comme nous allons le montrer dans la section suivante.
- le raisonnement s'effectue par chaînage avant, il est donc guidé par les faits. Cette propriété est bien adaptée pour la réalisation de tâches de vérifications et de suggestions.

3.4.4.1. Développement des règles d'aide à la conception :

Nous avons développé les différentes règles utilisées dans le module d'aide à la conception (règles d'association et les règles de savoir-faire) en utilisant l'environnement de développement d'ILOG JRULES illustré à la Figure 3.10.

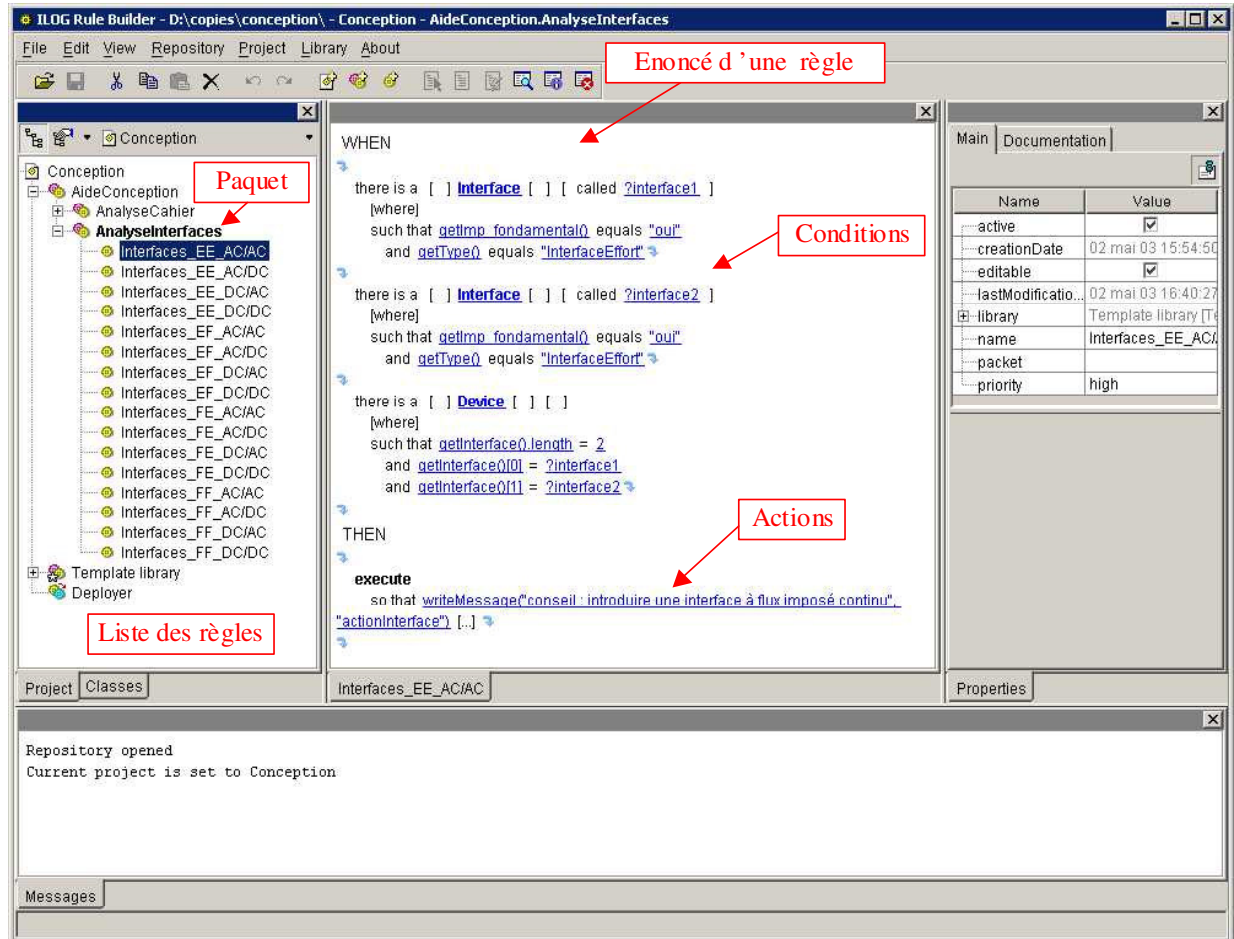


Figure 3.10 - Environnement de développement ILOG JRULES

Cet outil permet de développer des règles mettant en jeu des objets appartenant à une arborescence de classes dans un langage quasi-naturel.

Dans notre application, les classes utilisées dans le développement des règles de l'outil d'aide à la conception sont exactement les classes développées pour le module dédié à l'assemblage de structures (voir paragraphe 3.6.1).

3.4.4.1.1. Les règles :

Comme pour la plupart des générateurs de systèmes experts, les règles développées avec ILOG JRULES respectent la syntaxe suivante :

Si (*Conditions*) alors (*Actions*)

En langage ILOG, les conditions portent toujours sur la présence ou non d'objets dans l'espace de travail du système expert, et les actions sont généralement des modifications des propriétés des objets qui vérifient ces conditions ou encore des affichages de messages.

Voici un exemple d'une règle de savoir-faire écrites dans un format semblable à celui du langage ILOG :

Règle **Exemple**

```
{
  Si {
    l'élément ?elem1
    impose un effort bidirectionnel à
    l'élément ?elem2 qui n'accepte qu'un effort toujours positif;
  } alors {
    afficher_erreur("Polarités incompatibles entre les
    éléments : " + ?elem1 + " et " ?elem2);
  }
};
```

Cette règle est exécutée quand on introduit dans l'espace de travail un assemblage entre un élément qui impose un effort bidirectionnel et un élément qui n'accepte qu'un effort toujours positif. L'effet de l'exécution de cette règle est l'affichage du message d'erreur indiqué.

Mais l'exécution d'une règle dépend aussi d'autres paramètres que nous allons décrire dans la section suivante.

3.4.4.1.2. *Contrôle de l'exécution des règles :*

ILOG JRULES donne la possibilité d'assembler les règles en paquets (voir Figure 3.10). L'activation d'un paquet entraîne l'activation de toutes les règles lui appartenant et sa désactivation entraîne la désactivation de ces règles.

Ainsi, nous utilisons cette propriété pour contrôler l'enchaînement du raisonnement, en activant les règles selon les besoins de l'application.

Mais l'exécution des règles dépendent aussi d'un autre paramètre : la priorité. Ce paramètre peut être utile quand les conditions d'exécution de plusieurs règles sont valables. Dans ce cas c'est la règle qui a la priorité la plus élevée qui est exécutée.

3.4.4.2. **Organisation des règles du module d'expertise :**

Nous avons classé les règles utilisées par le module d'expertise dans les paquets suivants :

3.4.4.2.1. *Analyse préliminaire :*

Ce paquet permet d'analyser les caractéristiques du cahier des charges, c'est à dire les propriétés de la source et de la charge ainsi que les propriétés fonctionnelles exigées (isolement galvanique, tenue d'un courant de court circuit, etc.), pour déterminer les fonctions indispensables à la chaîne de conversion recherchée.

Comme exemple de règle contenue dans ce paquet, on peut citer :

"Si la source est alternative et la charge est continue alors il faut introduire un élément *redresseur*".

3.4.4.2.2. *Analyse de la structure en cours de construction :*

Ce paquet contient les règles de savoir-faire permettant d'analyser l'état de la structure en cours de construction, afin de fournir éventuellement une aide à l'utilisateur portant sur ce qu'il doit faire pour achever la construction.

Parmi les règles de ce paquet, on distingue :

- Les règles qui indiquent à l'utilisateur les fonctions qu'il doit encore insérer dans sa structure.

Comme exemple de ces règles, on peut citer :

"Si la tenue d'un courant de court-circuit est exigée et la structure ne contient pas d'éléments *dévolteur* alors rappeler à l'utilisateur qu'il doit introduire un élément *dévolteur*".

- Les règles permettant l'analyse des propriétés d'un élément choisi par l'utilisateur pour "l'éclater" en introduisant une interface d'échange d'énergie intermédiaire. Les propriétés d'une telle interface peuvent être suggérer par l'une de ces règles.

On peut citer par exemple la règle suivante :

"Si la structure doit contenir un élément *redresseur* et que l'élément *Elem* à décomposer possède deux interfaces à flux imposé alternatif alors introduire entre les interfaces d'*Elem* une interface intermédiaire à effort imposé continu"

Cette partie des règles est en cours de perfectionnement.

3.4.4.2.3. *Détection des erreurs :*

C'est un paquet qui contient les règles permettant de détecter les erreurs d'association d'éléments commises pendant le processus de construction. Ces règles veillent à la compatibilité des polarités et des propriétés fréquentielles des éléments associés au sein de la structure en cours de construction.

Dans ce cadre, on peut citer par exemple la règle suivante :

"S'il y a un assemblage entre un élément qui impose un effort bidirectionnel et un autre qui n'accepte qu'un effort toujours positif alors afficher un message d'erreur".

3.4.4.2.4. *Règles de recherche :*

Ces règles sont susceptibles de s'appliquer quand l'utilisateur adresse, vers la base de données, une requête pour identifier un élément qu'il veut insérer dans sa structure. Dans ce

cas il faut rechercher les éléments ayant des propriétés d'interfaces compatibles avec les éléments voisins de l'élément qu'on veut identifier (voir paragraphes 2.3.2 et 2.3.3).

Ainsi, ces règles permettent de définir les polarités et les propriétés fréquentielles de l'élément à identifier pour les envoyer à la base de données pour rechercher les éléments possédant ces propriétés.

Un exemple de ces règles est :

"Si la polarité de référence acceptée est *bidirectionnelle* alors les polarités imposées compatibles sont : *bidirectionnelle, positive ou négative*"

3.4.5. Historique de la construction :

L'historique de l'évolution de la structure pendant la construction (fonctionnalité "Historique de la construction" dans le paragraphe 3.3.7), est sauvegardée au fur et à mesure dans un arbre de résolution (voir Figure 3.11), car la construction s'effectue selon un processus arborescent (voir paragraphe 2.5.3.2).

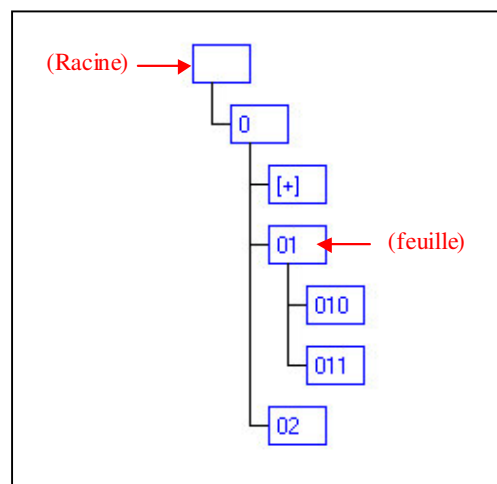


Figure 3.11 - Arbre de résolution

La racine de l'arbre contient la description du cahier des charges de la session de conception. Chacune des autres feuilles représente une étape du processus de construction et est caractérisée par la structure issue de cette étape et l'opération qui a permis de l'obtenir.

Les différentes opérations (éclatement, introduction d'une nouvelle pièce ou autres) peuvent être effectuées suite à une initiative du concepteur ou à une suggestion du module d'expertise ou à une requête destinée à la base de données. Cette information est aussi incluse dans les caractéristiques des feuilles correspondantes.

L'utilisateur peut naviguer à travers les feuilles de l'arbre pour visualiser l'état d'avancement de la construction et des structures correspondantes sur "l'éditeur graphique", afin de les consulter ou les modifier.

Les structures des feuilles terminales (celles qui ne possèdent pas de descendants) représentent des solutions au problème ou des impasses dans le raisonnement.

On peut sauvegarder le contenu de cet arbre dans un fichier XML [Ber99]. Ce fichier met l'accent sur les structures solutions et les caractéristiques des étapes (et donc des feuilles de l'arbre de résolution correspondantes) qui ont permis de construire ces solutions.

Nous travaillons sur le traitement des fichiers XML issus de la sauvegarde, pour permettre l'exploitation de leurs données en les archivant dans la base de données ou en les réutilisant dans d'autres processus de construction.

3.4.6. Panneau de messages :

En plus des outils de conception que nous venons de décrire, nous avons choisi de mettre à la disposition de l'utilisateur un panneau de messages pour afficher les résultats de ses requêtes vers la base de données (voir Figure 3.12).

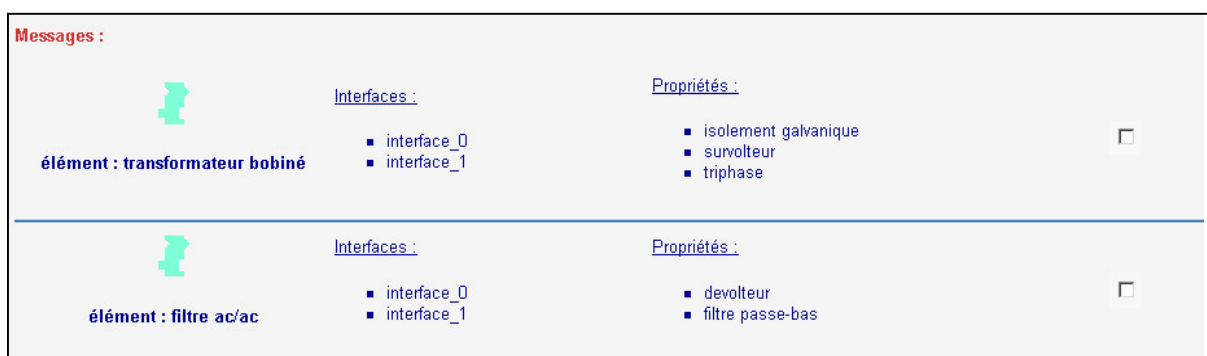


Figure 3.12 – Affichage des résultats d'une requête destinée à la base de donnée

L'utilisateur peut ainsi identifier un élément de sa structure à l'un des éléments affichés sur le panneau en cochant la case de son choix.

Le panneau de messages sert aussi à afficher les suggestions et les avertissements du module d'expertise (voir Figure 3.13).

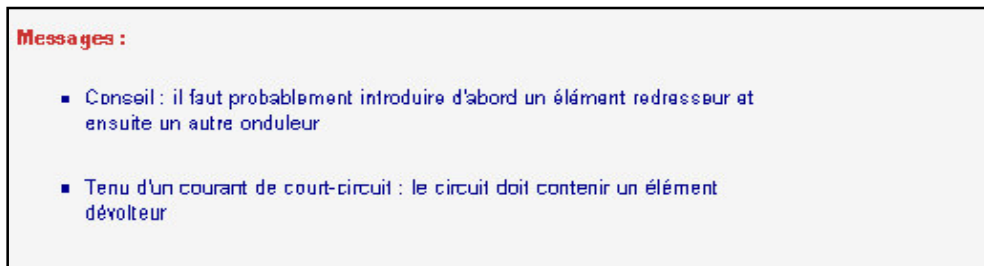


Figure 3.13 - Affichage des résultats de suggestions du module d'expertise

3.5. Utilisation des outils pour la conception :

3.5.1. L'interface utilisateur de l'application :

Les différents outils, décrits dans le paragraphe 3.4, sont exploités à partir de l'interface utilisateur de la Figure 3.14.

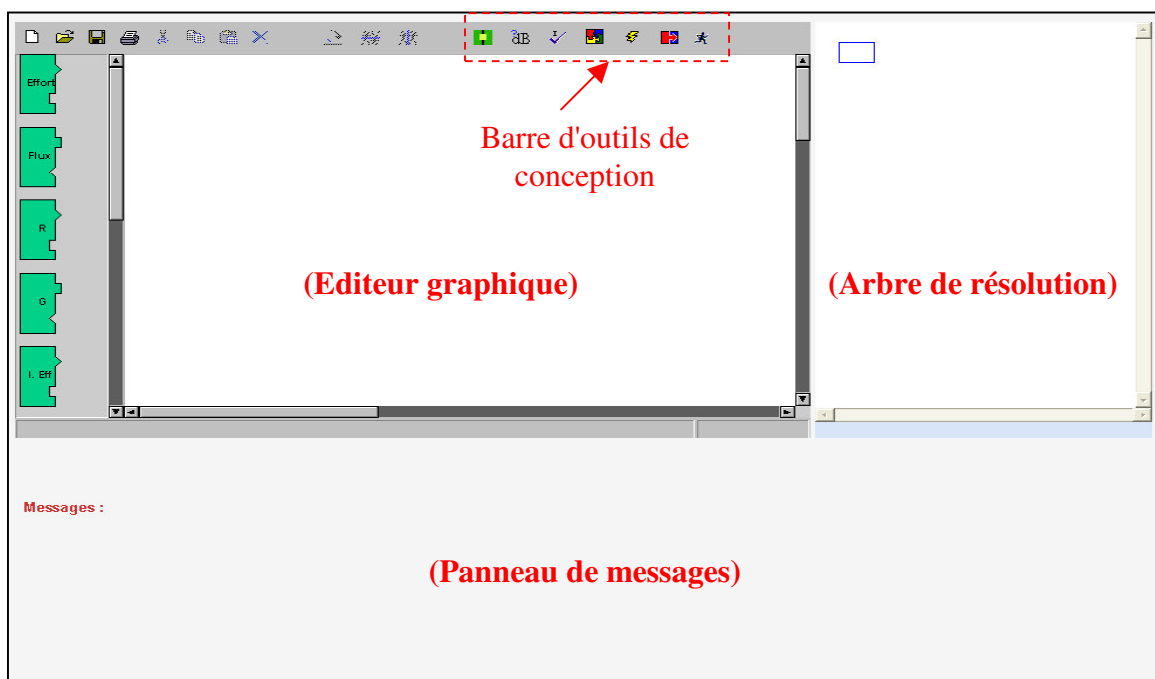



Figure 3.14 – Interface utilisateur

Dans ce qui suit, nous montrons à travers un exemple, l'utilisation de cette interface utilisateur pour construire une structure en réponse à un cahier des charges.

3.5.2. Exemple d'une session de conception :

Pour commencer une session de conception, l'utilisateur agit sur le bouton  de la "barre d'outils de conception" (voir Figure 3.14), ce qui a pour effet l'apparition de la fenêtre de "définition du cahier des charges" (voir Figure 3.15)

Source :		Charge :	
Domaine :	<input type="text" value="électrique"/>	Domaine :	<input type="text" value="électrique"/>
Grandeur imposée :	<input type="text" value="Flux"/>	Grandeur imposée :	<input type="text" value="Flux"/>
Polarité imposée :	<input type="text" value="positif"/>	Polarité imposée :	<input type="text" value="bidirectionnel"/>
Impose cc :	<input type="text" value="oui"/>	Impose cc :	<input type="text" value="non"/>
Impose fondamental :	<input type="text" value="non"/>	Impose fondamental :	<input type="text" value="oui"/>
Impose harmoniques :	<input type="text" value="non"/>	Impose harmoniques :	<input type="text" value="non"/>
Polarité acceptée :	<input type="text" value="bidirectionnel"/>	Polarité acceptée :	<input type="text" value="bidirectionnel"/>
Accepte cc :	<input type="text" value="oui"/>	Accepte cc :	<input type="text" value="oui"/>
Accepte fondamental :	<input type="text" value="oui"/>	Accepte fondamental :	<input type="text" value="oui"/>
Accepte harmoniques :	<input type="text" value="oui"/>	Accepte harmoniques :	<input type="text" value="oui"/>
Comparaison des niveaux de tension entre source et charge :			
<input type="radio"/> vs > ve		<input type="radio"/> vs < ve	
<input type="radio"/> vs = ve			
Fonctions :			
<input checked="" type="checkbox"/> Isolement Galvanique	<input checked="" type="checkbox"/> Tenu Icc	<input type="checkbox"/> Encombrement minimal	<input type="checkbox"/> Réversibilité de la puissance
<input type="button" value="Ok"/>			

Figure 3.15 – Exemple de définition d'un cahier des charges

Dans le cas de la Figure 3.15, il s'agit d'un cahier des charges qui spécifie les exigences suivantes :

- Source : source de courant (flux) continu (réseau DC inductif).
- Charge : source de courant alternatif (charge inductive).
- Fonctions exigées : isolement galvanique, tenue d'un courant de court-circuit.

Le résultat de la validation de ces choix est l'apparition des caractérisations énergétiques de la source, de la charge et du dispositif recherché sur l'éditeur graphique, comme le montre la Figure 3.16.

Dans cet exemple, il s'agit de construire une structure qui doit assurer le transfert de puissance entre deux sources de courant. Le macro-élément recherché est alors un gyrateur flux-effort.

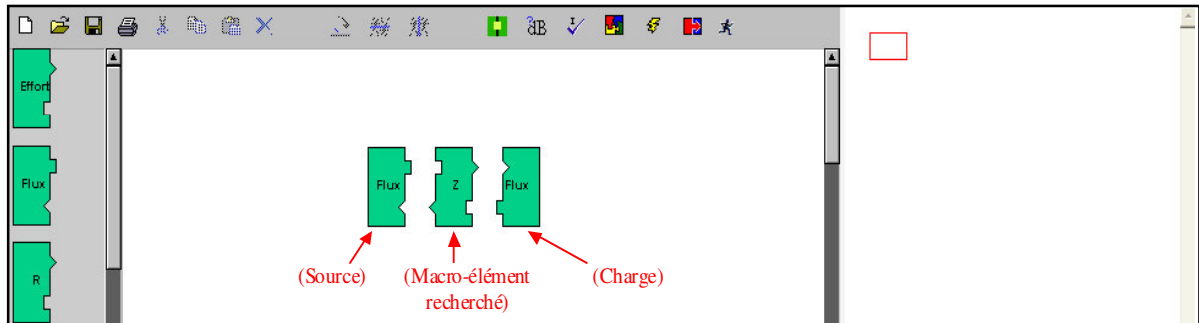



Figure 3.16 - Structure issue du choix du cahier des charges de la Figure 3.15

L'utilisateur peut consulter le module d'expertise pour analyser le cahier des charges en agissant sur le bouton . L'aide du module d'expertise s'affiche sur le panneau de messages comme le montre la Figure 3.17.

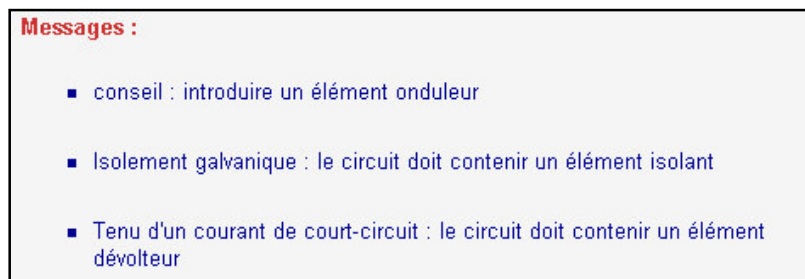



Figure 3.17 – Aide du module d'expertise

Dans notre exemple, le module d'expertise va indiquer que la structure recherchée doit contenir un élément onduleur puisque la source est continue et la charge est alternative. Elle doit aussi contenir un élément assurant l'isolement galvanique et un élément dévolteur pour respecter l'exigence de tenue de courant de court-circuit.

On peut maintenant sélectionner l'élément représentant la structure recherchée pour le décomposer à l'aide d'une interface d'échange d'énergie. Pour effectuer cette tâche, il faut utiliser le bouton . Le résultat de cette action est l'apparition de la fenêtre illustrée

par la Figure 3.18. Elle permet de choisir les propriétés de l'interface utilisée dans la décomposition de l'élément sélectionné.

The image shows a dialog box with the following settings:

Domaine physique :	électrique
Grandeur imposée :	Effort
Polarité imposée :	indefini
Impose composante continue :	oui
Impose fondamental :	oui
Impose harmoniques :	indefini
Polarité acceptée :	bidirectionnel
Accepte composante continue :	non
Accepte fondamental :	oui
Accepte harmoniques :	oui

At the bottom center, there is an "Ok" button.

Figure 3.18 – *Propriétés d'une interface d'échange d'énergie introduite lors d'une décomposition d'un élément*

Dans le cas de la Figure 3.18, il s'agit d'une interface d'échange d'énergie à tension imposée. Si nous appliquons cette opération au macro-élément de la Figure 3.16, la structure initiale est remplacé sur l'éditeur graphique par la structure de la Figure 3.19.

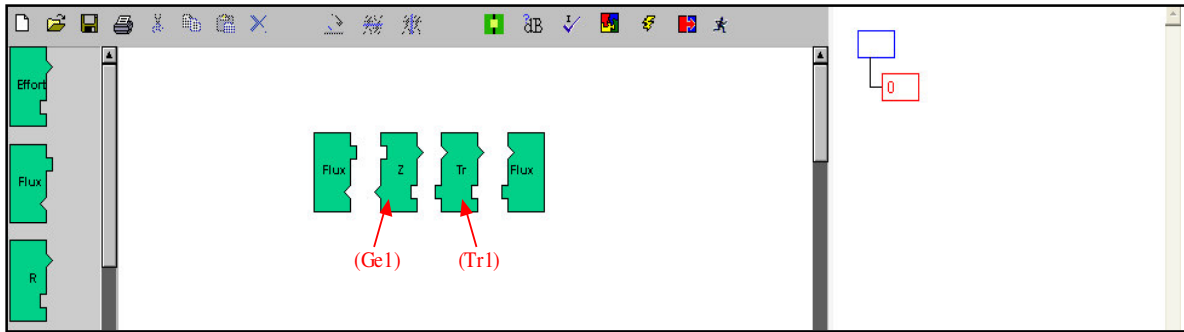



Figure 3.19 - Structure résultante de l'éclatement du macro-élément de la Figure 3.16

Dans cette figure, on peut constater que la décomposition du macro-élément de la Figure 3.16, qui est un gyrateur flux-effort, par une interface d'échange d'énergie à effort (tension) imposé, engendre un autre élément de type gyrateur flux-effort (élément "Ge1") et un élément de type Transformateur (élément "Tr1"). On peut aussi constater l'apparition d'une nouvelle feuille dans l'arbre de résolution. Cette feuille correspond à la nouvelle étape du processus de construction.

Maintenant, si on sélectionne l'élément "Tr1" et qu'on lance une recherche dans la base de donnée à l'aide du bouton , on obtient l'affichage suivant :

Messages :





	<u>Interfaces :</u>	<u>Propriétés :</u>
élément : transformateur bobiné	<ul style="list-style-type: none"> ■ interface_0 ■ interface_1 	<ul style="list-style-type: none"> ■ isolement galvanique <input type="checkbox"/> ■ survolteur ■ triphase
	<u>Interfaces :</u>	<u>Propriétés :</u>
élément : filtre ac/ac	<ul style="list-style-type: none"> ■ interface_0 ■ interface_1 	<ul style="list-style-type: none"> ■ devolteur <input type="checkbox"/> ■ filtre passe-bas

Figure 3.20 - Résultats de recherches d'éléments effectuées dans la base de données

Le concepteur peut identifier l'élément "Tr1" à l'élément de son choix en cochant la case correspondante et en validant le choix par le bouton .

Dans notre cas, on peut choisir d'identifier "Tr1" au transformateur bobiné. On réalise ainsi l'isolement galvanique exigé.

Si on sélectionne l'élément "Ge1" (voir Figure 3.19) et on demande l'aide du module d'expertise par le bouton , on obtient le message suivant :

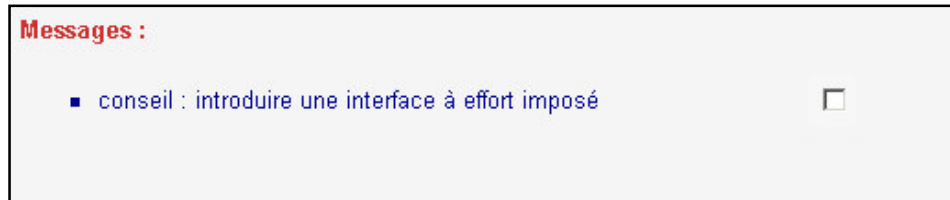



Figure 3.21 – Suggestion du module d'expertise

Le module expert suggère de décomposer l'élément "Ge1" en introduisant une interface d'échange d'énergie à effort (tension) imposée, pour engendrer un élément de type Transformateur et un autre de type gyrateur flux-effort.

On peut appliquer la suggestion du module d'expertise en la sélectionnant et en validant ce choix par le bouton . On obtient ainsi la structure de la Figure 3.22.

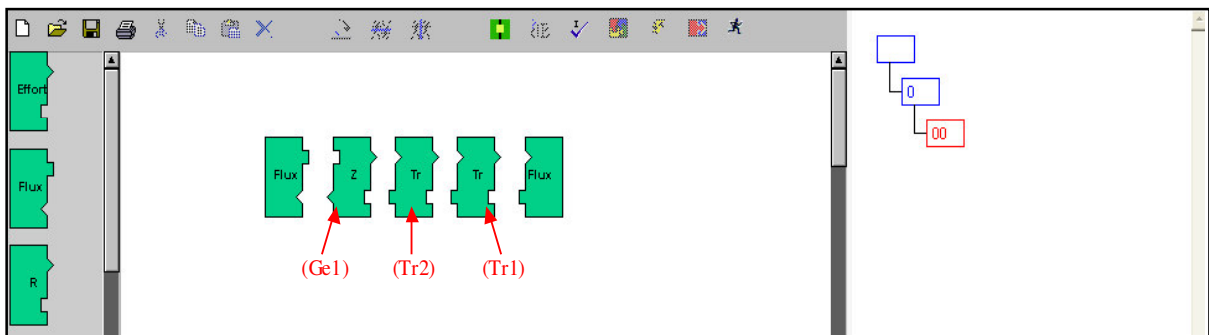


Figure 3.22 – Deuxième décomposition

De la même façon que pour la première décomposition, on peut identifier l'élément "Tr2" à un onduleur de tension qui est aussi un élément dévolteur. L'élément "Ge2" peut être identifié à une capacité parallèle.

3.6. Mise en oeuvre informatique :

Après avoir décrit les différents outils informatiques dédiés à l'aide à la conception et leurs modes d'utilisation, nous allons décrire les choix technologiques effectués lors de leur implantation informatique.

3.6.1. Approche et langage de programmation :

Durant l'étape d'implantation, nous nous sommes basés essentiellement sur les technologies orientés objet Java pour les raisons suivantes.

Nous avons pensé qu'une approche orientée objet [Mey97] était la plus adaptée à notre problématique du fait que les différentes notions d'éléments caractérisés et d'interfaces d'échange d'énergie décrites dans le chapitre précédent sont organisées en classes. Par exemple, les éléments sont classés en dipôles, quadripôles et éléments de connexion. Ainsi, nous nous sommes basés sur la hiérarchie d'objets présentée sur la figure suivante (schéma développé en formalisme UML [Mul00]).

Les principales classes de cette hiérarchie sont :

- La classe *Interface* : elle représente les interfaces d'échanges d'énergie.

Les principaux attributs d'un objet interface sont :

- le type de la grandeur imposée (effort ou flux),
- le domaine physique de l'interface (électrique, mécanique, etc.),
- les polarité acceptée et celle imposée,
- les propriétés fréquentielles de l'interface (impose une composante continue, accepte un fondamental, etc.).

Cette classe se divise en deux sous-classes : la classe des interfaces à effort imposé (*InterfaceEffort*) et celle à flux imposé (*InterfaceFlux*).

Nous distinguons aussi :

- La classe *Device* : C'est la classe des éléments caractérisés.

Elle est décrite principalement par les attributs suivant :

- la caractérisation énergétique de l'élément,
- la profil graphique (pièce) déduit de la caractérisation,
- ses interfaces d'échange,
- ses propriétés fonctionnelles.

A partir des différents types de caractérisation énergétique, on distingue les sous classes correspondantes comme par exemple : *SourceEffort* (classe représentant les sources d'effort), *Integrateur_Effort* (classe représentant les sources d'effort), *Transformateur*, etc.

- La classe *Macro* : représentant macro-éléments.

Cette classe est caractérisée par le vecteur d'éléments qui constituent le macro-élément en question, et par le vecteur des interfaces d'échange d'énergie mises en commun dans cette structure.

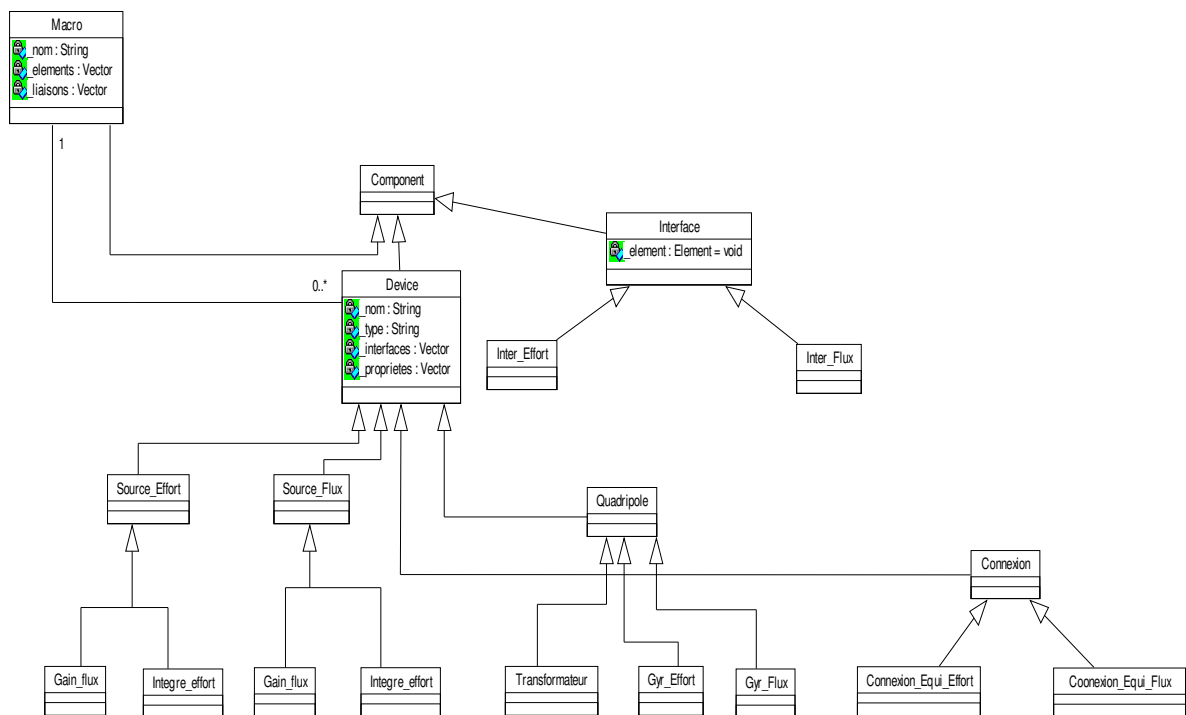


Figure 3.23 - Hiérarchie des classes graphiques

Le choix du langage de programmation Java [Cha00] pour le développement des classes de la hiérarchie présentée est justifié par la richesse de ses bibliothèques et par la portabilité des programmes développés avec ce langage, grâce à la notion de machine virtuelle qui permet de les exécuter sur la plupart des systèmes d'exploitation et plate-formes.

3.6.2. Plate-forme d'exécution :

Après avoir développé les différents outils informatiques dédiés à l'aide à la conception, nous devons les organiser une application informatique permettant leur collaboration durant leur exécution.

Pour réaliser cela, nous avons choisit de "déployer" nos outils dans un serveur d'application J2EE [All01] pour bénéficier d'une architecture client-serveur permettant la communication entre les différents outils et ressources (base de données, fichiers, etc.) ainsi que l'accès à plusieurs utilisateurs.

Notre choix s'est porté sur le serveur d'application JBOSS qui est un outil Open Source facile à configurer et qui ne consomme pas beaucoup de ressources [Sta02].

L'application est configurée selon l'architecture suivante :

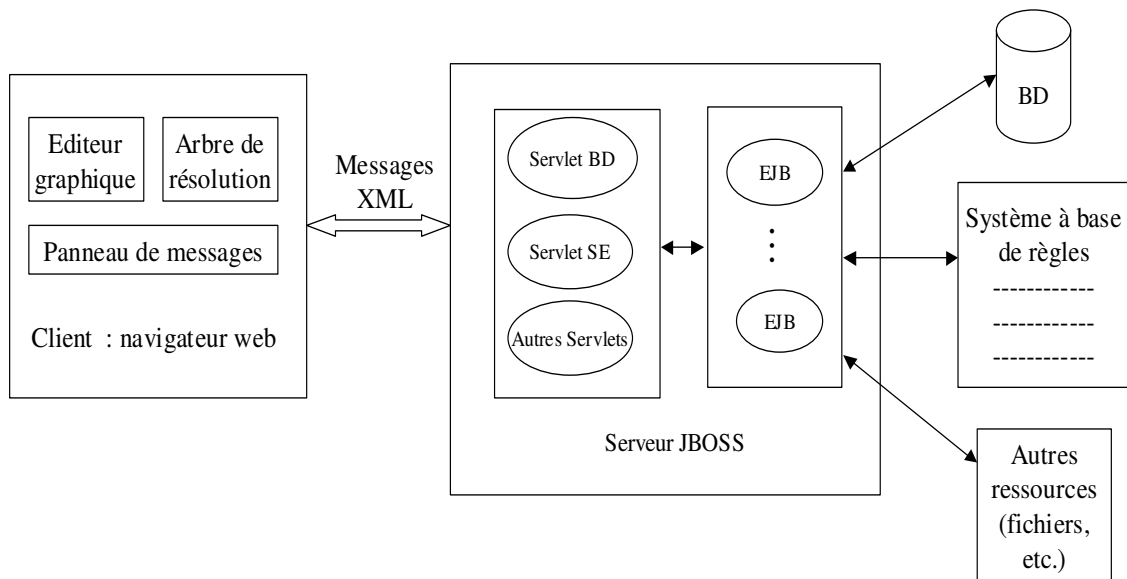


Figure 3.24 - Architecture de l'application

L'éditeur graphique (paragraphe 3.4.3) et l'arbre de résolution (paragraphe 3.4.5) sont implantés comme des applets Java [Cha00] exécutées sur un client de type navigateur web.

Ces applets peuvent communiquer entre elles, à travers des classes standards dédiées à cette tâche. On peut ainsi affecter une structure figurant sur l'éditeur graphique à une feuille de l'arbre de résolution pour le sauvegarder ou choisir une étape du processus de conception associée à une feuille de l'arbre pour afficher sur l'éditeur graphique l'état de la structure correspondant à cette étape et le modifier éventuellement pour générer une autre branche du raisonnement.

Les applets évoquées peuvent communiquer à distance, à travers des messages en XML [Ber99] avec un servlet [Hun99] dédié à la recherche dans une base de données

(servlet BD) afin d'effectuer notamment les recherches d'éléments. Elles peuvent communiquer de la même façon avec un servlet dédié au module d'expertise pour solliciter son assistance pendant la conception. Ces servlets exploitent des composants de type "EJB" [All01] qui contrôlent notamment l'accès à la base de données ; leur rôle est principalement la communication avec l'applet de l'éditeur graphique.

Les résultats des requêtes envoyées aux servlets dédiées à la base de données ou au module d'expertise s'affichent sur le panneau de messages (paragraphe 3.4.6). Ce dernier est une page web codée en langage XML. L'utilisateur est souvent amené à choisir, à partir de cette page, des éléments de la base de données à introduire dans le circuit en cours de conception ou des suggestion du module d'expertise pour les appliquer.

3.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons montré comment nous avons exploité les différentes notions issues du formalisme de caractérisation énergétique adopté afin de développer des outils d'aide à la conception en Génie Electrique.

Nous avons alors élaboré une application faisant collaborer trois outils quasi-indépendants. Il s'agit d'un outil de construction de structures qui, à l'aide d'un module d'expertise, permet d'assembler des éléments caractérisés dont les propriétés sont issues d'une base de donnée Access.

Dans ce qui suit, nous allons montrer à travers quelques exemples, comment utiliser cette panoplie d'outils dans différents processus de conception.

Chapitre 4 – Exemples d'application

Chapitre 4 – Exemples d'application

Dans ce chapitre, nous allons traiter quatre exemples de processus de conception :

- Le premier exemple est l'alimentation d'une bobine supraconductrice. C'est un exemple dans lequel la résolution se base seulement sur les propriétés de la source et de la charge.
- Le deuxième exemple décrit le processus de conception d'un scanner médical. Nous utilisons la méthode de conception par décomposition et les outils évoqués dans le chapitre précédent pour résoudre un problème décrit par les propriétés d'une source et d'une charge ainsi que différentes exigences fonctionnelles.
- Ensuite, nous traitons l'exemple d'une alimentation sans interruption (ASI) qui est un problème où on dispose d'une charge et de deux sources d'alimentation.
- Enfin, nous traitons un exemple multidisciplinaire à travers la conception d'une chaîne de conversion électromécanique réversible en puissance.

Durant le traitement de ces exemples, nous avons adopté une démarche qui consiste à récolter et classer les données nécessaires pour exprimer un problème donné afin de les analyser et les adapter en vue d'une formulation structurée d'un cahier des charges selon l'approche que nous avons adoptée. Une fois que le cahier des charges est formulé, nous montrons l'évolution du raisonnement au cours duquel nous utilisons les différentes notions dégagées dans les chapitres précédents pour résoudre le problème considéré.

4.1. Alimentation d'une bobine supraconductrice :

4.1.1. Données du problème :

Il s'agit de déterminer le circuit d'alimentation de bobines supraconductrices utilisées dans l'accélérateur de particules subatomiques LHC (Large Hardon Collider) du CERN [Bor96].

Ce dispositif permettra de produire des collisions entre des faisceaux de particules à une énergie de 14 TeV. Il utilise le tunnel de LEP (Large Electron-Position Collider) de 27 km de circonférence à 100 m sous terre.

La trajectoire des particules le long de l'anneau sera assurée par des aimants quadripolaires (386 principaux, de 3 m de long) et dipôles (1232 principaux de 15 m de long), de structures mécaniques similaires.

Les quadripôles focalisent les particules dans l'anneau de l'accélérateur alors que les dipôles courbent leur trajectoire le long de l'anneau.

Les dipôles doivent générer des champs magnétiques très élevés. Les bobines supraconductrices évoquées au début du paragraphe peuvent jouer ce rôle puisqu'elles permettent de générer à basse tension des courants, et donc des champs magnétiques, très élevés.

Considérons l'une de ces bobines et désignons la par L. Au cours du fonctionnement du LHC, la bobine supra L est alimentée par une source de tension continue dont la tension délivrée ne dépasse pas les quelques Volts. Le dispositif de conversion entre la source et la bobine doit lui permettre de générer un courant ayant l'allure illustrée dans la Figure 4.1.

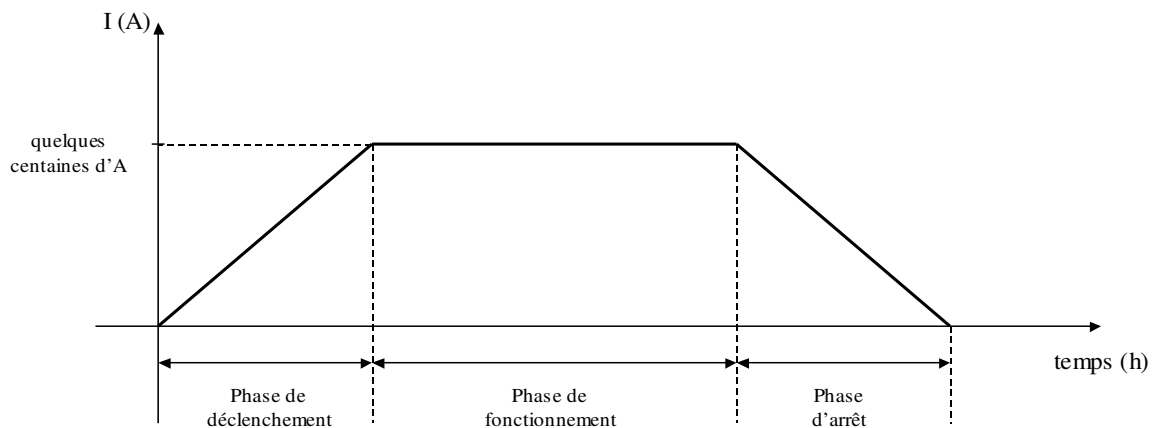


Figure 4.1 - Allure du courant de la bobine supraconductrice

4.1.2. Analyse des données :

Si on analyse le diagramme de la Figure 4.1, on constate que le courant doit varier selon trois phases :

- Phase de déclenchement : il s'agit de la phase de mise sous tension de la bobine L. La valeur du courant croît avec une pente très faible. Ainsi, la tension aux bornes de la bobine L, proportionnelle à la dérivée du courant, est donc positive.
- Phase de fonctionnement : la valeur du courant souhaité est établie, le dispositif d'alimentation doit faire en sorte qu'on garde cette valeur aussi longtemps que nécessaire (cela peut durer plusieurs heures voire quelques jours). La tension aux bornes de la bobine L est donc quasiment nulle. Cette phase permet d'alimenter la bobine afin d'appliquer un champ magnétique permettant l'accélération et la collision des particules subatomiques pour les analyser et les identifier.
- Phase d'arrêt : il s'agit de la mise hors tension de la bobine L. La valeur du courant décroît avec la même pente que la phase de déclenchement. La tension aux bornes de la bobine L est négative.

4.1.3. Formulation du cahier des charges :

Nous pouvons traduire ces spécifications par le cahier des charges suivant :

- *Source* : source de tension continue.

Elle est caractérisée par un dipôle à effort imposé présenté sur la Figure 4.2.



Figure 4.2 - *Caractérisation énergétique de la source*

L'interface de ce dipôle possède les propriétés suivantes :

- grandeur imposée par la source : tension,
 - polarité imposée par la source : positive,
 - la source impose une composante continue : oui,
 - la source impose un fondamental : non,
- grandeur acceptée par la source : courant,
 - polarité acceptée par la source : bidirectionnelle,
 - la source accepte une composante continue : oui,
 - la source accepte un fondamental : oui.

- *Charge* : inductance L qui se comporte comme une source de courant continu. Elle est caractérisée par un dipôle à flux imposé comme le montre Figure 4.3.



Figure 4.3 - *Caractérisation énergétique de la charge*

L'interface de ce dipôle possède les propriétés suivantes :

- grandeur imposée par la charge : courant,
 - polarité imposée par la charge : positive,
 - la charge impose une composante continue : oui,
 - la charge impose un fondamental : non,
- grandeur acceptée par la charge : tension,
 - polarité acceptée par la charge : bidirectionnelle,
 - la charge accepte une composante continue : oui,
 - la charge accepte un fondamental : oui.

Essayons maintenant d'utiliser les outils informatiques décrits dans le chapitre précédent pour résoudre ce problème.

Si on introduit dans l'outil de construction de structures les exigences formulées, par l'intermédiaire de l'interface de définition le cahier des charges (voir paragraphe 3.4.2), on obtient sur la feuille de travail la structure suivante :

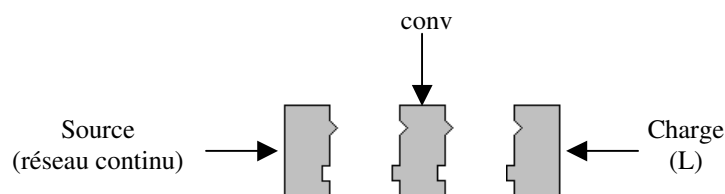


Figure 4.4 - *Caractérisation du convertisseur à concevoir*

Le convertisseur recherché (élément "conv") est un élément "Transformateur" car la source impose la tension et la charge impose le courant.

4.1.4. Résolution du problème :

Si on demande l'aide du module d'expertise (voir paragraphe 3.4.4), il indiquera que le dispositif recherché devrait contenir un élément "hacheur" ou un assemblage "onduleur / redresseur" puisque la source et la charge imposent des grandeurs continues, comme le montre le panneau de messages affiché après la demande d'aide (voir Figure 4.5).



Figure 4.5 - *Panneau de message affiché après l'appel du module d'expertise*

Dans la Figure 4.6, nous montrons la règle appliquée tel qu'elle apparaît sur l'interface de développement d'ILOG JRULES.



Figure 4.6 - La règle appliquée dans cet exemple tel qu'elle figure sur l'interface de développement d'ILOG JRULES

Cette règle, intitulée "SourceDC/ChargeDC", peut se traduire selon le format simplifié suivant :

Règle **SourceDC/ChargeDC**

```

{
  Si {
    Il existe un dipôle ?device1 qui n'impose pas de fondamental
    et un dipôle ?device2 qui n'impose pas de fondamental;
    Tel que la source du cahier des charges est ?device1
    et sa charge est ?device2;
  } alors {
    afficher_message("Il faut probablement introduire un élément
    hacheur ou un assemblage onduleur / redresseur");
  }
};

```


On peut maintenant affecter la fonction "hacheur" à l'élément "conv". Ensuite, il suffit de lancer une recherche dans la base de donnée pour trouver les éléments ayant le profil et les propriétés demandées, ainsi que des interfaces compatibles avec celles de la source et de la charge selon les règles évoquées dans le deuxième chapitre.

Le résultat de cette opération s'affiche dans le panneau de messages de la Figure 4.7.

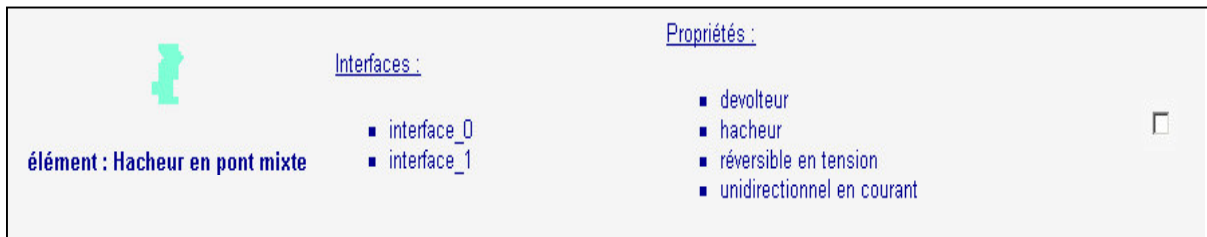


Figure 4.7 - résultats de la recherche dans la base de données

Ainsi, pour assurer l'alimentation de la bobine L en respectant l'allure de courant indiquée par la Figure 4.1, on peut imaginer une solution qui consiste à utiliser un hacheur en pont mixte, unidirectionnel en courant et réversible en tension, comme le montre le schéma de la Figure 4.8.

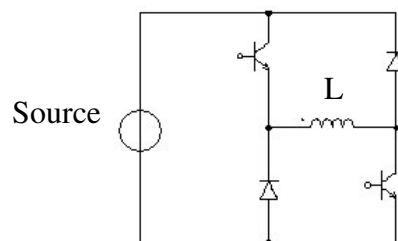


Figure 4.8 - Schéma filaire de la solution

4.2. Alimentation du tube à rayons X d'un scanner médical :

4.2.1. Données du problème :

Il s'agit d'assurer le transfert d'énergie entre le réseau de distribution alternatif et le tube à rayons X d'un scanner médical. Le cahier des charges précise les propriétés suivantes :

- Alimentation à partir du réseau alternatif triphasé (50 Hz, 400 V),
- charge continue (140 kV, courant inférieur ou égal à 200 mA),
- isolement galvanique entre la source et la charge,
- dispositif mobile,
- limitation des courants de court-circuit consécutifs à d'éventuels arcs électriques,
- caractéristiques de la charge dont l'allure est indiquée dans la Figure 4.9.

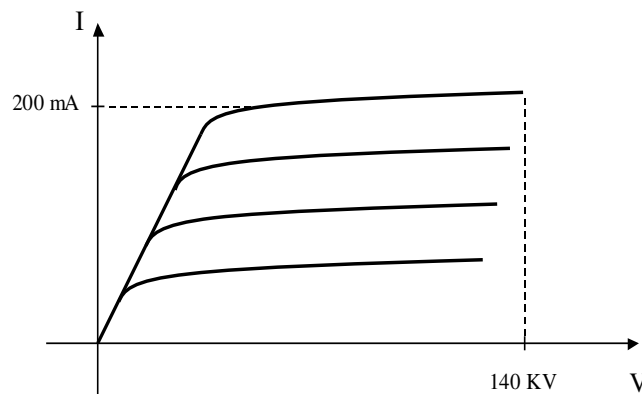


Figure 4.9 - Allure de la caractéristique courant-tension du tube à rayon X

4.2.2. Analyse des données :

L'étude des spécifications indiquées nous permet de déduire les informations suivantes :

- Le réseau alternatif est une source de tension,
- D'après les caractéristiques de la Figure 4.9 ; le scanner, qui joue le rôle de la charge, peut être considéré comme une source de courant continu,
- A part la présence d'un isolement galvanique, la structure à concevoir doit avoir un encombrement minimal pour assurer sa mobilité.
- De plus, elle doit pouvoir tenir un courant de court circuit et limiter ainsi les courants d'arcs électriques.
- la tension de sortie est supérieure en moyenne à la tension d'entrée ($V_s > V_e$).

4.2.3. Formulation du cahier des charges :

Cela nous emmène à adopter le cahier des charges suivant :

- *Source* : source de tension alternative.

Elle est caractérisée par un dipôle à effort imposé illustré dans la Figure 4.10.



Figure 4.10 - *Caractérisation énergétique de la source*

L'interface de cet élément possède les propriétés suivantes :

- grandeur imposée par la source : tension,
 - polarité imposée par la source : bidirectionnelle,
 - la source impose une composante continue : non,
 - la source impose un fondamental : oui,
- grandeur acceptée par la source : courant,
 - polarité acceptée par la source : bidirectionnelle,
 - la source accepte une composante continue : non,
 - la source accepte un fondamental : oui.
 - la source accepte les harmoniques : non.
- *Charge* : source de courant alternatif,

Elle est caractérisée par un dipôle à flux imposé comme le montre la Figure 4.11.



Figure 4.11 - *Caractérisation énergétique de la charge*

L'interface de cet élément possède les propriétés suivantes :

- grandeur imposée par la charge : courant,
 - polarité imposée par la charge : positive,
 - la charge impose une composante continue : oui,
 - la charge impose un fondamental : non,

- grandeur acceptée par la charge : tension,
 - polarité acceptée par la charge : positive,
 - la charge accepte une composante continue : oui,
 - la charge accepte un fondamental : non.
- *Propriétés fonctionnelles* :
 - isolement galvanique,
 - encombrement minimal,
 - tenu de courant de court-circuit,
 - $V_s > V_e$.

La solution recherchée, comme le montre la Figure 4.12, est le macro-élément "Elem" de type "Transformateur", puisque la source impose le tension et la charge impose le courant.

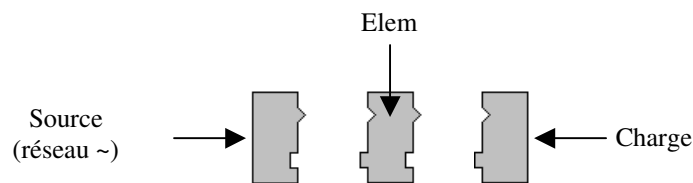


Figure 4.12 - *Caractérisation de la structure à concevoir*

4.2.4. Résolution du problème :

L'analyse du cahier des charges par le module d'expertise nous indique que cette solution doit prendre en compte les considérations suivantes :

- la structure doit contenir une fonction "redresseur" puisque la source est alternative et la charge est continue,
- on doit introduire un élément assurant l'isolement galvanique, tout en limitant l'encombrement du dispositif,
- il faut introduire un élément dévolteur pour assurer la tenue d'un courant de court-circuit,
- on doit intégrer un élément survolteur puisque la tension de sortie est supérieure en moyenne à la tension d'entrée.

Ensuite, il faut faire apparaître ces fonctionnalités, avec l'aide apportée par le module d'expertise et la base de donnée, au cours des décompositions successives du

macro-élément représentant la solution recherchée en blocs élémentaires dont les propriétés figurent dans la base de données.

Une des solutions possibles consiste d'abord à introduire entre les interfaces de "Elem" une interface à courant (flux) imposé alternatif (voir Figure 4.13) et à affecter les fonctions "redresseur" et "survolteur" à l'élément "Ge1" et les autres fonctions à "Gf1".

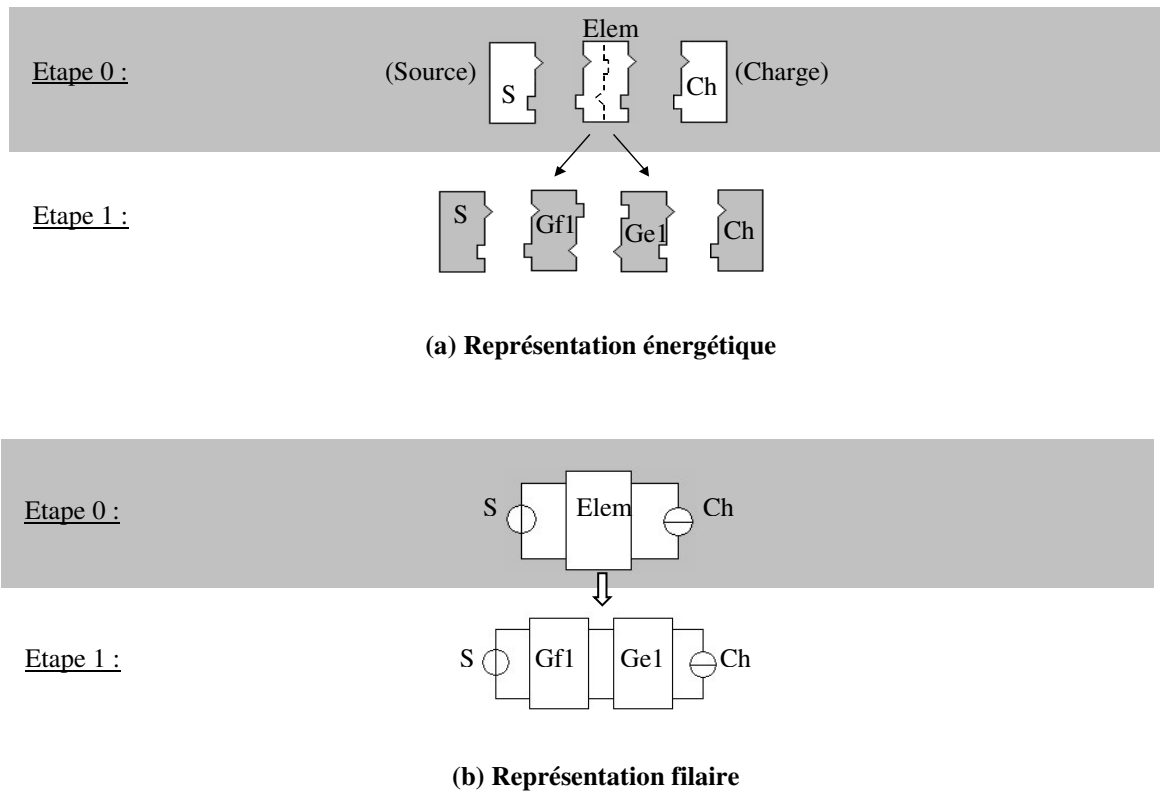


Figure 4.13 – Exemple 2 : étapes 0 et 1

Pour décomposer l'élément "Ge1" par exemple, on peut faire appel au module d'expertise, pour lui demander de proposer les propriétés de l'interface qui va permettre cette opération. Dans ce cas, ce module nous suggère d'introduire une interface à courant imposé continu (voir Figure 4.14), puisque la structure à concevoir doit contenir un dispositif de redressement ; et pour intégrer cette fonction il faut introduire un élément de type "Transformateur" possédant une interface "d'entrée" continue.

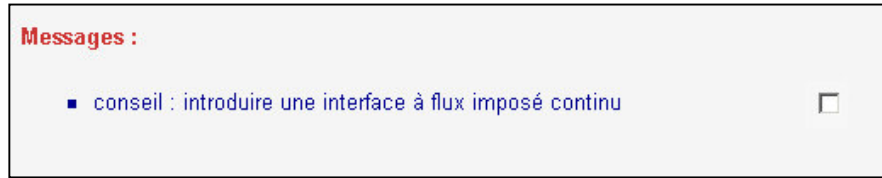


Figure 4.14 – Suggestion du module d'expertise pour la décomposition d'un élément

Ainsi, on peut "éclater" l'élément "Ge1" en introduisant une interface à courant imposé continu (voir Figure 4.15) et en réservant les fonctions "redresseur" et "survolteur" à l'élément "Tr1".

Une requête dans la base de donnée permet de caractériser "Tr1" comme un redresseur à diodes et "Ge2" comme une capacité parallèle.

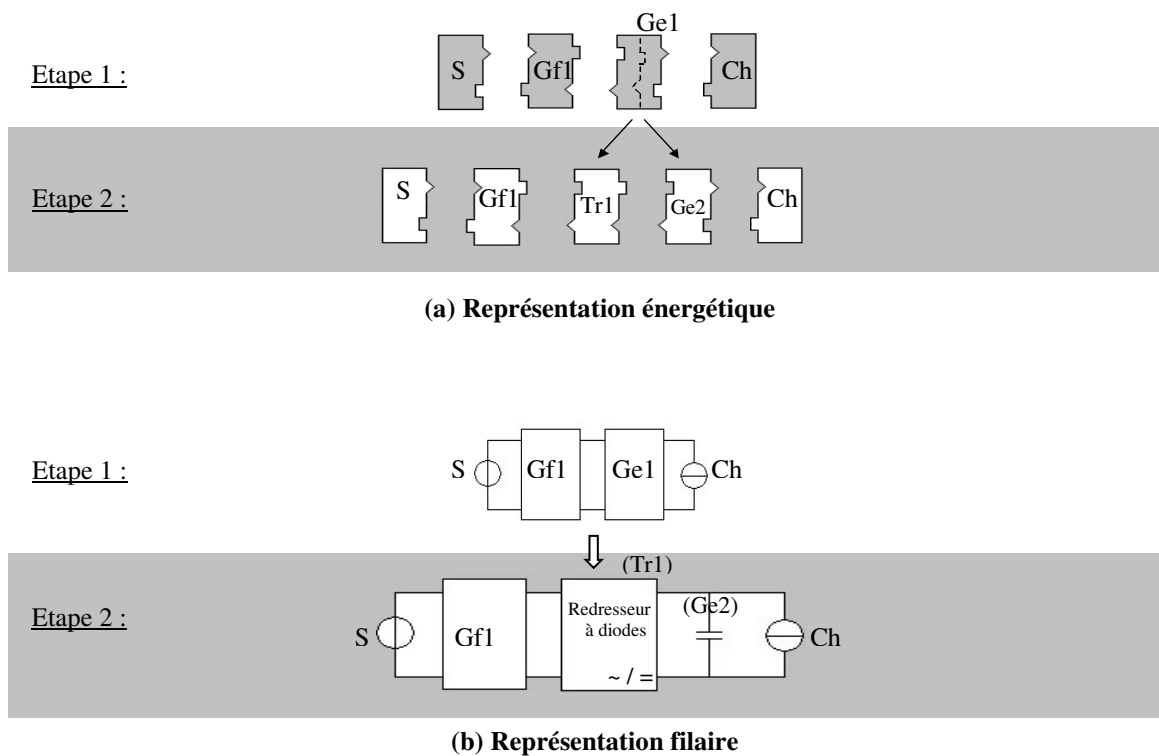


Figure 4.15 – Exemple 2 : étapes 1 et 2

Ensuite, le processus de décomposition peut se poursuivre comme suit :

- On introduit dans la structure un transformateur bobiné HF attaqué en courant (élément de type Transformateur "Tr2") pour réaliser l'isolement galvanique entre la source et la charge tout en assurant un encombrement minimal du dispositif. Cet

élément (ainsi que le gyrateur courant-tension Gf2) résulte de la décomposition de l'élément "Gf1" par l'intermédiaire d'une interface à courant imposé alternatif (voir Figure 4.16).

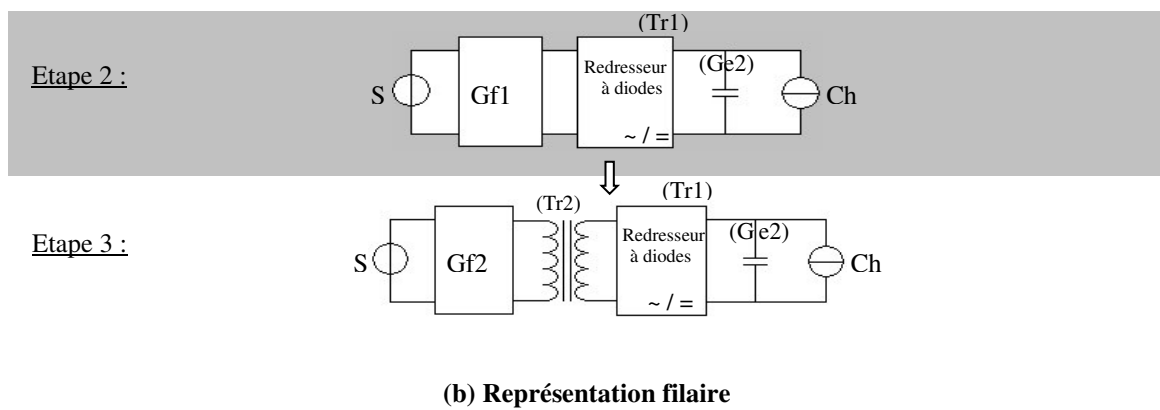
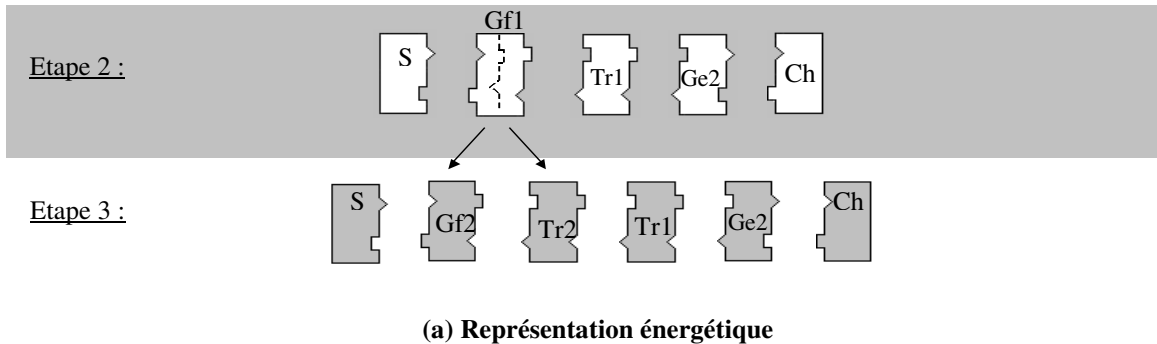


Figure 4.16 - Exemple 2 : étapes 2 et 3

Dans le cas du transformateur HF, l'aide contextuelle de la base de donnée interpelle l'utilisateur sur le fait qu'il faut élever la fréquence à "l'entrée" du transfo comme le montre la Figure 4.17.

Nom de l'élément : transformateur HF

Caractérisation énergétique :

classe : Transformateur

domaine de validité fréquentiel : tout

auteur : demni

date de création : 08/01/2001

Commentaire :

Les interfaces d'échange d'énergie de cet élément :

interface 1 | interface 2

Domaine de l'interface électrique

grandeur imposée Flux

impose polarité indéfini

impose comp. continue oui

impose fondamental oui

impose harmoniques indéfini

grandeur acceptée Effort

accepte polarité bidirectionnel

accepte comp. continue non

accepte fondamental oui

accepte harmoniques oui

Propriétés fonctionnelles :

propriétés	
isolement galvanique	
encombrement minimal	

Caractéristique propre : rapport de transformation

Règles de bon usage :

Les grandeurs d'entrée de cet élément doivent avoir une fréquence élevée.
Il faut probablement placer un dispositif élévateur de fréquence à son entrée.

Aide contextuelle

Figure 4.17 - Propriétés du transformateur HF

On peut alors attribuer la propriété fonctionnelle d'élévation de la fréquence à l'élément "Gf2", ainsi que la propriété "dévolteur" déduite avant d'entamer le processus de décomposition.

- En décomposant l'élément "Gf2" par l'intermédiaire d'une interface à courant imposé alternatif (voir Figure 4.18), on obtient l'élément Transformateur "Tr3", auquel on attribut les propriétés "élévateur de fréquence" et "dévolteur" ; ainsi que le gyrateur effort-flux "Gf3" qui peut être considéré comme un filtre passe haut LC série, permettant d'éliminer toute composante continue à "l'entrée" du transformateur HF.

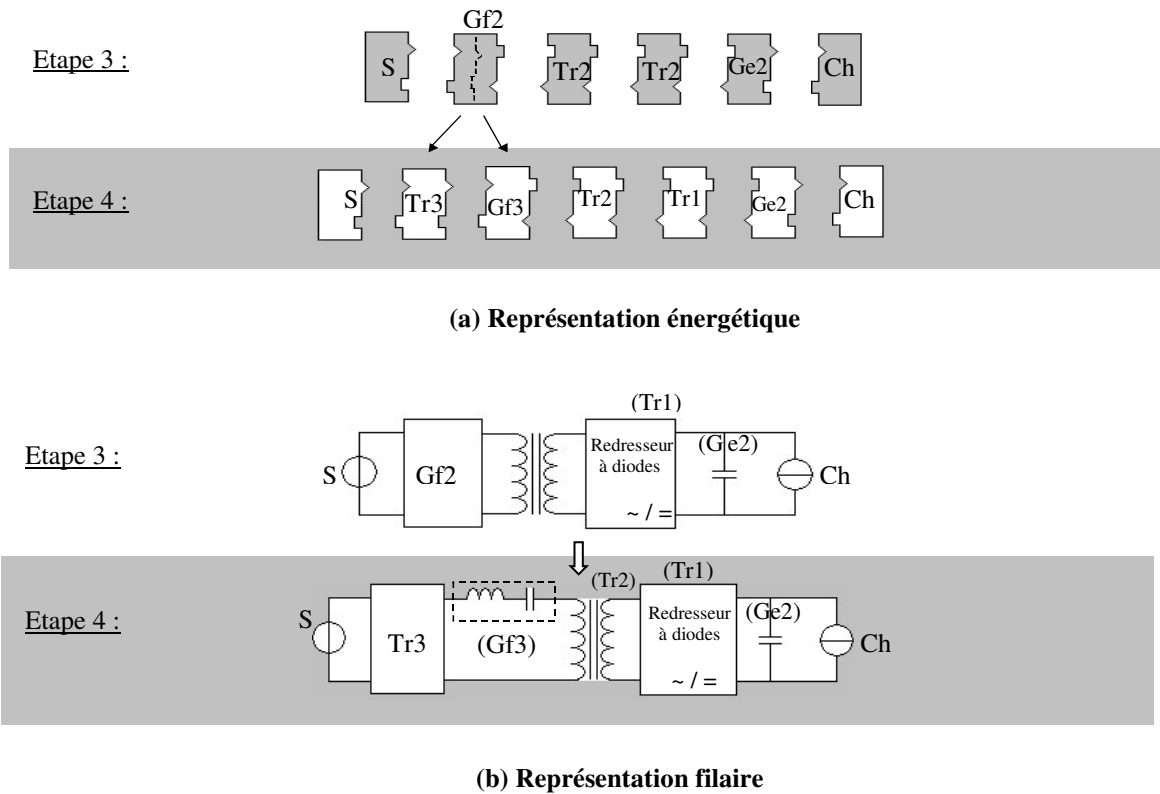


Figure 4.18 - Exemple 2 : étapes 3 et 4

- On "éclate" l'élément "Tr3" en introduisant une interface à tension imposée continue (voir Figure 4.19) pour obtenir les éléments de type Transformateur "Tr4" et "Tr5". On peut attribuer la fonction "élévateur de fréquence" à l'élément "Tr5". Ce dernier peut être identifié comme un onduleur MLI, qui est un élément dévolteur permettant de satisfaire l'exigence de tenue de courant de court-circuit. Dans le cas de l'introduction de l'onduleur MLI dans la structure, l'analyse de cette dernière par le module d'expertise va nous indiquer qu'il faut introduire un élément "redresseur" pour pouvoir obtenir une tension continue à l'entrée de l'onduleur MLI.

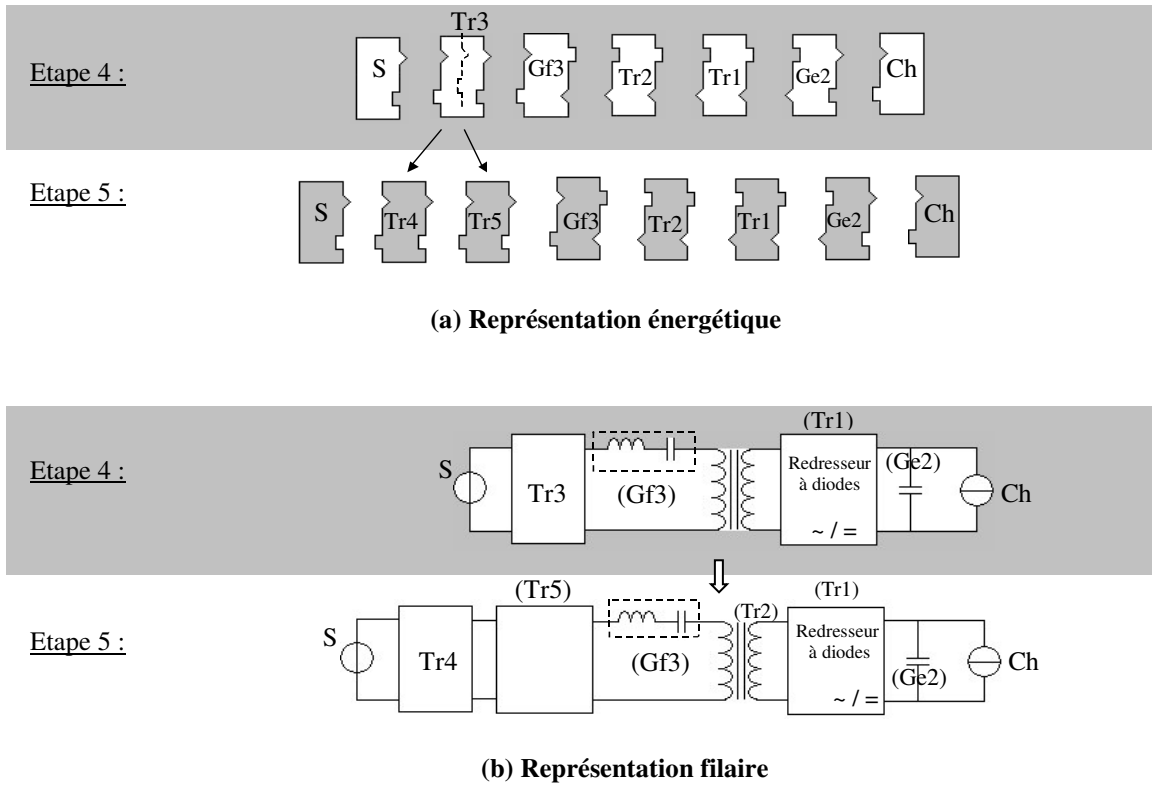
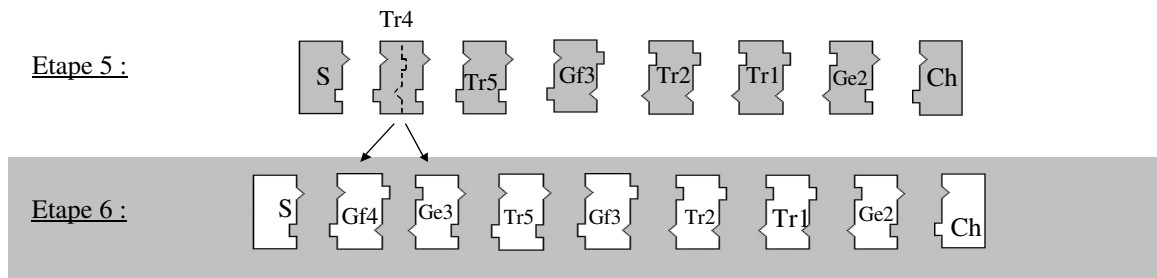
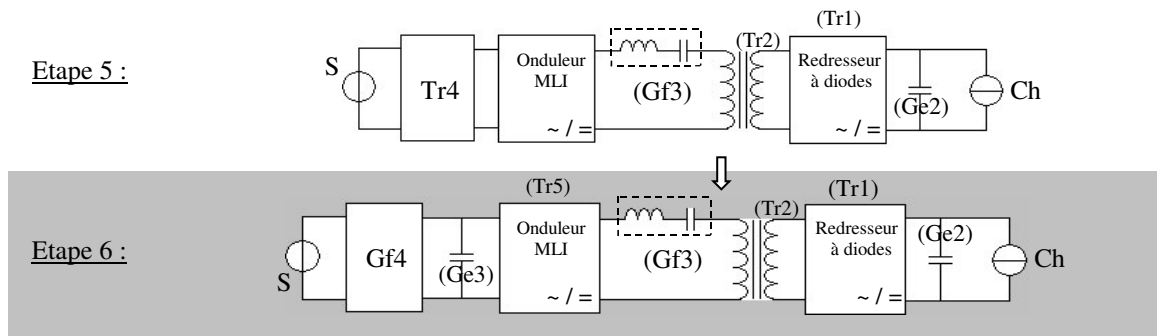


Figure 4.19 - Exemple 2 : étapes 4 et 5

- On peut décomposer l'élément "Tr4" à l'aide d'une interface à courant imposé continu (voir Figure 4.20) pour obtenir le gyrateur effort-flux "Gf4" et le gyrateur flux-effort "Ge3" qui peut être considéré comme une capacité parallèle.



(a) Représentation énergétique



(b) Représentation filaire

Figure 4.20 - Exemple 2 : étapes 5 et 6

- "L'éclatement" de "Gf4" par une interface à courant imposé alternatif (voir Figure 4.21) engendre un élément gyrateur effort-flux "Gf5" et un autre de type Transformateur "Tr6". Le premier peut être identifié comme une inductance et le deuxième comme un redresseur MLI qui permet d'éliminer les harmoniques de courant au niveau du réseau.

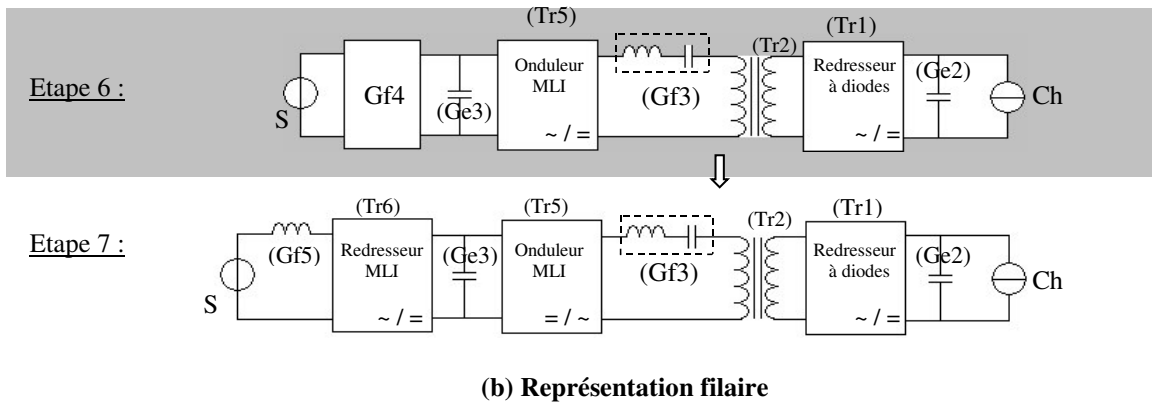
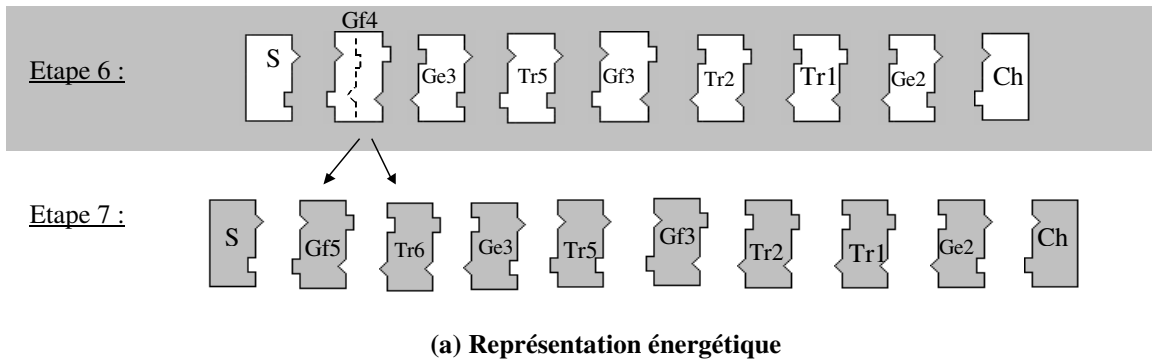


Figure 4.21 - Exemple 2 : étapes 6 et 7

Ainsi, nous obtenons le dispositif suivant :

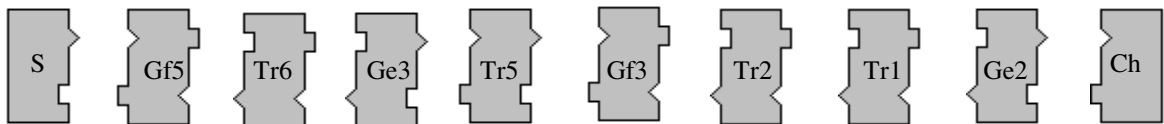


Figure 4.22 - Caractérisation énergétique du circuit d'alimentation du tube à rayons X d'un scanner médical

Le schéma filaire de la structure obtenue est présenté dans la figure suivante.

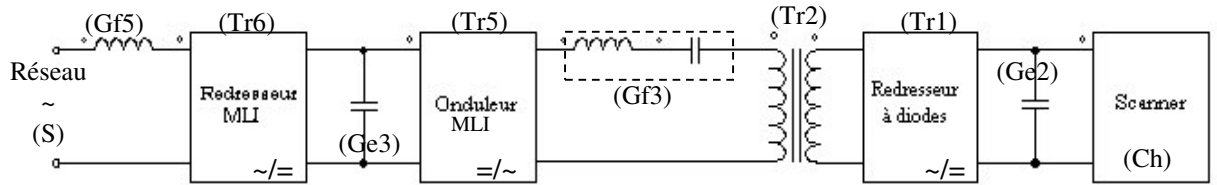


Figure 4.23 - Schéma filaire du circuit d'alimentation du tube à rayons X d'un scanner médical

Dans ce qui suit, nous présentons le récapitulatif du processus de conception du circuit d'alimentation du tube à rayons X d'un scanner médical :

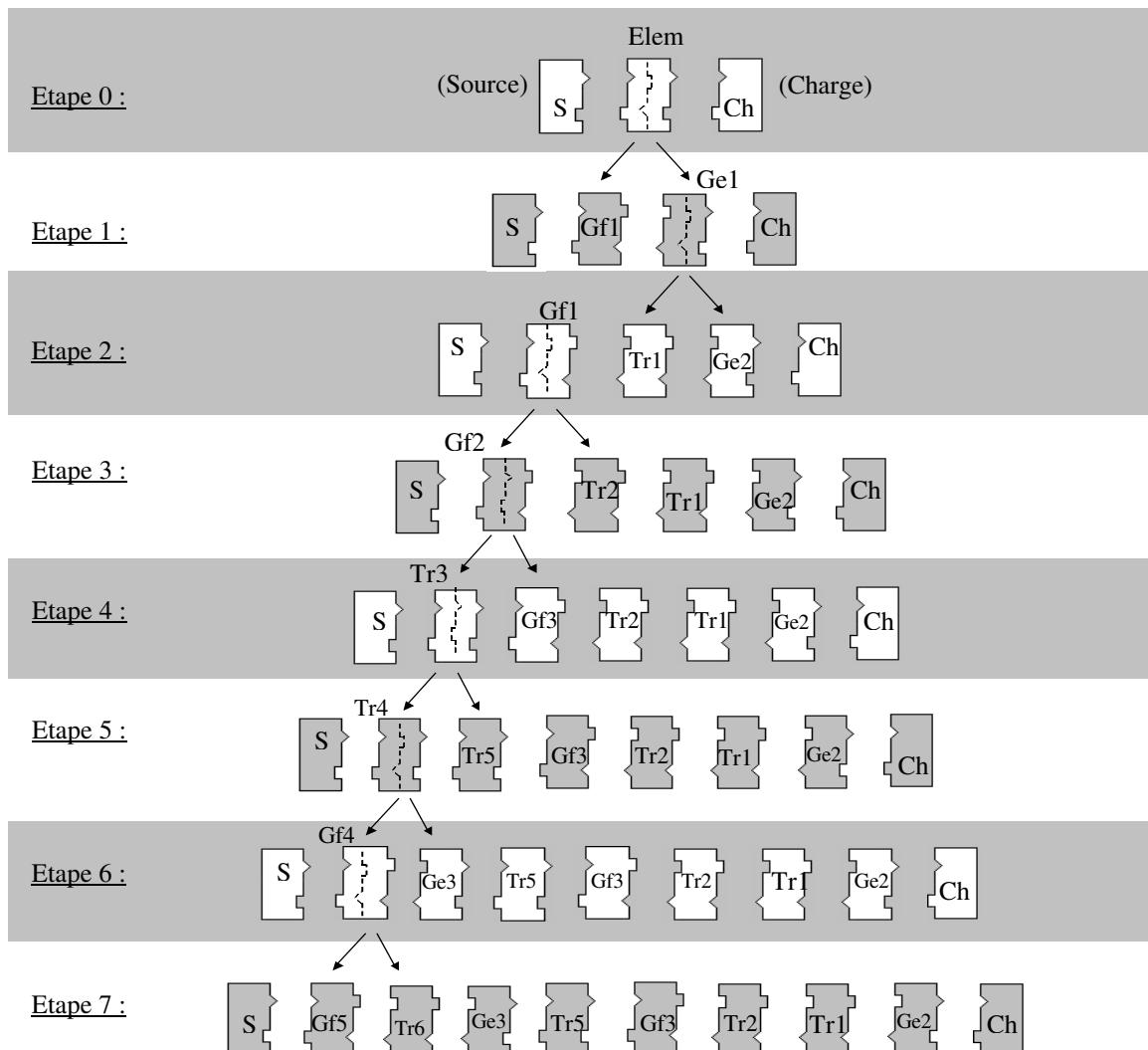


Figure 4.24 - Processus de conception d'une alimentation pour un tube à rayons X d'un scanner médical

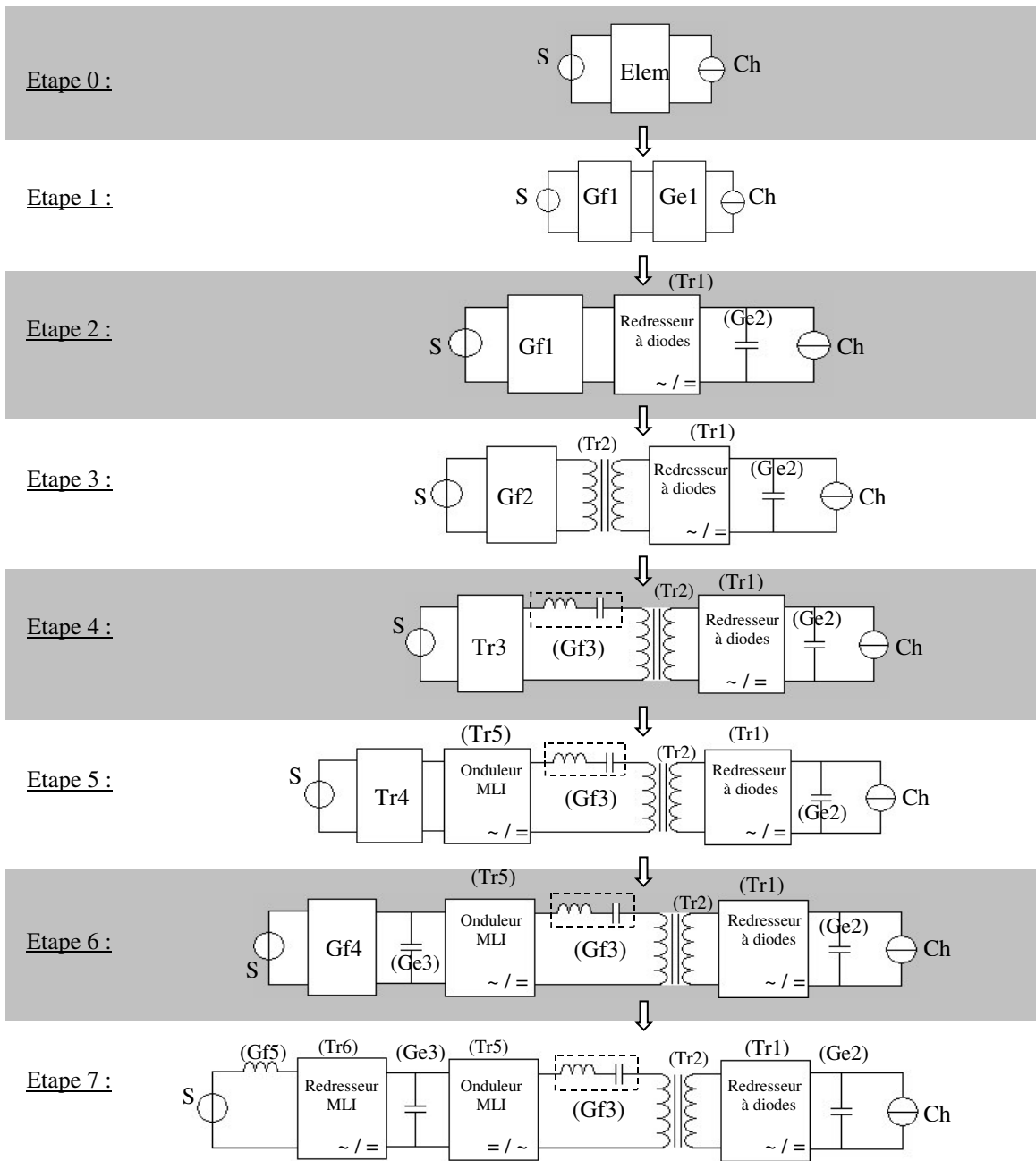


Figure 4.25 - *Processus de conception d'une alimentation pour un tube à rayons X d'un scanner médical : évolution du schéma filaire de la structure*

4.3. Alimentation sans interruption (ASI) :

4.3.1. Données du problème :

Ce problème consiste à développer un circuit d'alimentation permettant d'alimenter sans discontinuité une charge quelconque à partir du réseau alternatif (comme par exemple l'alimentation PULSAR PSX20 de Merlin-Gérin [Lad03]). La tension aux bornes de cette charge doit être parfaitement sinusoïdale. En cas d'interruption au niveau du réseau, l'alimentation de la charge sera assurée à partir d'une batterie d'accumulateurs (voir Figure 4.26).

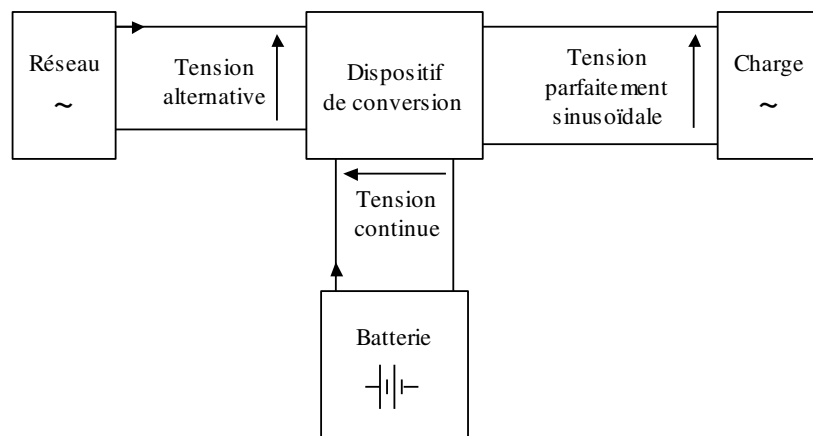


Figure 4.26 - Schéma synoptique de l'ASI

Les caractéristiques du dispositifs sont :

- Alimentation par réseau alternatif monophasé (50 Hz, 230 V).
- Alimentation en cas d'interruption du réseau par une batterie d'accumulateurs avec une tension d'une centaine de Volts au maximum.
- Une tension de sortie parfaitement sinusoïdale possédant les mêmes valeurs que celles du réseau.
- Un courant d'entrée réseau sinusoïdal.
- Isolement galvanique et encombrement minimal.

4.3.2. Analyse des données :

Le problème posé est assez particulier, puisqu'on dispose de deux sources d'alimentation (au lieu d'une seule) et d'une charge. Pour le résoudre, nous proposons de le diviser en deux parties :

- Une première partie traitant la conversion d'énergie entre le réseau alternatif et la charge.

Dans ce cas on a une source et une charge alternatives, avec des tensions d'entrée et de sortie égales en valeur efficace ($V_s = V_e$).

- Une deuxième partie traitant la conversion d'énergie entre la batterie d'accumulateurs et la charge.

Dans ce cas on a une source continue et une charge alternative, avec une tension de sortie supérieure en moyenne à celle de l'entrée ($V_s > V_e$).

4.3.3. Formulation du cahier des charges :

□ **Première partie :** la source considérée est le réseau alternatif monophasé.

- *Source :* source de tension alternative.

Elle est caractérisée par un dipôle à effort imposé illustré sur la Figure 4.27.



Figure 4.27 - Caractérisation énergétique de la première source

L'interface de ce dipôle possède les propriétés suivantes :

- grandeur imposée par la source : tension,
 - polarité imposée par la source : bidirectionnelle,
 - la source impose une composante continue : non,
 - la source impose un fondamental : oui,
- grandeur acceptée par la source : courant,
 - polarité acceptée par la source : bidirectionnelle,
 - la source accepte une composante continue : non,
 - la source accepte un fondamental : oui,
 - la source accepte les harmoniques : non.

- *Charge* : source de courant alternatif,
Elle est caractérisée par un dipôle à flux imposé illustré sur la Figure 4.28.



Figure 4.28 - *Caractérisation énergétique de la charge*

L'interface de ce dipôle possède les propriétés suivantes :

- grandeur imposée par la charge : courant,
 - polarité imposée par la charge : bidirectionnelle,
 - la charge impose une composante continue : non,
 - la charge impose un fondamental : oui,
 - grandeur acceptée par la charge : tension,
 - polarité acceptée par la charge : bidirectionnelle,
 - la charge accepte une composante continue : non,
 - la charge accepte un fondamental : oui,
 - la charge accepte les harmoniques : non.
 - *Propriétés fonctionnelles* :
 - isolement galvanique,
 - encombrement minimal,
 - $V_s = V_e$.
- **Deuxième partie** : la source considérée est la batterie d'accumulateurs.
- *Source* : source de tension continue.
Elle est caractérisée par un dipôle à effort imposé illustré sur la Figure 4.29.



Figure 4.29 - *Caractérisation énergétique de la deuxième source*

L'interface de ce dipôle possède les propriétés suivantes :

- grandeur imposée par la source : tension,
 - polarité imposée par la source : positive,
 - la source impose une composante continue : oui,
 - la source impose un fondamental : non,
- grandeur acceptée par la source : courant,
 - polarité acceptée par la source : bidirectionnelle,
 - la source accepte une composante continue : oui,
 - la source accepte un fondamental : non.
- *Charge* : la même charge que celle présentée dans la première partie.
- *Propriétés fonctionnelles* :
 - $V_s > V_e$.

4.3.4. Résolution du problème :

Considérons d'abord le premier sous-problème qui consiste à assurer le transfert de puissance entre le réseau et la charge.

Dans ce cas, si on introduit la première partie des spécifications dans l'outil de construction de structures et si on l'analyse avec le module d'expertise, ce dernier va indiquer que le dispositif recherché doit probablement intégrer au moins un élément redresseur et un autre onduleur puisque la source et la charge sont alternatives ; sans oublier d'introduire dans la structure globale un élément assurant l'isolement galvanique (en tenant compte de l'exigence d'un encombrement minimal).

Ensuite, si on se réfère à la deuxième partie du cahier des charges, qui consiste à assurer le transfert de puissance entre la batterie et la charge, le module d'expertise va suggérer que la structure doit contenir :

- un élément survolteur puisque la tension de la charge est en moyenne supérieure à celle de la batterie,

- un élément onduleur puisque la source considérée est continue et la charge est alternative.

Maintenant, on va essayer de préparer la structure initiale du raisonnement pour pouvoir appliquer la méthode de construction par décomposition successive. La réalisation de cette étape préliminaire s'effectuera "manuellement", car notre application ne prend pas pour le moment en charge ce type de problème.

- **Etape préliminaire :**

Durant cette étape, nous essayons d'introduire la batterie dans la structure à concevoir, sans tenir compte de son dispositif de recharge, de façon à ce que les éléments indéterminés de la structure soient des quadripôles qui peuvent être identifiés par décomposition. C'est ce qu'on décrit dans la Figure 4.30.

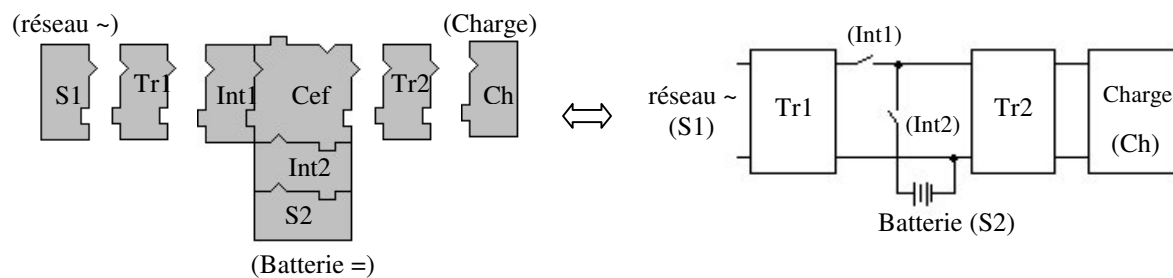


Figure 4.30 – *Structure initiale*

La structure initiale de la Figure 2.30 illustre notamment l'association du réseau "S1", en passant par l'élément de type Transformateur "Tr1", à l'interrupteur série "Int1". Quant à la batterie "S2", elle est associée à l'interrupteur série "Int2".

Ensuite, l'ensemble batterie "S2" + interrupteur "Int2" est associé à la charge, à travers l'élément de type Transformateur "Tr1", grâce à la connexion équi-flux "Cef".

Les interrupteurs "Int1" et "Int2" fonctionnent de manière complémentaire. En effet, en fonctionnement normal, "Int1" (alimentation à partir du réseau) doit être fermé et "Int2" (alimentation à partir de la batterie) doit être ouvert. Dans ce cas, c'est le réseau qui assure l'alimentation de la charge. En cas de problème au niveau du réseau, "Int1" doit être ouvert et "Int2" doit être fermé, pour assurer la continuité de l'alimentation de la charge à partir de la batterie.

Maintenant, pour déterminer la structure de l'ASI, il suffit d'identifier les éléments "Tr1" et "Tr2" en procédant par décomposition.

- **Processus de décomposition :**

Dans ce processus, nous essayons de déterminer la structure de l'ASI, en partant du schéma initial illustré dans la Figure 4.30 et en décomposant les éléments "Tr1" et "Tr2".

Les différentes étapes de décomposition ont été obtenues grâce aux opérations suivantes :

- Lors de l'étape de départ (voir Figure 2.30), l'élément "Tr1" qui possède interface "d'entrée" alternative et une interface de "sortie" continue peut être identifié comme un redresseur à diodes.
- La décomposition de l'élément de type Transformateur "Tr2" par introduction d'une interface à courant imposée continue (voir Figure 4.31) permet d'obtenir le gyrateur flux-effort "Ge1" et le gyrateur flux "Gf1". Ce dernier peut être identifié comme une inductance série.

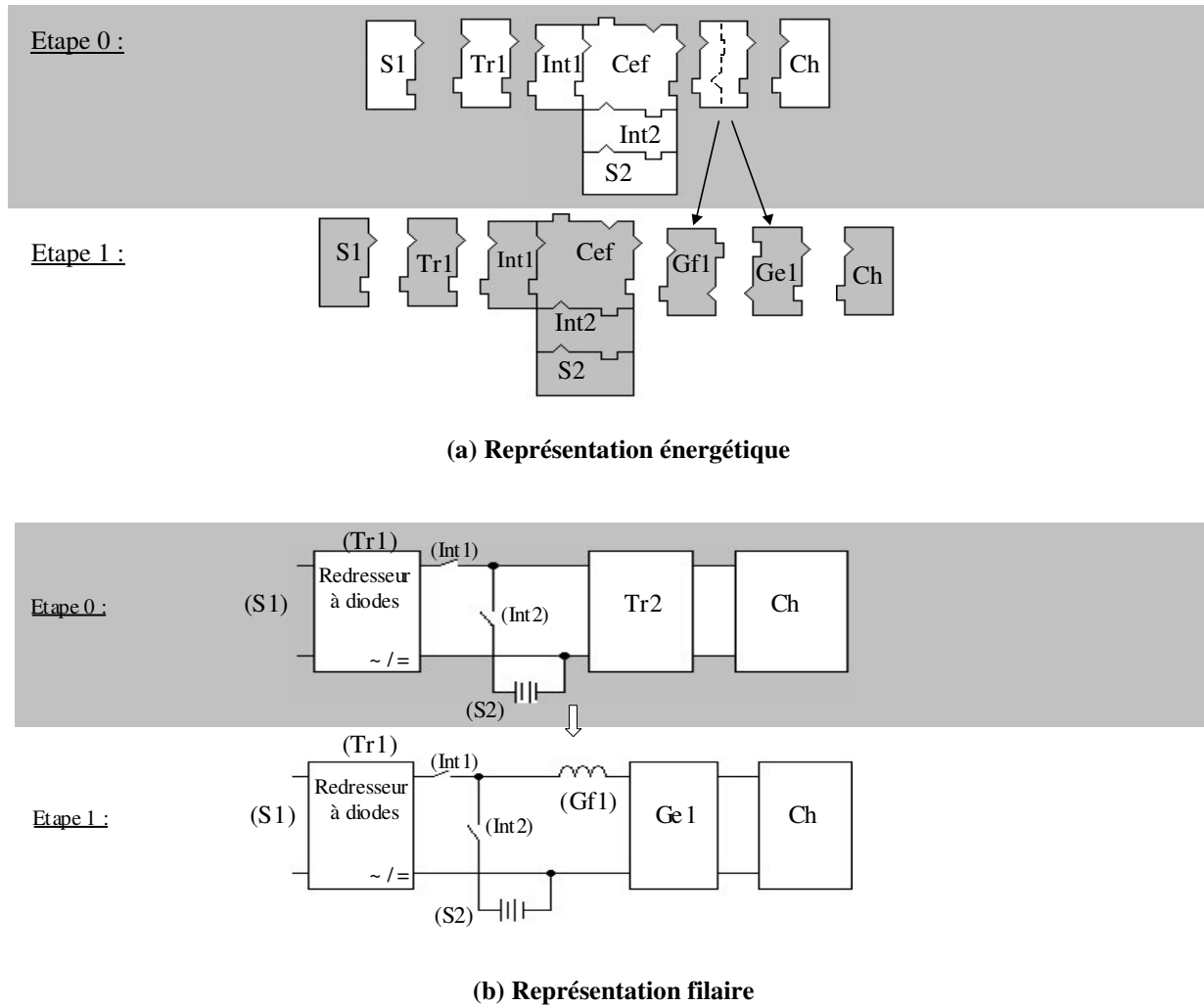
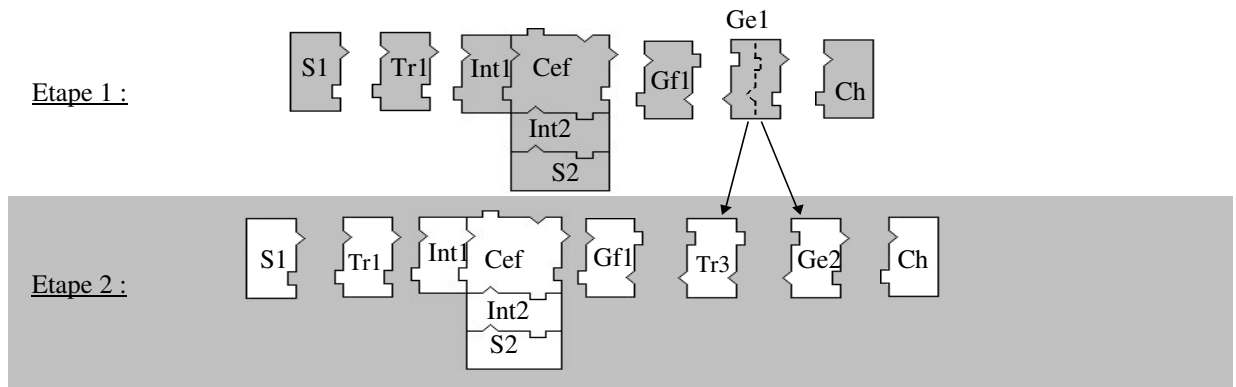
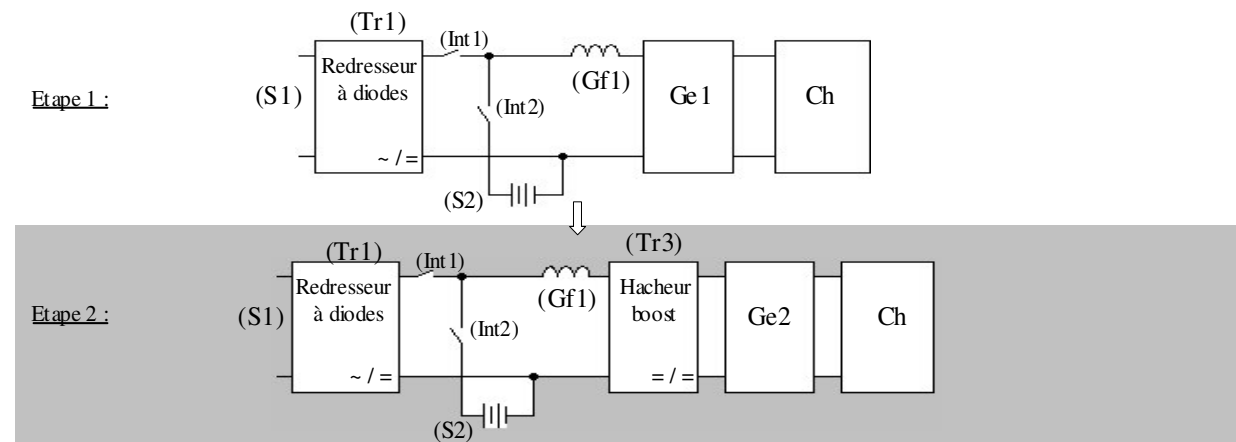


Figure 4.31 - Exemple 3 : étapes 0 et 1

- La décomposition par une interface à tension imposée continue de l'élément "Ge1" (voir Figure 4.32) engendre un gyrateur flux-effort "Ge2", et un élément de type Transformateur "Tr3" qui peut être considéré comme un hacheur boost. On introduit ainsi l'élément survolteur évoqué dans l'analyse de la deuxième partie des spécifications.



(a) Représentation énergétique



(b) Représentation filaire

Figure 4.32 - Exemple 3 : étapes 1 et 2

- Pour assurer l'isolement galvanique en tenant compte de l'encombrement minimal, on peut par exemple décomposer d'abord l'élément "Ge2" (voir Figure 4.33) par une interface à tension imposée alternative pour obtenir le gyrateur flux-effort "Ge3" ainsi que l'élément de type Transformateur "Tr3", identifié comme un onduleur de courant.

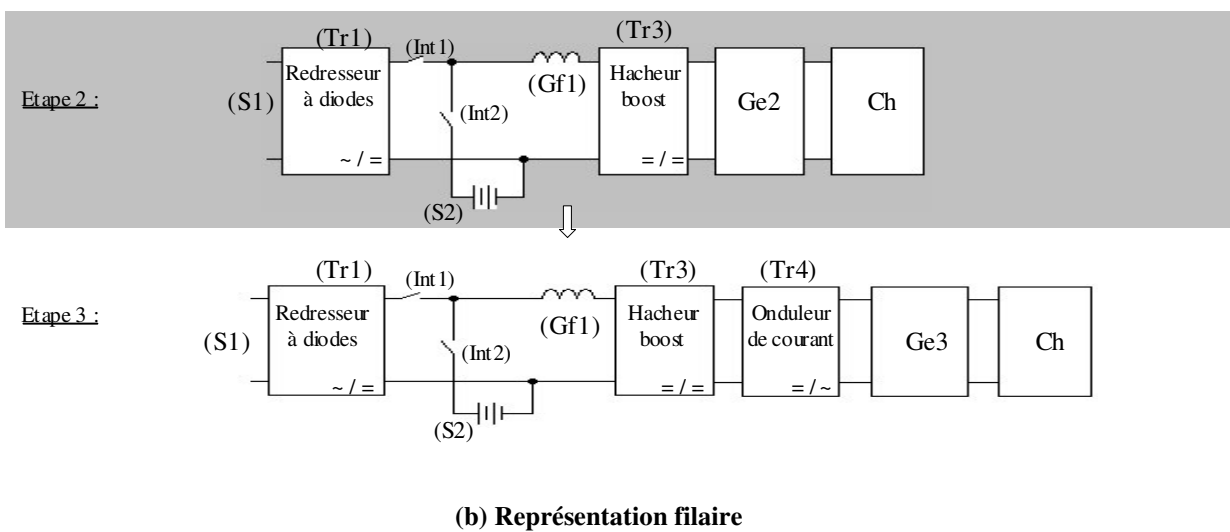
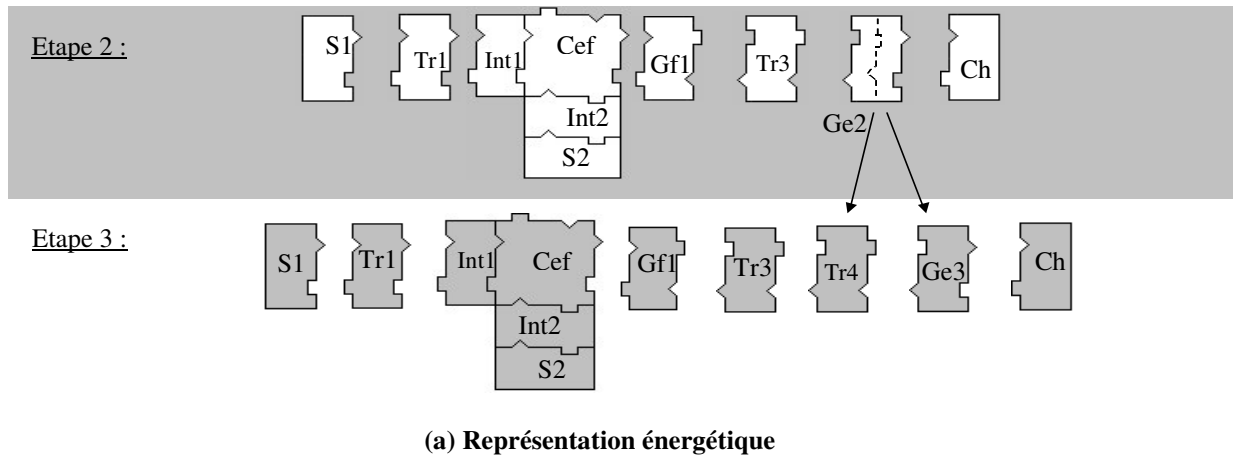
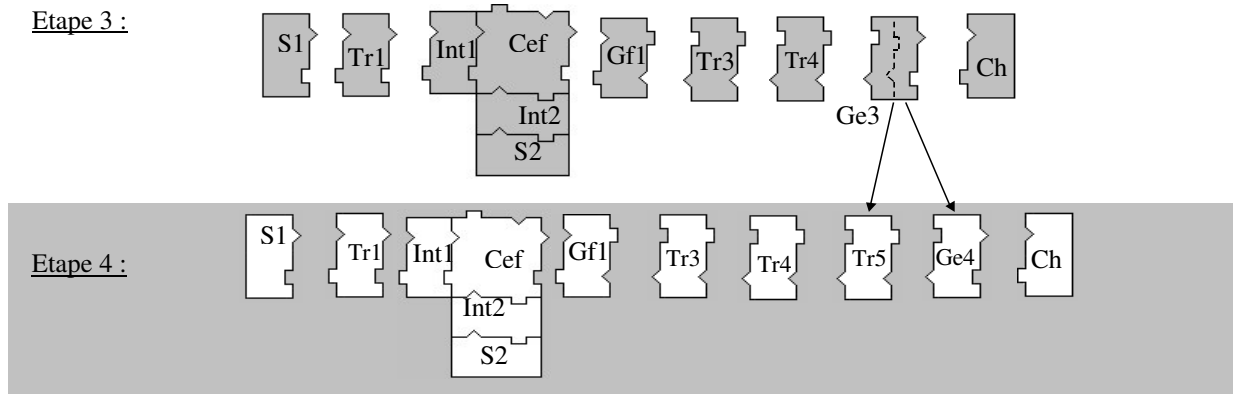
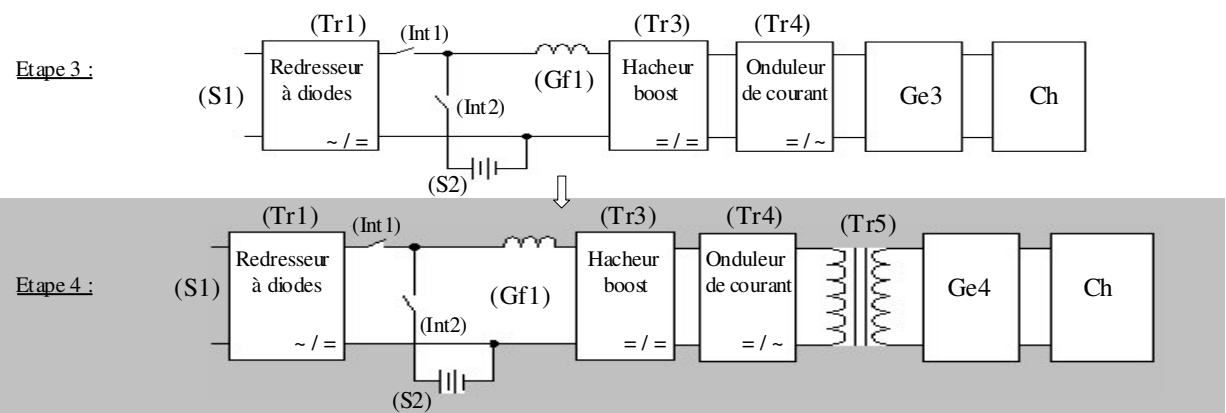


Figure 4.33 - Exemple 3 : étapes 2 et 3

On éclate ensuite "Ge2" en introduisant une interface à tension imposée alternative (voir Figure 4.34) pour obtenir le gyrateur flux-effort "Ge4" et l'élément Transformateur "Tr4" qu'on peut considérer comme un transformateur HF.



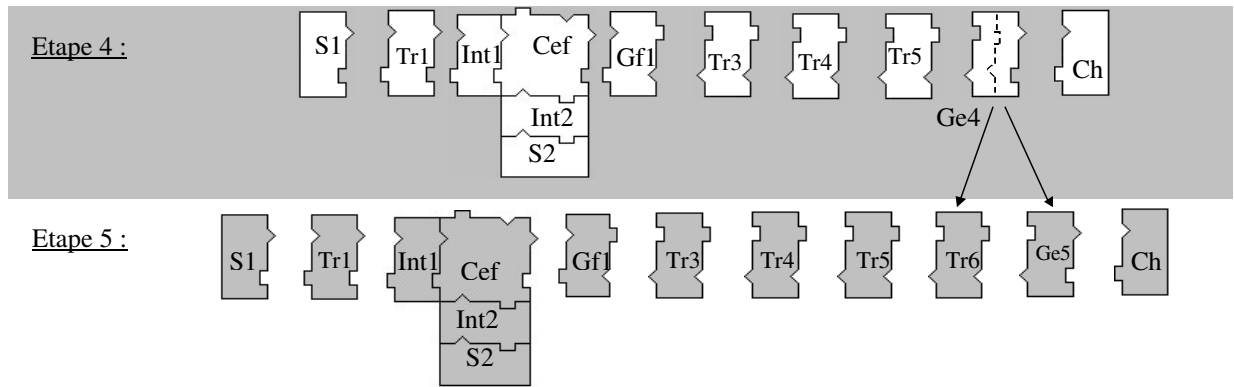
(a) Représentation énergétique



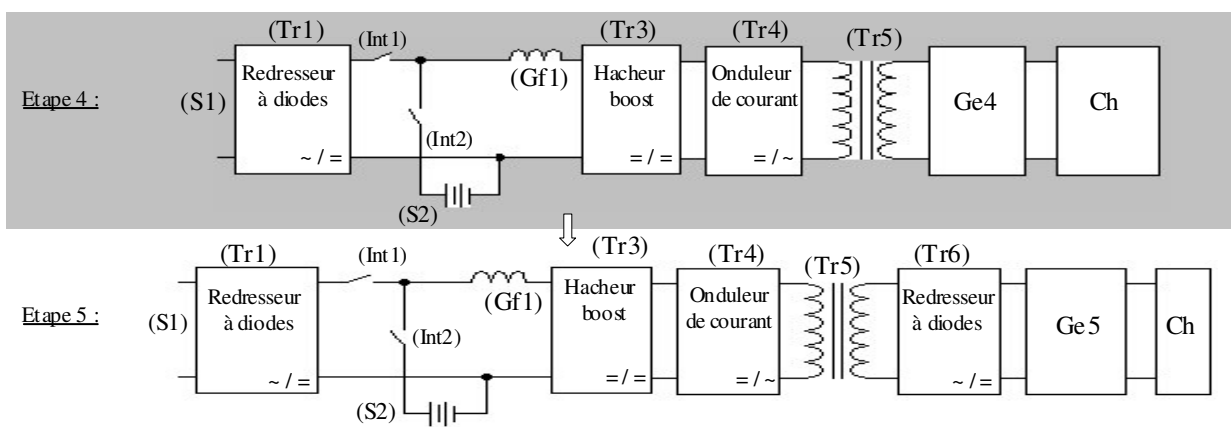
(b) Représentation filaire

Figure 4.34 - Exemple 3 : étapes 3 et 4

Enfin, on peut décomposer "Ge4" par une interface à tension imposée continue (voir Figure 4.35) pour obtenir un autre gyrateur effort-flux noté "Ge5" et l'élément Transformateur "Tr5" identifié comme un redresseur à diodes.



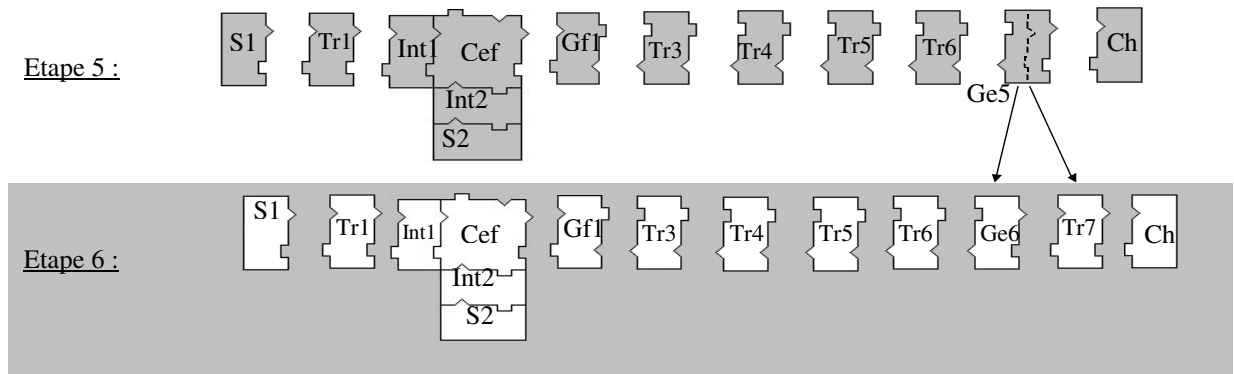
(a) Représentation énergétique



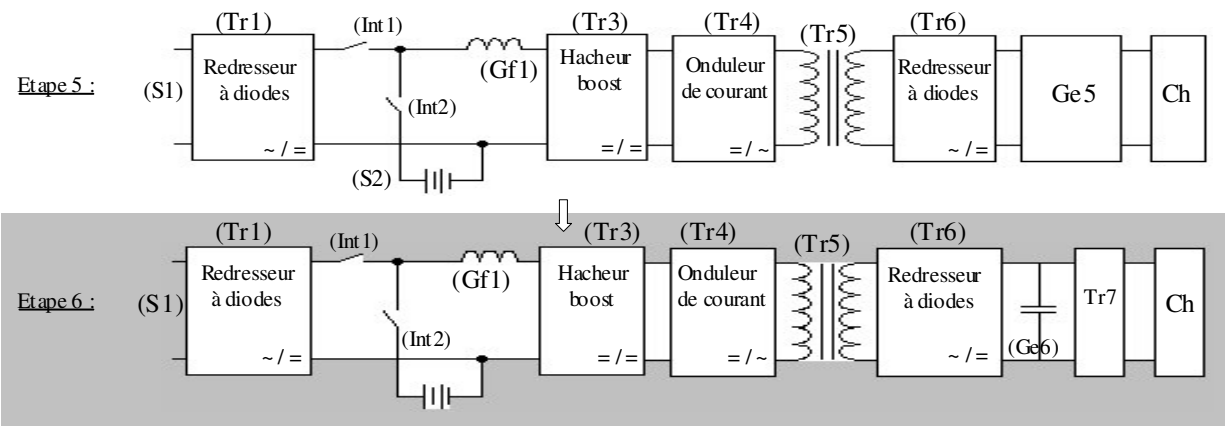
(b) Représentation filaire

Figure 4.35 - Exemple 3 : étapes 4 et 5

- "L'éclatement" de "Ge5" par l'intermédiaire d'une interface à tension imposée continue (voir Figure 4.36) permet d'obtenir l'élément Transformateur "Tr6" et le gyrateur flux-effort "Ge6" qu'on peut considérer comme une capacité parallèle.



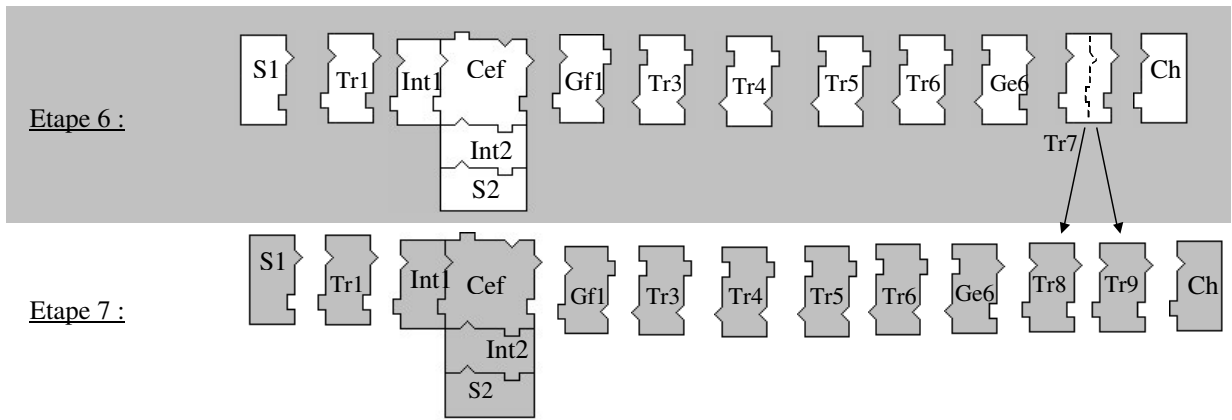
(a) Représentation énergétique



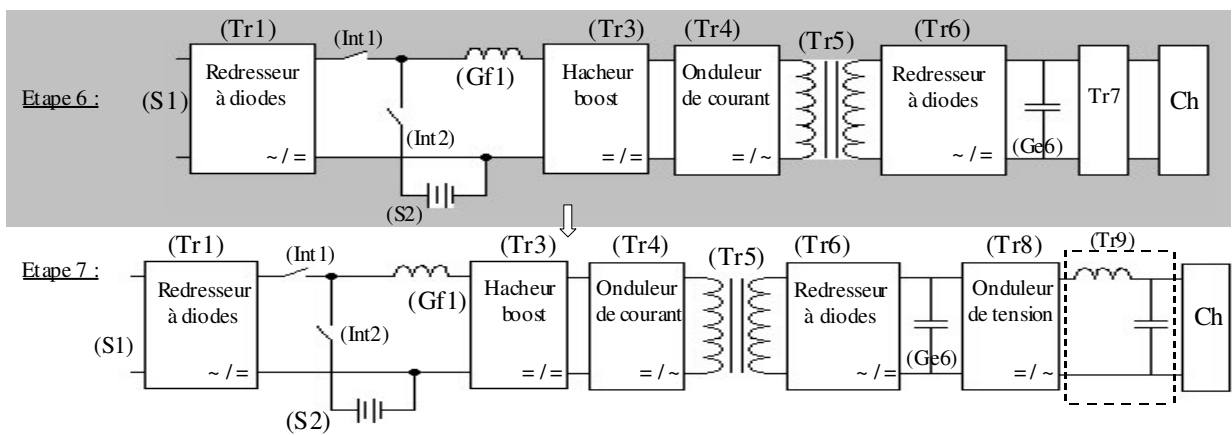
(b) Représentation filaire

Figure 4.36 - Exemple 3 : étapes 5 et 6

- En décomposant l'élément "Tr6" en introduisant une interface à tension imposée alternative (voir Figure 4.37), on obtient les éléments de type Transformateur "Tr7" et "Tr8".
L'élément "Tr7" peut être identifié comme un onduleur de tension, alors que l'élément "Tr8" peut être considéré comme un filtre passe-bas LC// permettant d'éliminer les harmoniques et d'obtenir une tension sinusoïdale aux bornes de la charge.



(a) Représentation énergétique



(b) Représentation filaire

Figure 4.37 - Exemple 3 : étapes 6 et 7

Le processus que nous venons de décrire nous permet alors d'obtenir le circuit suivant :

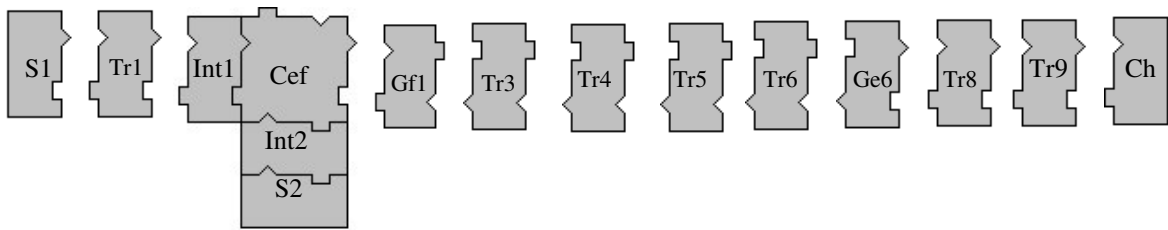


Figure 4.38 - Caractérisation énergétique du circuit de l'ASI

Le schéma filaire correspondant au dispositif obtenu est décrit par la figure suivante :

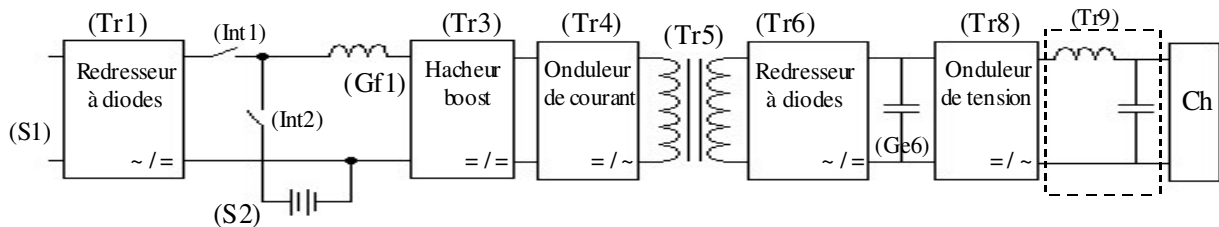


Figure 4.39 - Schéma filaire de l'ASI

Dans ce qui suit, nous présentons le récapitulatif du processus de conception de l'ASI :

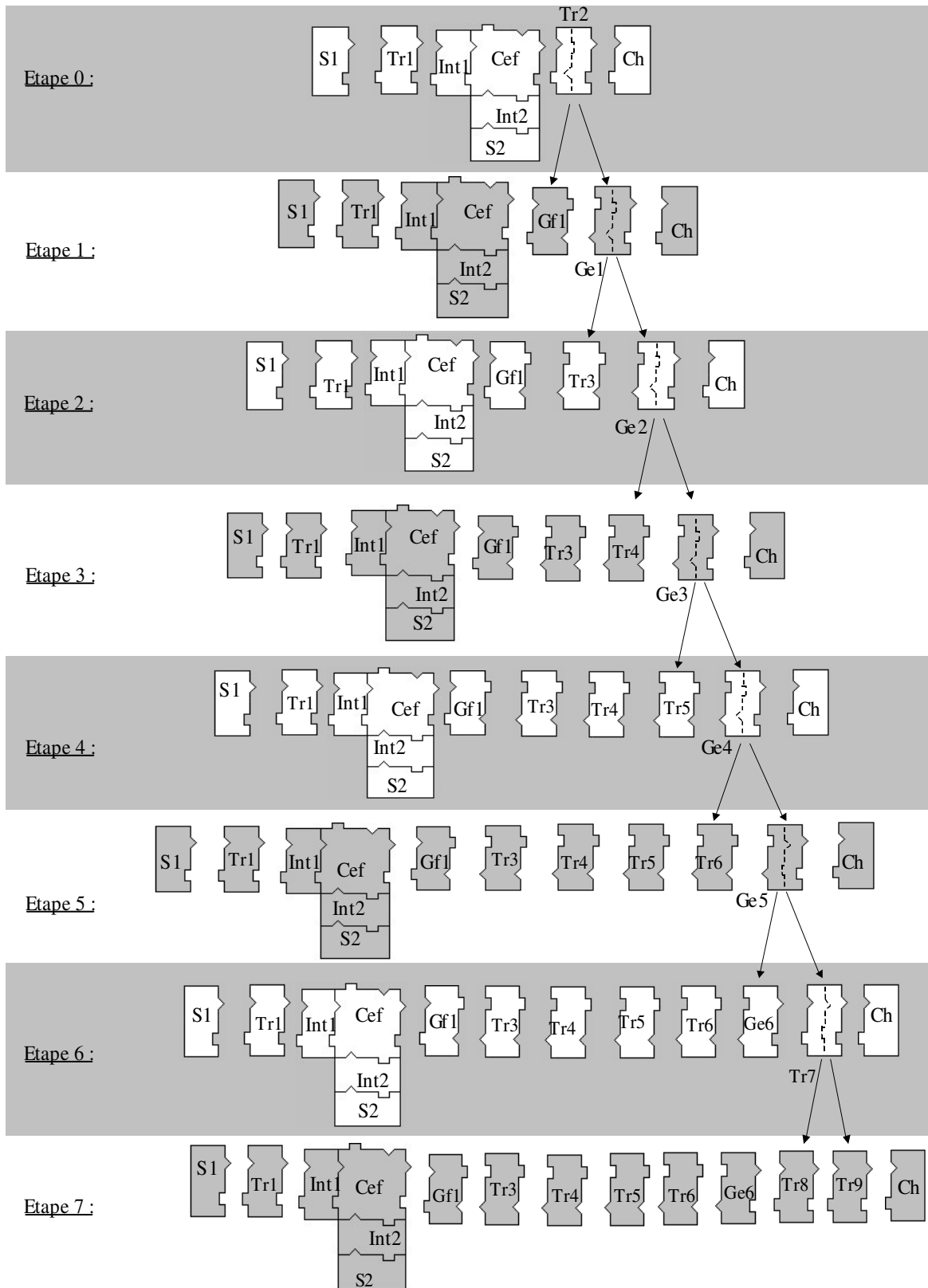


Figure 4.40 - Déroulement de la conception de l'ASI

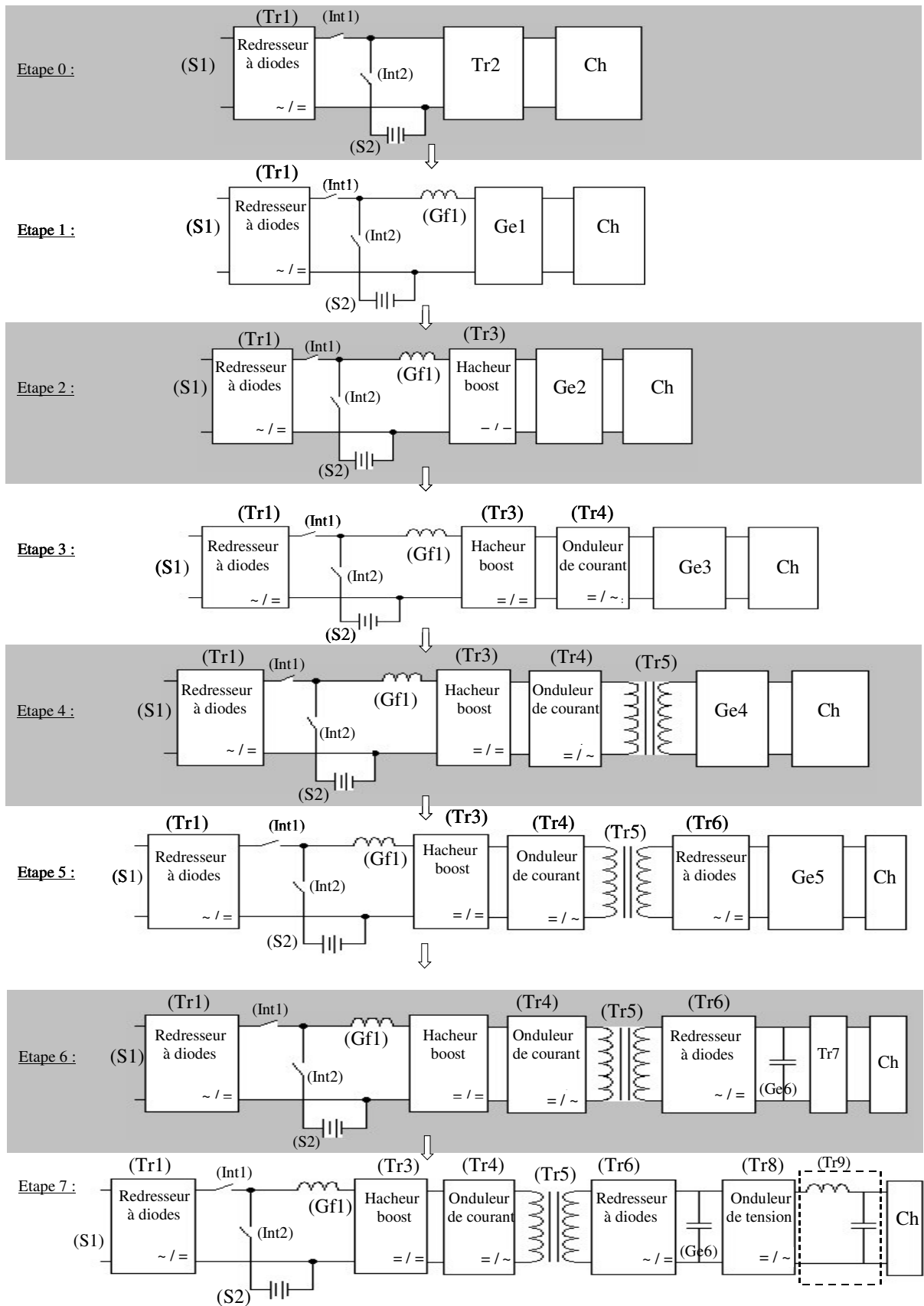


Figure 4.41 - Déroulement de la conception de l'ASI : évolution du schéma filaire

4.4. Chaîne de conversion électromécanique : système de levage :

4.4.1. Données du problème :

Nous proposons de déterminer un dispositif électromécanique permettant de soulever ou faire descendre une masse de quelques kilogrammes suspendue par un câble. L'alimentation électrique du dispositif sera assurée à partir du réseau alternatif 230 V / 50 Hz.

4.4.2. Analyse des données :

Au cours du raisonnement, nous devons tenir compte des considérations suivantes :

- La source d'alimentation, qui est une source de tension alternative (source d'effort) réversible en tension et en courant.
- La charge mécanique est une source de vitesse (source de flux) réversible en vitesse et en force.
- Le dispositif à concevoir doit être réversible en puissance pour pouvoir restituer l'énergie sur la source pendant la phase de descente de la charge.

4.4.3. Formulation du cahier des charges :

- *Source* : source de tension alternative.

Elle est caractérisée par un dipôle à effort imposé illustré sur la Figure 4.42.



Figure 4.42 - Caractérisation énergétique de la source

L'interface de ce dipôle possède les propriétés suivantes :

- grandeur imposée par la source : tension,
 - polarité imposée par la source : bidirectionnelle,
 - la source impose une composante continue : non,
 - la source impose un fondamental : oui,
- grandeur acceptée par la source : courant,
 - polarité acceptée par la source : bidirectionnelle,

- la source accepte une composante continue : non,
- la source accepte un fondamental : oui.
- *Charge* : source de vitesse,
Elle est caractérisée par un dipôle à flux imposé comme le montre la Figure 4.43.



Figure 4.43 - *Caractérisation énergétique de la charge*

L'interface de type translation mécanique de cet élément possède les propriétés suivantes :

- grandeur imposée par la charge : vitesse,
 - polarité imposée par la charge : bidirectionnelle,
 - la charge impose une composante continue : oui,
 - la charge impose un fondamental : oui,
- grandeur acceptée par la charge : force,
 - polarité acceptée par la charge : bidirectionnelle,
 - la charge accepte une composante continue : oui,
 - la charge accepte un fondamental : oui,
- *Propriétés fonctionnelles* :
 - réversibilité en puissance.

4.4.4. Résolution du problème :

Pour résoudre le problème posé, la structure doit contenir un convertisseur électromécanique, c'est à dire une machine électrique ; ainsi qu'un dispositif de conversion électrique permettant d'assurer notamment la réversibilité en puissance de la structure globale.

La structure recherchée, comme le montre la Figure 4.44, est le macro-élément "Elem" de type "Transformateur", puisque la source impose la tension (effort) et la charge impose la vitesse (flux).

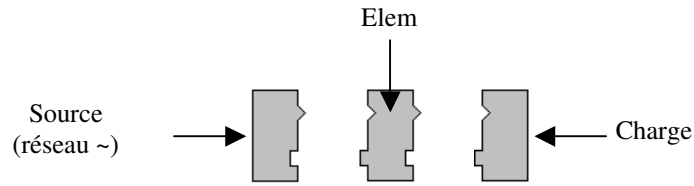


Figure 4.44 - *Caractérisation de la structure à concevoir*

Une des solutions possibles consiste à effectuer les décompositions suivantes :

- On peut décomposer l'élément "Elem" en introduisant une interface électrique à effort (et donc à tension) imposé continu (voir Figure 4.45). On obtient deux éléments de type Transformateur "Tr1" et "Tr2".

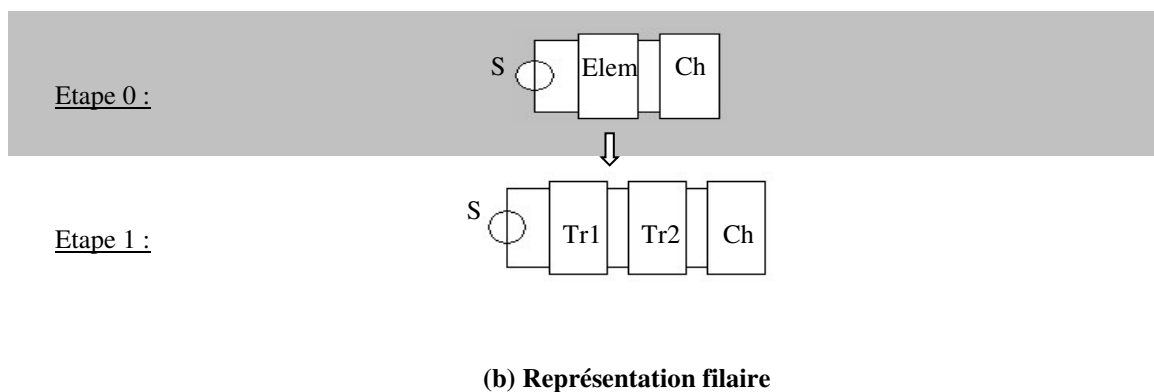
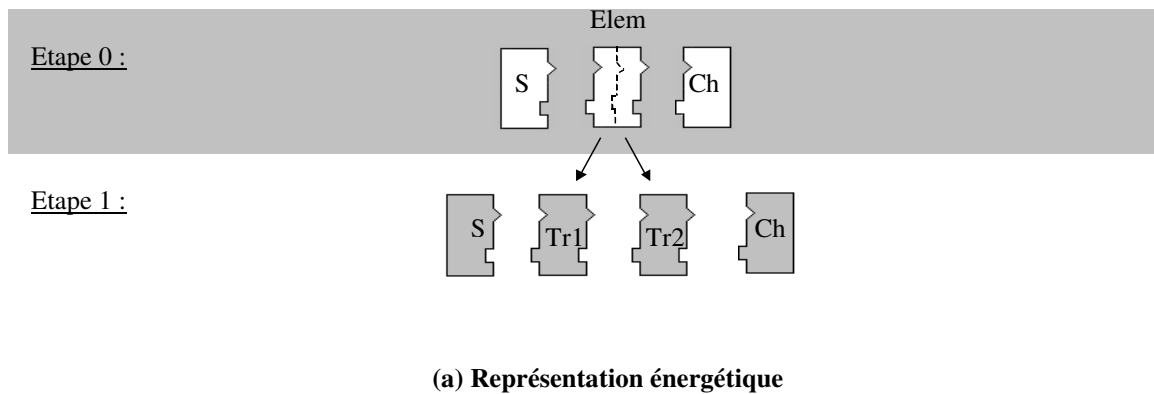


Figure 4.45 – *Exemple 4 : étapes 0 et 1*

- "L'éclatement" de l'élément de type Transformateur "Tr2" en introduisant une interface de rotation mécanique à effort (couple) imposé permet d'obtenir les éléments de type Transformateur "Tr3" et "Tr4" (voir Figure 4.46). L'élément "Tr3" peut être identifié comme une machine à courant continu (en tenant compte de l'inductance de l'induit, comme on l'a montré au paragraphe 2.3.7). La machine "Tr3" est réversible en tension, car elle est réversible en vitesse de rotation (on peut faire monter ou descendre la charge), grandeur proportionnelle à la fem de la machine. Elle est aussi unidirectionnelle en courant car le couple (proportionnel au courant) est toujours positif.

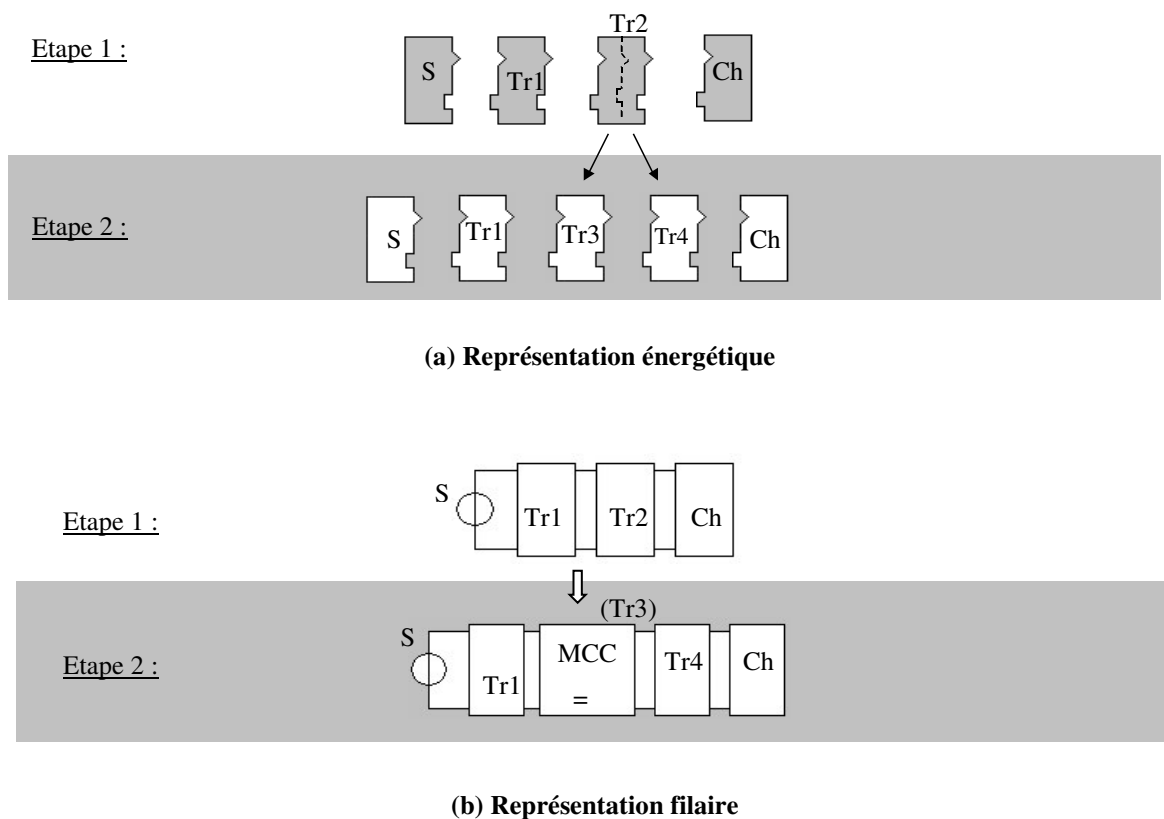


Figure 4.46 - Exemple 4 : étapes 1 et 2

- La décomposition de l'élément "Tr4" par introduction d'une interface de rotation mécanique à effort (couple) imposé permet d'obtenir les éléments de type Transformateur "Tr5" et "Tr6" (voir Figure 4.47). L'élément "Tr5" peut être identifié comme un réducteur de vitesse qui est nécessaire au dispositif car la vitesse de rotation est grande par rapport à la vitesse de déplacement de la charge.

L'élément "Tr6", qui possède une interface "d'entrée" de type rotation mécanique et une interface de "sortie" de type translation mécanique, peut être considéré comme un tambour cylindrique.

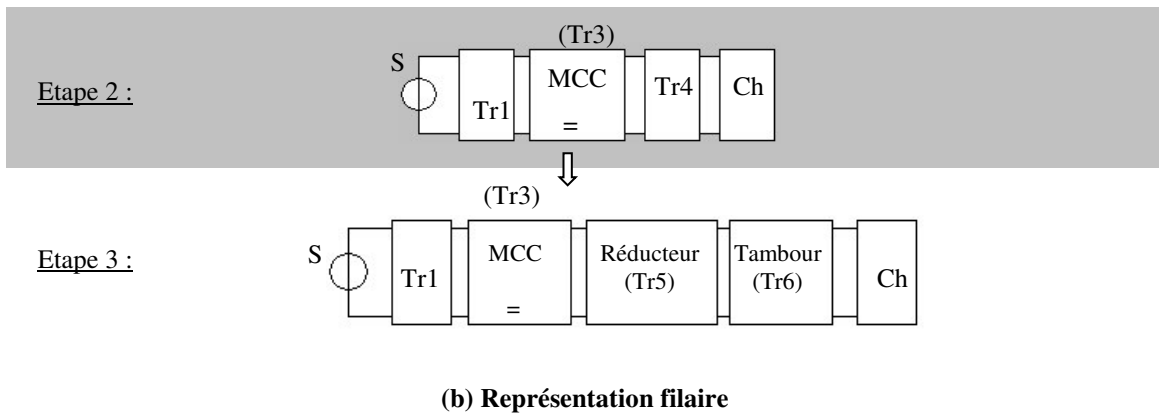
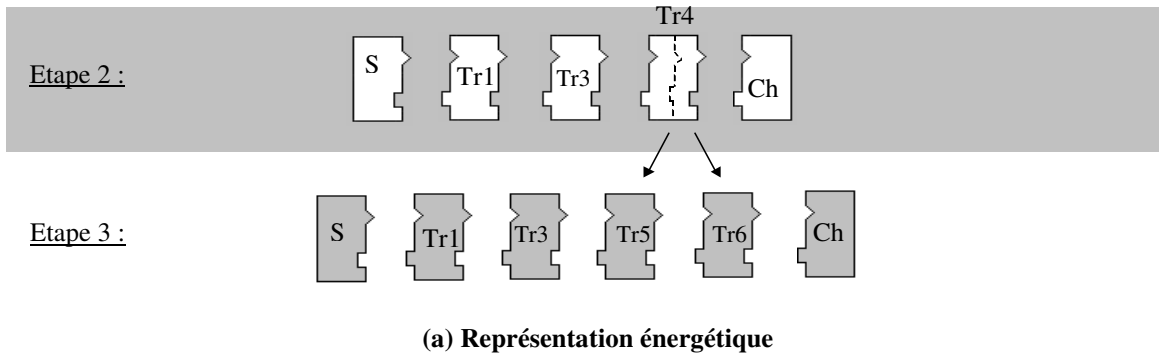
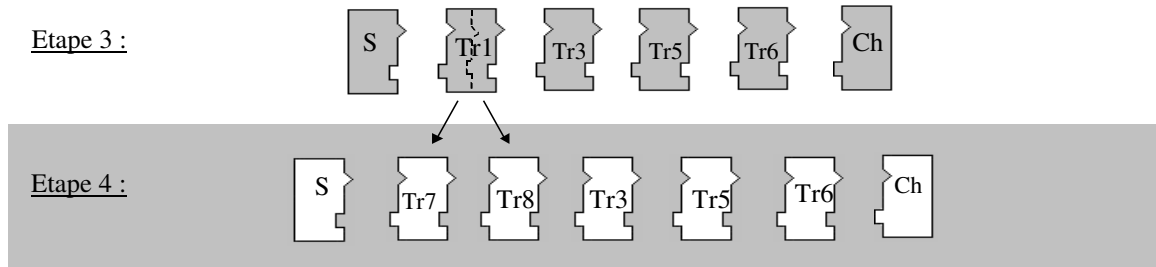
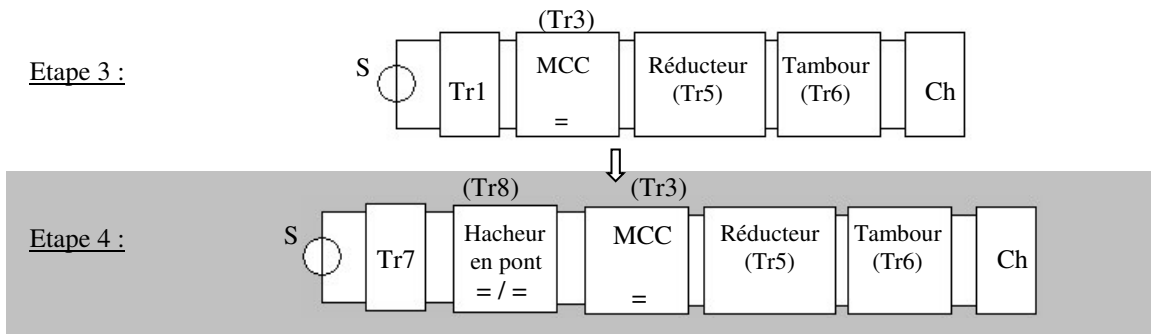


Figure 4.47 - Exemple 4 : étapes 2 et 3

- En "éclatant" l'élément de type Transformateur "Tr1" par l'intermédiaire d'une interface à effort (tension) imposé continu (voir Figure 4.48), on obtient notamment l'élément de type Transformateur "Tr8", qui doit posséder des interfaces "d'entrée" et de "sortie" continues, et qui doit être réversible en tension et unidirectionnel en courant sur son interface de "sortie", puisque la machine à courant continu est réversible en tension et unidirectionnelle en courant sur son interface électrique. L'élément "Tr8" peut être alors considéré comme un hacheur en pont mixte (voir paragraphe 4.1.4), réversible en tension et unidirectionnel en courant.



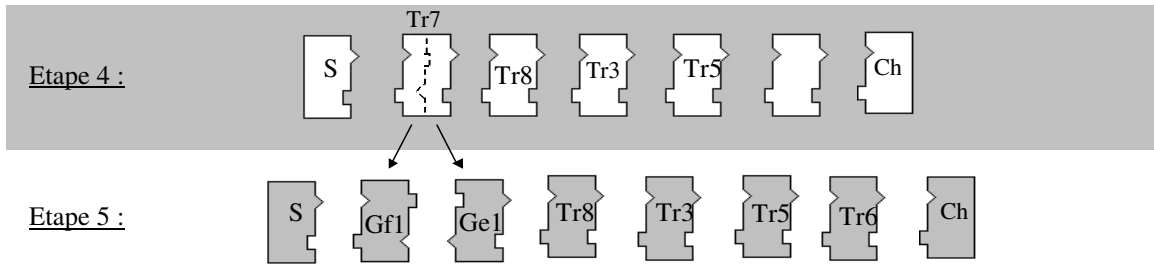
(a) Représentation énergétique



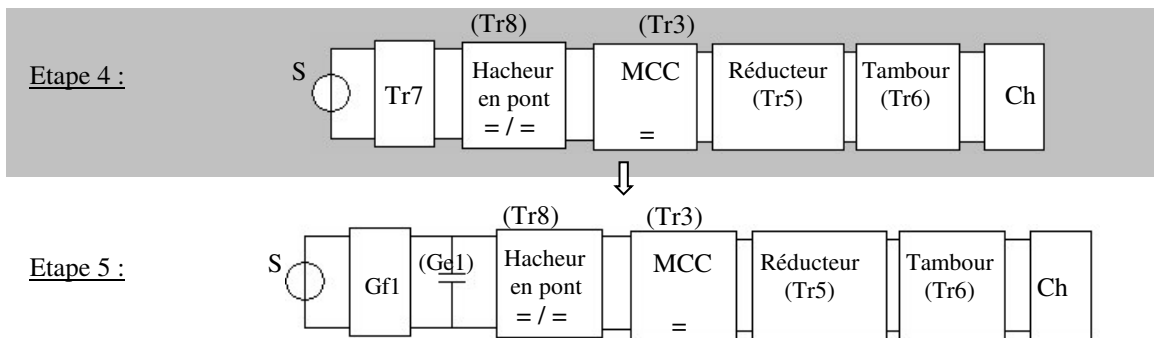
(b) Représentation filaire

Figure 4.48 - Exemple 4 : étapes 3 et 4

- Si on décompose l'élément Transformateur "Tr7" en introduisant une interface à flux (courant) imposé continu (voir Figure 4.49), on obtient le gyrateur effort-flux "Gf1" et le gyrateur flux-effort "Ge1" qui peut être considéré comme une capacité parallèle.



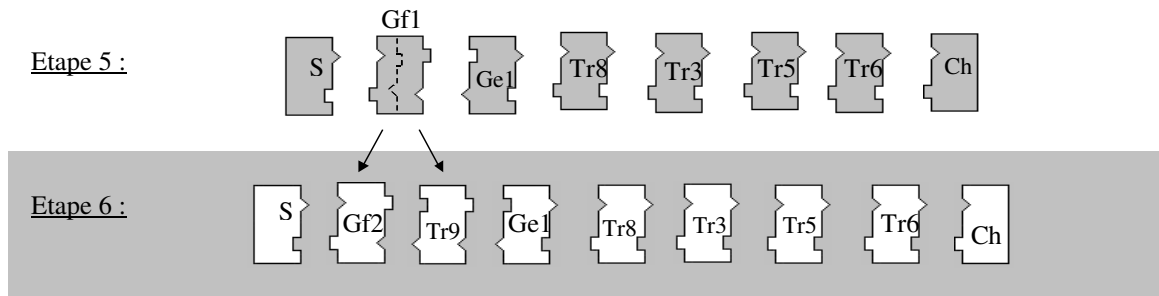
(a) Représentation énergétique



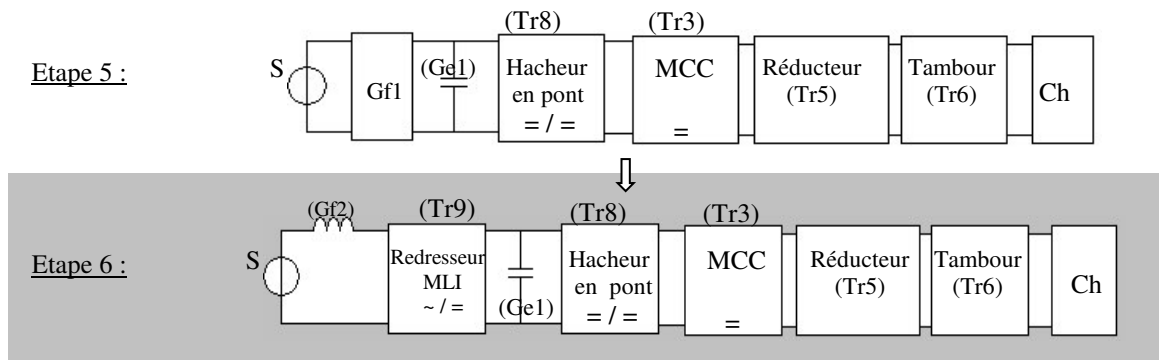
(b) Représentation filaire

Figure 4.49 - Exemple 4 : étapes 4 et 5

- On peut "éclater" l'élément "Gf1" à l'aide d'une interface à flux (courant) imposé alternatif le gyrateur effort-flux "Gf2" (voir Figure 4.50), qui peut être considéré comme une inductance série, et l'élément de type Transformateur "Tr9" qui peut être considéré comme un redresseur MLI.



(a) Représentation énergétique



(b) Représentation filaire

Figure 4.50 - Exemple 4 : étapes 5 et 6

Ainsi, le dispositif de conversion électromécanique recherché peut être caractérisé par les éléments de la Figure 4.51.

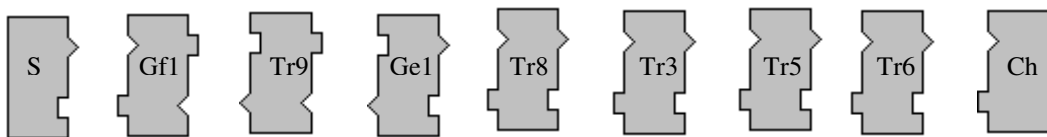


Figure 4.51 - Caractérisation énergétique de la première solution

Le schéma filaire équivalent est le suivant :

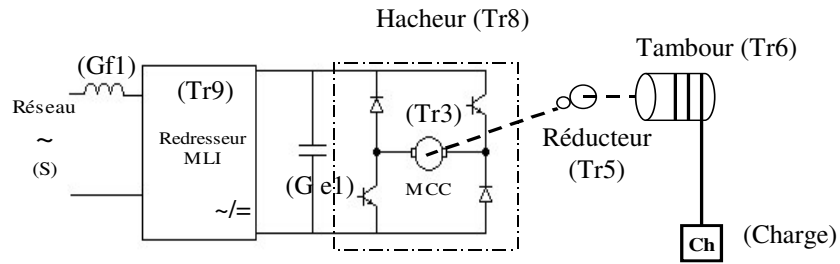


Figure 4.52 - Schéma filaire de la chaîne de conversion électromécanique

Dans ce qui suit, nous présentons le récapitulatif du processus de conception de l'exemple :

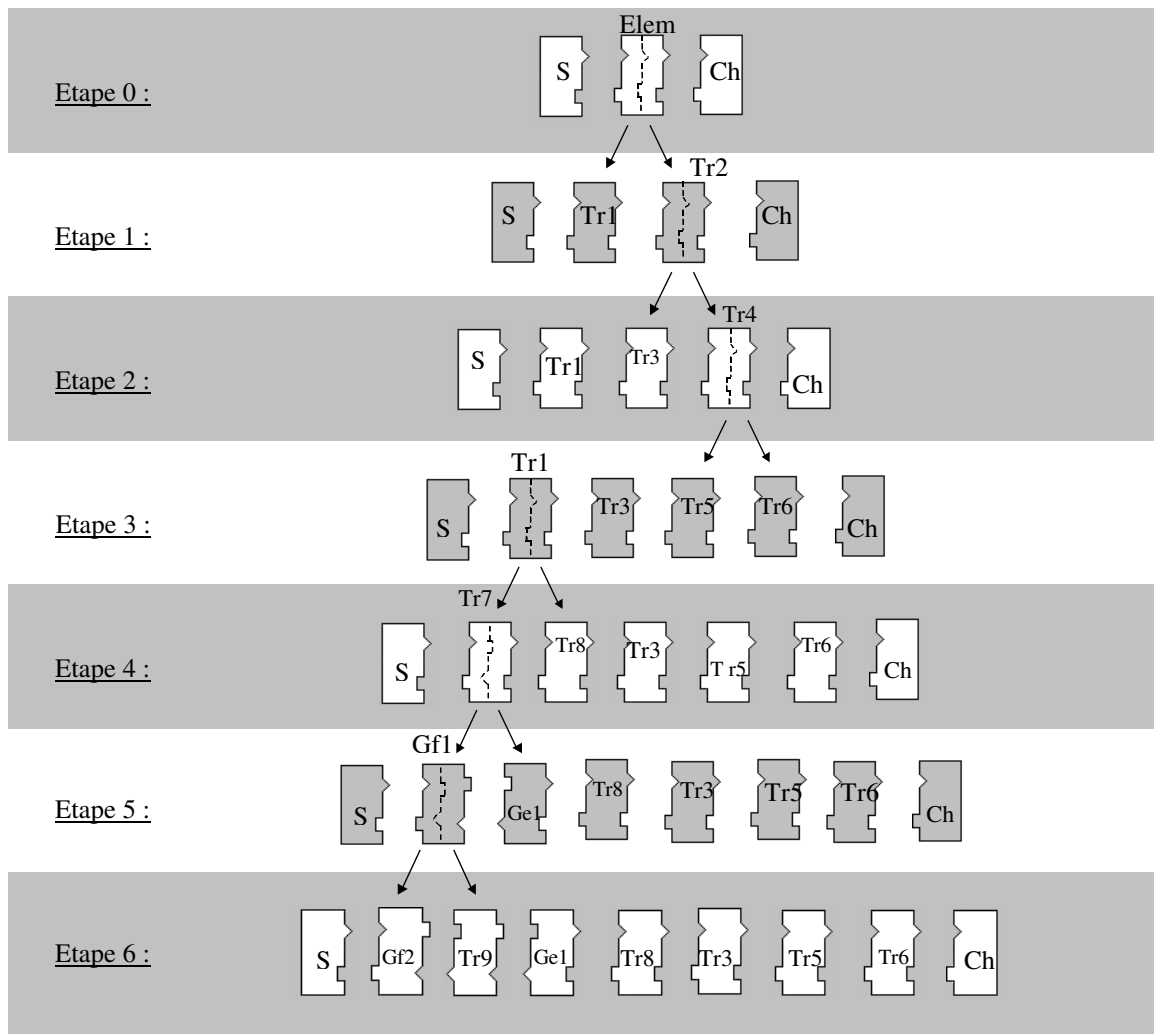


Figure 4.53 - Processus de conception d'une chaîne de conversion électromécanique

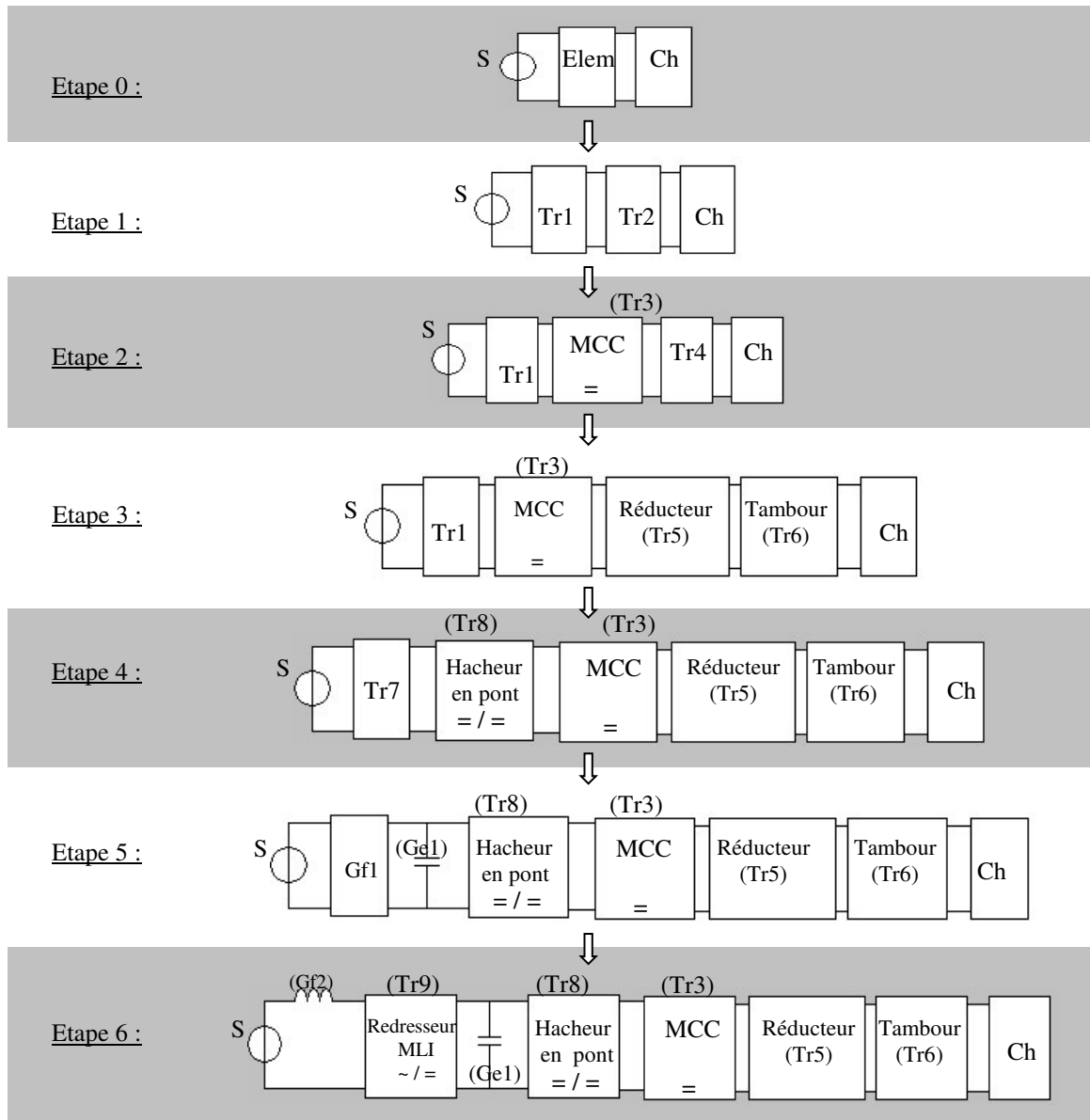


Figure 4.54 - Processus de conception d'une chaîne de conversion électromécanique : évolution du schéma filaire

- **Vérification de la réversibilité en puissance de la structure obtenue :**

On peut vérifier la réversibilité en puissance d'une structure à l'aide du module d'expertise, qui signalera éventuellement le non respect de cette exigence si elle fait partie du cahier des charges.

Pour qu'une structure soit réversible en puissance, il faut que ses convertisseurs statiques soient réversibles localement en puissance avec des réversibilités compatibles.

Dans notre exemple, la structure de conversion obtenue est réversible en puissance. En effet, le hacheur en pont mixte "Tr8" placé à l'entrée de la machine à courant continu

"Tr3" (voir Figure 4.53 et Figure 4.54) impose à son "entrée", c'est à dire à la sortie du redresseur MLI, un courant " I_e " bidirectionnel. Ceci est due au fait que le hacheur "Tr8" impose à l'entrée de la machine "Tr3" une tension " V_s " bidirectionnelle, permettant ainsi à cette dernière de faire monter et descendre la charge mécanique. Or, les grandeurs d'entrée et de sortie du hacheur sont liées par les relations suivantes :

$$V_s = F_m(t) V_e$$

$$I_e = F_m(t) I_s$$

V_e et I_e étant les grandeurs "d'entrée", et sont unidirectionnelles et $F_m(t)$ la fonction de modulation du hacheur.

Ainsi, le courant imposée par le hacheur "Tr8" au niveau de son interface "d'entrée" est bidirectionnel. Or le redresseur MLI "Tr9" est réversible en courant au niveau de ses interfaces de "sortie" et surtout "d'entrée". On assure ainsi la restitution au réseau de l'énergie fournie pendant la phase de descente de la charge mécanique. La structure est donc réversible en puissance.

Conclusion générale

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse portent sur l'élaboration de méthodes et d'outils de conception de structures de conversion d'énergie utilisées dans le domaine du Génie Electrique.

Pour atteindre cet objectif, nous avons commencé par étudier l'activité de conception en général. Nous avons alors abordé les différentes étapes d'un processus de conception ainsi que quelques techniques de cette activité.

Nous avons aussi étudié quelques approches de conception spécifiques au Génie Electrique, ce qui nous emmené à adopter dans notre démarche une approche systémique qui consiste à construire des systèmes de conversion d'énergie par association de sous systèmes ou éléments.

Ensuite, nous avons élaboré un formalisme qui prend en compte différents points de vue qualitatifs et nécessaires pour la conception par association d'éléments. Ce formalisme consiste à caractériser les différents éléments utilisés en se basant sur les caractéristiques des échanges énergétiques entre ces éléments, quand ils sont associés au sein d'un dispositif électrique, ainsi que leurs propriétés fonctionnelles.

A partir du formalisme de caractérisation adopté, nous avons dégagé des règles d'association des éléments qui nous ont permis de développer deux méthodes de conception de chaîne de conversion d'énergie par associations d'éléments caractérisés.

La première méthode procède par recherches successives d'éléments compatibles avec d'autres déjà introduits dans la structure en cours d'assemblage jusqu'à ce que cette dernière soit constituée d'éléments connus.

La deuxième méthode procède par décompositions successives du système recherché jusqu'à ce qu'il soit décrit par une association d'éléments connus et assemblés de manière judicieuse permettant de respecter leur compatibilité pour garantir un dispositif saint et cohérent.

Nous avons exploité la méthode de conception par décompositions successives pour développer une application informatique d'aide à la conception, s'articulant principalement autour de trois outils :

- une base de donnée qui contient les propriétés des éléments caractérisés et qui constitue la boîte à outils du concepteur,
- un outil de construction de dispositifs (éditeur graphique) par association d'éléments caractérisés issus de la base de donnée,
- un module d'expertise pour aider l'utilisateur par des suggestions et des conseils lui permettant d'insérer les bons éléments aux bons endroits et l'avertissant en cas d'erreurs effectuées pendant l'assemblage.

Nous montrons enfin, à travers des exemples significatifs, comment un concepteur peut exploiter les méthodes et outils développés.

Outre l'enrichissement de la base de données par d'autres éléments caractérisés, il est souhaitable d'enrichir la base de règles du module d'expertise notamment par des modules dédiés aux disciplines physiques autres que l'électrotechnique (mécanique, électrochimie, etc.).

On peut aussi penser à intégrer des modules d'expertise spécialisés dans les convertisseurs statiques, les cellules de commutations, etc. pour affiner l'étude des solutions établies dans les processus de conception.

Enfin, il faut envisager la conversion des schémas représentés selon notre approche de caractérisation énergétique en des schémas Bond Graph pour exploiter les outils d'analyse issus de ce formalisme afin d'étudier et d'améliorer les solutions issues de nos approches.

Annexes

Annexe 1 – Exemples d'éléments caractérisés

Dans cette annexe nous présentons quelques exemples de propriétés d'éléments caractérisés stockés dans la base de données (on dispose actuellement, d'une trentaine d'éléments). Ces propriétés s'affichent sur des "états" qui sont des documents imprimables générés de manière automatique par ACCESS.

▪ **L'élément "filtre ac/ac" :**

Auteur : H. P.

Date de création 31/11/2000

Nbre d'interfaces : 2

Domaine de validité fréquentiel : très basses fréquences

Classe : Transformateur

Caractéristique propre : fréquence de coupure

Caractérisation :



Aide contextuelle :

La fréquence d'utilisation doit être inférieure à la fréquence de coupure.

Interfaces de l'élément :

Interface N° : 1

Domaine physique de l'interface : électrique

Grandeur imposée sur l'interface : Flux

Polarité imposée : bidirectionnel

Composante continue imposée ? : non

Fondamental imposé ? : oui

Grandeur acceptée sur l'interface : Effort

Polarité acceptée : bidirectionnel

Composante continue acceptée ? : non

Fondamental acceptée ? : oui

Interface N° : 2

Domaine physique de l'interface : électrique

Grandeur imposée sur l'interface : Effort

Polarité imposée : bidirectionnel

Composante continue imposée ? : non

Fondamental imposé ? : oui

Grandeur acceptée sur l'interface : Flux

Polarité acceptée : bidirectionnel

Composante continue acceptée ? : non

Fondamental acceptée ? : oui

Propriétés fonctionnelles de l'élément :

- dévolteur
- filtre passe-bas

▪ **L'élément "capacité parallèle" :**

Auteur : H.P.

Date de création 01/02/2001

Nbre d'interfaces : 2

Domaine de validité fréquentiel : hors hautes fréquences /
tension continue

Classe : GyrateurFluxEffort

Caractéristique propre : rien

Caractérisation :



Aide contextuelle :

Interfaces de l'élément :

<p>Interface N° : 1</p> <p>Domaine physique de l'interface : électrique</p> <p>Grandeur imposée sur l'interface : Effort</p> <p>Polarité imposée : bidirectionnel</p> <p>Composante continue imposée ? : oui</p> <p>Fondamental imposé ? : oui</p> <p>Grandeur acceptée sur l'interface Flux</p> <p>Polarité acceptée : bidirectionnel</p> <p>Composante continue acceptée ? : oui</p> <p>Fondamental acceptée ? : oui</p>	<p>Interface N° : 2</p> <p>Domaine physique de l'interface : électrique</p> <p>Grandeur imposée sur l'interface : Effort</p> <p>Polarité imposée : bidirectionnel</p> <p>Composante continue imposée ? : oui</p> <p>Fondamental imposé ? : oui</p> <p>Grandeur acceptée sur l'interface Flux</p> <p>Polarité acceptée : bidirectionnel</p> <p>Composante continue acceptée ? : oui</p> <p>Fondamental acceptée ? : oui</p>
--	--

Propriétés fonctionnelles de l'élément :

- filtre passe-bas

▪ L'élément "buck-valeur-moyenne"

Auteur : H.P.

Date de création 01/02/2001

Nbre d'interfaces : 2

Domaine de validité fréquentiel : basses fréquences

Classe : Transformateur

Caractéristique propre : rien

Caractérisation :



Aide contextuelle :

conversion continu-continu

Interfaces de l'élément :

Interface N° : 1

Domaine physique de l'interface : électrique

Grandeur imposée sur l'interface : Flux

Polarité imposée : positif

Composante continue imposée ? : oui

Fondamental imposé ? : oui

Grandeur acceptée sur l'interface Effort

Polarité acceptée : positif

Composante continue acceptée ? : oui

Fondamental acceptée ? : oui

Interface N° : 2

Domaine physique de l'interface : électrique

Grandeur imposée sur l'interface : Effort

Polarité imposée : positif

Composante continue imposée ? : oui

Fondamental imposé ? : oui

Grandeur acceptée sur l'interface Flux

Polarité acceptée : positif

Composante continue acceptée ? : oui

Fondamental acceptée ? : oui

Propriétés fonctionnelles de l'élément :

- hacheur
- dévolteur

Annexe 2 – Exemples de règles du module d'expertise

Dans ce document, nous présentons le listing de quelques règles utilisées par le module d'expertises (on dispose, pour le moment, de plus de 70 règles). Ce listing, écrit en HTML selon un format plus lisible que le code réel développé en langage ILOG, est généré de manière automatique à l'aide de la fonction de génération de document d'ILOG JRULES.

Rule AnalyseCahier.tenueIcc :

active true
documentation Cas ou le cahier des charges exige la tenue d'un courant de court-circuit.
creationDate Mon Sep 15 11:04:09 CEST 2003
editable true
lastModificationDate Wed Jul 14 19:54:09 CEST 2004
name tenueIcc
packet AnalyseCahier
priority high

WHEN

there is a **CahierCharges**
such that getTenuIcc().equals("oui")

THEN

execute
so that ?context.writeMessage("Tenu d'un courant de court-circuit : le circuit
doit contenir un élément dévolteur","default")

Rule AnalyseCahier.isol_!enc :

active true
documentation Cas ou le cahier des charges exige un isolement galvanique sans encombrement minimal.
creationDate Tue Mar 23 13:50:09 CET 2004
editable true
lastModificationDate Wed Jul 14 19:50:58 CEST 2004
name isol_enc
packet AnalyseCahier
priority high

WHEN

there is a **CahierCharges**
such that getIsolGalva().equals("oui")
and getEncoMin().equals("oui")

THEN

execute
so that ?context.writeMessage("Isolement galvanique : le circuit doit contenir un élément isolant ", "default")

Rule AnalyseCahier.sourceDC_chargeAC :

active true
 documentation Cas d'une source continue, et d'une charge alternative.
 creationDate Wed Mar 24 11:01:17 CET 2004
 editable true
 lastModificationDate Wed Jul 14 19:59:48 CEST 2004
 name sourceDC_chargeAC
 packet AnalyseCahier
 priority high

WHEN

there is a **Interface** called ?interface1
 such that getImp_fondamental().equals("non")
 there is a **Interface** called ?interface2
 such that getImp_fondamental().equals("oui")
 there is a **Device** called ?device1
 such that getInterface().length = 1
 and getInterface()[0] = ?interface1
 there is a **Device** called ?device2
 such that getInterface().length = 1
 and getInterface()[0] = ?interface2
 there is a **CahierCharges**
 such that getSource() = ?device1
 and getCharge() = ?device2

THEN

execute
 so that ?context.writeMessage("conseil : introduire un élément
 onduleur","default")

Rule AnalyseCahier.sourceAC_chargeDC :

active true
documentation Cas d'une source alternative, et d'une charge continue.
creationDate Wed Mar 24 11:34:35 CET 2004
editable true
lastModificationDate Wed Jul 14 20:02:25 CEST 2004
name sourceAC_chargeDC
packet AnalyseCahier
priority high

WHEN

there is a **Interface** called ?interface1
such that getImp_fondamental().equals("oui")
there is a **Interface** called ?interface2
such that getImp_fondamental().equals("non")
there is a **Device** called ?device1
such that getInterface().length = 1
and getInterface()[0] = ?interface1
there is a **Device** called ?device2
such that getInterface().length = 1
and getInterface()[0] = ?interface2
there is a **CahierCharges**
such that getSource() = ?device1
and getCharge() = ?device2

THEN

execute
so that ?context.writeMessage("conseil : introduire un élément redresseur","default")

Rule AnalyseCahier.sourceAC_chargeAC :

active true
 documentation Cas d'une source et d'une charge alternatives.
 creationDate Tue Mar 30 17:33:40 CEST 2004
 editable true
 lastModificationDate Wed Jul 14 20:00:52 CEST 2004
 name sourceAC_chargeAC
 packet AnalyseCahier
 priority high

WHEN

there is a **Interface** called ?interface1
 such that getImp_fondamental().equals("oui")
 there is a **Interface** called ?interface2
 such that getImp_fondamental().equals("oui")
 there is a **Device** called ?device1
 such that getInterface().length = 1
 and getInterface()[0] = ?interface1
 there is a **Device** called ?device2
 such that getInterface().length = 1
 and getInterface()[0] = ?interface2
 there is a **CahierCharges**
 such that getSource() = ?device1
 and getCharge() = ?device2

THEN

execute
 so that ?context.writeMessage("Conseil : il faut probablement introduire un élément redresseur et un autre onduleur", "default")

Rule AnalyseCahier.sourceDC_chargeDC :

active true
 documentation Cas d'une source et d'une charge continues.
 creationDate Tue Mar 30 17:51:47 CEST 2004
 editable true
 lastModificationDate Wed Jul 14 20:02:54 CEST 2004
 name sourceDC_chargeDC
 packet AnalyseCahier
 priority high

WHEN

there is a **Interface** called ?interface1
 such that getImp_fondamental().equals("non")
 there is a **Interface** called ?interface2
 such that getImp_fondamental().equals("non")
 there is a **Device** called ?device1
 such that getInterface().length = 1
 and getInterface()[0] = ?interface1
 there is a **Device** called ?device2
 such that getInterface().length = 1
 and getInterface()[0] = ?interface2
 there is a **CahierCharges**
 such that getSource() = ?device1
 and getCharge() = ?device2

THEN

execute
 so that ?context.sendMessage("Conseil : il faut probablement introduire un élément hacheur ou un élément onduleur et un autre redresseur", "default")

Rule AnalyseElements.Interfaces_EE_AC_AC :

active	true
documentation	Cas d'une pièce à interfaces d'entrée et de sortie à effort imposé alternatif, avec une structure qui doit contenir un élément redresseur.
creationDate	Mon Sep 15 11:04:09 CEST 2003
editable	true
lastModificationDate	Wed Mar 24 11:00:15 CET 2004
name	Interfaces_EE_AC_AC
packet	AnalyseElements
priority	low

WHEN

```

there is a Interface called ?interface1
  such that getImp_fondamental().equals("oui")
    and getType().equals("InterfaceEffort")
there is a Interface called ?interface2
  such that getImp_fondamental().equals("oui")
    and getType().equals("InterfaceEffort")
there is a Device
  such that getInterface().length = 2
    and getInterface()[0] = ?interface1
    and getInterface()[1] = ?interface2
there is a Interface called ?interface3
  such that getImp_fondamental().equals("oui")
there is a Interface called ?interface4
  such that getImp_fondamental().equals("non")
there is a Device called ?device1
  such that getInterface().length = 1
    and getInterface()[0] = ?interface3
there is a Device called ?device2
  such that getInterface().length = 1
    and getInterface()[0] = ?interface4
there is a CahierCharges
  such that getSource() = ?device1
    and getCharge() = ?device2
there is no Device
  such that !getNameDB().equals("newelem")
    and getProps().contains("redresseur de tension")
there is no Device
  such that !getNameDB().equals("newelem")
    and getProps().contains("redresseur de courant")

```

THEN

```

execute
  so that ?context.writeMessage("conseil : introduire une interface à flux imposé
continu", "actionInterface")

```

Rule AnalyseElements.Interfaces_FF_DC_DC :

active	true
documentation	Cas d'une pièce à interfaces d'entrée et de sortie à flux imposé continu, avec une structure qui doit contenir un élément onduleur.
creationDate	Mon Sep 15 11:04:09 CEST 2003
editable	true
lastModificationDate	Tue Sep 16 15:42:02 CEST 2003
name	Interfaces_FF_DC_DC
packet	AnalyseElements
priority	low

WHEN

there is a **Interface** called ?interface1
 such that getImp_fondamental().equals("non")
 and getType().equals("InterfaceEffort")
 there is a **Interface** called ?interface2
 such that getImp_fondamental().equals("non")
 and getType().equals("InterfaceEffort")
 there is a **Device**
 such that getInterface().length = 2
 and getInterface()[0] = ?interface1
 and getInterface()[1] = ?interface2
 there is a **Interface** called ?interface3
 such that getImp_fondamental().equals("non")
 there is a **Interface** called ?interface4
 such that getImp_fondamental().equals("oui")
 there is a **Device** called ?device1
 such that getInterface().length = 1
 and getInterface()[0] = ?interface3
 there is a **Device** called ?device2
 such that getInterface().length = 1
 and getInterface()[0] = ?interface4
 there is a **CahierCharges**
 such that getSource() = ?device1
 and getCharge() = ?device2
 there is no **Device**
 such that !getNameDB().equals("newelem")
 and getProps().contains("onduleur de tension")
 there is no **Device**
 such that !getNameDB().equals("newelem")
 and getProps().contains("onduleur de courant")

THEN

execute
 so that ?context.writeMessage("conseil : introduire une interface à effort imposé continu", "actionInterface")

Rule CompImposeeCompatible.accepte_indefini :

active true
 creationDate Wed Aug 06 14:28:57 CEST 2003
 editable true
 lastModificationDate Tue Sep 16 15:43:23 CEST 2003
 name accepte_indefini
 packet CompImposeeCompatible

WHEN

there is a **Interface**
 such that getImp_comp_continue() equals "indefini"

THEN

execute
 so that resetBuffer()
 and inserInBuffer("oui")
 and inserInBuffer("non")
 and inserInBuffer("indefini")
 and sendBufferContent()

Rule CompImposeeCompatible.accepte_oui :

active true
 creationDate Wed Aug 06 14:28:57 CEST 2003
 editable true
 lastModificationDate Tue Sep 16 15:43:30 CEST 2003
 name accepte_oui
 packet CompImposeeCompatible

WHEN

there is a **Interface**
 such that getImp_comp_continue() equals "oui"

THEN

execute
 so that resetBuffer()
 and inserInBuffer("oui")
 and inserInBuffer("non")
 and inserInBuffer("indefini")
 and sendBufferContent()

Rule CompImposeeCompatible.accepte_non :

active true
 creationDate Wed Aug 06 14:28:57 CEST 2003
 editable true
 lastModificationDate Tue Sep 16 15:43:26 CEST 2003
 name accepte_non
 packet CompImposeeCompatible

WHEN

there is a **Interface**
 such that getImp_comp_continue() equals "non"

THEN

execute
 so that resetBuffer()
 and inserInBuffer("non")
 and sendBufferContent()

Rule CompAccepteeCompatible.impose_oui :

active true
 creationDate Wed Aug 06 13:46:00 CEST 2003
 editable true
 lastModificationDate Tue Sep 16 15:43:13 CEST 2003
 name impose_oui
 packet CompAccepteeCompatible
 priority high

WHEN

there is a **Interface**
 such that getAcc_comp_continue() equals "oui"

THEN

execute
 so that resetBuffer()
 and inserInBuffer("oui")
 and sendBufferContent()

Rule CompAccepteeCompatible.impose_non :

active true
creationDate Wed Aug 06 13:49:44 CEST 2003
editable true
lastModificationDate Tue Sep 16 15:43:09 CEST 2003
name impose_non
packet CompAccepteeCompatible
priority high

WHEN

there is a **Interface**
such that getAcc_comp_continue() equals "non"

THEN

execute
so that resetBuffer()
and inserInBuffer("oui")
and inserInBuffer("non")
and sendBufferContent()

Rule CompAccepteeCompatible.impose_indefini :

active true
creationDate Wed Aug 06 13:51:00 CEST 2003
editable true
lastModificationDate Tue Sep 16 15:43:05 CEST 2003
name impose_indefini
packet CompAccepteeCompatible
priority high

WHEN

there is a **Interface**
such that getAcc_comp_continue() equals "indefini"

THEN

execute
so that resetBuffer()
and inserInBuffer("oui")
and inserInBuffer("non")
and inserInBuffer("indefini")
and sendBufferContent()

Rule PolariteAccepteeCompatible.impose_positif :

active true
 creationDate Wed Jul 30 12:54:40 CEST 2003
 editable true
 lastModificationDate Tue Sep 16 15:44:50 CEST 2003
 name impose_positif
 packet PolariteAccepteeCompatible

WHEN

there is a **Interface**
 such that getPolarite_acceptee() equals "positif"

THEN

execute
 so that resetBuffer()
 and inserInBuffer("positif")
 and inserInBuffer("bidirectionnel")
 and inserInBuffer("indefini")
 and sendBufferContent()

Rule PolariteAccepteeCompatible.impose_negatif :

active true
 creationDate Wed Aug 06 13:27:24 CEST 2003
 editable true
 lastModificationDate Tue Sep 16 15:44:46 CEST 2003
 name impose_negatif
 packet PolariteAccepteeCompatible

WHEN

there is a **Interface**
 such that getPolarite_acceptee() equals "negatif"

THEN

execute
 so that resetBuffer()
 and inserInBuffer("negatif")
 and inserInBuffer("bidirectionnel")
 and inserInBuffer("indefini")
 and sendBufferContent()

Rule PolariteAccepteeCompatible.impose_bidirectionnel :

active true
 creationDate Wed Aug 06 13:28:52 CEST 2003
 editable true
 lastModificationDate Tue Sep 16 15:44:40 CEST 2003
 name impose_bidirectionnel
 packet PolariteAccepteeCompatible

WHEN

there is a **Interface**
 such that getPolarite_acceptee() equals "bidirectionnel"

THEN

execute
 so that resetBuffer()
 and insertInBuffer("bidirectionnel")
 and insertInBuffer("indefini")
 and sendBufferContent()

Rule PolariteAccepteeCompatible.impose_indefini :

active true
 creationDate Wed Aug 06 13:46:26 CEST 2003
 editable true
 lastModificationDate Tue Sep 16 15:44:43 CEST 2003
 name impose_indefini
 packet PolariteAccepteeCompatible

WHEN

there is a **Interface**
 such that getPolarite_acceptee() equals "indefini"

THEN

execute
 so that resetBuffer()
 and insertInBuffer("positif")
 and insertInBuffer("negatif")
 and insertInBuffer("bidirectionnel")
 and insertInBuffer("indefini")
 and sendBufferContent()

Rule PolariteImposeeCompatible.accepte_bidirectionnel :

active true
 creationDate Wed Aug 06 14:18:32 CEST 2003
 editable true
 lastModificationDate Tue Sep 16 15:44:59 CEST 2003
 name accepte_bidirectionnel
 packet PolariteImposeeCompatible

WHEN

there is a **Interface**
 such that getPolarite_imposee() equals "bidirectionnel"

THEN

execute
 so that resetBuffer()
 and inserInBuffer("positif")
 and inserInBuffer("negatif")
 and inserInBuffer("bidirectionnel")
 and inserInBuffer("indefini")
 and sendBufferContent()

Rule PolariteImposeeCompatible.accepte_indefini :

active true
 creationDate Wed Aug 06 14:18:32 CEST 2003
 editable true
 lastModificationDate Tue Sep 16 15:45:03 CEST 2003
 name accepte_indefini
 packet PolariteImposeeCompatible

WHEN

there is a **Interface**
 such that getPolarite_imposee() equals "indefini"

THEN

execute
 so that resetBuffer()
 and inserInBuffer("positif")
 and inserInBuffer("negatif")
 and inserInBuffer("bidirectionnel")
 and inserInBuffer("indefini")
 and sendBufferContent()

Rule PolariteImposeeCompatible.accepte_negatif :

active true
creationDate Wed Aug 06 14:18:32 CEST 2003
editable true
lastModificationDate Tue Sep 16 15:45:06 CEST 2003
name accepte_negatif
packet PolariteImposeeCompatible

WHEN

there is a **Interface**
such that getPolarite_imposee() equals "negatif"

THEN

execute
so that resetBuffer()
and inserInBuffer("negatif")
and sendBufferContent()

Rule PolariteImposeeCompatible.accepte_positif :

active true
creationDate Wed Aug 06 14:18:32 CEST 2003
editable true
lastModificationDate Tue Sep 16 15:45:10 CEST 2003
name accepte_positif
packet PolariteImposeeCompatible

WHEN

there is a **Interface**
such that getPolarite_imposee() equals "positif"

THEN

execute
so that resetBuffer()
and inserInBuffer("positif")
and sendBufferContent()

Rule VerifierAssociations.verif_comp_energ_1 :

active true
documentation Vérifier la compatibilité énergétique des grandeurs imposées et acceptées
creationDate Wed Jul 14 20:18:45 CEST 2004
editable true
lastModificationDate Wed Jul 14 21:18:00 CEST 2004
name verif_comp_energ_1
packet VerifierAssociations

WHEN

there is a **Interface** called ?interface1
such that getType() equals "InterfaceEffort"
there is a **Interface** called ?interface2
such that getType() equals "InterfaceFlux"
there is a **Connexion**
such that getInterface1() equals ?interface1
and getInterface2() equals ?interface2

THEN

execute
so that ?context.writeMessage("Incompatibilité énergétique dans l'association entre les éléments "+?interface1.getDevice().getName()+" et "+?interface2.getDevice().getName(),"default")

Rule VerifierAssociations.verif_comp_pol_1 :

active	true
documentation	Vérification des compatibilités des polarités : cas où un élément impose une polarité bidirectionnelle à un autre qui n'accepte qu'une polarité positive
creationDate	Wed Jul 14 21:22:29 CEST 2004
editable	true
lastModificationDate	Wed Jul 14 21:37:47 CEST 2004
name	verif_comp_pol_1
packet	VerifierAssociations

WHEN

there is a **Interface** called ?interface1
 such that getPolarite_imposee() equals "bidirectionnel"
 there is a **Interface** called ?interface2
 such that getPolarite_acceptee() equals "positif"
 there is a **Connexion**
 such that getInterface1() equals ?interface1
 and getInterface2() equals ?interface2

THEN

execute
 so that ?context.sendMessage("Incompatibilité de polarité dans l'association entre les éléments "+?interface1.getDevice().getName()+" et "+?interface2.getDevice().getName(),"defaut")

Rule VerifierAssociations.verif_freq_cc_1 :

active true

documentation Vérification des compatibilités des propriétés fréquentielles : cas où un élément impose une composante continue à un autre qui ne l'accepte pas

creationDate Wed Jul 14 21:42:14 CEST 2004

editable true

lastModificationDate Wed Jul 14 21:52:50 CEST 2004

name verif_freq_cc_1

packet VerifierAssociations

WHEN

there is a **Interface** called ?interface1
 such that getImp_comp_continue() equals "oui"

there is a **Interface** called ?interface2
 such that getAcc_comp_continue() equals "non"

there is a **Connexion**
 such that getInterface1() equals ?interface1
 and getInterface2() equals ?interface2

THEN

execute
 so that ?context.sendMessage("Incompatibilité énergétique dans l'association entre les éléments "+?interface1.getDevice().getName()+" et "+?interface2.getDevice().getName(),"default")

Annexe 3 – Configuration de JBOSS

La configuration du serveur d'application JBOSS est assurée essentiellement par le fichier "jboss.jcml" (codé en XML).

Ce dernier permet notamment de :

- Référencer les bases de données utilisées dans les applications déployées sur le serveur. Ainsi, la base de donnée de notre application a été référencé dans la rubrique suivant :

```
<mbeancode="org.jboss.jdbc.XADataSourceLoader"
name="DefaultDomain:service=XADataSource,name=conceptionBD">
  <attribute name="PoolName">conceptionBD</attribute>
    <attribute name="DataSourceClass">
      org.jboss.pool.jdbc.xa.wrapper.XADataSourceImpl
    </attribute>
    <attribute name="Properties"/>
    <attribute name="URL">jdbc:odbc:conceptionBD</attribute>
    <attribute name="GCMinIdleTime">1200000</attribute>
    <attribute name="JDBCUser"/>
    <attribute name="Password" />
    <attribute name="LoggingEnabled">>false</attribute>
</mbean>
```

On distingue notamment l'étiquette de la base (attribut "PoolName") qui est dans notre cas "conceptionBD" et qui sera utilisée dans le code des classes qui forment notre application pour accéder à la base à travers des requêtes SQL.

On ne doit pas oublier de mentionner l'URL de la base (attribut "URL") qui est dans notre cas "jdbc:odbc:conceptionBD" est qui signalé via odbc32 de windows.

- Activer le conteneur web dans lequel s'exécute les composants web et via lequel on fixe le port d'accès aux pages web de l'application grâce à la rubrique suivante :

```
<mbean code="org.jboss.web.catalina.EmbeddedCatalinaServiceSX"  
  name="DefaultDomain:service=EmbeddedTomcat">  
  <attribute name="Port">80</attribute>  
</mbean>
```

Normalement, les services web d'une application s'exécute par défaut sur le port 8080, mais nous l'avons remplacé dans notre application par le port 80 (attribut "Port") car nous avons un conflit d'accès sur le premier port avec l'éditeur web d'ILOG JRULES.

Bibliographie

- [All01] S. Allamaraju, K. Avedal, R. Browett, J. Diamond, J. Griffin, M. Holden, A. Hoskinson, R. Johnson, T. Karsjens, L. Kim, A. Nakimovsky, D. O'Connor, S. Tyagi, G. Van Damme, G. Van Huizen, M. Wilcox, S. Zieger. *"Programmation avec J2EE - Conteneurs J2EE, servlets, JSP, EJB"*. Editions Eyrolles, Paris, 2001.
- [Bel00] B. Bel Habib. *"Méthodologie pour le développement de Plates Formes Intégrées dédiés à la Conception en Génie Electrique"*. Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000.
- [Ber98] S. Bergeon. *"Contribution à une méthodologie de dimensionnement des convertisseurs statiques"*. Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1998.
- [Ber99] J. C. Bernadac, F. Knab. *"Construire une application XML"*. Editions Eyrolles, Paris, 1999.
- [Bor92] P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis. *"Modélisation et identification des processus", Tome 2*. Editions TECHNIP, Paris, 1992.
- [Bor96] F. Bordry, A. Dupaquier. *"High Current, Low Voltage Power Converters for LHC"*. EPAC'96, Sitges, Espagne, 1996.
- [Bou00] A. Bouscayrol, X. Guillaud, J. P. Hautier, Ph. Delarue. *"Macro modélisation des conversions électromécaniques : application à la commande des machines électriques"*. Revue Internationale de Génie Electrique, Vol. 3, n°2, France, 2000.

- [Bou02] A. Bouscayrol, Ph. Delarue, E. Semail, J. P. Hautier, J. N. Verhille. *"Application de la représentation énergétique macroscopique à un système de traction multimachine"*. Revue Internationale de Génie Electrique, Vol. 5, n°3-4, France, 2002.
- [Bro01] F. Broud. *"SQL"*. Editions Pearson Education, Paris, 2001.
- [Cha00] I. Charon. *"Le langage Java - Concepts et pratiques"*. Editions Hermes, Paris, 2000.
- [Dau00] G. Dauphin-Tanguy. *"Les bonds graphs"*. Editions Hermes, Paris, 2000.
- [Dem00] H. Demni. *"Conception des systèmes électrotechniques"*. Mémoire de stage de DEA en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2000.
- [Dem02] H. Demni, H. Piquet, H. Foch. *"Conception en électronique de puissance à l'aide d'éléments caractérisés"*. JTEA'2002, Sousse, Tunisie, 2002.
- [En88A] Equipe d'enseignants de l'ENSEEIH. *"La conversion continu - continu"*. Notes de cours. Editions Mentor, Paris, 1988.
- [En88B] Equipe d'enseignants de l'ENSEEIH. *"Méthodes d'études des convertisseurs statiques"*. Notes de cours. Editions Mentor, Paris, 1988.
- [Fan01] Z. Fan, J. Hu, K. Seo, E. Goodman, R. Rosenberg, B. Zhang. *"Bond Graph Representation and Genetic Programming for Automated Analog Filter Design"*. Genetic and Evolutionary Computation Conference, San Fransisco, USA, 2001.
- [Far90] H. Farreny, M. Ghallab. *"Eléments d'intelligence artificielle"*. Editions Hermes, Paris, 1990.
- [Fef00] Y. Fefermann. *"Optimisation directe de systèmes hétérogènes en Génie Electrique"*. Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2000.

- [Fez00] D. Fezzani, J. Desbiens. *"Des Systèmes experts aux systèmes multi-agents comme nouveau paradigme de conception en ingénierie"*. JTEA'2000, Hammamet, Tunisie, 2000.
- [Fez96] D. Fezzani. *"Système expert pour la conception en Electronique de Puissance"*. Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1996.
- [Foc93A] H. Foch, Y. Chéron, R. Arches, B. Escaut, P. Marty, M. Metz. *"Commutateurs de courant à thyristors"*. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie Electrique, France, 1993.
- [Foc93B] H. Foch, Y. Chéron, R. Arches, B. Escaut, P. Marty, M. Metz. *"Fonctionnement avec sources réelles des commutateurs à thyristors"*. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie Electrique, France, 1993.
- [Fra96A] B. François, J. P. Cambronne, J. P. Hautier. *"Caractérisation des convertisseurs matriciels : I. Structure de l'automate de commande rapprochée"*. Journal de Physique III, n° 6, France, 1996.
- [Fra96B] B. François, J. P. Cambronne, J. P. Hautier. *"Caractérisation des convertisseurs matriciels : II. Synthèse des fonctions de connexion"*. Journal de Physique III, n° 6, France, 1996.
- [Foc98] H. Foch, F. Forest, T. Meynard. *"Onduleurs de tensions – Structures. Principes. Applications"*. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie Electrique, France, 1998.
- [Hau99] J. P. Hautier, J. P. Caron. *"Convertisseurs statiques – Méthodologie causale de modélisation et de commande"*. Editions TECHNIP, Paris, 1999.
- [Hun99] J. Hunter, W. Crawford. *"Le guide du programmeur Java Script"*. Editions O'reilly, Paris, 1999.
- [Ilo02] Ilog. *"Ilog Rule Builder 4.0 User's Guide"*. France, 2002.
- [Jon01] E. Jones. *"Access 2000 et VBA"*. Editions OEM, Paris, 2001.
- [Lad03] Ph. Ladoux, H. Piquet, F. Richardeau. *"Utilisation des outils de simulation pour une approche pédagogique en Electronique de puissance"*. La Revue 3EI, n°35, France, 2003.

- [Lec98] C. Lechevalier. *"Analyse fonctionnelle des convertisseurs statiques en vue de la conception"*. Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1998.
- [McF99] N. McFarlane. *"Le guide du programmeur Java Script"*. Editions Eyrolles, Paris, 1999.
- [Mey97] B. Meyer. *"Object-oriented Software construction"*. Prentice Hall Ptr editions, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 1997.
- [Mul00] P. A. Muller, N. Gaertner. *"Modélisation objet avec UML"*. Editions Eyrolles, Paris, 2000.
- [Piq00] H. Piquet, H. Foch, H. Demni. *"Une méthode de conception en électronique de puissance, à l'aide d'éléments caractérisés"*. EPF'2000, Lille, 2000.
- [Piq89] H. Piquet. *"Simulation numérique des convertisseurs statiques - prise en compte des boucles de contrôle"*. Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1989.
- [Piq94] H. Piquet, J. P. Cambronne, S. Saadate, C. Glaize, *"Conception des dispositifs et systèmes électrotechniques"*. EPF' 1994, Cachan, 1994.
- [Rag96] D. Ragget, J. Lam, I. Alexander. *"HTML 3 – Electronic Publishing on the world wide web"*. Addison – Wesley editions, Harlow, UK, 1996.
- [Ran03] S. A. Randi. *"Conception systémique de chaînes de traction synchrones pour véhicule électrique à large gamme de vitesse"*. Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [Ree98] G. Reese. *"JDBC et Java – Guide du programmeur"*. Editions O'Reilly, Paris, 1998.
- [Rom98] S. Roman. *"Bases de données MS-Access – Conception et programmation"*. Editions O'Reilly, Paris, 1998.
- [Sab93] J. C. Sabonnadière. *"Conception assistée par ordinateur (CAO) en Génie Electrique"*. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie Electrique, France 1993.

- [Sha93] J.E.E. Sharpe, R.H. Bracewell. "*Application of bond graph methodology to concurrent conceptual design of interdisciplinary systems*". IEEE Systems, Man and Cybernetics'93 Conference. Le Touquet, 1993.
- [Sta02] S. Stark, M. Fleury, The JBOSS Group. "*JBOSS Administration and Development*". Pearson Education editions, Lebanon, USA, 2002.
- [Vin03] C. Vincent. "*XML et XSL – Les feuilles de styles XSL*". Editions Eyrolles, Paris, 2003.

