



Contribution au choix d'architecture 3D des systèmes mécatroniques sous contraintes multi-physiques : Application aux Interférences Electro-Magnétiques (IEM)

Mouna Kharrat

► To cite this version:

Mouna Kharrat. Contribution au choix d'architecture 3D des systèmes mécatroniques sous contraintes multi-physiques : Application aux Interférences Electro-Magnétiques (IEM). Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Paris-Saclay; Université de Sfax (Tunisie), 2020. Français. NNT : 2020UPAST049 . tel-03166547

HAL Id: tel-03166547

<https://theses.hal.science/tel-03166547>

Submitted on 11 Mar 2021

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

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

Contribution au choix d'architecture 3D des systèmes mécatroniques sous contraintes multiphysiques : Application aux Interférences Electro-Magnétiques (IEM)

**Thèse de doctorat de l'Université de Sfax et de
l'université Paris-Saclay**

École doctorale n°573 : Interfaces : matériaux, systèmes, usages
Spécialité de doctorat : Ingénierie des systèmes complexes
Unité de recherche : SUPMECA, Laboratoire QUARTZ, 93400, Saint-
Ouen, France
Réfèrent : CentraleSupélec

**Thèse présentée et soutenue en visioconférence totale,
Le 15/12/2020, par**

Mouna KHARRAT

Composition du Jury

Marija JANKOVIC

Professeur des Universités, Université Paris Saclay

Président

Mnaouar CHOUCANE

Professeur des Universités, ENIM

Rapporteur & Examineur

Christine PRELLE

Professeur des Universités, UTC (Roberval)

Rapporteur & Examineur

Ali AKROUT

Professeur des Universités, ENIT

Examineur

Jean-Yves CHOLEY

Professeur des Universités, SUPMECA (QUARTZ)

Directeur de thèse

Jamel LOUATI

Professeur des Universités, ENIS (LA2MP)

Co-Directeur de thèse

Olivia PENAS

Ingénieur de recherche, HDR, SUPMECA (QUARTZ)

Encadrante de thèse

Mohamed HADDAR

Professeur des Universités, ENIS (LA2MP)

Co-Encadrant de thèse

Olivier MAURICE

Expert en CEM dans ARIANE Group

Invité

Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé en collaboration entre le laboratoire QUARTZ de l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris (SUPMECA), et le laboratoire de Mécanique, Modélisation et Productique (LA2MP) de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS).

Ce travail est le fruit d'un long parcours et sans l'aide et le support précieux des personnes suivantes, il n'aurait certainement pas pu être mené jusqu'à son terme. Je leur suis très reconnaissante car ils étaient toujours présents pour m'encourager dans mes travaux de recherche.

Mes premiers remerciements vont tout d'abord aux membres du jury pour leur intérêt dans ce travail et pour avoir accepté de l'examiner et de l'évaluer, et je voudrais remercier particulièrement Madame Christine PRELLE, Professeur des Universités à l'Université de Technologie de Compiègne, et Monsieur Mnaouar CHOUCANE, Professeur des Universités, à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir (ENIM), d'avoir accepté de rapporter mon manuscrit et pour leur travail de lecture attentive afin d'évaluer ce document. Un grand merci à Monsieur Ali AKROUT, Professeur des Universités à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENT), et à Madame Marija JANKOVIC, Professeur des Universités à l'Université Paris Saclay, de m'avoir fait l'honneur d'être examinateurs de ma thèse et d'accepter de juger ce travail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à Monsieur Jean-Yves CHOLEY, Professeur à l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris, pour son accueil chaleureux au sein de l'équipe de SUPMECA, je lui suis également très reconnaissante pour tous ses conseils et ses encouragements tout au long de ces années.

Je remercie également Monsieur Jamel LOUATI, Professeur des Universités à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, et Monsieur Mohamed HADDAR, Professeur des Universités à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, pour leurs encadrements, leurs encouragements, et leurs critiques constructives ainsi que leurs contributions pour travailler dans de bonnes conditions.

Je tiens aussi à exprimer mes vifs remerciements à mon encadrante de thèse Madame Olivia PENAS, Ingénieur de recherche, HDR, pour sa disponibilité permanente, son support continu tout au long de ma thèse, et la confiance qu'elle m'a accordée en m'offrant ce travail de thèse passionnant et qui m'a permis d'approfondir mes connaissances dans un domaine particulier que je ne connaissais pas : les interférences électromagnétiques (IEM). Elle m'a guidée et elle m'a donnée également l'occasion de profiter de ses compétences professionnelles notamment dans le domaine de l'Ingénierie Système (IS).

Je tiens à remercier Monsieur Hassen TRABELSI, Docteur de l'Ecole Centrale Paris, pour tous ses encouragements et son soutien durant ma thèse.

Un tout grand merci à Monsieur Régis PLATEAUX, enseignant-chercheur à l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris, à Monsieur Romain BARBEDIENNE, Docteur de l'Université Paris-Saclay et à Monsieur Olivier MAURICE, expert en compatibilité électromagnétique, pour leur gentillesse, leurs aides précieuses, leurs disponibilités et leurs collaborations de travail dans différents domaines évoqués dans cette thèse (telles que la CEM, la topologie, la thermique, etc.).

Je suis très reconnaissante à tous mes collègues et à tous ceux qui m'ont aidé, d'une manière ou d'une autre, de près ou de loin, à terminer cette thèse.

Je voulais aussi adresser mes remerciements sincères aux membres de LA2MP et de QUARTZ et à Madame Christel COMPAGNON, Assistante du Laboratoire QUARTZ, qui ont contribué chacun à sa façon, au bon déroulement de cette thèse et je remercie également tous ceux qui m'ont apporté leur soutien nécessaire à cette thèse.

Ces remerciements sincères ne peuvent s'achever, sans une pensée pour ma famille, en particulier mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés, qui m'ont tendu la main et m'ont soutenue en me donnant de la force, de l'amour et surtout de la patience pour achever cette thèse. Je remercie également ma sœur jumelle et mon frère qui m'ont toujours soutenue et m'ont encouragée pour l'accomplissement de ce chemin.

Enfin, j'adresse mes remerciements sincères à mes ami(e)s proches qui, grâce à un petit sms ou une petite parole, m'ont apporté le soutien et le courage toutes ces années.

Titre : Contribution au choix d'architecture 3D des systèmes mécatroniques sous contraintes multiphysiques : Application aux Interférences Electro-Magnétiques (IEM)

Mots clés : Conception préliminaire, Ingénierie des systèmes basée sur les modèles, Modélisation électromagnétique, Évaluation d'architecture, Identification des interférences électromagnétiques, Extension SysML.

Résumé : L'intégration des systèmes mécatroniques génère de nombreuses perturbations multi-physiques (thermiques, électromagnétiques et dynamiques) rendant leur choix d'architecture complexe. En effet, l'introduction croissante de composants électroniques et électriques (E/E) dans la plupart des systèmes actuels, augmente le risque d'occurrence de nombreuses interférences électromagnétiques (IEM) pouvant dégrader fortement leur fonctionnement. Tandis que ces problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM) sont généralement traités en phase de conception détaillée, où les possibilités de compromis se limitent à quelques ajustements de positionnement ou à des solutions de protection coûteuses, une solution consiste à proposer un cadre collaboratif pour l'évaluation, dès les premières phases de conception, d'architectures physiques de concept prenant en compte ces contraintes électromagnétiques (EM). En effet, il est important à cette étape, que l'ensemble des acteurs multidisciplinaires impliqués puissent définir, modifier/mettre à jour, ajouter leurs connaissances et contraintes et échanger leurs données tout en continuant à travailler dans leur environnement numérique habituel. Par ailleurs, ces activités d'ingénierie système doivent être outillées avec des approches d'« Ingénierie Système basée sur des modèles » (MBSE), pour supporter la continuité numérique, la cohérence et la traçabilité des modèles et des données nécessaires à ce processus d'évaluation.

Pour répondre à ce besoin, cette thèse s'appuie sur l'approche collaborative MBSE SAMOS (Spatial Architecture based on Multi-physics and Organization of Systems) afin de supporter l'évaluation de l'architecture 3D de concept en phase amont sous contraintes électromagnétiques. Dans ce contexte, nous avons, dans un premier temps, développé une extension SysML appelée EMILE (ElectroMagnetic Interactions Layout Extension) pour formaliser et modéliser, au plus tôt, les contraintes EM dans le modèle système.

Cette extension inclut notamment la définition des exigences EM, la description des modes de couplage électromagnétiques et la spécification des configurations de simulation permettant la vérification et la validation ultérieures des exigences, grâce au développement d'une interface homme-machine. Notre travail de recherche a ensuite porté sur une méthodologie d'évaluation combinant une approche topologique avec une modélisation EM., afin de supporter le processus d'évaluation qualitative et quantitative des interférences électromagnétiques (IEM). En effet, pour un type d'IEM donné, l'analyse topologique de l'architecture système permet d'identifier qualitativement l'existence des composants victimes et de leurs agresseurs potentiels associés. Une fois ces IEM potentielles identifiées, une évaluation quantitative peut alors être réalisée, par exemple en se basant sur les équations et lois physiques du couplage identifié, et sur les exigences électromagnétiques et géométriques prédéfinies avec EMILE. Cette approche permet ainsi de garantir le choix pertinent d'une architecture physique 3D de concept sous contraintes EM. Les approches proposées ont été illustrées sur une étude de cas d'une chaîne de traction du véhicule électrique, en s'appuyant sur plusieurs scénarios d'implémentation logicielle (SysML, Modelica, Matlab, FreeCAD) au sein de l'outil Sketcher 3D EM.

Title : Contribution to the choice of 3D architecture of mechatronic systems under multi-physical constraints: Application to Electro-Magnetic Interferences (EMI)

Keywords : Conceptual design, Model-Based System Engineering, Electromagnetic modeling, Architecture evaluation, Electromagnetic interferences identification, SysML extension.

Abstract : The integration of mechatronic systems generates many multi-physical disturbances (thermal, electromagnetic and dynamic) making their choice of architecture complex. Indeed, the increasing introduction of electronic and electrical (E/E) components in most of the current systems, increases the risk of occurrence of many electromagnetic interferences (EMI) that can strongly degrade their behavior. While these electromagnetic compatibility (EMC) problems are usually addressed in the detailed design phase, where the possibilities of compromise are limited to a few positioning adjustments or costly protection solutions, one solution is to propose a collaborative framework for the evaluation, from the early design phases, of physical design architectures taking into account these electromagnetic (EM) constraints. Actually, it is important at this stage that all the multidisciplinary actors involved can define, modify/update, add their knowledge and constraints and exchange their data while continuing to work in their usual digital environment. In addition, these system engineering activities must be supported with "Model-Based System Engineering" (MBSE) approaches, to support the digital continuity, consistency and traceability of the models and data required for this evaluation process.

To meet this need, this thesis is based on the MBSE SAMOS (Spatial Architecture based on Multi-physics and Organization of Systems) collaborative approach to support, from the preliminary design phase, the evaluation of the 3D concept architecture under electromagnetic constraints. In this context, we have initially developed a SysML extension called EMILE (ElectroMagnetic Interactions Layout Extension) to formalize and model, as early as possible, the EM constraints in the system model.

This extension notably includes the definition of EM requirements, the description of electromagnetic coupling modes and the specification of simulation configurations allowing the further verification and validation of the requirements, thanks to the development of a Human-Machine Interface. Our research work then focused on an evaluation methodology combining a topological approach with EM modeling, in order to support the process of qualitative and quantitative evaluation of electromagnetic interference (EMI). Indeed, for a given type of EMI, the topological analysis of the system architecture allows to qualitatively identify the existence of the victim components and their associated potential aggressors. Once these potential EMIs have been identified, a quantitative evaluation can then be performed, for example based on the physical equations and laws of the identified coupling, and on the electromagnetic and geometric requirements predefined with the EMILE extension. As a result, this approach ensures the relevant choice of a 3D physical architecture of the concept under EM constraints. The proposed approaches have been illustrated on a case study of an electric vehicle power train, based on various software implementation scenarios (SysML, Modelica, Matlab, FreeCAD) within the Sketcher 3D EM tool.

Table des matières

Liste des acronymes.....	16
Introduction générale	18
I. Enjeux industriels.....	18
A. Conception des systèmes mécatroniques.....	18
B. Interférences électromagnétiques dans les systèmes mécatroniques	20
C. Evaluation de l'architecture 3D de concept sous contraintes multiphysiques.	21
II. Problématique scientifique	24
III. Structure du manuscrit.....	25
Chapitre 1. Etat de l'art et contexte scientifique	27
I. Contexte Model-Based System Engineering.....	27
A. Ingénierie Système (IS)	27
B. Les approches MBSE.....	29
1. Collaboration entre des équipes de disciplines différentes et amélioration de la communication pendant la phase de préconception.....	31
2. Intégration des exigences géométriques et physiques dans une approche MBSE...	33
C. Evaluation de l'architecture 3D physique	36
1. Métrique.....	36
2. Evaluation par simulation physique et géométrique	37
3. Evaluation par modélisation mathématique.....	37
II. Plateforme SAMOS/ Sketcher thermique	38
III. Evaluation des IEM en phase amont	40
A. Introduction terminologique.....	40
1. CEM vs IEM.....	40
2. Modes commun et différentiel des IEM.....	41
3. Mécanismes de transmission des IEM.....	42
B. Evaluation numérique du comportement EM basée sur l'architecture 3D	47
C. Analyse EM dès la phase de préconception	49
IV. Conclusion	49
Chapitre 2. Analyse du besoin	51
I. Géométrie 3D.....	51
II. Experts thermiques.....	53
A. Besoins	53
1. Pratiques existantes	54
2. Analyse des améliorations potentielles.....	54
III. Experts en dynamique.....	55

1.	Besoins	55
2.	Les pratiques existantes	56
3.	Analyse des améliorations potentielles	59
IV.	Experts EM	60
1.	Spécificités sectorielles	60
2.	Besoins	63
3.	Pratiques existantes	64
4.	Analyse des améliorations potentielles	66
V.	Synthèse	67
Chapitre 3. Modélisation EM dans EMILE		69
I.	L'extension SysML EMILE pour la spécification des contraintes EM	69
A.	Besoins	69
B.	Exigences EM	71
C.	Modélisation géométrique	71
D.	Couplages EM	72
E.	Simulation	74
F.	Modèle de données	74
II.	Implémentation de l'extension SysML EMILE	77
A.	Nouveaux artefacts stéréotypés	78
B.	Exigences	79
C.	Informations géométriques	80
D.	Modélisation EM	80
E.	Simulation	81
F.	IHM	81
III.	Cas d'étude : chaîne de traction d'un véhicule électrique (EVPT)	83
A.	Batterie Haute Tension (HT)	85
B.	Convertisseur de puissance (Onduleur DC/AC)	85
C.	Convertisseur DC/DC	86
D.	Moteur électrique	86
E.	Câbles d'interconnexion électriques	86
F.	Description des composants de la Twizy 80	87
IV.	Discussions	88
A.	Entretiens avec des industriels et améliorations apportées	88
B.	Comparaison avec des travaux connexes	91
V.	Conclusion	92
Chapitre 4. Evaluation des risques d'IEM		93

I.	Objectif de l'approche.....	93
II.	Evaluation qualitative.....	94
A.	Analyse de l'existant	94
1.	Pratiques industrielles	94
2.	Travaux scientifiques existants	96
B.	Notre approche : modélisation et analyse topologique.....	98
1.	Concepts et approche générale.....	98
2.	Application à une IEM particulière : la diaphonie étrangère	110
III.	Evaluation quantitative	117
A.	Approches existantes	117
1.	La méthode des Moments (MoM)	117
2.	La méthode des éléments finis (FEM)	118
3.	La méthode des éléments finis de frontière (BEM)	118
4.	La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)	118
5.	La méthode TLM	119
6.	La modélisation analytique.....	119
7.	La méthode de KRON.....	120
B.	Analyse et choix des méthodes.....	120
C.	Approches prototypées sur la diaphonie étrangère	121
IV.	Discussions	124
V.	Conclusions	125
	Chapitre 5. Implémentation dans SAMOS et application sur un cas d'étude.....	126
I.	Adaptation de l'approche SAMOS.....	126
II.	Implémentation du processus global dans le sketcher 3D EM	127
A.	Sketcher 3D EM.....	127
B.	Connexion des modèles issus des 3 environnements.....	128
1.	Exigences	129
2.	Modélisation géométrique SysML- 3D	130
3.	Modélisation EM.....	133
C.	Intégration de l'évaluation qualitative et quantitative au sein d'un même environnement (Matlab)	144
1.	Evaluation qualitative des IEM par diaphonie inductive	144
2.	Evaluation quantitative par modèle analytique des IEM par diaphonie inductive	147
D.	Evaluation quantitative comparative entre un modèle analytique et une approche tensorielle (Kron)	148
1.	Approche de KRON	149

2. Résultats	151
III. Discussions	152
IV. Conclusions	153
Conclusion générale et perspectives.....	155
I. Cadre général	155
II. Contributions	155
III. Perspectives	157
IV. Publications	158
Références bibliographiques.....	159
Annexe 1 : Interférences ElectroMagnétiques (IEM)	179
I. Transmission par conduction.....	179
A. Couplage par liaison directe	179
B. Couplage par impédance commune.....	179
II. Transmission par rayonnement	180
A. Couplage inductif.....	180
C. Couplage par diaphonie inductive.....	182
D. Couplage capacitif.....	185
E. Couplage par diaphonie capacitive.....	186
F. Couplage par rayonnement électromagnétique.....	188
1. Couplage en champ proche	190
2. Couplage en champ lointain	191
Annexe 2 : Equations de Maxwell	195
Annexe 3 : Rappels sur la théorie des graphes.....	196
Annexe 4 : Méthodes quantitatives existantes	199
I. La méthode des Moments (MoM).....	199
II. La méthode des éléments finis (FEM).....	199
III. La méthode TLM.....	199
IV. L'analyse tensorielle (pour méthode de Kron)	200
A. Définition et notions de base.....	200
B. Modélisation d'un circuit électrique avec un graphe topologique	201

Liste des figures

Figure 1 : Exemple d'un avion « tout électrique » (Sarlioglu and Morris, 2015).....	18
Figure 2 : Processus de conception d'ingénierie système (DoD, 2001)	19
Figure 3 : Plateforme collaborative intégrée 3Dexperience (3DEXPERIENCE, 2019)	23
Figure 4 : Positionnement de nos travaux.....	25
Figure 5 : Modèle en V présentant les processus d'ingénierie système pour le développement de l'architecture système (Forsberg et al., 2005)	28
Figure 6 : Modèle en V présentant les itérations pour les prises de décisions liées à la gestion des opportunités et des risques tout au long de la conception (Mooz and Forsberg, 2006).....	29
Figure 7 : a) Documents based Systems Engineering (DBSE) b) Model Based Systems Engineering (MBSE) (Madni and Purohit, 2019).....	31
Figure 8 : Modes de collaboration entre acteurs a) étroitement couplé b) sans couplage.....	31
Figure 9 : Niveaux d'abstraction (verticale et horizontale) pour un exemple d'un composant hardware RF (Lafi, 2016).....	32
Figure 10 : Rôles de l'architecte Système (Muller, 2011).....	33
Figure 11 : Approche SAMOS (Romain Barbedienne, 2017)	39
Figure 12 : Description du Sketcher 3D thermique (Barbedienne et al., 2015b).....	40
Figure 13 : Caractérisation des IEM.....	41
Figure 14 : Description du Mode Commun (MC) (Ecole Supérieur de Plasturgie, 2001; Revol, 2018).....	42
Figure 15 : Description du Mode Différentiel (MD) (Ecole Supérieur de Plasturgie, 2001; Revol, 2018).....	42
Figure 16 : Types d'IEM suivant leur mode de transmission.....	43
Figure 17 : Couplage par rayonnement électromagnétique en champ proche et en champ lointain	43
Figure 18 : Les différents modes de couplage des IEM.....	44
Figure 19 : Exemple de l'alternateur i-StARS (Valeo ©) (Richard and Dubel, 2007)...	47
Figure 20 : Evolution de l'architecture 3D des systèmes mécatroniques (source : Projet O2M)	51
Figure 21 : Motorisation intégrée d'un véhicule hybride électrique (Tadros et al., 2003).	52
Figure 22 : Proposition d'amélioration de l'outil Sketcher 3D thermique.....	55
Figure 23 : Courbe de matrice de transfert	58
Figure 24 : Schéma de gabarit d'amplitude sur une plage fréquentielle donnée.....	59
Figure 25 : Modélisation dynamique d'une architecture en phase amont.....	60
Figure 26 : Exemple d'interactions multiphysiques intrasystèmes et extrasystèmes d'un véhicule automobile.....	64
Figure 27 : Proposition du processus d'évaluation des IEM en phase amont (s'appuyant sur l'approche SAMOS)	67
Figure 28 : Positionnement de nos travaux de thèse	68
Figure 29 : Modèle de données EMILE	75
Figure 30 : Aperçu du processus basé sur EMILE dans un diagramme d'activités.	77
Figure 31 : Diagramme du profil EMILE	79
Figure 32 : Vue de l'implémentation EMILE dans l'environnement de l'outil PTC	81
Figure 33 : Développement de nouveaux boutons basés sur des scripts pour le diagramme BDD physique	82

Figure 34 : Développement de nouveaux menus de configuration (IHM) pour définir une géométrie prédéfinie sur un composant.....	82
Figure 35 : Développement de nouveaux menus de configuration (IHM) pour définir une géométrie prédéfinie sur un medium interactif.....	82
Figure 36 : Développement du menu Physique (IHM).....	83
Figure 37 : Développement de nouveaux boutons basés sur des scripts (IHM) pour les diagrammes BDD physique et IBD physique.....	83
Figure 38 : Chaîne de traction du véhicule électrique Renault TWIZY 80 (Caillard, 2015)	84
Figure 39 : Schéma de l'architecture des composants E/E de l'EVPT'	84
Figure 40 : Cheminement du courant électrique dans la batterie de puissance (Guttowski et al., 2003).....	85
Figure 41 : Propagation des courants de mode commun au niveau de l'ensemble « convertisseur - câble – moteur » (Costa et al., 2005b).....	85
Figure 42 : Mise à jour du modèle de données d'EMILE suite aux retours d'expériences des experts.	90
Figure 43 : Processus d'évaluation des IEM dans approche MBSE	93
Figure 44 : Loi de probabilité de perturbation d'un composant (victime) en fonction de son niveau de contrainte	96
Figure 45 : Diagramme physique d'une architecture E/E générique.....	99
Figure 46 : Graphe topologique d'une architecture E/E générique.....	101
Figure 47 : Matrice d'incidence transposée A/S de l'architecture générique : $\delta 0t$	101
Figure 48 : Extrait de l'architecture pour analyse du couplage Composant/Boucle.....	104
Figure 49 : Matrice d'incidence transposée A/S : $\delta 0t$	104
Figure 50 : Matrice Laplacienne S/S, $L = MI \times Mit$	105
Figure 51 : Matrice Laplacienne L réduite.....	105
Figure 52 : Algorithme du programme d'identification de boucles de courant victimes	106
Figure 53 : Matrice d'interactions décrivant les arêtes impliquées dans les mailles (victimes) identifiées.....	106
Figure 54 : Matrice d'interactions décrivant les sommets impliquées dans les mailles (victimes) identifiées.....	107
Figure 55 : Matrice d'incidence transposée A/S ($\delta 0t$) avec identification du MC (en bleu) et des antennes (en rouge).....	108
Figure 56 : Schéma initial d'une architecture E/E en interaction.....	111
Figure 57 : Diagramme physique de l'architecture physique E/E.....	111
Figure 58 : Schéma électrique équivalent de l'architecture E/E	112
Figure 59 : Graphe topologique de l'architecture E/E	112
Figure 60 : Matrice d'incidence transposée $\delta 0t$ entre les arêtes et les sommets.....	113
Figure 61 : Matrice Laplacienne $\delta 0 \times \delta 0t$ des sommets avec leurs degrés à la diagonale correspondant à l'itération 1	114
Figure 62 : Matrice Laplacienne $\delta 0 \times \delta 0t$ réduite correspondant à l'itération 2	114
Figure 63 : Matrice Laplacienne $\delta 0 \times \delta 0t$ réduite correspondant à l'itération 3	115
Figure 64 : Matrice Laplacienne $\delta 0 \times \delta 0t$ réduite correspondant à l'itération 4	115
Figure 65 : Matrice Laplacienne $\delta 0 \times \delta 0t$ réduite correspondant à l'itération 5	115
Figure 66 : Évolution du graphe topologique au cours des itérations successives du processus d'identification des boucles	116
Figure 67 : Matrice d'interaction MA/M des boucles de courant (mailles) identifiées en fonction des arêtes orientées.....	116

Figure 68 : Champ magnétique crée dans la boucle victime.....	121
Figure 69 : Discretisation d'une surface de boucle.....	122
Figure 70 : Paramètres géométriques utilisés dans les équations de la diaphonie inductive	123
Figure 71 : Adaptation de l'approche SAMOS pour les IEM	127
Figure 72 : Aperçu global du Sketcher 3D EM.....	128
Figure 73 : Architecture de la chaîne de traction de la Twizy80.	129
Figure 74 : Extrait des exigences physiques de l'architecture de l'EVPT.	130
Figure 75 : Architecture de la Twizy 80 avec un focus sur l'EVPT avec définition de la géométrie des composants E/E	131
Figure 76 : IHM pour l'importation de modèles SysML dans l'environnement 3D (FreeCAD) et export correspondant.....	132
Figure 77 : Architecture 3D de l'EVPT' générée automatiquement de l'environnement SysML vers l'environnement FreeCAD	132
Figure 78 : Diagramme BDD physique des composants impliqués dans le couplage d'IEM considéré (diaphonie).....	134
Figure 79 : Description des artefacts EMILE liés au câble HT (raccordé à l'onduleur)	134
Figure 80 : Diagramme IBD physique pour la définition du couplage par diaphonie inductive	135
Figure 81 : Diagramme IBD physique pour la définition du couplage par diaphonie capacitive.	135
Figure 82 : Exemple de diagramme paramétrique physique (PPD) pour la diaphonie capacitive en MC.....	136
Figure 83 : Diagramme ibd du couplage inductif sous Cameo	138
Figure 84 : Diagramme paramétrique de l'inductance mutuelle sous Cameo	138
Figure 85 : Diagramme paramétrique de l'inducteur sous Cameo.....	139
Figure 86 : Aperçu de code Modelica généré directement de l'outil Cameo	139
Figure 87 : Modèle électrique du couplage par diaphonie inductive	141
Figure 88 : Aperçu de la fenêtre ajoutée pour l'implémentation des valeurs pour les paramètres géométriques dans le modèle EM.....	141
Figure 89 : Aperçu de l'atelier "Spredsheet" sous FreeCAD	142
Figure 90 : Fichier (.txt) contenant les paramètres géométriques exportés depuis FreeCAD.....	142
Figure 91 : Code de l'import des paramètres géométriques sous Dymola	143
Figure 92 : Affectation des valeurs géométriques pour les composants physiques dans l'outil Dymola.....	143
Figure 93 : Schéma électrique de l'EVPT dans un diagramme interne de bloc	144
Figure 94 : Schéma électrique équivalent du scénario EVPT' en MD.	144
Figure 95 : Diagramme physique (à gauche) et topologique (à droite) à partir de l'architecture 3D des composants E/E de l'EVPT'.....	145
Figure 96 : Code Matlab pour la génération de la matrice d'incidence transposée et la matrice Laplacienne.....	145
Figure 97 : Matrice d'incidence transposée du scénario EVPT générée sous Matlab.....	145
Figure 98 : Matrice Laplacienne du scénario EVPT générée sous Matlab	145
Figure 99 : Code Matlab pour l'identification de toutes les boucles de courants	146
Figure 100 : Identification des boucles de courant identifiées par le programme Matlab	146
Figure 101 : Code Matlab pour la génération automatique de la matrice d'interaction	146
Figure 102 : Identification des agresseurs potentiels à partir la matrice d'interaction sous Matlab	146
Figure 103 : Paramètres géométriques pris en compte pour le scénario d'EVPT'	147

Figure 104 : Fonction pour le calcul de la surface de boucle sous Matlab	147
Figure 105 : Fonction du maillage des boucles de courant victime sous Matlab.....	148
Figure 106 : Résultat de maillage de la boucle victime de courant victime sous Matlab	148
Figure 107 : Aperçu des équations physiques du couplage de diaphonie inductive sous Matlab	148
Figure 108 : Modélisation électrique du scénario EVPT par la méthode de Kron.....	149
Figure 109 : Modélisation topologique du scénario EVPT par la méthode de Kron.....	150
Figure 110 : Matrice d'impédance et vecteur de tension source	150
Figure 111 : Mise à jour de la matrice de couplage	150
Figure 112 : Tension de la victime du scénario EVPT pour les approches analytiques et de Kron pour les paramètres M et Zc constants	151
Figure 113 : Tension de la victime du scénario EVPT pour les approches analytique et de Kron avec différentes valeurs de d(mm) et s(mm)	152
Figure 114 : Adaptation de l'approche SAMOS adaptée pour les IEM	156
Figure 115 : Couplage par liaison directe en mode commun et différentiel (Magnon, 2006) .	179
Figure 116 : Couplage par impédance commune (Darkawi, 2016).....	179
Figure 117 : Solution pour limiter le couplage par impédance commune (Darkawi, 2016)....	180
Figure 118 : Champ magnétique créé par le passage d'un courant dans un conducteur.....	180
Figure 119 : Calcul du champ magnétique dans un point P en appliquant la loi de Biot-Savart	181
Figure 120 : Création de la tension induite VN dans la boucle victime.....	181
Figure 121 : Couplage inductif dans un circuit électrique récepteur (Poulichet, 2010)	182
Figure 122 : Diaphonie inductive entre deux conducteurs	183
Figure 123 : Schéma de deux circuits source et victime en diaphonie inductive et son circuit équivalent correspondant (Alexandersson, 2008).....	183
Figure 124 : Couplage par diaphonie inductive en mode différentiel (Cassiolato, 2011)	183
Figure 125 : Couplage par diaphonie inductive en mode commun (Cassiolato, 2011)	184
Figure 126 : Couplage capacitif dans un conducteur fermé.....	185
Figure 127 : Représentation du couplage capacitif en MC (à gauche) et son schéma équivalent (à droite) (Alexandersson, 2008)	186
Figure 128 : Couplage par diaphonie capacitive en mode différentiel (Schneider, 2017)	187
Figure 129 : Couplage par diaphonie capacitive en mode commun (Schneider, 2017).....	188
Figure 130 : Champ proche et lointain en fonction de la distance de la source (Cuvilier, 2000)	190
Figure 131 : Champ électrique rayonné par un dipôle électrique (Demoulin, 2004)	191
Figure 132 : Champ magnétique généré par une petite boucle rayonnante (Demoulin, 2004)	191
Figure 133 : Rayonnement par une antenne (Maurice, 2007b)	192
Figure 134 : Couplage champ électrique à câble (CRESTT Industrie, 2004; Magnon, 2006)	193
Figure 135 : Couplage champ à boucle (Magnon, 2006).....	193
Figure 136 : Couplage champ magnétique à boucle en mode commun (Magnon, 2006)	193
Figure 137 : Couplage du champ magnétique à boucle en mode différentiel (Magnon, 2006)	194
Figure 138 : Maillage d'un modèle par la méthode des éléments finis	199
Figure 139 : Discrétisation d'un modèle en utilisant la méthode TLM (jojusimz, 2020)	200
Figure 140 : Schéma de graphe orienté (El Fellous, 2010)	201

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des différents modes de couplage d'IEM et références de la littérature associées.....	44
Tableau 2 : Synthèse des IEM.....	45
Tableau 3 : Modes de couplage EM rayonné.....	73
Tableau 4 : Données approximatives sur les composants de l'EVPT de la Renault TWIZY 80.....	87
Tableau 5 : Géométrie estimées des différents câbles du cas d'étude	87
Tableau 6 : Matrice d'interaction/ de risque	95
Tableau 7 : IEM classées suivant la nature des composants source-victime.....	98
Tableau 8 : Modélisation de la structure physique	99
Tableau 9 : Modélisation topologique.....	100
Tableau 10 : Tableau de synthèse des IEM, incluant l'analyse topologique et la définition des contraintes physiques et géométriques nécessaires à l'évaluation quantitative.....	103
Tableau 11 : Synthèse du processus d'évaluation qualitative	110
Tableau 12 : Exigences initiales du scénario d'EVPT.....	130
Tableau 13 : Comparaison entre les éléments/la sémantique et les diagramme SysML et Modelica (Paredis et al., 2010)	137
Tableau 14 : Rappel sur quelques terminologies de base dans la théorie des graphes.....	196
Tableau 15 : Quelques notions de base pour l'analyse tensorielle	200
Tableau 16 : Transformations d'espaces entre les entités topologiques	202

Liste des acronymes

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
BDD	Block Definition Diagram
BE	Boundary Element
BT	Basse Tension
CAD	Computer-Aided Drafting
CAE	Computer-Aided Engineering
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CEM	Compatibilité ElectroMagnétique
CI	Conductive Interaction
CLD	Class Diagram
CSP	Constraint Satisfaction Problem
COTS	Commercial Off-The-Shelf
DBSE	Documents Based Systems Engineering
DEPS	Design Problem Specification
DEVS	Discrete Event System Specification
E/E	Électronique/Électrique
EDA	Electronic design automation
EF	Éléments Finis
EGRM	Élément Géométrique Minimal de Référence
EI	Electric Interaction
EM	Électromagnétique
EMA	Electro-Mechanical Actuator
EMILE	ElectroMagnetic Interactions Layout Extension
ESD	Electro-Static Discharge
FDTD	Finite Difference Time Domain
FEM	Finit Element Method
FRF	Fonction de Réponse en Fréquence
FV	Finite Volume
GERTRUDe	Geometrical Extension Related to TTRS Reference for a Unified Design
HoQ	House of Quality
HT	Haute Tension
IBD	Internal Block Diagram
IEM	Interférences ElectroMagnétiques
IF	Interacting Face
IHM	Interface Homme-Machine
INCOSE	International Council on Systems Engineering
IS	Ingénierie Système

ISBM	Ingénierie de Systèmes Basée sur des Modèles
M2M	Model to Model (transformation)
M2T	Model to Text (transformation)
MBSE	Model-Based Systems Engineering
ISO	International Organization for Standardization
MDO	Multi-Disciplinary Optimization
MC	Mode Commun
MCAD	Mechanical Computer-Aided Drafting
MD	Mode Différentiel
MEF	Méthode Éléments Finis
MoM	Method of Moment
O2M	Outils de Modélisation Mécatronique
OMG	Object Management Group
PIDO	Process Integration Design Optimization
PPD	Physics Parametric Diagram
PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
RGE	Reduced Geometric Element
SA-CAD	System Architecting CAD
SAMOS	Spatial Architecture based on Multi-physics and Organization of Systems
SATT	Surfaces Associées Technologiquement et Topologiquement
SBD	Set-Based Design
SE	System Engineering
SEMP	Systems Engineering Management Plan
SRC	Spectre de Réponse au Choc
SRE	Spectre des Réponses Extrêmes
STRD	STRucture Diagram
SysML	System Modeling Language
TMD	Tuned Mass Dumper
TFM	Topological Functioning Model
TLM	Transmission-Line Modelling
TheReSE	Thermics Related SysML Extension
TTRS	Technologically and Topologically Related Surfaces
UML	Unified Modeling Language
V&V	Vérification & Validation
XML	Extensible Markup Language

Introduction générale

I. Enjeux industriels

A. Conception des systèmes mécatroniques

En raison de la forte concurrence entre les entreprises, le principal défi de l'industrie est d'assurer une bonne qualité des produits tout en réduisant les coûts et les délais de conception. Se basant sur l'intégration croissante de nouvelles technologies de l'information dans des systèmes existants, cette concurrence conduit aujourd'hui à des systèmes de plus en plus complexes adressant des problématiques mécatroniques. En parallèle, ces entreprises doivent faire face à de nouveaux enjeux sociétaux (comme la transition énergétique et les normes associées ou les ruptures technologiques, telles que l'Internet des objets ou les systèmes autonomes), qui les obligent à concevoir de nouvelles architectures de systèmes. Or, la conception de telles architectures peut présenter des risques de développement et des coûts associés élevés (Kossiakoff et al., 2003). Ceci est d'autant plus vrai dans le contexte de l'électrification des transports (ex : avion tout électrique, véhicule électrique ou hybride, etc.), où l'architecture de ces nouveaux systèmes doit être totalement réinventée, puis évaluée efficacement pour limiter les risques ultérieurs (Figure 1). Par exemple, Atkinson et al. utilisent des pompes à carburant électriques au lieu de pompes hydrauliques pour améliorer l'efficacité, le poids et la taille du système, ainsi que la souplesse du contrôle de la vitesse (Atkinson et al., 2006; Wolmarans et al., 2011).

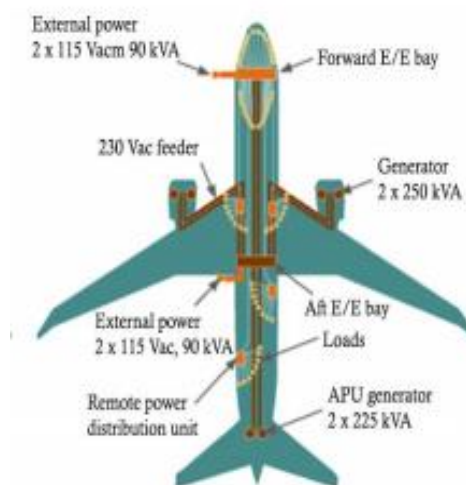


Figure 1 : Exemple d'un avion « tout électrique » (Sarlioglu and Morris, 2015)

En parallèle, pour supporter « l'intelligence » désormais couramment introduite dans les fonctions de contrôle, ces systèmes s'appuient sur un grand nombre d'équipements électriques et électroniques. Or, l'intégration physique de composants multidomaines au sein d'un même système peut générer de nouvelles contraintes multiphysiques, telles que la température, les vibrations et les interférences électromagnétiques (IEM).

Ainsi, la spécificité de la notion d'intégration (fonctionnelle, multidomaine ou physique) (Bradley, 2018; Bricogne-Cuignières, 2015) présente un autre grand défi pour la conception de ces systèmes devenus mécatroniques, et requiert de fait de s'appuyer sur l'ingénierie système pour y parvenir. Le processus de conception « classique » proposé en ingénierie système est représenté sur la Figure 2. La phase de conception commence généralement par l'analyse des besoins du client, puis par la génération de la spécification des exigences (Wang et al., 2017), afin de fournir une architecture fonctionnelle qui permette d'identifier et représenter les exigences fonctionnelles et de

performance du système. Cette architecture fonctionnelle comprend une description des fonctions (c'est-à-dire la transformation des flux d'entrée en flux de sortie) et des interactions entre les fonctions du système, mais aussi celles avec l'environnement externe. Ensuite, une ou plusieurs architectures logiques sont proposées à partir : d'une part des fonctions regroupées en séquences logiques et d'autre part de solutions techniques/technologiques, pour composer un ensemble de concepts qui soutiennent le fonctionnement logique du système. Puis, la dernière étape nécessaire à la synthèse d'architecture du système consiste à allouer les éléments du modèle d'architecture logique aux composants des architectures physiques candidates (Hassine, 2015).

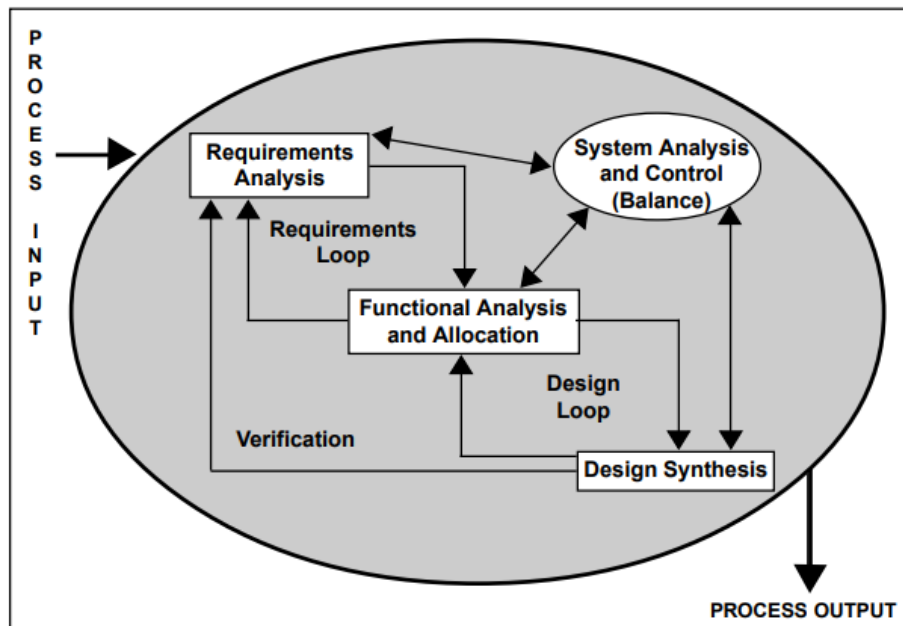


Figure 2 : Processus de conception d'ingénierie système (DoD, 2001)

Ces différentes étapes sont pilotées par des architectes Système qui formalisent les exigences du produit et ont besoin d'un cadre architectural pour étudier les différents choix de conception et solutions techniques correspondantes. Ils évaluent généralement les architectures physiques des différents concepts selon divers critères (performances, maturité, coût, risques, bénéfices, etc.), mais généralement sans prendre en compte les multiples contraintes physiques (thermiques, électromagnétiques, dynamiques ...) exprimées par les experts disciplinaires. En effet, les environnements de simulation multidomaines ou spécifiques à un domaine ne sont généralement utilisés pour évaluer les performances et le comportement des couplages multiphysiques, qu'une fois l'architecture physique d'un concept choisie, c'est-à-dire en phase de conception détaillée. Or, comme les décisions prises dès les premières phases de conception affectent environ 80% des coûts de développement globaux du cycle de vie du système (Kazi et al., 2002), les modifications tardives d'architecture ont un impact préjudiciable sur le coût, la qualité et les performances du produit (Kossiakoff et al., 2003; Perry et al., 2005; Wang et al., 2002). Par conséquent, l'évaluation, en phase amont, de l'architecture 3D de concepts sous contraintes multiphysiques est devenue un enjeu crucial.

Ainsi, pour garantir la réussite d'une conception multidomaine et intégrée des systèmes mécatroniques, leur processus de conception nécessite une approche multidisciplinaire globale, soutenant la collaboration entre toutes les équipes de conception. En effet, afin de pouvoir sélectionner la « meilleure » architecture physique de concept validant les exigences fonctionnelles et de performance, mais aussi les exigences liées aux contraintes multiphysiques et aux contraintes

d'implantation 3D, les architectes Système doivent collaborer non seulement avec les experts disciplinaires et les équipes de simulation mais aussi avec les architectes 3D. Comme l'évaluation d'architectures nécessite de nombreuses interactions, souvent basées sur des ressources de modélisation hétérogènes (outils, langages, formats d'extension, etc.), elle conduit à des compromis tardifs et difficiles, notamment pour la définition de l'architecture 3D finale. En effet, en phase de conception détaillée (généralement basée sur la modélisation par éléments finis dans un environnement de simulation spécifique), les experts techniques défendent leur point de vue respectif sur l'architecture 3D idéale en fonction de leurs contraintes, mais sans avoir la possibilité de discuter du choix d'architecture du concept initial. À ce stade de la conception, l'architecture 3D du système est presque figée. En parallèle, compte tenu des contraintes imposées par les nombreux experts, les possibilités de compromis se limitent à quelques ajustements de positionnement ou à des solutions de protection coûteuses afin d'éviter les perturbations physiques et les couplages indésirables. Une solution est de proposer à ces acteurs de spécifier, modifier/mettre à jour, ajouter leurs connaissances et leurs contraintes, échanger leurs données afin de concevoir le système avec l'architecte Système, de manière collaborative et interactive dès la phase amont. Cette solution permettra alors de fournir une architecture système optimale et cohérente vis-à-vis des exigences de tous les acteurs impliqués dans la conception, tout en prenant en compte la difficulté que chacun puisse travailler dans son environnement numérique habituel. Pour faciliter la collaboration entre les différents modèles développés par les acteurs de la conception (architecte Système, experts multidisciplinaires, architecte 3D ...), ces activités d'ingénierie système doivent être outillées avec des approches d'« Ingénierie Système basée sur des modèles » (MBSE), qui supportent la continuité numérique, la cohérence et la traçabilité des données. D'ailleurs, ces approches MBSE sont aujourd'hui de plus en plus répandues dans l'industrie (Chami et al., 2018), car reconnues pour l'amélioration de la réutilisation, la collaboration et la cohérence entre les différents acteurs et les modèles dans les différentes étapes de conception des systèmes multidisciplinaires.

B. Interférences électromagnétiques dans les systèmes mécatroniques

Concernant les enjeux liés aux interférences électromagnétique (IEM), de nombreux systèmes actuels, notamment dans les secteurs automobile et aéronautique, intègrent un nombre élevé et croissant d'équipements électroniques dans leur architecture (systèmes d'assistance à la conduite, équipements pour le confort, connectivité ubiquitaire, véhicules autonomes, etc.). Au cours des dernières décennies, nous avons constaté une tendance générale à remplacer les systèmes mécaniques et hydrauliques par des configurations «filaires» comprenant des capteurs, des actionneurs et des microprocesseurs. Par exemple, les composants logiciels et électroniques représentent désormais plus de 30% du coût d'une voiture moderne classique (Mologni et al., 2010a). Or, cette demande soutenue d'intégration de systèmes électroniques génère un nombre croissant de problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM) correspondants (Carter, 2012; Zhang et al., 2017).

Un des principaux problèmes concerne notamment la phase d'intégration du système. En effet, même si chaque composant individuel a passé les tests expérimentaux de compatibilité électromagnétique avec succès vis-à-vis des exigences réglementaires, les fabricants peuvent découvrir certains comportements émergents, basés sur les IEM, lors de l'intégration finale des composants (qui peuvent être développés par différents fournisseurs) pour construire le système complet (Mologni et al., 2010a). Karen Burnham souligne ce problème pour les intégrateurs de véhicules qui doivent ainsi faire face à des interactions imprévues lorsque des composants sont intégrés, et préconise de prendre en compte les problèmes de CEM à la fois en phase amont et au niveau du véhicule (Burnham, 2017). Cette difficulté souligne la nécessité de spécifier, au niveau

du système, toutes les contraintes électromagnétiques (EM), tout en prenant en compte, dès la conception, l'architecture préliminaire 3D des composants. Ainsi, la conception de systèmes complexes intégrant des composants électriques/électroniques (E/E) tout en respectant les exigences en matière de gestion de l'énergie, sans augmenter les risques de coût et de sécurité, est considérée comme un défi majeur pour l'industrie (Ranganathan et al., 2002; Rybak and Steffka, 2004). Un aperçu des recherches actuelles sur les problèmes de CEM et leurs mesures correctives est proposé par Zhao et al., en particulier sur les problèmes rencontrés dans certains systèmes E/E intégrés dans les véhicules (Zhao et al., 2013).

En effet, ces problèmes d'interférences électromagnétiques (IEM) peuvent être générés par une simple variation de tension ou de fréquence dans un circuit électronique. Dans les faits, les problèmes EM usuels résultant des sous-systèmes E/E sont : soit causés par des sources naturelles (telles que la terre, les rayonnements, les décharges électrostatiques, la foudre, etc.), soit par des sources artificielles non intentionnelles (couplage entre des équipements E/E). Les experts en CEM considèrent généralement quatre classes principales de comportement EM : (1) la susceptibilité d'un composant aux émissions externes indésirables, (2) l'immunité d'un système aux sources de perturbations radiofréquences (RF) externes, (3) ses propres émissions électromagnétiques vers l'environnement et enfin (4) le couplage par lequel les interférences électromagnétiques (IEM) émises par une source atteignent une victime. Trois facteurs sont alors nécessaires pour que les IEM dégradent le fonctionnement des équipements électriques ou même causent des défaillances : la source d'interférence, le chemin de couplage et les équipements sensibles. C'est pourquoi la prise en compte des contraintes EM est essentielle lors du processus de conception de tels systèmes. Malheureusement, de nombreuses normes CEM sont difficiles à mettre en œuvre dans les phases amont de conception, car la connaissance des composants peut encore être imprécise, et les fonctionnalités EM sont souvent spécifiées ultérieurement (une fois le produit fabriqué) en fonction des spécifications du client (Vrignon et al., 2013). Aussi, afin de faire face aux défis industriels actuels, répondre aux exigences ou normes législatives et limiter les risques de perturbations (Zhang et al., 2017), les IEM doivent être prises en compte le plus tôt possible, et notamment lors du choix de l'architecture de concept.

En résumé, les problèmes de CEM sont de plus en plus importants pour l'industrie. Ils découlent d'une part de l'utilisation croissante des systèmes E/E et d'autre part d'un manque de flexibilité dans le placement ou la conception des modules électroniques. Par conséquent, une modélisation EM au niveau du système est requise dès les premières étapes du processus de conception du véhicule (Mologni et al., 2010a), basée sur un partage des contraintes EM entre les architectes Système et les experts en CEM.

C. Evaluation de l'architecture 3D de concept sous contraintes multiphysiques.

L'évaluation des performances et du comportement des couplages géométriques et multiphysiques de l'architecture physique du concept choisie, est généralement effectuée pendant la phase de conception détaillée. Ce qui génère une augmentation importante des délais et coûts de conception. Pourtant, il serait plus efficace d'évaluer les architectures alternatives sous contraintes géométriques et multiphysiques dès les premières phases de conception.

L'évaluation des différentes architectures et solutions proposées au cours du processus de conception, nécessite aussi la collaboration entre les différentes disciplines. Dès la phase de préconception, le choix d'architecture de concept est un processus de négociation entre disciplines (Détienne et al., 2005). Les exigences en phase de préconception ne sont jamais complètes ou sans ambiguïté, la solution et la définition progressive de nouvelles contraintes sont nécessaires, qu'elles

soient exprimées explicitement ou implicitement par les concepteurs. Ainsi, les solutions ne reposent pas uniquement sur des critères purement techniques de résolution de problèmes, elles résultent également de compromis entre les concepteurs. Pour faciliter cette collaboration et l'intégration de contraintes multidisciplinaires en phase amont, on peut distinguer deux approches : (i) réunir les disciplines autour d'une vision commune et (ii) faciliter les échanges de données relatives à leurs contraintes physiques/disciplinaires.

Concernant le partage d'une vision commune en phase de préconception, la représentation 3D présente un support efficace pour la collaboration et la négociation des différentes disciplines impliquées. D'ailleurs, de plus en plus d'études soulignent la nécessité d'intégrer une description graphique et une visualisation 3D dès les premières étapes de la conception (Shah and Rogers, 1988). En effet, cette vue 3D du concept permet de partager plus facilement les informations de conception (géométriques et physiques) entre les équipes de disciplines différentes. Parallèlement, la phase de préconception est une étape cruciale qui nécessite une conception assistée par ordinateur (CAO) au cours du cycle de développement de produits (Wang et al., 2002). Cette visualisation 3D contribue également à la bonne compréhension des idées de conception pour toutes les parties communes, partagées par tous les acteurs, réduisant ainsi le temps et le coût de conception (Qin et al., 2003). Les modèles 3D permettent d'étudier plusieurs concepts en réduisant le nombre de prototypes physiques coûteux. Par ailleurs, la modélisation CAO 3D facilite la gestion collaborative et la communication entre les différents acteurs (Boujut and Laureillard, 2002; Shen et al., 2008a). En visualisant le concept en 3D, les différents experts disciplinaires peuvent facilement identifier leurs contraintes physiques sous-jacentes (liées par exemple à la proximité de deux composants, ou à l'exposition d'un composant à un environnement « hostile »).

Pour échanger facilement les données issues des modèles (systèmes, géométriques, physiques) générés par les experts, les entreprises actuelles, quel que soit leur secteur d'activité, introduisent de plus en plus l'ingénierie système basée sur les modèles (MBSE) dans leur processus de conception (Chami et al., 2018; Chami and Bruel, 2018). Cette approche permet de remplacer tous les documents papier par des modèles numériques, et ainsi d'assurer le partage, la continuité et la cohérence des données en conception collaborative en améliorant la saisie et la réutilisation des connaissances (Haskins, 2011). Ainsi, non seulement les informations et les exigences spécifiées en phase amont peuvent être tracées jusqu'à la conception détaillée (par continuité numérique) (Grady, 2010) mais les éléments de conception détaillée peuvent aussi être automatiquement vérifiés vis-à-vis des exigences initiales. D'autre part, il est également possible d'échanger des données entre des modèles de disciplines différentes. Dans la pratique, la continuité des données numériques des modèles peut être assurée de deux façons différentes : soit par l'intégration de toutes les données au sein d'une plate-forme unique de modélisation, soit en assurant l'interopérabilité entre les données, langages ou outils. Concernant la première tendance, certains fournisseurs d'outils commerciaux proposent une plate-forme de modélisation unique, afin d'accompagner la conception depuis les exigences jusqu'à la phase de conception détaillée. Par exemple, la plateforme 3Dexperience de Dassault Systèmes (Figure 3) est une plateforme d'expertise qui permet la modélisation, la gestion et le partage des données entre les différents acteurs, de façon cohérente et transparente. Cette plateforme d'information collaborative est basée sur des logiciels de conception 3D, d'analyse et de simulation. Elle permet ainsi de gérer les configurations et les exigences dans un même environnement interactif collaboratif afin d'assurer la traçabilité des modifications du système, en intégrant quatre suites logicielles (Catia, Simulia, Delmia et Enovia) au sein d'un même environnement. Cette plateforme permet de créer directement des liens entre les différents éléments de modélisation du processus de conception. Néanmoins, certaines faiblesses de cette plateforme ont été soulignées (Chauvin et al., 2014; Kleiner and Kramer, 2013),

elles sont principalement liées à l'absence de liens dynamiques quantitatifs entre les exigences et les architectures fonctionnelle et logique et à l'absence de génération automatique entre les différents environnements. Ces lacunes représentent des limites pour la cohérence, la compréhension, l'analyse et la vérification et validation (V&V) des données échangées (géométriques et physiques) entre les acteurs. Ceci entraîne alors une augmentation considérable du temps et des risques de développement.



Figure 3 : Plateforme collaborative intégrée 3DExperience (3DEXPERIENCE, 2019)

En ce qui concerne la deuxième tendance basée sur des approches d'interopérabilité des données, elles peuvent s'appuyer (i) soit sur la gestion des données produit (PDM) dans une base de données pendant toutes les phases du cycle de vie du produit (PLM), (ii) soit sur un échange direct de données entre les modèles, (iii) soit sur de la transformation de modèles. La gestion du cycle de vie des produits et de leurs données au travers de systèmes PLM et PDM permettent d'organiser et de stocker les données afin de limiter la redondance. Ils facilitent la réutilisation tout en améliorant l'unicité des données, et donc la cohérence entre différents modèles. Néanmoins, selon Paviot et al., les lacunes de ces outils PLM résident dans la question de l'interopérabilité, puisque chaque acteur manipule de nombreux modèles numériques avec une grande variété de formats de fichiers qui finalement génèrent encore des données redondantes et incohérentes (Paviot et al., 2011). En parallèle, le développement de formats standards (ex : norme STEP (Fowler, 1995), XML (OMG, 2015)) vise à gérer l'interopérabilité entre les différents outils (Fowler, 1995; Pratt and Anderson, 2001). Malheureusement, l'implémentation de ces normes dans les outils logiciels industriels ne permet pas toujours d'assurer cette interopérabilité efficacement (AFNet, 2015; Cutting and Noppen, 2015; Qin et al., 2017; Selim et al., 2015). Par ailleurs, le processus de traduction directe, proposé par certains logiciels commerciaux (ModelCenter, Syndeia), permet l'interopérabilité des outils pour des objectifs multidisciplinaires de co-simulation et d'optimisation. Même si ces solutions existantes permettent d'échanger des données entre différents outils, ils ne peuvent générer ni de nouvelles architectures, ni de géométrie 3D à partir de zéro, car ils ne sont basées que sur des paramètres de conception existants (Barbedienne et al., 2019). Enfin, un dernier niveau d'interopérabilité est lié aux approches de transformation des modèles qui visent à générer un nouveau modèle à partir d'un modèle source selon certaines règles formellement définies. Aujourd'hui, peu de chercheurs ont développé des transformations entre un modèle système (en UML (Unified Modeling Language) ou SysML (Systems Modeling Language)) et un modèle CAO. Hertkorn et al. proposent un modèle de transformation bidirectionnelle afin d'échanger des données 3D entre UML et l'outil CAO CATIA V5, à travers un profil UML pour les objets CATIA (Hertkorn and Reichwein, 2007; Reichwein, 2011). Cependant, cette approche ne permet pas de créer directement une nouvelle géométrie en UML et ne spécifie aucune exigence de paramètres

géométriques en UML. En ce qui concerne l'interopérabilité entre un modèle système et un modèle physique multidomaine, la transformation de modèle la plus connue est SysML4Modelica entre SysML et le langage Modelica (Reichwein, 2012; Reichwein et al., 2012). Cependant, comme la géométrie n'est abordée qu'à travers les attributs des objets Modelica existants, ce modèle est limité aux artefacts de modélisation géométrique de l'équation Modelica et ne gère aucune contrainte géométrique, ne fournissant ainsi aucune vue d'assemblage 3D.

Finalement, même si l'évaluation, en phase amont, de l'architecture 3D de concepts sous contraintes multiphysiques est devenue un enjeu crucial, et notamment pour prendre en compte les IEM, liées à l'intégration croissante de technologies E/E dans les systèmes, il n'existe pas d'approches/outils répondant à ce besoin, tout en assurant la cohérence des données fournies par les différents experts disciplinaires.

II. Problématique scientifique

Les décisions de modification de la conception, et notamment les choix d'architecture d'un concept, qui sont prises au début du processus coûtent cinq fois plus cher que les décisions de modification de conception prises plus tard, du fait de l'impossibilité de déterminer si une décision de conception précoce est correcte jusqu'à un stade ultérieur du développement lors des tests. Or, le choix d'architecture de systèmes mécatroniques est un processus délicat et complexe pour de nombreuses raisons. La première concerne le besoin d'innovation en termes d'architectures, due à la forte intégration de nouvelles technologies dans ces systèmes, et donc le besoin d'outiller les architectes Systèmes pour faciliter l'évaluation rapide et pertinente des architectures de concepts envisagées. Par ailleurs, le nombre croissant de composants à inclure dans un volume compact, génère des problèmes de positionnement géométrique (architecture 3D) qui sont aussi, souvent générateurs de couplages multiphysiques émergents et notamment d'interférences électromagnétiques entre les composants E/E. A cela, se rajoutent les besoins de collaborations multidisciplinaires pour prendre en compte les contraintes des experts, et par la suite l'interopérabilité des modèles métiers correspondants, pour faciliter la cohérence des données et la gestion des compromis pour les choix de conception et notamment celui d'architecture de concept.

L'objectif de ce travail de recherche est donc de proposer une approche permettant aux différents acteurs de la conception, de collaborer en phase amont pour faciliter l'évaluation d'architecture de concept prenant en compte les contraintes multiphysiques des experts métiers (bien avant la phase de conception détaillée). Dans ce cadre, nous nous sommes ensuite focalisés sur les contraintes liées aux interférences électromagnétiques générées par l'intégration de composants E/E au sein des systèmes mécatroniques.

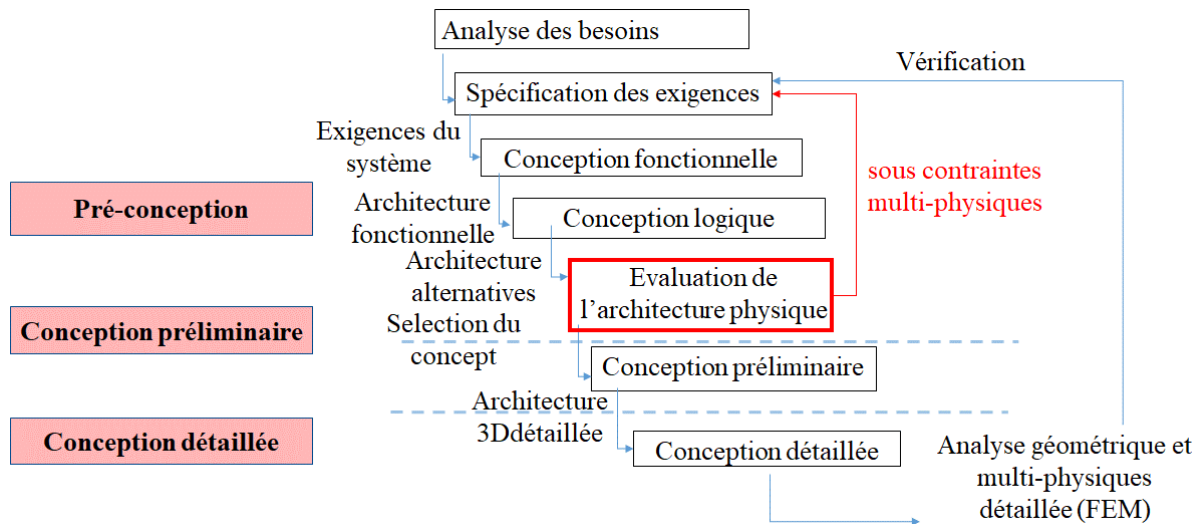


Figure 4 : Positionnement de nos travaux.

S'appuyant sur les approches d'ingénierie système basées sur des modèles (MBSE), pour garantir la cohérence globale de la conception du système, nos travaux de recherche visent donc à étendre l'approche collaborative (MBSE) appelée « SAMOS » déjà appliquée à la thermique et proposée par R. Barbedienne (Barbedienne et al., 2015b, 2015a), pour l'évaluation de l'architecture 3D de concept sous contraintes EM.

Pour cela, nos contributions ont porté d'une part sur l'intégration des contraintes EM dans la modélisation système en phase amont et d'autre part sur la combinaison de la modélisation EM et d'une approche topologique, afin de supporter le processus d'évaluation qualitative et quantitative des interférences électromagnétiques (IEM) pour le choix pertinent d'une architecture physique 3D de concept pour les systèmes mécatroniques.

III. Structure du manuscrit

Le **chapitre 1**, intitulé "Etat de l'art et contexte scientifique", décrit le contexte de l'ingénierie système et ses approches associées telle que l'approche MBSE (Ingénierie Système Basée sur des Modèles) dans la conception multidisciplinaire. Ensuite, nous présentons les travaux antérieurs menés au sein du laboratoire, autour de l'approche SAMOS (**S**patial **A**rchitecture based on **M**ulti-physics and **O**rganisation of **S**ystems) pour la gestion des interactions pour l'évaluation de l'architecture 3D sous contraintes thermiques, et son implémentation au sein de l'outil Modeleur 3D thermique. Puis, nous détaillons les spécificités liées aux contraintes EM par un état de l'art ciblé sur ce domaine, avant de mettre en évidence les problèmes non résolus que nous proposons d'adresser dans nos travaux.

Le **chapitre 2**, intitulé "Analyse du besoin", présente le recueil des besoins et pratiques usuelles en milieu industriel, réalisé auprès d'experts métiers, ainsi que l'état de l'art des approches de modélisations existantes pour la thermique, l'électromagnétisme et la dynamique.

Le **chapitre 3** s'intitule "Modélisation EM dans EMILE", et commence par la spécification des contraintes EM dans le modèle Système dès les premières phases de conception. Puis, nous détaillons le profil SysML EMILE (ElectroMagnetic Interactions Layout Extension) que nous avons développé pour la définition des exigences EM, la modélisation géométrique de l'architecture, la description des couplages EM et la spécification de simulation EM, nous présentons ensuite son implémentation dans l'outil SysML (PTC Integrity Modeler v8.4), avant de

décrire le cas d'étude utilisé comme fil conducteur de ces travaux de thèse. Ce cas d'étude d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique est détaillé en précisant la spécificité et la criticité de ses composants vis-à-vis les IEM. Nous terminons ce chapitre par une discussion autour d'une part des améliorations apportées par des entretiens avec les industriels, et d'autre part de la comparaison de nos propositions avec d'autres travaux existants.

Le **chapitre 4**, intitulé "Evaluation des risques d'IEM", se focalise sur l'évaluation qualitative et quantitative des risques d'IEM. S'appuyant sur les pratiques et approches existantes, ce chapitre décrit une méthodologie d'évaluation combinant une approche topologique avec une modélisation EM. L'analyse exhaustive de tous les couplages EM possibles a été détaillée puis illustrée sur le cas d'un couplage par diaphonie. L'évaluation quantitative des couplages identifiés qualitativement, est alors détaillée pour deux approches choisies : la modélisation analytique et celle de Kron, avant de terminer sur une discussion de nos développements.

Le **chapitre 5**, intitulé "Implémentation dans SAMOS et application sur un cas d'étude", présente les développements mis en œuvre pour assurer la cohérence des données au sein de la plateforme SAMOS. Après avoir décrit l'adaptation de l'approche SAMOS aux contraintes EM, nous présentons l'implémentation de nos développements dans le sketcher 3D EM, tout en montrant les possibilités d'interfaçages entre les trois environnements (Système, 3D, Simulation) via des connexions SysML-Modelica, FreeCAD-Modelica ou FreeCAD-Matlab, illustrées sur le cas d'étude de la chaîne de traction du véhicule électrique.

Enfin, le manuscrit se termine par des conclusions et des perspectives sur les approches développées.

Chapitre 1. *Etat de l'art et contexte scientifique*

Dans ce chapitre, nous présentons le contexte scientifique de l'ingénierie système et des approches MBSE associées définissant le besoin collaboratif entre les différentes disciplines et celui de l'intégration des exigences géométriques et physiques dans une approche MBSE. Des travaux existants sur les outils d'évaluation de l'architecture 3D physique sont présentés. Puis un focus détaille l'approche SAMOS et son implémentation logicielle pour la modélisation des contraintes thermiques dans l'IS. La troisième section commence par une introduction terminologique autour des Interférences Electro-Magnétiques (IEM), avant de préciser les différents modes de couplages électromagnétiques. Un état de l'art détaille les principaux outils et méthodes utilisés pour l'évaluation des IEM basée sur l'architecture 3D et les différents travaux proposant une analyse EM dès les premières phases de conception, avant de clôturer le chapitre par une conclusion.

I. Contexte Model-Based System Engineering

A. Ingénierie Système (IS)

Le terme d'ingénierie système (IS) a été introduit par Schlager en 1956 en tant qu'approche systématique pour l'ingénierie de systèmes industriels complexes (Schlager, 1956). Le Conseil international d'ingénierie système (INCOSE) précise sa définition comme suit : « L'ingénierie système est une approche interdisciplinaire et un moyen permettant de réaliser des systèmes performants et réussis » (INCOSE, 2015). Ainsi, l'IS décrit une vue d'ensemble de tous les processus devant être exécutés pour concevoir et développer un système complexe, en tenant compte de son cycle de vie complet (Lardeur, 2003). Depuis 1969, des normes internationales ont été élaborées pour décrire le processus d'ingénierie système, nous pouvons citer parmi les standards les plus connus : ANSI / EIA 632 (ANSI/EIA-632, 1999; Martin, 2000), IEEE 1220 (Doran, 2006; IEEE 1220, 1998), ISO / IEC 15288 (Freund, 2005; ISO/IEC 15288, 2008) et le manuel INCOSE SE (INCOSE, 2010). Cette approche interdisciplinaire a émergé en réponse à la complexité toujours croissante des systèmes. En effet, l'IS porte à la fois sur la définition des besoins des clients et les fonctionnalités requises dès le début du cycle de développement, sur la documentation de ces exigences, mais aussi sur le processus de synthèse de la conception et de la validation du système, tout en tenant compte des critères du problème en termes d'opérations, de coûts, de délais, de performances et risques, de support, de tests, de fabrication et de disposition (INCOSE, 2015).

Concernant notre problématique, i.e. l'évaluation d'architecture en phase amont sous contraintes multiphysiques, l'IS offre de nombreux intérêts tels que : (i) la gestion de l'ingénierie collaborative multidisciplinaire ; (ii) le partage d'une vue commune multiéchelle et (iii) la traçabilité et la cohérence des données.

- Gestion de l'ingénierie collaborative multidisciplinaire

L'introduction de nouvelles technologies, et notamment celles des technologies de l'information (internet des objets, cloud, systèmes de services...) nécessite des processus de conception et d'évaluation d'architecture des systèmes mécatroniques multidisciplinaires et donc de plus en plus complexes. Or, l'ingénierie système s'avère être un moyen efficace pour gérer des problèmes complexes et souvent compliqués sur le plan technologique. Elle fournit l'effort multidisciplinaire requis tout au long du processus de conception du système pour s'assurer que tous les objectifs de conception soient atteints d'une manière efficace (Blanchard, 2008).

- Partage d'une vue commune multiéchelle

Les concepteurs ont besoin d'un point de vue global et partagé pour évaluer l'ensemble d'un système mécatronique dès les premières phases de conception. Or, l'ingénierie système considère le système dans son ensemble. Ce point de vue systémique se traduit par le fait que l'IS traite des relations du système à concevoir avec son sursystème (environnement) et ses sous-systèmes (Kapurch, 2010). Elle ne se concentre pas uniquement sur les détails internes de la façon dont un sous-système doit accomplir sa mission. Elle vise à garantir l'intégrité du produit global en imposant les besoins commerciaux et techniques à toutes les équipes interdisciplinaires, dans le but de développer le produit en tant que système et de fournir un produit de qualité qui réponde aux besoins des clients (Hamelin et al., 2010).

- Traçabilité et cohérence des données

Enfin, l'ingénierie système peut aider les concepteurs à assurer la traçabilité et la cohérence entre les différentes étapes du processus de développement et notamment au cours des premières phases de conception. En effet, il est important lors de l'évaluation d'architecture, que chaque composant défini dans l'architecture d'un système soit relié à au moins une exigence fonctionnelle (Leonard, 1999) et que les choix d'architectures soient tracés, vis-à-vis des critères et contraintes pris en compte (Legendre, 2017).

Par ailleurs, parmi les modèles de cycle de vie les plus utilisés pour la conception de systèmes complexes (ex : modèle en cascade (Royce, 1970), modèle en spirale (Boehm, 1988) et modèle en V (Forsberg and Mooz, 1998), etc.), le diagramme " Vee ou V " (Forsberg et al., 2005) est celui qui a été choisi par l'INCOSE pour représenter les processus d'ingénierie système (Figure 5). En effet, le processus d'ingénierie système est plutôt un processus séquentiel « Top-down » (descendant), autrement dit partant de l'analyse d'un concept vers le produit, qui nécessite de définir des plans de vérification pendant l'élaboration des exigences et met l'accent sur l'évaluation continue des risques et des possibilités.

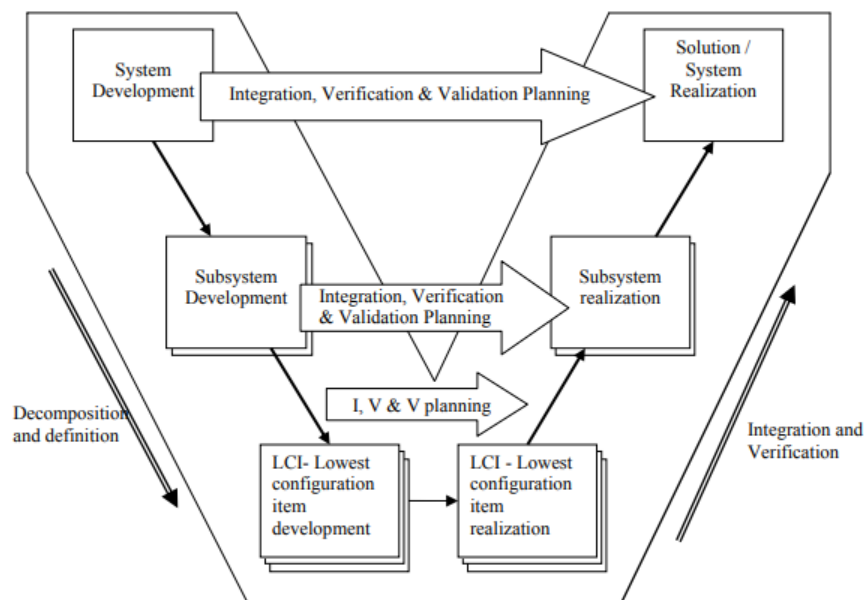


Figure 5 : Modèle en V présentant les processus d'ingénierie système pour le développement de l'architecture système (Forsberg et al., 2005)

Or, l'aspect itératif, lié notamment au besoin de collaborations, reste quand même très présent comme le démontrent les propositions de variantes du cycle en V pour intégrer des boucles d'itération lors du processus de conception (Gräßler et al., 2018), et leur intérêt souligné dans le

processus d'IS qui les a formalisées (Forsberg and Mooz, 1991). Sur la Figure 6, les itérations, qu'elles soient « ascendantes » ou « descendantes » sont effectuées sur la ligne verticale "Time Now". Les itérations ascendantes font intervenir les utilisateurs et sont les activités de validation en cours de réalisation pour garantir que les niveaux de référence proposés sont acceptables. Les itérations verticales descendantes constituent les interrogations et les évaluations essentielles en matière de gestion des opportunités et des risques. À chaque étape du cycle de vie du système, les processus itératifs de l'IS permettent de s'assurer qu'un concept ou une conception est réalisable et que les parties prenantes demeurent favorables à la solution au fur et à mesure qu'elle évolue (SE Handbook Working Group, 2011). Ainsi, ce modèle permet de proposer une approche structurée et itérative pour la conception du système, de l'élaboration du concept jusqu'à sa mise en disposition.

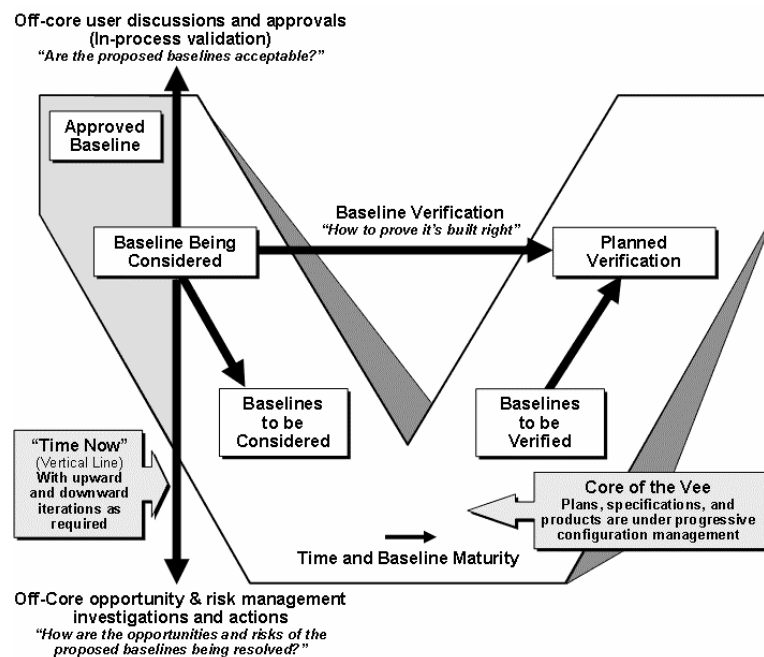


Figure 6 : Modèle en V présentant les itérations pour les prises de décisions liées à la gestion des opportunités et des risques tout au long de la conception (Mooz and Forsberg, 2006)

En parallèle, pour répondre au besoin de collaboration multidisciplinaire de la conception mécatronique et notamment de la cohérence des données durant le processus de conception, les approches d'ingénierie système basées sur des modèles (MBSE) se sont considérablement développées (Jeff A Estefan, 2008), en s'appuyant sur le fort développement concomitant des outils de modélisation et simulation multidisciplinaires.

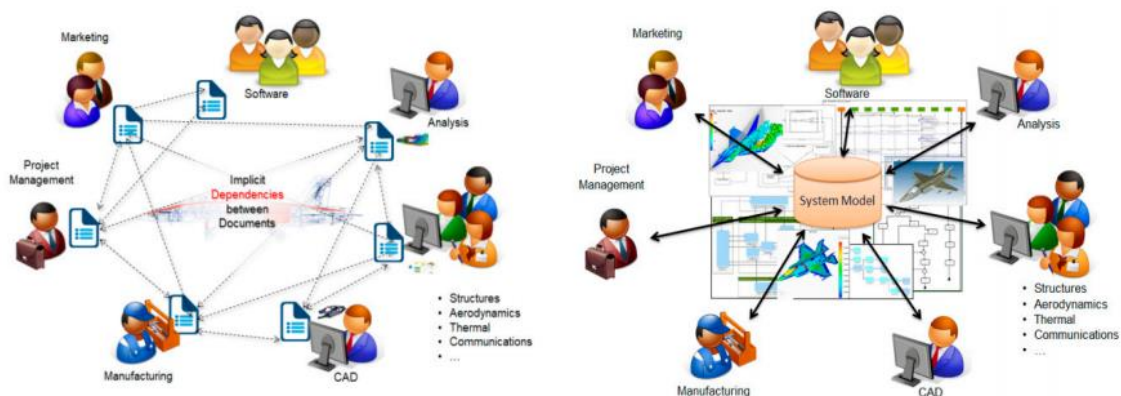
B. Les approches MBSE

L'ingénierie système basée sur les modèles (Model-Based System Engineering en anglais) est un concept largement utilisé par la communauté logicielle, en particulier depuis l'avènement du langage UML (Unified Modeling Language) dans les années 1990. L'INCOSE la définit comme étant « l'application formalisée de la modélisation pour supporter les exigences du système, la conception, l'analyse, la vérification et la validation des activités qui commencent dès la phase de conception et se poursuivent tout au long des phases de développement et du cycle de vie ultérieur » (INCOSE, 2015).

Historiquement, la conception des systèmes complexes s'est d'abord appuyée sur des approches d'ingénierie système basée sur les documents (DBSE) pour gérer les informations système, avant

l'émergence de l'ingénierie système basée sur les modèles (MBSE). L'approche DBSE est caractérisée par la génération de spécifications textuelles, de documents de conception, de schémas et de diagrammes, au format papier ou électronique, pour la capture des spécifications du client et des exigences du système. Les spécifications du système, de ses sous-systèmes et de ses composants matériels et logiciels y sont généralement représentées dans une arborescence hiérarchique, appelée arbre de spécifications (Friedenthal et al., 2008). Les schémas fonctionnels et de principe produits sont utilisés comme outils de dessin pour saisir la conception globale du système et sont stockés sous forme de fichiers séparés inclus dans la documentation de conception du système. Généralement, les exigences sont alors gérées à l'aide d'un outil de gestion des exigences tel que DOORS¹. Un plan de gestion de l'ingénierie système (SEMP) documente comment le processus d'ingénierie système est employé dans le projet et comment les disciplines d'ingénierie doivent travailler ensemble pour élaborer la documentation nécessaire afin de satisfaire les exigences de l'arbre des spécifications. Les activités d'ingénierie système sont alors planifiées en estimant le temps et l'effort requis pour produire la documentation, et les progrès sont ensuite mesurés par l'état d'avancement des documents. Ces documents de spécification et de conception textuels sont utilisés pour communiquer l'information sur la conception à tous les intervenants : clients, utilisateurs, développeurs, testeurs et autres parties prenantes. L'ingénieur système est alors chargé de contrôler la documentation et de s'assurer manuellement que les documents et les dessins sont à jour, valides, complets et cohérents, et que le système développé est conforme à la documentation. En effet, la traçabilité entre les exigences et la conception du système doit être établie manuellement dans l'outil de gestion des exigences, car il n'existe aucun lien formel entre la base de données des exigences et les documents d'architecture et de conception.

La mise en œuvre d'une approche DBSE, aussi rigoureuse soit-elle, présente de fortes limites : toutes les activités manuelles de traçabilité (incluant les liens de dépendances entre les différentes vues du système), de vérification et de validation des exigences ne garantissent pas la cohérence entre les exigences, la conception, l'analyse technique et l'information sur les essais, et génèrent de surcroît une augmentation considérable de la durée de conception. De plus, comme ces informations sont souvent réparties sur plusieurs documents, il est difficile de maintenir (en cas de changement) ou de réutiliser les données de conception pour une variante ou nouvelle conception. Enfin, en DBSE, les ingénieurs ne peuvent s'échanger les données que par des documents de conception, ce qui est non seulement inefficace, mais aussi souvent source d'erreurs. Cela est d'autant plus critique pour la conception de systèmes complexes multidomaines, qui nécessite une forte collaboration multidisciplinaire. La Figure 7 schématise les approches DBSE versus MBSE.



¹ DOORS "Dynamic Object Oriented Requirements System" : est un outil qui utilise des techniques de parsing pour la gestion des exigences.

a)

b)

Figure 7 : a) Documents based Systems Engineering (DBSE) b) Model Based Systems Engineering (MBSE) (Madni and Purohit, 2019)

C'est dans ce contexte, que les approches MBSE, visant à déployer l'IS à travers des modèles, se sont largement développées, permettant d'assurer la cohérence et la traçabilité non seulement entre les niveaux de conception mais aussi entre les différentes disciplines et facilitant ainsi la collaboration multidisciplinaire et le choix d'architecture de systèmes multidomaines (Friedenthal et al., 2008).

1. Collaboration entre des équipes de disciplines différentes et amélioration de la communication pendant la phase de préconception

En phase de préconception, les spécifications initiales d'un système complexe ne sont généralement pas suffisantes pour définir clairement le système, cette étape critique nécessite donc l'échange de nombreux points de vue, et notamment entre les différentes disciplines, avant d'établir des compromis entre les concepteurs et aboutir au choix d'un concept d'architecture. En effet, la collaboration entre personnes de plusieurs disciplines ayant des expertises et expériences différentes permet, dans les premières phases d'exploration, de fournir un ensemble des concepts basés sur des objectifs communs initialement définis. Wang et al. affirment notamment que plus la conception progresse, moins les décisions influencent la conception finale ; aussi il est important en phase amont de la conception que le nombre de collaborateurs soit élevé pour générer le plus d'idées et de solutions techniques (Wang et al., 2002). Kvan précise qu'en milieu industriel, cette collaboration au cours du processus de conception peut prendre deux formes : un mode de collaboration étroitement couplé, dans lequel les participants travaillent ensemble étroitement et intensément " pour atteindre un résultat créatif et holistique ", en observant et comprenant leurs opérations respectives ; ou un mode de collaboration sans couplage, dans lequel chaque acteur apporte juste son savoir dans son domaine d'expertise spécifique où il possède la connaissance appropriée à la situation étudiée (Kvan, 2000). La Figure 8 présente ces différents modes de collaboration entre des équipes multidisciplinaires. Dans ce contexte, les approches MBSE permettent aux différents acteurs de formaliser leurs données de conception dans des modèles, de représenter leur vue système en y intégrant leur expertise spécifique, et fournissent une vue intégrée commune du système en s'appuyant sur la continuité numérique offerte par les modèles.

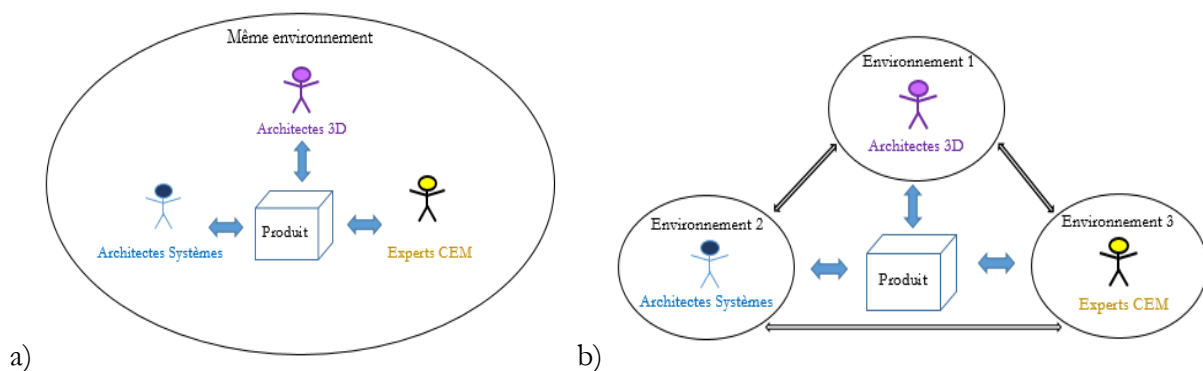


Figure 8 : Modes de collaboration entre acteurs a) étroitement couplé b) sans couplage

Au niveau des modèles, cette vue système se décompose en plusieurs niveaux d'abstraction. Ces niveaux peuvent être classés en deux types selon (Qamar et al., 2011) : (i) une abstraction verticale entre les modèles à différents niveaux de détail/de systèmes (sous-systèmes, composants, etc.) ; (ii) une abstraction horizontale qui concerne les informations entre les modèles d'un même niveau, mais de disciplines différentes. L'intégration verticale s'appuie sur la cohérence entre une certaine

partie du système et le système dans son ensemble, ou entre des modèles de même « périmètre système » mais de granularité de modélisation différente en termes de paramètres/variables pris en compte, phénomènes négligés, etc. L'intégration horizontale fait appel aux modèles multidomaines liés à l'implication de différents experts multidisciplinaires et outils de modélisation associés. Par exemple, un ingénieur logiciel risque de ne pas être en mesure de comprendre un modèle avec des schémas de circuit électrique. La Figure 9 montre ces deux types d'intégration (verticale et horizontale) pour un exemple de composant hardware RF (Lafi, 2016) :

- Quatre niveaux d'abstraction verticale : la couche atomique (composée de composants atomiques) est le niveau d'abstraction le plus bas ; le niveau du circuit ; le niveau du module et le niveau du système (est le niveau d'abstraction le plus élevé). Le passage d'un niveau d'abstraction verticale inférieur à un niveau d'abstraction supérieur est appelé « abstraction » tandis que le passage d'un niveau d'abstraction supérieur à un niveau d'abstraction inférieur est appelé « raffinement ».
- Deux niveaux d'abstraction horizontale : un niveau système où les composants sont traités comme des systèmes multidomaines, et un niveau circuit, plus détaillé, où ces composants sont décrits par leur modèle disciplinaire correspondant (ex : circuit électrique) (Spoto et al., 2006). Les informations entre ces modèles, dans un même niveau d'abstraction, peuvent être de différentes natures.

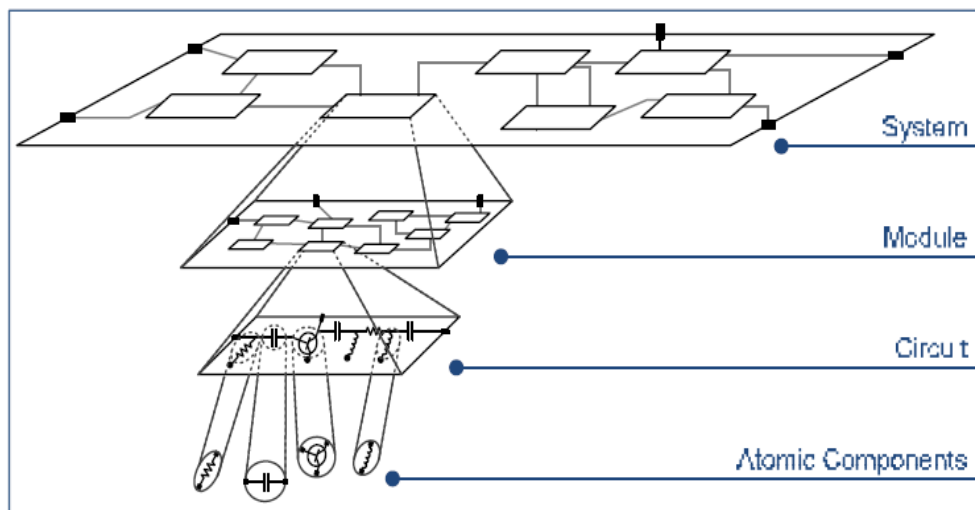


Figure 9 : Niveaux d'abstraction (verticale et horizontale) pour un exemple d'un composant hardware RF (Lafi, 2016)

Ainsi, les approches MBSE visent à prendre en compte les terminologies/sémantiques et les méthodes propres à chaque discipline impliquée, en générant une modélisation multi-vue permettant de partager plus facilement les informations critiques de conception. Si une vue complète du système est très utile et nécessaire pour comprendre les relations entre les sous-systèmes et les interdépendances entre les activités de conception exécutées dans différents domaines, les approches MBSE doivent aussi prendre en charge la façon dont la cohérence et la traçabilité de toutes ces données de conception multi-niveaux (d'abstraction) seront assurées dans les différents outils de modélisation utilisés.

Finalement, dans une approche MBSE, le processus de collaboration entre différents acteurs disciplinaires, implique un grand nombre de domaines connexes et d'intervenants chargés de mener des actions conjointes et de prendre des décisions communes et cohérentes (Fiorèse et al., 2012), tout en remplaçant les documents papier par des modèles numériques et des données échangeables. Ces pratiques visent non seulement à réduire les incohérences dans les données de conception des

systèmes de plus en plus complexes mais aussi à faciliter les compromis de décision nécessaires au cours des différentes étapes de la conception. Ainsi, les approches MBSE améliorent non seulement la collaboration entre les équipes multidisciplinaires de conception (en leur permettant de partager une représentation complète du système), mais aussi la gestion de la complexité en leur fournissant une visualisation du système à différents niveaux d'abstraction et en leur donnant la possibilité d'intégrer de façon cohérente ces différents points de vue via la modélisation.

2. *Intégration des exigences géométriques et physiques dans une approche MBSE*

Parallèlement, l'évaluation des différentes architectures et solutions proposées, au cours du processus de conception, nécessite de prendre en compte non seulement le besoin de toutes les parties prenantes et notamment les contraintes géométriques et physiques (ex : mécaniques, électriques, logicielles) de chaque discipline, mais aussi de s'assurer de la cohérence de ces données dans la modélisation du système par les différents acteurs, afin de pouvoir gérer plus efficacement les compromis de conception au niveau de l'architecture 3D du système. En effet, la prise en compte de la géométrie dès les premières phases de la conception est essentielle : selon Wang et al., la phase de préconception est une tâche cruciale qui nécessite une conception assistée par ordinateur (CAO) au cours du cycle de développement de produits d'ingénierie, pour permettre d'atténuer l'ambiguïté et de promouvoir la cohérence des exigences pour l'ensemble de l'équipe (Wang et al., 2002).

En parallèle, dans les approches MBSE, la nature et le nombre de modèles mis en jeu étant très variables suivant le niveau d'abstraction adressé et la maturité du projet, les architectes Système utilisent leurs connaissances expertes (Figure 10) pour pouvoir passer facilement de vues détaillées spécifiques à des vues plus abstraites de plus haut niveau (Muller, 2011).

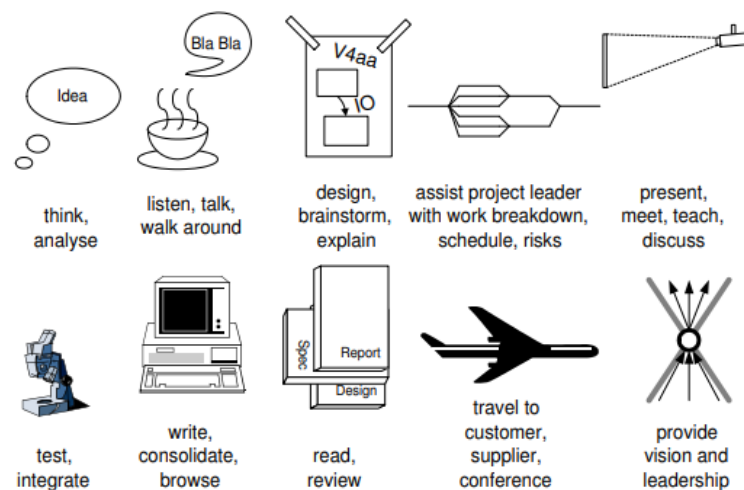


Figure 10 : Rôles de l'architecte Système (Muller, 2011).

En effet, initialement, ils doivent recueillir et comprendre les besoins de toutes les parties prenantes : non seulement les besoins et les attentes du client, mais aussi les contraintes des fournisseurs, des employés (incluant sous-traitants) et des autres intervenants, au travers de différents moyens de communication (réunions, visites, courriels, etc.). Une fois les besoins traduits en exigences fonctionnelles et non fonctionnelles (performances, contraintes géométriques, physiques...), en collaboration avec tous les membres de l'équipe technique, les architectes Système génèrent des alternatives d'architectures de concepts qu'ils doivent faire valider par les experts disciplinaires. A ce stade, la fourniture d'une architecture 3D et l'utilisation de la simulation peut

s'avérer fort utile pour déterminer le positionnement des différents sous-composants et les interfaces multidomaines, en prenant en compte les contraintes des experts disciplinaires.

Pour répondre à ce besoin multidisciplinaire collaboratif de l'ingénierie système, ces différents experts s'appuient sur des modèles implémentés dans des langages et outils spécifiques. Comme décrit par Johnson, les modèles de conception peuvent être classés en deux types : les modèles du système et les modèles d'analyse (Johnson, 2008). Les modèles du système sont utilisés pour spécifier la structure, les fonctions et les comportements souhaités du système, et sont généralement réalisés par les architectes Système. Alors que les autres types de modèles, appelés modèles d'analyse, développés par les équipes multidisciplinaires, sont utilisés pour évaluer le comportement du système (modèles dynamiques, logiques, modèles éléments finis, etc).

Ainsi, pour définir le modèle du système, appelé également modèle Système, les architectes Système utilisent communément le langage SysML (Systems Modeling Language), reconnu pour soutenir l'analyse, la spécification, le support d'échange de modèles et de données dans une approche MBSE (OMG, 2010). Comme SysML est un langage de modélisation dérivé du langage UML, il bénéficie du mécanisme de spécialisation offert par les profils : SysML est un profil d'UML et peut être lui-même étendu à d'autres champs d'application. Les profils permettent un enrichissement sémantique du langage au niveau de son métamodèle, par la modification ou l'ajout de métaclasse qui représentent les nouveaux concepts (au sens ontologique). Les stéréotypes permettent de spécialiser des éléments de modélisation existants (métaclasse) comme les classes, les attributs, les opérations et les activités, afin de leur donner des propriétés spécifiques et adaptées à un domaine particulier. Les métaclasse, qui sont liées les unes aux autres par des généralisations et des associations, ont alors un ensemble de propriétés et de contraintes que les concepteurs peuvent instancier pour créer leurs modèles avec une sémantique plus riche. Par conséquent, toute extension de SysML ou profil en UML, permet d'enrichir les modèles avec des éléments personnalisés afin de répondre à des besoins disciplinaires spécifiques et éviter des ambiguïtés sémantiques (Friendenthal et al., 2009). Pour autant, même si SysML ne spécifie pas de méthodologie particulière pour définir une architecture Système à partir d'exigences initiales, de nombreux auteurs ont proposé des approches MBSE basées sur SysML pour y parvenir (Andrianarison and Piques, 2010; Jeff A. Estefan, 2008; Holt and Perry, 2008; Mhenni et al., 2014).

Or dans un contexte MBSE, la collaboration multidisciplinaire suppose que les données des modèles développés par les différents acteurs de la conception puissent être échangées en assurant leur cohérence et leur traçabilité. Aussi, des chercheurs ont développé des profils UML ou des extensions SysML, pour enrichir les modèles avec la sémantique des autres acteurs disciplinaires, afin de les rendre interfaçables ou intégrables avec un processus de transformation de modèles entre le modèle Système (UML/SysML avec profils) et les autres langages/outils de conception (3D, modélisation/simulation physique...). En effet, les transformations de modèles visent à générer un nouveau document ou modèle à partir d'un modèle source selon certaines règles formellement définies. Il existe deux types de transformation : la transformation d'un modèle en un autre modèle (M2M), et celle d'un modèle en un texte (M2T). Alors que la transformation M2M est un moyen d'assurer l'interopérabilité sémantique de la modélisation, la transformation M2T est plutôt utilisée pour générer automatiquement des documents texte à partir de modèles afin d'améliorer la collaboration à travers un processus MBSE. Elle permet à tous les acteurs du processus de conception de comprendre facilement le contenu d'un modèle sans nécessairement connaître le langage de modélisation. Le principal inconvénient de la transformation de modèles est d'ordre technique, puisqu'elle nécessite un important effort de développement pour chaque nouvelle transformation avec chaque outil (Shen et al., 2008b). Ainsi, comme la représentation 3D

d'un produit joue un rôle important dans la conception d'ingénierie de nombreux secteurs (aérospatiale, automobile, fabrication, etc), plusieurs profils UML ont été développés afin de capturer des informations géométriques communément partagées dans un contexte multidisciplinaire. Par exemple, des extensions SysML ont été développées pour intégrer dans le modèle Système en SysML des données d'ingénierie de CAO et CAE (Peak et al., 1998; Vosgien et al., 2012), ou cartographier des concepts mécaniques « MCAD » et électriques « ECAD ». Par ailleurs, les informations géométriques englobent les caractéristiques géométriques d'un produit (par exemple : le volume, la masse, le centre de gravité et le moment d'inertie) et certains concepts de modélisation géométrique spécifiques (pour assurer la génération d'éléments 3D dans des outils de CAO). Ainsi, par exemple, Reichwein et al. ont défini des profils en UML spécifiques pour intégrer des modèles géométriques de contrôleurs et de systèmes multi-corps, afin de supporter la transformation de ces modèles en modèles de géométries 3D qui sont très répandus tels que CATIA et SolidWorks (Reichwein, 2011). D'autres travaux existants proposent des approches MBSE basées sur SysML pour introduire le point de vue géométrique. Baysal et al. ont proposé une méthode de modélisation géométrique et de positionnement en UML pour l'analyse de tolérance (Baysal et al., 2005) en introduisant des éléments géométriques dès les premières étapes de la conception, mais sans l'intégration de contraintes de positionnement. Le profil UML développé par Bohnke et al. permet de définir la géométrie 3D des composants en UML à partir de CATIA V5, mais ne gère pas leurs contraintes d'assemblage et ne permet pas la création de nouvelles géométries des composants en UML (Böhnke et al., 2009). En parallèle, Warniez et al. ont proposé une extension géométrique SysML, qui permet de définir des métriques d'intégration physique, mais cette méthode ne comporte pas de contraintes géométriques pour gérer la position relative entre composants (Warniez et al., 2014). Enfin, Barbedienne et al. ont développé l'extension GERTRUDe SysML qui intègre la forme géométrique et la topologie pour gérer la création de nouvelles géométries, les contraintes de positionnement relatif et la transformation de modèles entre l'outil de modélisation SysML PTC Integrity Modeler et les architectures 3D dans l'outil FreeCAD (Barbedienne et al., 2014).

Comme la conception mécatronique nécessite la modélisation/simulation physique et multidomaine pour évaluer les performances et les couplages multiphysiques des architectures 3D candidates, de nombreux auteurs ont également proposé des profils UML/SysML pour soutenir la collaboration entre les architectes Système (qui spécifient le système et son architecture) et les experts en simulation physique (qui les valident par évaluation comportementale). Pour cela, ils se sont appuyés sur une sémantique commune, permettant l'interfaçage adéquat de leur outil de simulation respectif via des processus de transformation de modèles (Durisic et al., 2017; Selim et al., 2015). Ainsi, Turki et Soriano s'appuient sur une extension SysML, basée sur l'analyse « Bondgraphs » pour générer des modèles Modelica, Simulink ou autres solveurs 0D (Kim, 2014; Turki and Soriano, 2005). D'autres approches de couplage/transformation de modèles UML/SysML avec des environnements de simulation (tels que Simulink et des outils basés sur le langage Modelica, etc.) ont été développés. Par exemple, de nombreux travaux ont porté sur le lien entre UML/SysML et Modelica. ModelicaML a été le premier profil UML à avoir été développé, il prend en charge les capacités d'échange de modèles (Pop et al., 2007) et permet de créer de nouvelles constructions et des diagrammes mais il ne permet pas de générer automatiquement le code nécessaire à la simulation dans un environnement Modelica sans l'intervention de l'utilisateur (Johnson et al., 2007). C'est pour cette raison que Schamai et al. ont proposé une extension SysML appelée SysML4Modelica (Paredis et al., 2010; Schamai et al., 2009) qui permet aux architectes Système, de facilement utiliser les artefacts SysML (diagrammes de blocs internes et paramétriques) et de générer automatiquement le code Modelica à partir d'un diagramme en SysML. Cao et al.,

ont traité la transformation de modèle entre SysML et Simulink (Cao et al., 2011; Di Natale et al., 2018; Šarga et al., 2012; Sjöstedt, 2009). Concernant la dynamique des systèmes, des auteurs ont proposé une extension SysML permettant de décrire le comportement d'un système dynamique (Matei et al., 2012), en développant un outil d'exécution intégré sur une plate-forme Eclipse afin d'exploiter la co-simulation entre SysML et Matlab / Simulink (Bock, 2006; Kawahara et al., 2009). En parallèle, la transformation de modèles entre un modèle SysML étendu et le logiciel commercial TRNSYS proposée par (Kim, 2014), permet d'évaluer les performances thermiques et électriques des systèmes énergétiques. Kapos et al. ont développé une transformation de modèles entre le formalisme SysML et DEVS (spécification de système à événements discrets) pour générer les transitions d'état et les équations différentielles du système (Kapos et al., 2014). Il est également possible de créer des modèles topologiques dans UML en utilisant le modèle de fonctionnement topologique (TFM) (Donins, 2009; Kluge et al., 2017). Pour simuler le comportement thermique, une autre transformation de modèles a été proposée par Groß et al. au travers d'un langage de conception basé sur les graphes et UML pour intégrer les informations géométriques et les attributs thermiques requis pour la simulation (Gross et al., 2012).

Finalement, afin de faciliter la collaboration avec les experts disciplinaires, de nombreux auteurs ont développé des profils UML ou extensions SysML permettant de prendre en compte leurs exigences métiers (géométriques et physiques) dans le modèle Système (géré par les architectes Système), tout en permettant grâce aux processus de transformation de modèles d'assurer la cohérence des données lors des échanges entre le modèle Système et les modèles de simulation multidomains. Pourtant, à notre connaissance, aucun profil n'a été développé pour prendre en compte les interactions électromagnétiques.

C. Evaluation de l'architecture 3D physique

Une fois ces exigences intégrées au modèle Système, les architectes Système doivent ensuite évaluer les différentes architectures, au regard des précédentes exigences (géométriques et physiques), pour choisir l'architecture de concept qui sera retenue pour les phases de pré-dimensionnement et de conception détaillée.

En conception mécatronique, les choix d'architectures et les processus décisionnels associés ne peuvent être l'objet d'un seul point de vue disciplinaire, puisqu'ils impactent directement les équipes et leurs contraintes de conception (Alvarez Cabrera et al., 2010). Dans ses travaux (Jankovic et al., 2012, 2006), Jankovic souligne l'importance des processus décisionnels, organisationnels et collaboratifs, en proposant un modèle de prise de décision collaborative qui augmente la traçabilité des choix de décision. Aussi, même s'il existe de nombreuses méthodes et outils pour prendre en charge le processus décisionnel en matière de choix d'architecture, tels que la maison de la qualité «House of Quality» (HoQ) (Punz et al., 2010), la conception axiomatique proposée par Suh (Suh et al., 2014), les approches de satisfaction de contraintes «Constraint Satisfaction Problem» (CSP) (Moullec et al., 2012; Trabelsi et al., 2013), etc., ces approches ne permettent pas d'évaluer quantitativement les différentes alternatives suivant des exigences géométriques et physiques.

1. Métrique

Un moyen d'atteindre cet objectif consiste à définir des critères et des métriques en fonction des objectifs du concepteur. Comme de nombreux critères sont généralement nécessaires pour répondre à un objectif global, des méthodes d'évaluation multicritère permettent de trouver la meilleure solution ou du moins la meilleure dans un ensemble de solutions. Les principes, avantages et inconvénients de telles méthodes sont largement détaillés dans des synthèses bibliographiques (Bouyssou et al., 2006; Greco et al., 2005). Ainsi, les métriques d'évaluation de l'architecture 3D

peuvent être utilisées en phase de préconception pour répondre à une grande variété d'objectifs. Par exemple, Warniez et al. (Warniez et al., 2014) ont proposé des métriques pour l'évaluation de l'intégration physique des systèmes mécatroniques. Leurs métriques, basées sur des alternatives d'architecture physique en SysML, n'abordent que la géométrie des composants, comme la compacité ou leur enveloppe convexe, pour réduire l'espace entre les composants, mais ne prennent en compte explicitement ni les positions relatives des composants ni leurs interactions physiques (comportement dynamique des composants).

2. Evaluation par simulation physique et géométrique

Un autre moyen pour évaluer l'architecture physique 3D sous contraintes physiques est d'utiliser la simulation du comportement physique des composants, en fonction des paramètres géométriques de l'architecture 3D du système. Qin et al. (Qin et al., 2003) proposent un environnement basé sur le Web pour partager et simuler le comportement dynamique d'une architecture conceptuelle 3D. Même si cet environnement propose une vérification collaborative du positionnement dynamique des composants soumis à des contraintes physiques dès les phases amont de conception, toute la modélisation géométrique et physique doit être programmée en Javascript, et la simulation physique est limitée aux mouvements cinématiques. Komoto et Tomiyama (Komoto and Tomiyama, 2012) ont développé un cadre appelé SA-CAD (System Architecting CAD), qui inclut un modèleur géométrique pour la visualisation, basé sur le modèle FBS (Function-Behaviour-Structure) (Gero and Kannengiesser, 2004). Cependant, elle n'inclut que des relations physiques paramétriques sans aucun solveur d'équation différentielle, et les relations spatiales sont limitées à 11 sans aucun solveur de contraintes spatiales ni automatisation du processus de positionnement des composants. Enfin, Barbedienne et al. ont proposé une approche MBSE appelée SAMOS (Spatial Architecture based on Multi-physics and Organisation of Systems) (Barbedienne et al., 2015a) pour l'évaluation de l'architecture physique 3D sous contraintes géométriques et physiques en phase amont de conception. Ils se sont alors focalisés sur la prise en compte des contraintes thermiques (Romain Barbedienne, 2017). Comme cette approche, basée sur le besoin de collaboration des acteurs multidisciplinaires, permet d'évaluer une architecture 3D de concept en phase de préconception, en prenant en compte différentes contraintes métiers, tout en améliorant la traçabilité et la cohérence des données, nous avons choisi de nous appuyer sur ces travaux pour implémenter nos travaux pour l'évaluation d'architecture 3D sous contraintes électromagnétiques.

3. Evaluation par modélisation mathématique

Afin d'évaluer en phase amont les architectures physiques sous contraintes multiphysiques tout en limitant le temps important requis par les simulations (lancées pour chaque architecture), une troisième alternative consiste à utiliser la modélisation mathématique dans une démarche de synthèse. Cette solution consiste à générer « la bonne architecture » en se basant sur des modélisations mathématiques et un ensemble de contraintes. Ces méthodes permettent de calculer et dimensionner au plus juste pour obtenir des architectures alternatives qui satisfont les différentes exigences système prédéfinies.

Par exemple, Maurice utilise l'analyse tensorielle des réseaux (ATR) établie par G. Kron pour faire la mise en équation d'un système physique spécifique représentable (architecture) par des réseaux électriques équivalents. En effet, le calcul tensoriel permet une systématisation qui, non seulement a la propriété de s'appliquer à n'importe quel système quel que soit sa complexité, mais offre également un examen méthodique des circuits, de les décomposer en éléments simples, de les superposer ou de les interconnecter, pour finalement faire de la synthèse et analyse des réseaux (Maurice, 2007a).

Zimmer et al. utilisent le langage DEPS (DEsign Problem Specification) (pour modéliser le système avec toutes ses exigences) et la méthode de satisfaction de contraintes (CSP) (pour trouver la bonne solution de synthèse) (Zimmer et al., 2017). En effet, cette approche permet aux acteurs de la conception de modifier directement et simplement leurs variables de performance dès les premières phases de conception pour synthétiser l'architecture satisfaisant un ensemble de contraintes (Meyer and Yvars, 2012; Yvars, 2009).

D'autres auteurs déploient le processus de conception basée sur les ensembles (en anglais : SBD= Set-Based Design), qui grâce aux informations/contraintes fournis à n'importe quel stade du processus permet de converger vers la bonne architecture. Cette approche facilite les décisions de conception en phase amont pour éviter les conflits et les incohérences entre les acteurs ayant des objectifs communs (Canbaz et al., 2014).

Tandis que les méthodes d'évaluation par simulation numérique ou par l'utilisation des métriques, en revanche, ne garantissent pas d'avoir une solution d'architecture 3D meilleure. D'une part, elles sont dans une approche d'analyse sur une architecture donnée, d'autre part, elles ont besoin d'un nombre important de boucles de simulations coûteuses (Hubert et al., 2016). Pour autant, même si une approche par modélisation mathématique, basée sur un ensemble de contraintes, permet d'évaluer les architectures physiques dès les premières phases de conception et de générer ainsi la meilleure solution d'architecture qui réponde aux exigences prédéfinies, très peu de travaux considèrent les aspects liés au couplage de la géométrie 3D et des différentes physiques impliquées.

Dans nos travaux de thèse, comme notre approche adresse plutôt la phase amont, qui présente de très nombreuses alternatives, nous avons choisi la modélisation mathématique (permettant une évaluation plus rapide) pour évaluer l'architecture de concept 3D, en s'appuyant sur des équations physiques qui intègrent à la fois les données physiques et les données géométriques nécessaires associées. Pour cela, deux méthodes différentes ont été utilisées : une première méthode analytique basée sur les équations de la physique et une seconde portant sur la méthode de Kron. Ces méthodes seront détaillées dans les chapitres suivants.

II. Plateforme SAMOS/ Sketcher thermique

L'approche SAMOS (Barbedienne et al., 2015a) et son implémentation logicielle pour la modélisation des contraintes thermiques (Sketcher thermique) (Romain Barbedienne, 2017) assure le lien entre l'IS et le processus de simulation en échangeant les spécifications et choix de conception appropriés (données géométriques et physiques), afin de maintenir la traçabilité et la cohérence de la conception de l'architecture 3D du système. En effet, SAMOS propose de récupérer les informations de simulation afin de vérifier que l'architecture physique 3D proposée par l'architecte Système répond aux exigences du système, puis de tracer ces informations dans le modèle SysML (Figure 11). Aussi, cette approche soutient la collaboration entre les concepteurs, tout en assurant la cohérence et la traçabilité de leurs données et modèles, conformément aux principes de l'IS.

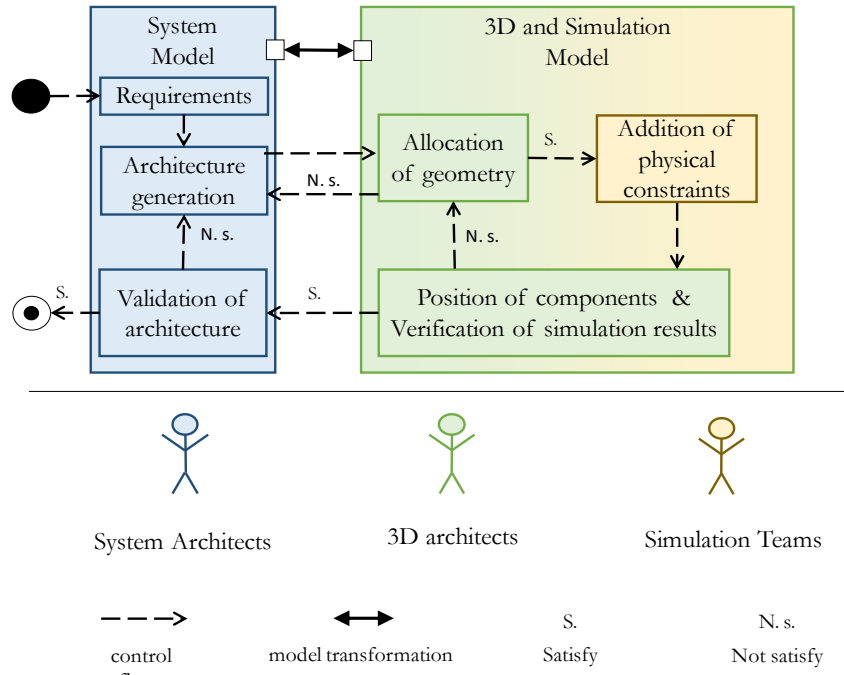
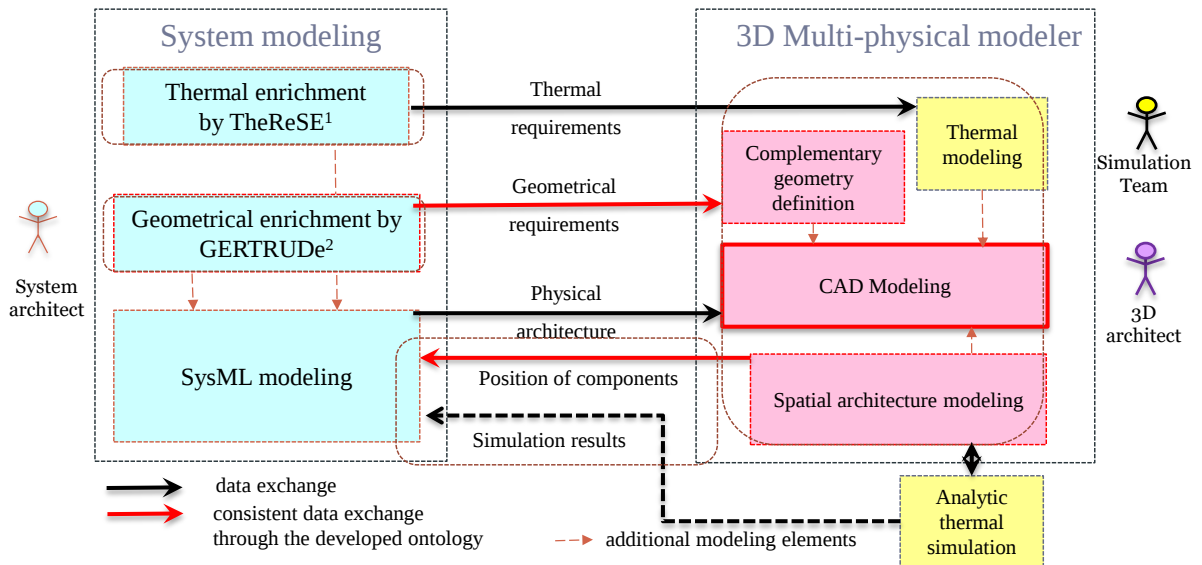


Figure 11 : Approche SAMOS (Romain Barbedienne, 2017)

Barbedienne et al. ont déjà implémenté et testé l'approche SAMOS pour les contraintes thermiques dans un Sketcher 3D thermique (Barbedienne et al., 2015b), permettant l'évaluation des interactions thermiques d'architectures 3D de concept.

Ainsi, Barbedienne et al. ont créé deux extensions SysML (GERTRUDe et TheReSE) pour enrichir le modèle Système avec des informations respectivement géométriques (basées sur le modèle des SATT : Surfaces Associées Topologiquement et Technologiquement) et thermiques. La plateforme logicielle du Sketcher 3D thermique est basée sur une transformation bilatérale de modèles pour 3 types de modèles : le modèle en SysML dans le modeleur système, le modèle de l'architecture 3D dans le modeleur 3D multi-physique et le modèle de comportement thermique à simuler. Le processus collaboratif sur lequel s'appuient ces transformations de modèles, est détaillé ci-dessous (Figure 12).



¹ TheReSE : Thermal Related SysML Extension

Comme l'architecte Système a besoin de sélectionner une architecture de concept qui réponde à la fois aux exigences physiques et géométriques, le modèle SysML nécessite au préalable d'être enrichi sémantiquement pour pouvoir exprimer ces exigences de manière appropriée. Ces exigences géométriques et multiphysiques pourront alors être transmises dans l'environnement CAO 3D pour générer les formes géométriques des composants déjà définies et les éventuelles contraintes de positionnement associées. Puis les architectes 3D pourront compléter éventuellement l'architecture 3D, positionner les pièces de géométrie simplifiée pour répondre aux exigences géométriques d'une part et d'autre part pour exprimer et satisfaire les contraintes physiques correspondant aux exigences multiphysiques initialement spécifiées dans le modèle système en SysML. Ensuite, des simulations multiphysiques de modèles analytiques en Modelica (en conduction et en convection pour la thermique) sont alors effectuées dans l'environnement Dymola (avec une interface en langage Python avec l'environnement 3D FreeCAD) afin de vérifier que le comportement de l'architecture 3D proposée répond bien à toutes les exigences physiques (et géométriques). Enfin, toutes les informations du modèle 3D et les résultats de la simulation associés dans l'environnement de simulation doivent être tracés vers le modèle SysML pour conserver les informations justifiant la sélection de l'architecture finale.

L'approche SAMOS initiale visait à développer un sketcher 3D multiphysique pour traiter l'ensemble des interactions physiques émergeant au sein des systèmes mécatroniques, mais n'a été implémentée que pour les contraintes et comportements thermiques. Les travaux précédents n'ont donc pas traité ni les Interférences Electromagnétiques (IEM), ni la Dynamique. C'est pourquoi, nos travaux de recherche ont porté sur l'extension de ces travaux à la dynamique mais surtout aux IEM (Kharrat et al., 2017; Mouna Kharrat et al., 2018).

III. Evaluation des IEM en phase amont

A. Introduction terminologique

1. CEM vs IEM

Selon le vocabulaire électrotechnique international VEI 161-01-072, la **Compatibilité ElectroMagnétique (CEM)** est la capacité d'un dispositif électronique, d'un équipement ou d'un système à fonctionner de façon satisfaisante dans son environnement (électromagnétique) sans introduire de perturbations électromagnétiques intolérables pour quoi que ce soit dans cet environnement. Pour comprendre et maîtriser la CEM, l'étude des **Interférences ElectroMagnétiques (IEM)** est donc un prérequis. Les IEM correspondent au phénomène de perturbation électromagnétique émise par un composant électrique ou électronique (E/E) polluant un autre composant E/E. En effet, la variation d'un courant ou d'une tension au cours du temps, produit un signal électrique (associé à une onde électromagnétique) se comportant ainsi comme une source de bruit. Ces ondes électromagnétiques générées sont susceptibles d'interférer et de se coupler avec d'autres ondes et par suite de perturber les récepteurs (victimes) (Hassoun, 2006). L'équipement à l'origine de la perturbation (qui fournit un bruit agressif) est appelé **source** alors que l'équipement qui supporte la perturbation (suffisamment sensible pour être perturbé par le bruit) est appelé **victime**. Le chemin de transmission de la perturbation (assurant la fonction de transfert de couplage) est appelé **chemin de couplage**. Or la transmission des perturbations EM peut causer des dysfonctionnements du système victime ou même entraîner sa défaillance et sa destruction, engendrant des problèmes de CEM, qui nécessitent alors de supprimer ou de diminuer

² CEI 60050(161) :1990, Vocabulaire Electrotechnique International(VEI) – Chapitre 161 : Compatibilité électromagnétique.

l'influence de l'un des trois facteurs (source, couplage ou victime) à l'origine des IEM. Ces trois facteurs sont représentés sur la Figure 13.

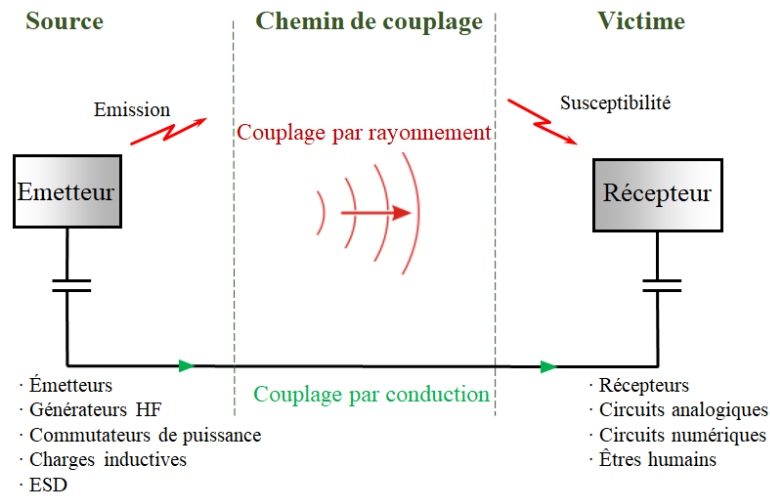


Figure 13 : Caractérisation des IEM

D'après la Figure 13, il existe deux chemins de couplages : i) le couplage par conduction, via la transmission d'un signal électrique à travers un conducteur électrique ; ii) le couplage par rayonnement, via un champ électrique, magnétique ou électromagnétique.

Les interférences électromagnétiques dépendent principalement de deux caractéristiques des équipements E/E : i) leur pouvoir d'**émission**, c'est-à-dire leur aptitude à générer des perturbations électromagnétiques vers l'environnement, ii) et leur **susceptibilité**, qui correspond à leur aptitude à réagir aux perturbations électromagnétiques extérieures. On parle aussi de la notion d'**immunité** qui est l'aptitude des équipements E/E à résister aux perturbations de l'environnement.

2. Modes commun et différentiel des IEM

Un champ variable externe, couplé avec les boucles et les fils du système, peut générer des courants et/ou des tensions induites et produire ainsi un bruit parasite, soit de mode commun (via la masse), soit de mode différentiel (entre les fils électriques), soit le plus souvent des deux.

a) Mode commun

Le bruit de **mode commun (MC)** est généré par le courant de mode commun IMC qui s'interfère entre la liaison bifilaire et la liaison équipotentielle. Ce mode utilise le réseau de masse (ou de terre) comme potentiel de référence. Le mode commun peut aussi être appelé **mode parasite, mode parallèle, mode longitudinal, ou mode asymétrique**. En mode commun, les courants circulent dans le même sens dans les deux conducteurs liant l'émetteur et le récepteur (Figure 14). L'origine de ces courants peut être créée par un champ variable externe dans une boucle formée par un câble, un plan de masse et des impédances de connexion des équipements (source et victime) avec la terre, comme elle peut également être provoquée par une source de bruit interne, entre la masse de référence et la liaison par le câble, provoquant ainsi des émissions rayonnées. Les composantes du MC sont définies par les équations (1) et (2) et la Figure 14.

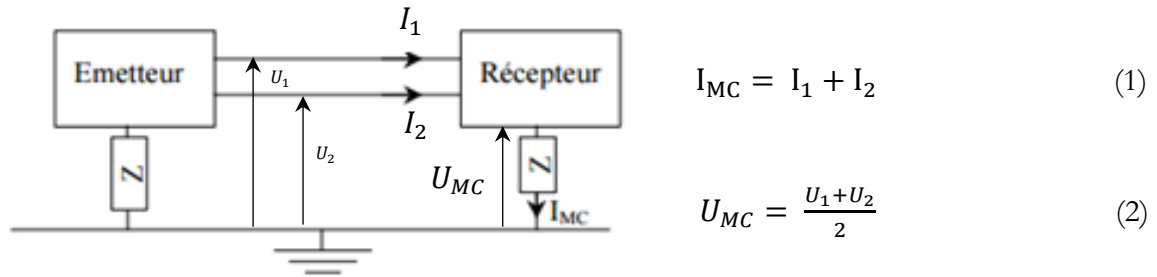


Figure 14 : Description du Mode Commun (MC) (Ecole Supérieur de Plasturgie, 2001; Revol, 2018)

b) Mode différentiel

Le bruit de **mode différentiel (MD)** est généré par le courant de mode différentiel qui s'interfère entre la liaison bifilaire des deux équipements (émetteur et récepteur). Ce mode différentiel peut être appelé aussi **mode symétrique**, **mode série** ou **mode normal**. En mode différentiel, le courant circule dans l'un des conducteurs actifs (I_1) et retourne en opposition de phase par l'autre conducteur (I_2) afin de transmettre les signaux entre un émetteur et un récepteur (Figure 15). Les composantes du MD sont définies par les équations (3) et (4) et la Figure 15.

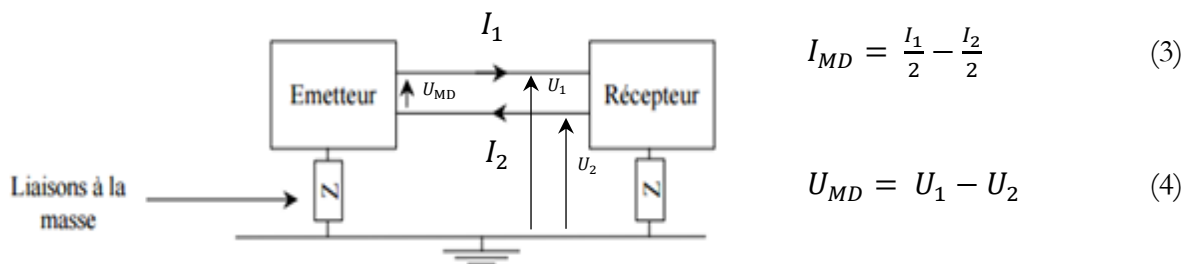


Figure 15 : Description du Mode Différentiel (MD) (Ecole Supérieur de Plasturgie, 2001; Revol, 2018)

3. Mécanismes de transmission des IEM

Les IEM font intervenir deux modes de transmission :

- la transmission par **conduction** (en MC et MD), où les perturbations EM se propagent sur les câbles électriques de liaison (et surtout les câbles d'alimentation) selon deux modes de couplage (par liaison directe ou par impédance commune) ;
- la transmission par **rayonnement** (en MC et MD), où les perturbations électromagnétiques se propagent entre une source et une victime, soit par un champ magnétique variable $H(t)$, soit par un champ électrique variable $E(t)$, soit les deux. On peut distinguer différents types de couplage : couplage inductif, couplage capacitif ou couplage par rayonnement électromagnétique, ce dernier se produisant soit en champ proche, soit en champ lointain.

La Figure 16 résume ces principaux types d'IEM.

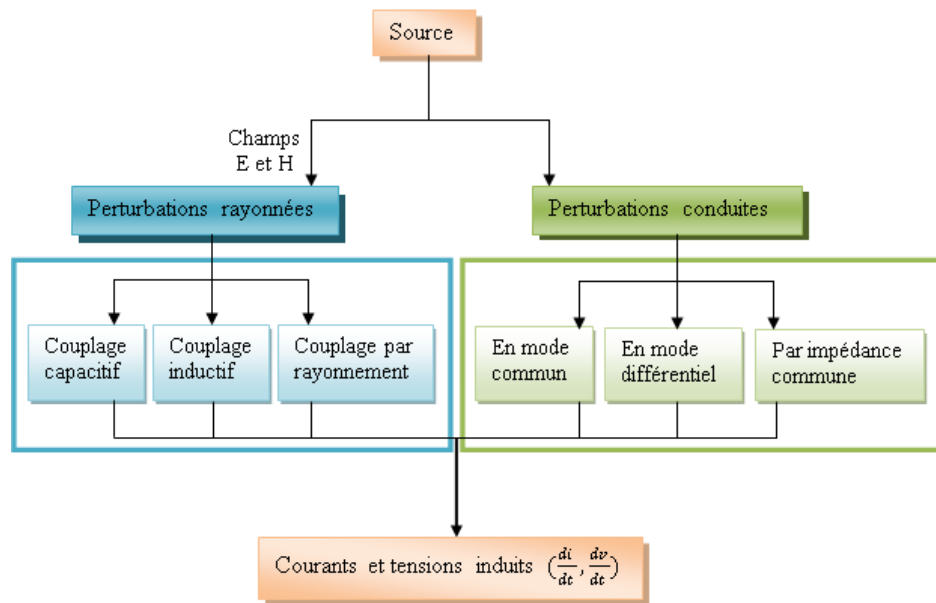


Figure 16 : Types d'EMI suivant leur mode de transmission

Par ailleurs, en électronique, on définit la **diaphonie** comme tout phénomène indésirable par lequel les signaux d'un système de transmission (fil/câble) créent des perturbations sur un autre. La **diaphonie exogène** (en anglais « **Alien Crosstalk** ») est le bruit électromagnétique produit par un câble dans d'autres câbles adjacents, par opposition aux perturbations générées par plusieurs fils au sein d'un même câble. La diaphonie se produit généralement par l'intermédiaire de champs électromagnétiques entre des conducteurs parallèles à proximité sur une certaine longueur. Ce couplage se traduit par l'apparition d'une inductance mutuelle et/ou d'une capacité mutuelle se traduisant respectivement par des couplages inductifs et/ou capacitifs indésirables (Lim et al., 2015; Mardiguian, 2003).

Pour le couplage par rayonnement EM, la Figure 17 montre que, si la distance r entre un circuit source et un circuit victime est très inférieure à la longueur d'onde λ du rayonnement ($\frac{\lambda}{2\pi r} \gg 1$), le couplage est dit en champ proche. Physiquement, il y a une coexistence des deux champs électriques E et magnétiques H mais généralement l'un est plus dominant que l'autre (d'où la relation $E + H \rightarrow \text{soit } E \text{ soit } H$). Par contre si la distance r est plus grande ($\frac{\lambda}{2\pi r} \ll 1$), le couplage est dit en champ lointain, et est défini par la coexistence des deux champs, électrique (E) et magnétique (H). Pour caractériser et décrire les équations du couplage par rayonnement que ce soit en champ proche ou lointain, la résolution des équations de Maxwell (Annexe 2) sera nécessaire.

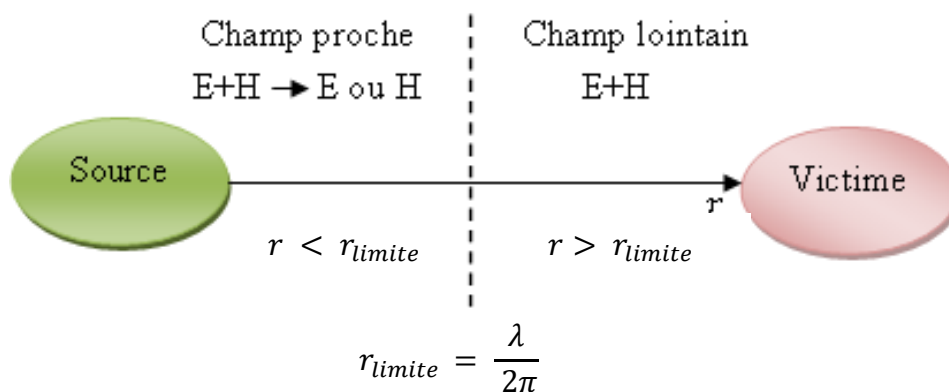


Figure 17 : Couplage par rayonnement électromagnétique en champ proche et en champ lointain

Ces différentes interférences électromagnétiques entre des antennes, des équipements et des câbles sont numérotées et présentées dans la Figure 18.

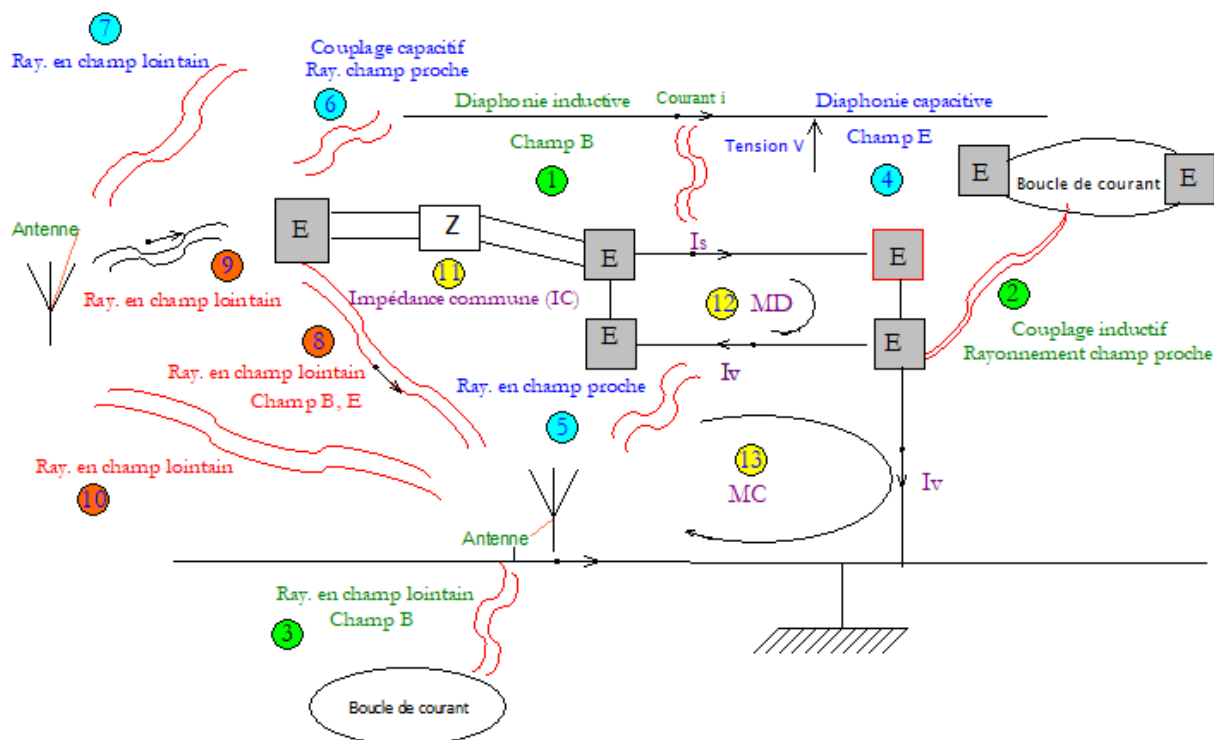


Figure 18 : Les différents modes de couplage des IEM

Ces IEM et leurs équations de couplage ont largement été étudiés dans la littérature (Tableau 1), et leur description est présentée dans l'Annexe 1 .

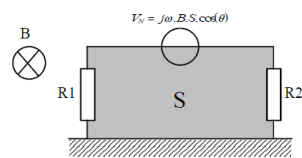
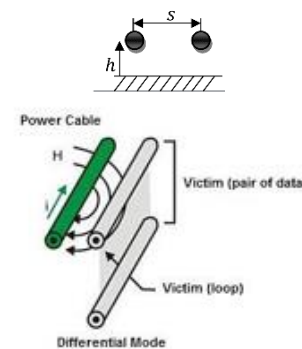
Tableau 1 : Récapitulatif des différents modes de couplage d'IEM et références de la littérature associées

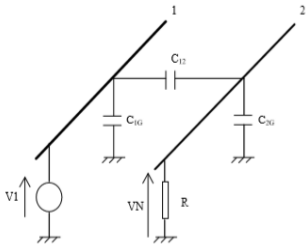
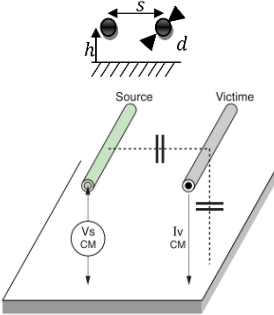
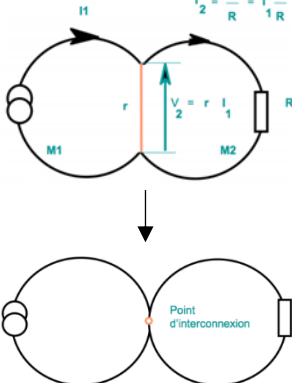
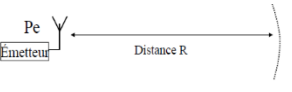
N°	Chemin de couplage	Source	Victime		Références
①	Couplage inductif	Diaphonie inductive	Courant de câble	Boucle de courant à proximité	(Hillenbrand et al., 2015; Kim et al., 2007; Ma et al., 2013; Mardiguian, 2003; Mishra et al., 2010)
②	Couplage inductif	Rayonnement en champ proche (champ B)	Equipement	Boucle de courant à proximité	(Liang et al., 2016; Mardiguian, 2003; Tsai, 2003; Yao et al., 2017)
③	Couplage par rayonnement	Rayonnement en champ lointain (champ E et B)	Antenne	Boucle de courant	(Cecconi, 2011; Dyballa and ter Haseborg, 2010; Mardiguian, 2003)
④	Couplage capacitif	Diaphonie capacitive	Tension au niveau d'un câble	Câble à proximité	(Hillenbrand et al., 2015; Kim et al., 2007; Li et al., 2015; Ma et al., 2013; Mardiguian, 2003; Mishra et al., 2010)
⑤		Rayonnement en champ proche (champ E)	Antenne		(Chen and Frei, 2016; Mardiguian, 2003; Tsai, 2003; Yao et al., 2017)
⑥			Equipement		

⑦	Couplage par rayonnement	Rayonnement en champ lointain (champ E et B)	Antenne	Câble à proximité	(Caso et al., 2016, 2014; Mardiguian, 2003; McNair and Olver, 1991; Omori et al., 2009)
⑧			Equipement	Antenne	
⑨			Antenne	Equipement	
⑩			Antenne	Antenne	
⑪	IC : Impédance commune	IEM Conduite	Circuit électrique 1 connecté à Z	Circuit électrique 2 connecté à Z	(Mardiguian, 2003; Paul, 1992; Shukla and Nirmala, 2006)
⑫	MD : Mode différentiel		E1/C1/E2	E2/C2/E1	(Korber et al., 2007; Mardiguian, 2003; Pairodamonchai and Sangwongwanich, 2011)
⑬	MC : Mode commun		E1/C1/E2	E2/C2/masse E0	(Costa et al., 2005a; Korber et al., 2007; Mardiguian, 2003; Pairodamonchai and Sangwongwanich, 2011)

Dans le Tableau 2 est présentée une synthèse de ces IEM avec leur équation de couplage et quelques moyens de protection pour les limiter, et notamment ceux liés à des facteurs géométriques ou de positionnement 3D (Magnon, 2005; Mardiguian, 2003).

Tableau 2 : Synthèse des IEM

Nom	Schéma	Equation	Moyen de protection
Couplage inductif ②		$V_N = j \cdot \omega \cdot B \cdot S \cdot \cos(\theta)$	- Diminuer la fréquence du signal - Blinder le câble source ou le câble victime - Eloigner physiquement les circuits (source et victime) ; - Bien orienter le circuit source par rapport au circuit victime peut réduire le terme $\cos(\theta)$; - Réduction de la surface S du circuit récepteur - Eliminer le parallélisme entre les deux conducteurs (source et victime) ; - Placer le conducteur récepteur sur le plan de masse.
Couplage par diaphonie inductive ①		$M_{MC} = \frac{\mu_0 L}{2\pi} \ln \left(1 + \left(\frac{2h}{s} \right)^2 \right)$	- Réduire la surface de la boucle source ou de la boucle victime (réduction de h) ; - Séparer les câbles sources des câbles victimes (augmentation de s) ; - Eviter la disposition parallèle des câbles perturbateurs et perturbés en les croisant ; - Réduire le rapport $\frac{dI_1}{dt}$; - Blinder le câble coupable ou le câble victime ;

Couplage capacitif ④		$V_N = \frac{j\omega \left[\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G}} \right]}{j\omega + \frac{1}{R(C_{12} + C_{2G})}} \cdot V_1$	- Diminuer la résistance R du circuit victime ; - Diminuer la valeur de la capacité parasite qui dépend de la géométrie et de l'orientation des conducteurs et du blindage ; - Eloigner les conducteurs les uns des autres ; - Blinder le conducteur victime.
Couplage par diaphonie capacitive ⑤		$C_{1-2} = 2\pi\epsilon_0 L \cdot \frac{\ln\left(1 + \left(\frac{2h}{s}\right)^2\right)}{\left(\ln\left(\frac{4h}{d}\right)\right)^2}$	- Réduire le rapport $\frac{dV_1}{dt}$; - Blinder le câble perturbateur ; - Réduire la surface de la boucle victime (réduction de h) ; - Séparer le câble source du câble victime (augmentation de s) ; - Eviter la disposition parallèle des câbles perturbateurs et perturbés ; - Rapprocher les câbles de la masse pour diminuer fortement la capacité parasite.
Couplage par impédance commune ⑪		$I_2 = \frac{V_2}{R} = I_1 \frac{r}{R}$	Eviter les branches (ou tronçons) communes en reliant toutes les masses en un seul point (point d'interconnexion) ; - Augmenter la section des conducteurs ; - Utiliser des câbles blindés.
Couplage par rayonnement : - couplage champ à boucle - couplage champ à fil ③⑥⑦⑧⑨⑩		$E(V/m) = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{30Pe \cdot Ge}$	- Blinder les câbles sources ou victime ; - Réduire la surface de boucle de courant du circuit victime (pour le couplage champ à boucle) ; - Augmenter la distance de séparation R entre les deux circuits source et victime (pour le couplage champ à fil).

Parmi les moyens de se protéger de ces IEM, nous retrouvons la modification des conditions opératoires (f , $\frac{dI_1}{dt}$, $\frac{dV_1}{dt}$, ...) qui sont parfois difficilement changeables sans perturber le fonctionnement nominal ou maîtrisables sans un système de contrôle ou un asservissement complexe. Un autre moyen concerne les solutions de blindage et de filtrage, mais qui sont fortement onéreuses. La dernière solution efficace consiste à : éloigner les composants sources des composants victimes, à modifier les paramètres géométriques de certains composants (et notamment au niveau des câbles), soit finalement à modifier l'architecture 3D.

B. Evaluation numérique du comportement EM basée sur l'architecture 3D

Comme les IEM dépendent à la fois de la géométrie et du positionnement et/ou de la topologie des composants, l'évaluation de l'architecture des composants 3D sous contraintes EM est donc critique pour le choix de concept des systèmes.

En effet, l'intégration de composants électroniques dans des configurations 2D ou 3D de systèmes mécatroniques inclus dans les systèmes complexes innovants actuels, rapproche les composants électroniques de certaines sources EM potentielles et peut donc générer de nouveaux couplages EM en champ proche (Dienot, 2012). L'alternateur i-StARS (Valeo ©) est un bon exemple de cette forte intégration physique, puisque la géométrie de ses modules électroniques a dû être optimisée pour s'adapter à l'architecture 3D des boîtiers et composants mécaniques (Figure 19).



Figure 19 : Exemple de l'alternateur i-StARS (Valeo ©) (Richard and Dubel, 2007)

Dans la littérature, l'évaluation numérique des IEM s'appuie sur deux types d'approches : l'une basée sur la simulation d'une architecture donnée, modélisée principalement par des techniques de maillage, l'autre plus formelle et théorique, basée sur la modélisation, par des équations, du comportement EM du système. Alors que la première permet de valider ou non si les contraintes EM d'une architecture donnée sont acceptables, la seconde permet de comprendre les éléments physiques qui influent sur les couplages EM et permet ainsi de définir les spécifications d'une architecture compatible avec des contraintes EM données.

Ainsi plusieurs modèles mathématiques et simulations numériques ont été développés pour aborder les questions d'IEM/CEM, et notamment lors de l'intégration de systèmes à grande échelle (Paul and Edwards, 1971). En ce qui concerne les risques de CEM de tels systèmes, les IEM doivent être évaluées à trois niveaux de modélisation complémentaires : l'entité du système, les faisceaux de câbles et enfin l'équipement électronique. Dans cette perspective, certains auteurs soulignent l'importance d'assurer un processus de simulation sans faille par l'échange de ces différents modèles EM, entre les constructeurs automobiles, les fournisseurs d'équipements électroniques et même les développeurs de circuits intégrés (CI), afin d'identifier rapidement les problèmes potentiels d'IEM des systèmes et ainsi réduire le temps et les coûts de développement (Neumayer et al., 2003). Grâce à l'automatisation de la conception électronique (EDA), Ying et al. ont également introduit un processus de conception descendant pour la CEM pour un système de communication multi-véhicules, afin d'évaluer l'impact des caractéristiques EM des sous-systèmes sur les performances de l'ensemble du système (Liu et al., 2010). Dans le même esprit, d'autres auteurs proposent une méthodologie de modélisation CEM au niveau du système qui est basée sur la modélisation réaliste (Egot-Lemaire et al., 2012) ou théorique (basée sur la topologie) (Benhassine and Maurice, 2016; Parmantier, 2004) des sous-systèmes.

Ainsi, au niveau du système, il est important de prendre en considération l'effet total incident dû à toutes les sources d'énergie électromagnétique : désirées et non désirées, intrasystèmes et intersystèmes, fils, équipements et antennes (Paul and Edwards, 1971). L'analyse par la méthode des éléments finis (FEM) permet de résoudre les problèmes électromagnétiques (Mologni et al., 2010b), mais nécessite des géométries détaillées et des simulations longues et coûteuses. Même si le projet de recherche européen "GEMCAR" rapporte des résultats encourageants liés à différentes techniques courantes de calcul électromagnétique (Transmission-Line Modelling (TLM), Finite Difference Time Domain (FDTD), Boundary Element (BE) methods, Method of Moment (MoM), Finite Volume (FV) technique) (Alestra et al., 2003; Flint and Ruddie, 2001; Ruddie et al., 2003) pour la modélisation EM de l'ensemble du véhicule (Günsaya et al., 2003), il y a un écart considérable entre la disponibilité d'un outil de modélisation du champ magnétique 3D et la capacité à construire des modèles EM de véhicules satisfaisants, du fait notamment de certaines difficultés techniques persistantes (Alestra et al., 2003; Frei et al., 2004). Actuellement, peu de travaux de recherche présentent des techniques ou des outils disponibles qui permettent d'évaluer de manière fiable et abordable la CEM de l'ensemble du système, comprenant toutes les sources d'IEM (Maurice, 2016a).

En parallèle, de nombreux chercheurs ont fourni des modèles et des outils pour évaluer le comportement électromagnétique des câbles et des harnais (Duval et al., 2002; Paul, 2007; Wang and Ren, 2016). Par exemple, Paul analyse et prédit la diaphonie dans un faisceau en tenant compte de la position du câble (Paul, 1987). En effet, si une solution efficace courante consiste à ajouter un blindage et/ou à torsader les fils, ou encore à utiliser des filtres, ces solutions techniques supplémentaires coûteuses pourraient dans de nombreux cas être remplacées par un simple détournement du fil dans d'autres faisceaux de câbles pour réduire les phénomènes de diaphonie. En parallèle, d'autres méthodes ont également été développées pour prévoir le rayonnement en mode commun des faisceaux de câbles (Sun et al., 2006).

De nombreux articles traitent des problèmes de CEM en se concentrant sur la modélisation EM des dispositifs électroniques (Aimé et al., 2009; Costa et al., 2005a; Foissac et al., 2009; Zangui et al., 2010) et notamment dans le secteur automobile (Alaeldine et al., 2007; Chen and Xu, 1998; Frikha et al., 2015; Guttowski et al., 2003; Lafon et al., 2004; Reuter et al., 2013a). Certains auteurs décrivent même une méthode pragmatique pour modéliser le comportement EM des pièces en interaction EM au sein d'une automobile (Frei et al., 2004; Günsaya et al., 2003).

Comme les contraintes de temps de plus en plus serrées des programmes actuels sur les véhicules impliquent un risque trop important de laisser les essais CEM n'être effectués qu'après la phase d'intégration au niveau du véhicule, de nombreuses approches numériques ont été proposées. Néanmoins, le volume de données résultant de tels calculs sur des structures complexes est tel, que la surabondance d'informations est un problème potentiel qu'il ne faut pas sous-estimer dans la phase de post-traitement (Günsaya et al., 2003). Le processus d'analyse peut donc devenir un élément principal des coûts associés à la modélisation numérique (Ruddle et al., 2003). De plus, les approches précédentes reposent sur un niveau de détail géométrique qui n'est disponible que dans la phase de conception détaillée, où les coûts de reconception sont critiques. Par conséquent, il devient évident que l'évaluation des IEM ne peut plus être prise en compte uniquement en phase de conception détaillée.

Enfin, parallèlement à ces techniques numériques, des modèles théoriques sont également utilisés pour prédire les problèmes de CEM par des approches mathématiques. En prenant en compte les phénomènes physiques EM à travers des règles métier et des modèles théoriques,

certaines modèles mathématiques basés sur la topologie EM permettent ainsi d'analyser le système avant de définir une architecture conforme du point de vue CEM et de résoudre les problèmes correspondants en fonction de la compréhension du comportement physique du système. Par exemple, les approches de modélisation EM basées sur Kron permettent d'analyser, dès les premières étapes de conception, les différents choix d'architecture basés sur des modèles mathématiques (Maurice, 2018a, 2016a).

C. Analyse EM dès la phase de préconception

L'analyse EM actuelle des systèmes E/E prend beaucoup de temps en raison du nombre croissant et de la variation des paramètres à analyser pour l'ensemble du système. C'est pourquoi, de nouvelles études récentes se concentrent sur l'introduction de l'évaluation des IEM dès la phase amont de conception. Ainsi, assurer la compatibilité électromagnétique des véhicules dès les premières phases de conception reste l'un des principaux challenges techniques des constructeurs automobiles et fournisseurs de dispositifs électroniques. De nombreux experts en CEM doivent donc résoudre de plus en plus tôt des problèmes potentiels d'interférences électromagnétiques, même s'ils ne fournissent pas un niveau précis des interactions, ni d'identification des phénomènes de diaphonie (Ranganathan et al., 2002). D'ailleurs, certains auteurs proposent des approches pour identifier rapidement les problèmes d'IEM lors de la conception de l'architecture 3D (Egot-Lemaire et al., 2012; Mologni et al., 2010b; Neumayer et al., 2003). Vrignon propose un outil de CAO, qui simule pendant la phase de conception le test d'immunité d'un système électronique avec une détection automatique par défaut, avant la phase de test réel (Vrignon et al., 2013). Chahine a développé une approche basée sur des méthodes de simulation numérique pour estimer dès le début de la conception la susceptibilité d'un PCB en tenant compte du placement 3D du système dans le véhicule (Chahine et al., 2013). Mais ces approches nécessitent des méthodes de simulation numérique (telle que la méthode FEM) longues et coûteuse afin d'évaluer l'architecture 3D.

Pourtant, comme l'évaluation des IEM a un impact significatif sur le choix de l'architecture physique et des composants (notamment des composants sur étagère COTS), elle doit être prise en compte dès le début de la conception et donc dès la phase de spécification. Même si certaines recherches notables portent sur l'élaboration des normes CEM (Dienot, 2012; Zhao et al., 2013) et le respect des exigences EM (Hubing, 2013; Willmann et al., 2015), ces exigences identifient généralement les conditions des essais CEM que le système doit réussir et se rapportent uniquement aux niveaux d'émission/immunité des composants E/E (Iglesias et al., 2015; Lafon et al., 2010), mais très peu de travaux (Morgan, 1994; Zamir et al., 2005) traitent de l'intégration de la modélisation EM dans une approche d'ingénierie système (IS), pour ainsi faciliter la collaboration multidisciplinaire dès les phases amont entre l'architecte Système et les experts métiers CEM. Par ailleurs, comme les IEM dépendent fortement de la géométrie et notamment de la distance qui sépare les composants perturbateurs des composants perturbés, il est également essentiel d'intégrer aux exigences et normes CEM, les exigences géométriques associées.

IV. Conclusion

Ce chapitre présente d'abord le besoin d'intégration des approches d'ingénierie système (IS) dans le processus de conception et notamment lors de l'évaluation de l'architecture 3D des systèmes multidisciplinaires tels que les systèmes mécatroniques. Aussi, pour répondre au besoin d'une part de collaboration entre les différents acteurs disciplinaires, et d'autre part d'intégration des contraintes géométriques et physiques en phase amont, que requiert ce processus d'évaluation de concepts, les approches d'ingénierie système basées sur des modèles (MBSE) se sont considérablement développées, s'appuyant sur le fort développement concomitant des outils de modélisation et de simulation multidisciplinaires. Aussi, après avoir détaillé l'état de l'art relatif à

ces enjeux, une synthèse a été présentée sur les méthodes existantes permettant l'évaluation d'une architecture 3D physique de concept dans un contexte multidisciplinaire.

L'approche MBSE appelée SAMOS ayant été retenue pour ses capacités à faciliter le choix d'une architecture 3D cohérente avec des spécifications géométriques et multiphysiques, a été présentée, ainsi que son implémentation pour l'évaluation de l'architecture 3D sous contraintes thermiques, au sein du Sketcher 3D thermique. Aussi, un des enjeux de cette thèse sera d'étendre ces développements aux contraintes dynamiques mais surtout EM.

La dernière partie de ce chapitre a donc porté sur un état de l'art sur les interférences EM et leur évaluation numérique, notamment dès la phase de préconception. Or un moyen simple et peu coûteux d'éviter certaines de ces IEM (couplages en mode rayonné et notamment les couplages par diaphonie capacitive et inductive) est de modifier l'architecture 3D. Or même si certains travaux existants proposent des approches pour l'évaluation des IEM basées sur l'architecture 3D en début de conception, elles n'abordent que partiellement l'activité de spécification des contraintes EM : les exigences EM sont plutôt décrites au travers des normes ou de l'expertise métier et ne sont pas intégrées dans une approche MBSE pour supporter la cohérence et la traçabilité des choix d'architecture, en collaboration avec l'architecte Système.

Par conséquent, nous proposons, dans les chapitres qui suivent, une approche MBSE qui intègre à la fois les exigences et normes CEM, et les exigences géométriques associées des différents équipements, afin d'évaluer l'architecture 3D de concept et de prédire ainsi les risques d'IEM dès les premières phases de conception.

Chapitre 2. *Analyse du besoin*

Ce chapitre présente le recueil et l'analyse du besoin en matière d'évaluation de l'architecture 3D de concept suivant trois équipes disciplinaires (thermique, CEM et dynamique), afin d'identifier d'une part les exigences communes et d'autre part celles spécifiques à chaque discipline. Cela permettra de définir les éventuelles adaptations de l'approche SAMOS et développements spécifiques à apporter pour le Sketcher 3D multiphysique.

I. *Géométrie 3D*

Des enquêtes auprès d'industriels montrent que la plupart des concepteurs ont besoin de croquis avant d'utiliser des outils de CAO 3D (Römer et al., 2001), car ils sont utiles pour avoir une vision préliminaire de la géométrie du système (Do et al., 2000). Le besoin de travailler dès les phases amont sur des architectures 3D a été précisé au travers du retour d'expériences de différents projets collaboratifs. En effet, au cours du projet O2M (Outils de modélisation et de conception pour la mécatronique)³, et notamment du sous-projet «ELEC3D» (Conception intégrée en 3D), les constructeurs et les fournisseurs du secteur de l'automobile ont notamment défini leurs contraintes pour intégrer des composants électroniques dans l'architecture 3D existante des composants mécaniques (Figure 20).

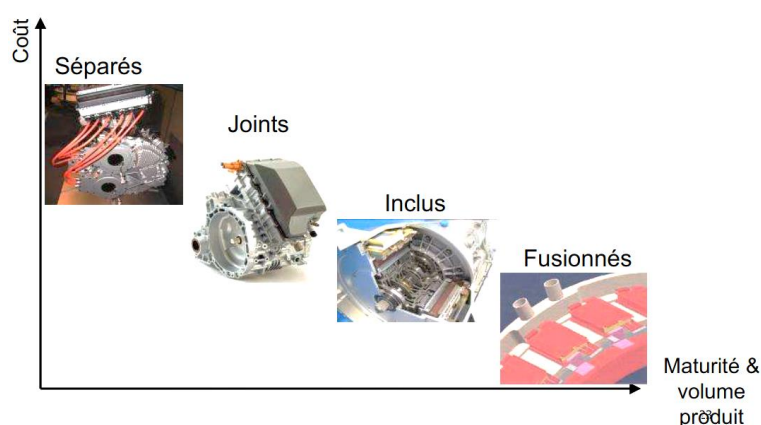


Figure 20 : Evolution de l'architecture 3D des systèmes mécatroniques (source : Projet O2M)

Dans le sous-projet ELEC3D, l'objectif était d'intégrer physiquement l'électronique de contrôle/commande à la structure mécanique d'un alternateur-démarrreur. Ainsi, la «mécatronisation» de systèmes originellement mécaniques, visant la réduction de volume, a fortement développé le concept d'intégration physique des systèmes mécatroniques (Richard and Dubel, 2007; Warniez et al., 2014), mettant l'architecture 3D au cœur des enjeux des concepteurs.

D'autres concepteurs ont dû modifier la géométrie des modules électroniques d'un Groupe MotoPropulseur Electrique (GMPE) pour s'adapter à l'architecture 3D des boîtiers et des composants mécaniques (Figure 21).

³ <https://systematic-paris-region.org/fr/projet/o2m/>,

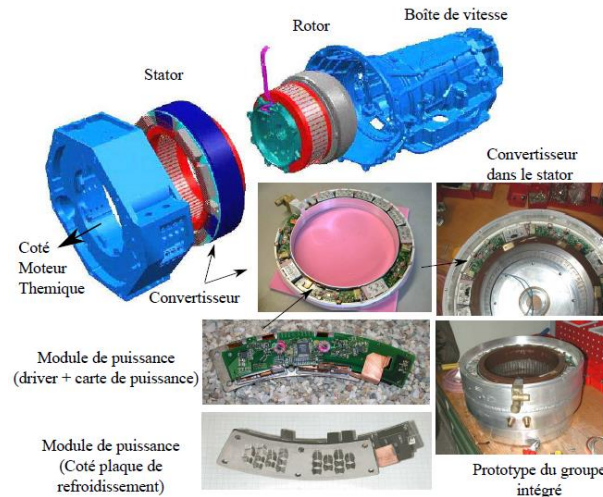


Figure 21 : Motorisation intégrée d'un véhicule hybride électrique (Tadros et al., 2003).

Ainsi, l'intégration physique croissante recherchée pour la compacité des systèmes mécatroniques n'est pas sans conséquence sur d'autres aspects. En effet, la proximité induite des composants peut, soit amener à la création de nouvelles fonctions permettant d'augmenter les performances du système global, mais aussi souvent causer des problèmes lorsque des couplages multiphysiques entraînent le dysfonctionnement des composants environnants. Le positionnement 3D des composants est donc un enjeu critique lors du choix d'architecture de systèmes mécatroniques.

En particulier pour la thermique, la géométrie, la forme et la position relative des composants jouent un rôle très important dans la procédure de modélisation thermique. En effet, quel que soit le mode de propagation thermique (conduction, convection ou rayonnement), les paramètres de calcul dépendent généralement de la géométrie et de la taille du composant, de son orientation et des conditions aux limites. Parallèlement, la forte intégration de l'électronique dans les composants mécaniques dans un volume très compacte induit de nouvelles contraintes thermiques notamment pour les équipements sensibles. Par conséquent, les experts en thermique seront ainsi obligés à prendre en compte le positionnement 3D des composants plus tôt dans le processus de conception.

Plus spécifiquement pour les IEM, la géométrie des composants est importante, car les interactions EM se déterminent par le rapport liant la longueur d'onde des perturbations aux dimensions des composants géométriques du système. En effet, dans un système complexe, une forte résonance EM peut se créer si la longueur d'onde des signaux est proche de la dimension des composants en interaction. En parallèle, la forme et les dimensions des circuits électriques source et victime impactent significativement les intensités des perturbations EM. En effet, pour les couplages de mode différentiel ou commun, plus la distance EM qui sépare le circuit source et le circuit victime est grande plus l'impact des perturbations EM est faible et inversement. En outre, plus les dimensions de la boucle du circuit électrique (source ou victime) sont petites plus les effets des perturbations EM sont faibles et vice-versa. Enfin, même l'étendue des surfaces utilisées pour les plans de masse influence considérablement l'intensité des perturbations EM de mode commun.

Finalement pour le comportement dynamique des systèmes, la géométrie des composants possède une influence significative et impactante. En effet, pour chaque forme du composant représentée par un volume donné (que ce soit plein ou creux), les mêmes fréquences propres diffèrent. En parallèle, comme les autres physiques (CEM et thermique), la stratégie de rapprochement ou d'éloignement des composants peut parfois produire soit des amplifications ou

des réductions des effets de vibrations (Cacciola and Tombari, 2018). Afin de diminuer ces effets vibratoires, il faut donc dans la mesure du possible choisir une fréquence d'usage qui soit éloignée des fréquences de résonance ou modifier le système pour déplacer ou limiter les fréquences de résonance, en prévoyant notamment des meilleures stratégies de fixation des composants. Enfin, afin de mieux étudier le comportement vibratoire, il faut bien sûr aussi prendre en compte les facteurs qui impactent le mouvement vibratoire de la structure étudiée comme par exemple ses caractéristiques géométriques et physiques (dimensions, forme, matériau, etc.), son chargement extérieur et ses conditions aux limites.

II. *Experts thermiques*

A. *Besoins*

Suite au rapprochement des composants électroniques dans la structure mécanique, de nouvelles contraintes thermiques sont apparues, accompagnées de nouveaux besoins pour les experts thermiques. Ces besoins ont été identifiés au travers de différents projets collaboratifs et d'interviews auprès d'industriels.

Au sein du projet O2M, l'intégration physique de l'alternateur a montré d'une part, que les composants électroniques étaient exposés à des températures élevées en raison de la proximité du moteur thermique, et d'autre part que comme certains de ces composants pouvaient être traversés par des courants élevés (jusqu'à 600A), ils devenaient eux-mêmes des sources d'échauffement des composants mécaniques, modifiant ainsi leur comportement mécanique (dilatation thermique, changement de phase). Ainsi, lors de la phase de conception, le développement d'équipements automobiles ou aéronautiques met en évidence plusieurs problématiques thermiques. En effet, les interactions thermiques peuvent être induites par des innovations technologiques se traduisant par l'intégration de composants électroniques : qu'il s'agisse de la température minimale ou maximale supportée par les composants, ou de la puissance thermique émise lors de leur utilisation opérationnelle. Elles peuvent aussi être générées par les conditions environnementales (par exemple, un environnement climatique alternant des températures très basses et très élevées, utilisation de la ventilation naturelle ou forcée). Ainsi, que ce soit pour faire face à l'apparition de températures critiques, induite par le comportement de certains matériaux ou par l'existence de zones d'équipements sensibles (boîtiers électroniques par exemple), ou pour la protection des équipements vis-à-vis de leur environnement, la température doit être maîtrisée pour ne pas dépasser des valeurs limites, afin de préserver l'intégrité fonctionnelle des équipements mécatroniques (Montrol et al., 2012).

Dans ce contexte, les besoins des experts thermiques adressent la mise à disposition d'outils 3D permettant d'identifier les interactions thermiques en fonction du positionnement des composants électroniques au cœur des structures mécaniques. Certains outils 3D ont ainsi été développés pour les experts thermiques, comme le logiciel Open VSP implémenté par Hahn pour la NASA, pour la conception des avions (Hahn, 2010). Pourtant, même si cet outil fournit une représentation graphique des surfaces extérieures d'un avion pour permettre l'étude thermique des différentes parties de l'avion dans les premières phases de la conception, il ne permet pas aux concepteurs de concevoir et de visualiser d'autres composants internes. C'est pourquoi au sein du projet SIM de l'IRT SystemX, un outil 3D (3D Sketcher thermique) a été développé pour évaluer les architectures 3D de concept au regard des contraintes thermiques. Par ailleurs, les partenaires industriels de ce projet ont exprimé aussi leur besoin de réduire le risque de longues boucles itératives lors de phases de conception ultérieures (réalisation et conception détaillée), en favorisant la collaboration (humaine et des données) dès la phase de préconception. La solution proposée (SAMOS) dans ce projet a permis de réduire ces itérations en fournissant une plateforme basée sur une approche

MBSE en collaboration avec l'ensemble des acteurs (architectes Système, architectes 3D et experts thermiques).

Finalement, la synthèse des besoins des experts thermiques a fait apparaître le besoin d'outils/modèles permettant :

- d'intervenir dès les premières phases de conception pour spécifier leurs contraintes thermiques (et géométriques associées, comme les distances de ségrégation) sur le modèle système partagé avec les autres acteurs de la conception ;
- de s'appuyer sur des outils 3D pour déterminer les zones critiques et leur permettre de proposer des architectures de composants (allocations de volumes) limitant les contraintes thermiques ;
- d'évaluer quantitativement les interactions thermiques, pour vérifier que les contraintes spécifiées sont respectées.

1. Pratiques existantes

Actuellement, les experts thermiques sont le plus souvent sollicités une fois que l'architecture physique de concept a été choisie sans s'assurer au préalable que cette architecture 3D de concept ne va pas générer des interactions physiques indésirables entre les composants choisis. Ils doivent alors optimiser la position des composants afin de définir une architecture 3D finale qui soit adaptée à leurs contraintes thermiques.

Pour évaluer le comportement thermique d'une architecture physique, ils effectuent souvent une première modélisation par résistance thermique, sans aucune considération 3D (Manchester and Bird, 1980). Certains d'entre eux utilisent l'optimisation multidisciplinaire (MDO) pour déterminer les valeurs de certains paramètres géométriques clés prenant en compte des contraintes thermiques (Choley et al., 2010; Hammadi et al., 2011). Cependant, cette approche paramétrique est limitée et peut être longue, car ces simulations thermiques sont basées sur une modélisation par éléments finis (FEM) de l'architecture et nécessitent donc un nouveau maillage géométrique à chaque modification de l'architecture 3D. Enfin, pour éviter les itérations et les coûts élevés pendant la phase de conception détaillée, certains utilisent des modèles de substitution adaptés à la modélisation thermique de certains systèmes multiphysiques (comme Sanchez et al. pour l'actionneur électromécanique (EMA) d'ailerons d'avion (Sanchez et al., 2017)). Néanmoins, ces modèles réduits sont basés sur des simulations d'éléments finis qui peuvent être longues et non adaptées lorsque la géométrie des composants n'est pas encore bien définie (notamment en phase de préconception).

2. Analyse des améliorations potentielles

En tenant compte des besoins des experts et des pratiques existantes, des améliorations de l'outil Sketcher 3D thermique proposé par R. Barbedienne (R. Barbedienne, 2017), peuvent être proposées afin de faciliter l'évaluation de l'architecture 3D sous contraintes thermiques, dès les premières phases de conception. Ces améliorations pourraient être par exemple d'ajouter une bibliothèque de matériaux, d'enrichir la modélisation thermique par des règles de ségrégation (telle que la distance entre les composants en interaction) et de compléter le processus de traçabilité : depuis le modèleur thermique 3D vers la modélisation système en SysML (System Modeling Language), ainsi que de l'environnement de simulation (en Modelica) au modèleur 3D et à la modélisation système en SysML. Ces propositions sont schématisées dans la Figure 22 Enfin,

d'autres travaux pourraient porter sur l'intégration de nouveaux types de modèles thermiques et l'automatisation de la vérification des exigences thermiques quantifiées.

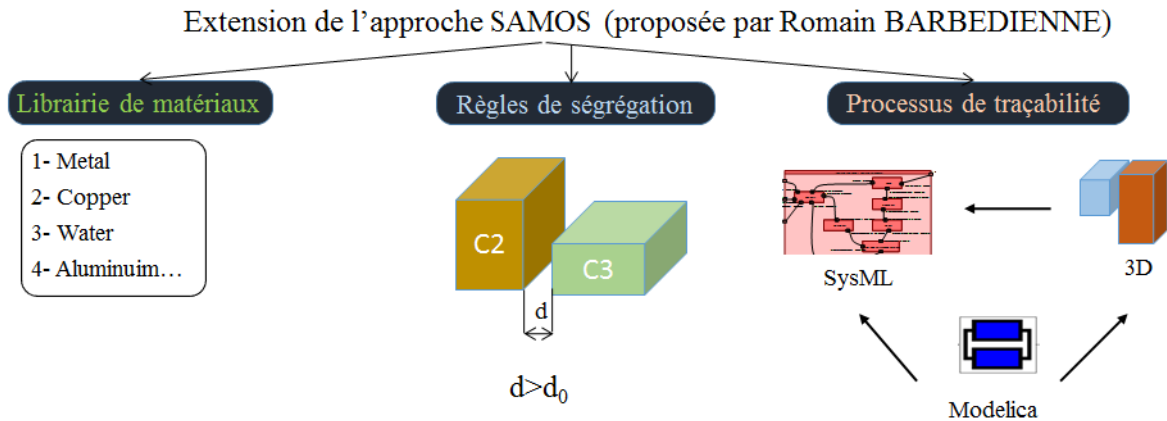


Figure 22 : Proposition d'amélioration de l'outil Sketcher 3D thermique

III. Experts en dynamique

Des experts en dynamique ont été interrogés sur leurs besoins et leurs pratiques actuelles pour résoudre les problèmes d'architecture 3D relatifs aux vibrations, qui surviennent principalement dans les configurations de montage lors de l'intégration de sous-systèmes dans le système mécatronique global. Ils doivent optimiser la position des composants afin de définir une architecture 3D adaptée à leurs besoins en vibration.

1. Besoins

Les phénomènes dynamiques des systèmes mécatroniques concernent les vibrations structurelles, notamment les risques de résonance et les comportements préjudiciables affectant les performances du système. Par conséquent, l'architecture de tels systèmes mécatroniques doit pouvoir satisfaire à la fois les exigences statiques et dynamiques (Trabelsi et al., 2013). Pour les exigences statiques, elles concernent principalement les exigences décrivant les propriétés statiques (telles que la dureté, la résistance à la rupture, la déformation, etc.) et les propriétés structurelles du système (telles que la masse, la forme, les dimensions, l'encombrement, etc.). Quant aux exigences dynamiques, elles consistent en des exigences qui permettent d'identifier les caractéristiques de performances et le processus de fonctionnement du système à travers des exigences métiers (appelées aussi spécifications fonctionnelles) et des exigences comportementales du système (telles que les seuils de sensibilité, la précision, la stabilité, etc.) (Trabelsi, 2014).

L'existence de vibrations dans un système mécatronique est considérée comme un problème très important dans les différentes applications industrielles. En effet, les sources de vibrations, générées par ces systèmes perturbant leur fonctionnement sont diverses : certaines proviennent de la technologie du système alors que d'autres sont dues à l'effet de son environnement externe (par exemple les vibrations dues au contact/choc avec d'autres structures ou avec le sol) (Hamza, 2016).

D'autre part, plusieurs rencontres avec des experts en dynamique issus des mondes académique et industriel nous ont permis alors d'identifier leurs rôles et leurs principales contraintes. Les problèmes d'architecture 3D relatives à la présence de vibrations se posent principalement pour l'intégration de sous-systèmes dans la structure (Rill, 2006). Les experts dynamiciens doivent alors déterminer des stratégies de positionnement et de fixation des composants dans l'ensemble de la structure (da Silva et al., 2008), tout en réduisant les vibrations des composants en interaction inclus dans l'architecture 3D considérée. En effet, les exigences dynamiques sont définies pour certaines

fréquences de résonance ou bandes de fréquences afin que les fréquences mises en jeu en phase opérationnelle ne coïncident pas avec les fréquences de résonance des composants et pour limiter le risque d'amplitudes de vibration préjudiciables.

Les dangers relatifs à l'architecture des systèmes les plus courants concernent principalement les fréquences comprises entre 0 et 1000 Hz, et pour les systèmes de transport courants (avion, voiture, train ...), ils sont plutôt limités à 0-100 Hz. En général, les études vibratoires sont modélisées aux dernières étapes du processus de conception (c'est-à-dire lors de la phase de conception détaillée). Par conséquent, les experts doivent trouver des solutions pratiques supplémentaires pour supprimer les vibrations dans l'architecture 3D préalablement choisie. Ils peuvent, si cela est possible, modifier ou changer l'architecture 3D (par un changement de la forme ou de la disposition des composants du système en mouvement, par la réduction des masses, etc.) ou modifier les caractéristiques de fonctionnement du système étudié (Trabelsi, 2014).

Afin d'aider les experts en dynamique vers une meilleure solution d'architecture 3D, de nombreux travaux ont été développés. Ces travaux visent à les aider à prendre des décisions pertinentes sur les choix d'architecture satisfaisant les contraintes dynamiques prédéfinies. Par exemple, Arbaoui et Asbik ont développé un outil d'aide à la décision pour la conception préliminaire d'un système d'éolienne. Cet outil, basé sur les connaissances d'ingénierie, permet d'aider les différents acteurs en dynamique à prendre des décisions sur les choix d'architecture en utilisant des techniques de modélisation de contraintes combinées avec un solveur CSP (en anglais : Constraint Satisfaction Problem) (Arbaoui and Asbik, 2010). Mais ces travaux sont souvent spécifiques à un système et ne prennent pas en compte les contraintes des phases amont de conception (incertitudes, géométrie non définitivement définie...). Aussi, lors de leur choix d'architecture 3D de concept, leur principal besoin est d'étudier le comportement dynamique des composants et de trouver le positionnement et/ou les caractéristiques de leur fixation pour éloigner les fréquences de résonance du système de sa plage de fréquences en phase opérationnelle (inférieure au kHz) et minimiser leurs amplitudes (via l'amortissement).

Par conséquent, afin de minimiser les effets de vibration, l'étude en phase amont des contraintes dynamiques leur permettrait de mieux choisir l'architecture 3D de concept, répondant aux exigences précédemment définies, sans avoir à dimensionner des solutions techniques additionnelles coûteuses pour atténuer les vibrations une fois en phase de conception détaillée. A cet égard, comme le dimensionnement préliminaire n'exige pas des éléments fins détaillés, les composants vibrants composant le système mécatronique peuvent ainsi être modélisés par des structures de topologies simples (par exemple : poutre, plaque, barre, coque, etc.). Par exemple, Ghazoi et al. ont développé une nouvelle méthodologie de pré-dimensionnement des systèmes mécatroniques sous contraintes vibratoires sans le recours aux méthodes traditionnelles de conception détaillée (telle que la méthode des éléments finis). Cette méthodologie consiste à développer une bibliothèque spécifique pour les éléments flexibles dans l'outil Dymola en se basant sur des méthodes analytiques permettant ainsi le choix de la meilleure solution nécessaire pour les étapes suivantes de conception détaillée (Hamza, 2016).

2. Les pratiques existantes

Comme la performance d'un système mécatronique est fortement influencée par plusieurs paramètres (tels que la forme de sa structure, ses dimensions, sa géométrie et la nature des matériaux de ses composants, etc.), une première approche consiste à utiliser différentes géométries et matériaux dans les composants (Casimir et al., 2016; Duperray, 2009; Renaud et al., 2011) tels que : le caoutchouc, les polymères (Jridi, 2017), les composites (Nguyen, 2015) ou encore des

systèmes piézoélectriques (Dion et al., 2013; Sénéchal, 2011). Finalement, lorsque les ajustements géométriques ne sont pas possibles, d'autres solutions technologiques peuvent être mises en œuvre pour réduire les vibrations, telles que l'adaptation de lois de commande, l'ajout d'amortisseurs ou de systèmes anti-vibrations (Boudon, 2014; Lopez et al., 2005).

D'autres approches permettent de prédire le comportement vibratoire de systèmes flexibles. Par exemple, Ghazoi et al. utilisent une approche analytique pour évaluer les vibrations générées entre un moteur et des cartes électroniques placées sur une plaque (Hamza et al., 2015). Des méthodes alternatives récentes, développées avec le développement des systèmes mécatroniques, proposent également des structures intelligentes avec des capteurs et des actionneurs (Benjeddou and Deü, 2002; Chevallier et al., 2008; Trindade and Benjeddou, 2009) intégrés pour supprimer les effets vibratoires indésirables sans augmenter le poids global du système (Narayanappa and Daseswararao, 2013).

Mais le plus souvent, les experts en dynamique effectuent des études préliminaires en utilisant des modélisations analytiques et calculs numériques pour évaluer le comportement dynamique de l'architecture physique sans prendre en compte le positionnement 3D des composants. Une méthode traditionnelle de réduction des vibrations consiste à augmenter la rigidité du système pour augmenter la fréquence de résonance au-delà de la fréquence d'utilisation. D'autres méthodes consistent à ajouter des absorbeurs de vibrations dynamiques appelés encore amortisseurs à masse ajustée TMD (Tuned Mass Damper) pour isoler le système vibrant (Djemal, 2015). Ces absorbeurs sont composés principalement d'une masse, d'un ressort et d'un amortisseur qui permettent la suppression des vibrations des machines et des structures (Djemal et al., 2015, 2014).

Ainsi dans le secteur automobile, un véhicule peut être modélisé comme une carcasse à laquelle sont rattachés les sous-systèmes, avec un nombre limité de fixations spécifiques (Den Hartog, 1985; Hmid, 2016). L'enjeu consiste alors à positionner et choisir ces fixations afin que les fréquences de résonance des composants et de la structure soient éloignées des multiples fréquences de chargement du système. Pour cela, les experts choisissent généralement des fixations flexibles pour avoir une fréquence de résonance du système inférieure à la fréquence d'utilisation et déterminent les paramètres appropriés (masse et rigidité) de la carcasse pour que sa fréquence de résonance soit supérieure à celle-ci. L'objectif est de maintenir les fréquences de résonance éloignées des fréquences d'utilisation. Lorsque ce n'est pas possible, ils essaient de diminuer le facteur de qualité Q (pour diminuer l'amplitude de la résonance) en augmentant l'amortissement (par dissipation au sein ou entre les composants) (Chevallier, 2012).

Ces approches sont basées sur une modélisation de système multi-corps rigide, sur une bande de fréquence comprise entre $0 < f < 100$ Hz (phase d'utilisation). Les composants sont modélisés par leur masse (avec leur volume, la position du centre de gravité et leur matrice modale d'inertie), et les points de fixation de chaque composant sont modélisés par leur rigidité et la matrice modale de raideur. Pour positionner les pattes de fixation par rapport au centre de gravité de chaque composant, les experts peuvent utiliser des méthodes empiriques SRC/SRE (Normes PR NORMDEF 0101) qui fournissent un spectre de réponse énergétique avec un facteur d'amortissement arbitraire de 5% pour un degré de liberté à une fréquence donnée. Mais ces méthodes empiriques (Good et al., 1985) utilisées en phase amont restent peu précises. D'ailleurs, les travaux de recherche actuels associés se concentrent sur l'enrichissement de ces méthodes empiriques par des fondements physiques (Derumaux, 2009; Mori, 2016; Navuri et al., 2017; Wattiaux and Verlinden, 2011; Yan and Li, 2019).

Une autre approche pour positionner les points de fixation consiste à identifier les fréquences de résonance de la structure (incluant les modes de résonance des fixations et du châssis), par un calcul en base modale, prenant en compte les non-linéarités et les déformations des éléments (qui ont leurs propres modes propres). Certains experts utilisent la méthode des éléments continus (en anglais continuous elements). Par exemple, une étude pour un constructeur automobile basée sur la modélisation en éléments continus sur le cas d'étude du Groupe Moto-Propulseur (GMP) a permis d'optimiser la forme et la position des composants (en déplaçant les masses qui sont réparties sur les poutres). Cette méthode fournit une description des régimes harmoniques en se basant sur différentes matrices dites matrices de raideurs dynamiques (en anglais Dynamic Stiffness Matrix method) permettant de représenter le comportement dynamique de ces structures (Casimir et al., 2000; Tounsi Chakroun, 2015). Cette méthode est beaucoup plus précise et surtout utilisée pour des fréquences élevées, par contre elle n'est pas adaptée à la phase de préconception où il y a encore beaucoup d'incertitudes. Ces fréquences de résonance sont représentées sur une courbe appelée matrice de transfert $\frac{1}{Z} = \frac{|X|}{|F|}$ en fonction de la fréquence, avec Z = Matrice d'impédance ; X = vecteur déplacement et F = vecteur des forces externes (Figure 23).

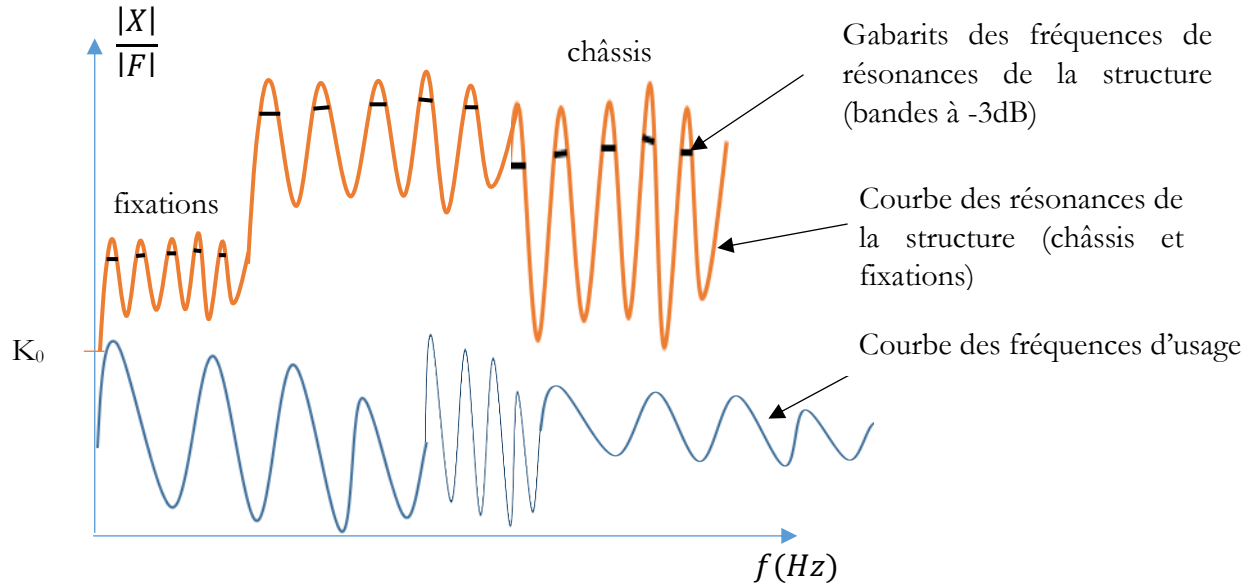


Figure 23 : Courbe de matrice de transfert

Pour tracer cette courbe, les experts linéarisent le comportement pour obtenir la fonction de réponse en fréquence (FRF), en exploitant les modes propres pour identifier les modes en corps rigides et réaliser leur calcul de base modale. Ce calcul consiste à résoudre l'équation suivante :

$$(-M\omega^2 + jC\omega + k)X = F \quad (5)$$

La notion d'amortissement de Rayleigh permet de définir la matrice d'amortissement C comme une combinaison linéaire des matrices de rigidité et de masse, avec a et b constantes à choisir arbitrairement :

$$[C] = a. [M] + b. [K] \quad (6)$$

Une fois cette courbe établie, il suffit de vérifier l'adéquation des fréquences de résonance du système avec celles d'usage en phase opérationnelle.

Puis, lorsque les experts travaillent en phase de conception détaillée et qu'ils doivent évaluer le comportement dynamique d'une architecture 3D, ils utilisent souvent des modèles par éléments finis ou des méthodes numériques complexes, qui nécessitent de longues heures (voire jours) de simulation pour l'étude d'une seule configuration de sollicitation (Seshu, 1997; da Silva et al., 2008; Zaeh and Siedl, 2007).

3. Analyse des améliorations potentielles

Pour faciliter l'évaluation d'une architecture physique 3D sous contraintes dynamiques, dès la phase amont, les développements suivants pourraient être mis en œuvre :

1. Dans l'environnement SysML, l'intégration des contraintes dynamiques dans le modèle Système de l'architecte Système, permettrait de disposer des contraintes multiphysiques de tous les experts disciplinaires, et ainsi de faire le meilleur choix d'architecture 3D de concept. Pour cela, le développement d'un profil SysML permettrait d'enrichir sémantiquement le modèle Système avec :
 - Les spécificités des exigences statiques en termes de propriétés statiques (déformation, résistance à la rupture, ...) et structurelles (géométrie et masse des composants déjà connues ou fixées) ;
 - Les spécificités des exigences dynamiques (gammes de fréquences (d'utilisation ou à éviter), gabarit d'amplitudes maximum (Figure 24), paramètres dynamiques, ...) ;
 - La spécification des analyses (simulation) / tests expérimentaux à réaliser : par exemple, domaine d'étude : 0-100 Hz ;
 - Les conditions de « non contact » entre les composants lors des sollicitations dynamiques (éviter les collisions).

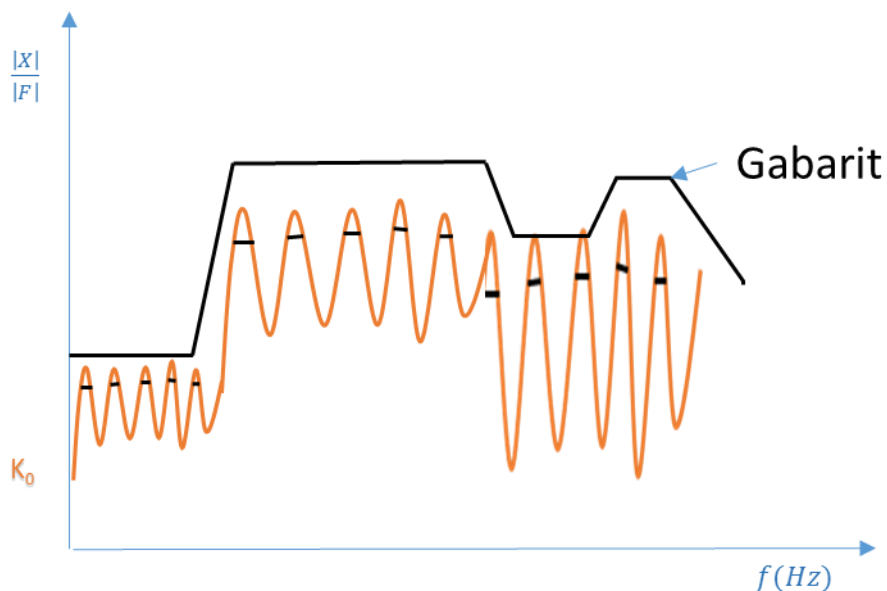


Figure 24 : Schéma de gabarit d'amplitude sur une plage fréquentielle donnée

2. Une analyse topologique, basée sur la grammaire de graphes (en s'inspirant des travaux de (Abdeljabbar, 2019; Dumouchel and Masfaraud, 2018; Masfaraud et al., 2016; Rameau et al., 2012; Rameau and Serré, 2016) permettrait de formaliser et modéliser

la connexion et déconnexion de certains points de fixation entre les composants et le châssis (matrice de connectivité), et choisir ainsi la configuration optimale (nombre et position de fixations pour répondre aux exigences dynamiques).

3. Dans l'environnement 3D, il faudrait enrichir la librairie :
 - a. de volumes élémentaires disponibles avec des données matériaux, le calcul ou la saisie de la matrice d'inertie, du centre de gravité et de la masse,
 - b. avec des éléments de fixation avec leur propriétés (de raideur, d'amortissement...),
 - c. des objets « excitation » (vecteurs force, couple, déplacement) et fréquences associées le cas échéant,
 - d. des objets « capteur » pour définir la position des points d'observation et leur domaine fréquentiel d'observation, vérifier le contact entre deux objets,

Ces données seront à transmettre à l'environnement de simulation, pour permettre l'évaluation du comportement dynamique de l'architecture ainsi définie.

4. Enfin, dans l'environnement de simulation, un dernier développement consisterait à modéliser le comportement dynamique d'une architecture 3D pour analyser et évaluer analytiquement une architecture avec des composants de géométries simples soumis à k points de fixation ($k = 1$ à n). Ensuite, en utilisant le formalisme de Fourier et l'inversion de matrices, on peut créer une bibliothèque de composants physiques, avec les équations de Lagrange et les fonctions de transfert paramétriques calculées entre les points de fixation, à l'aide de modèles FRF. Ainsi, chaque composant serait défini par une masse et leurs points de fixations seraient représentés par des ressorts, tandis que les composants seraient reliés entre eux par une poutre flexible. Un exemple est donnée sur la Figure 25 représentant une modélisation dynamique d'une transmission de véhicule composée de deux masses ($M1$, $M2$), deux rigidités ($k1$, $k2$), deux amortisseurs ($C1$, $C2$) et d'une poutre de flexion qui est caractérisée par son module de Young (E), son moment d'inertie I , sa masse volumique (ρ) et sa longueur (L).

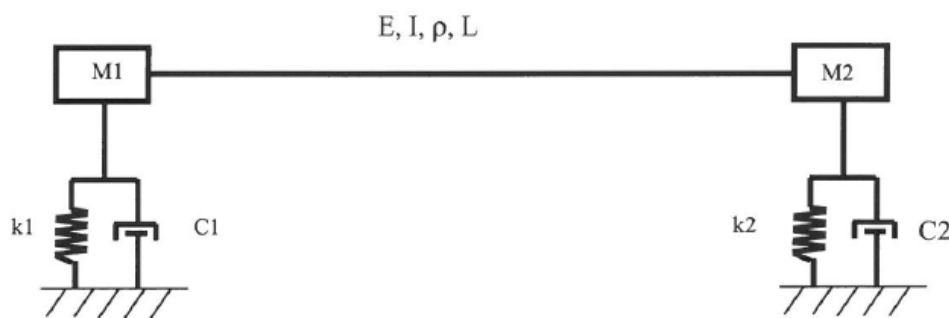


Figure 25 : Modélisation dynamique d'une architecture en phase amont

IV. Experts EM

1. Spécificités sectorielles

En fonction du secteur industriel concerné, du marché cible et du volume de production correspondant, les objectifs et les contraintes liés à la CEM sont différents, que ce soit au niveau du coût, du temps de conception ou de la stratégie envisagée. En effet, à une extrémité du spectre

se trouve l'industrie automobile avec une production de masse, où les compromis CEM sont faits entre la sécurité prioritaire des passagers, le faible coût des produits et des temps de développement courts. De l'autre côté, il y a le secteur spatial avec une production quasi-unitaire, pas de passagers, des années de développement, un budget important mais sans marge d'erreur. Par conséquent, les questions et les prises de décision liées aux compromis en matière de compatibilité électromagnétique, pour chaque secteur, seront très différentes.

Dans le secteur automobile, l'ingénierie CEM est traditionnellement une activité expérimentale (Willmann et al., 2015). Les concepteurs testent expérimentalement leurs composants, et notamment les émissions par conduction, les émissions rayonnées, l'immunité multi-sources et les décharges électrostatiques (ESD) (Sun and Chaoqun, 2009). En effet, les constructeurs automobiles doivent s'assurer que tous leurs sous-systèmes ont passé des tests rigoureux avant leur intégration dans le véhicule. Par la suite, des essais sur l'ensemble du véhicule sont nécessaires, comprenant les essais d'émission rayonnée, d'immunité rayonnée et d'ESD, qui s'appuient sur certains équipements coûteux comme les chambres anéchoïques. Tous ces essais CEM expérimentaux coûteux sont généralement basés sur plusieurs normes internationales, dont celles de l'Office international de normalisation (ISO), de la SAE (Society of Automotive Engineers), par exemple l'ISO 11452-1:2015 (ISO 11452-1:2015, 2015), ISO 11452-2:2004 (ISO 11452-2:2004, 2014), ISO 11452-7:2003 (ISO 11452-7:2003, 2003), SAE J1113/12_201711 (SAE international, 2017), ou également les normes OEM des grandes entreprises automobiles (Ford Norms, 2016; Jaguar Land Rover Norms, 2010). Ces normes limitent généralement, dans certaines conditions spécifiques, le niveau d'émissions (conduites/rayonnées) généré par les composants (considérés comme sources) et elles définissent également le niveau d'immunité minimal (conduite/rayonnée) que les composants doivent avoir pour pouvoir résister, sans dysfonctionnement (Hesener, 2010).

La compatibilité électromagnétique pour l'industrie ferroviaire concerne principalement des spécifications de sécurité et de fiabilité, qui exigent que les véhicules ferroviaires et l'équipement ferroviaire embarqué, ainsi que l'équipement de voie, soient rigoureusement conçus et testés pour la compatibilité électromagnétique avant la mise en service. En effet, l'absence de définition, dans les normes, d'un test et de procédure pour l'examen des cas spécifiques les plus défavorables en CEM constitue un réel problème en termes de coût, de temps et de fiabilité. Les normes (EN50238 (CENELEC - EN 50238, 2003), EN5088 (CENELEC - EN 50388, 2012), EN 50215 (CENELEC - EN 50215, 1999)) doivent donc être complétées par certaines règles de conception afin de répondre aux exigences de fiabilité du système. Dans cette perspective, Adin et al. proposent un examen scientifique des IEM spécifique à l'environnement ferroviaire et lient les exigences de fiabilité à l'interopérabilité électromagnétique et à la conception des systèmes (Adin et al., 2012).

Les exigences en matière de CEM pour l'aéronautique ont subi un processus de changement continu, entraîné à la fois par l'environnement électromagnétique toujours plus contraignant (en termes d'amplitude et de gamme de fréquences) et par l'utilisation croissante de l'électronique dans les systèmes des avions pour le contrôle des fonctions critiques (Carter, 2012; Clarke and Larsen, 1987). En effet, de nouvelles stratégies et approches sont nécessaires pour répondre aux normes strictes de compatibilité électromagnétique des avions (DO-160 (RTCA DO-160, 2007)/ED-14 (EUROCAE ED 14, 1997)) en raison de l'intensification de l'électrification des avions modernes (issus du concept « More Electric Aircraft ») et de l'utilisation de matériaux non métalliques comme les composites fibres de carbone (Kut et al., 2013; Sormunen, 2018). De la même manière que dans les autres secteurs précédemment mentionnés, les normes (MIL-STD 464 (MIL-STD 464, 2010), MIL-STD 461 (GENESYS, 2015; MIL-STD 461, 2015), MIL-STD 462 (MIL-STD 462, 1999)) et les essais d'émission et d'immunité correspondants (irradiation par antennes, chambres d'injection

et de réverbération en courant continu) sont également utilisés de manière classique pour les équipements aéronautiques et les aéronefs complets. Pour les avions civils, certaines séries de courbes de couplage génériques (Generic Transfer Function), selon la taille et la catégorie d'avion, peuvent être utilisées pour limiter les essais coûteux et aider à estimer les effets induits (en phase opérationnelle) sur une plage de niveau plus large. Enfin, pour traiter la question de l'intégration, une alternative à l'ensemble des essais d'un avion est l'utilisation de la modélisation mathématique et de nombreux codes EM sophistiqués, ainsi que l'installation manuelle des faisceaux de câbles permettant un positionnement et notamment une distance du fuselage variable : ces deux approches peuvent avoir un gain significatif pour réduire les couplages d'IEM néfastes.

Dans l'industrie des engins spatiaux (Fortescue et al., 2011), les concepteurs sont actuellement confrontés à des défis importants en matière de compatibilité électromagnétique dans leurs véhicules en raison du fort développement des communications, de la robotique, de la télédétection et des engins spatiaux scientifiques et, plus récemment, de petits satellites lancés en groupes. Les problèmes de compatibilité électromagnétique connexes amènent les constructeurs d'engins spatiaux à imposer des exigences strictes en matière de compatibilité électromagnétique à leurs engins spatiaux et à leur équipement de soutien au sol, ce qui entraîne relativement peu d'incidents de ce type dans les engins spatiaux, la plupart des entreprises s'efforçant de prendre rapidement des dispositions CEM pour tout système à concevoir. En règle générale, les spécifications relatives aux exigences CEM sont établies et conçues pour chaque engin spatial, c'est-à-dire en fonction de sa mission. Ils se composent des exigences au niveau de l'engin spatial et des sous-systèmes/unités, qui devront être vérifiées par des essais mais aussi généralement en conformité avec les normes militaires américaines MIL-STD-461 (GENESYS, 2015; MIL-STD 461, 2015). Aussi, les problèmes de CEM rencontrés sur les engins spatiaux entraînent généralement de légères dégradations de performances, même si certaines d'entre elles peuvent avoir des conséquences plus graves.

Dans l'industrie de la microélectronique, qui est particulièrement sollicitée dans les innovations des produits actuels, la forte intégration des microsystèmes dans un volume très réduit (par exemple dans une puce électronique ou à l'intérieur d'un boîtier électronique), peut générer de fortes agressions EM. Avec l'augmentation croissante de la miniaturisation des microsystèmes, les problèmes de CEM sont devenus de plus en plus critiques pour les industriels, les obligeant ainsi à prédire les risques CEM dès les premières phases de conception (Richelli, 2016). Ces perturbations EM peuvent provenir soit de ces mêmes microsystèmes, soit d'autres microsystèmes voisins ou même de l'environnement extérieur (Gandelli et al., 2006). En effet, l'étude CEM de tels systèmes implique le contrôle de tous les microcircuits électroniques, de ses interconnexions et de tous ses composants électroniques, amenant les experts CEM à utiliser des méthodes de mesure et des standards spécifiques tenant compte de la complexité et de la taille réduite de ces circuits intégrés. Ces standards et normes concernent principalement : les émissions rayonnées et conduites « IEC 61967 » (IEC61967, 2002), et l'immunité RF « IEC 62132 » (IEC62132, 2007). L'optimisation du placement des composants pour respecter la CEM est alors nécessaire dans la conception des circuits intégrés pour éviter les solutions de blindage et de filtrage coûteuses.

En résumé, quel que soit le secteur considéré, ils fondent tous leurs contraintes de développement CEM sur des normes mais adaptent leurs propres spécifications en fonction de leurs spécificités et contraintes. Cependant, avec l'avènement des véhicules électriques et hybrides-électriques et l'intégration croissante d'une large gamme de nouveaux systèmes électroniques basés sur les technologies de l'information et les fréquences de fonctionnement correspondantes, les

tâches de conception et d'évaluation EM s'avèrent une charge lourde pour leurs fabricants, quel que soit le secteur industriel.

2. *Besoins*

Une expertise en compatibilité électromagnétique (CEM) est nécessaire pour deux types d'analyse : (i) le comportement EM intrinsèque des composants électroniques inclus dans les systèmes mécatroniques, et (ii) les couplages dus à la présence d'autres sources de perturbations environnantes. Dans le premier cas, des perturbations peuvent survenir à partir des IEM générées par les composants eux-mêmes alors que dans le second cas, les perturbations n'apparaissent qu'en présence de l'environnement qui l'entoure (couplages émergents). Dans les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique, ce dernier cas est systématiquement pris en compte (présence possible d'antennes et/ou d'autres circuits émettant des signaux parasites (Weber et al., 2003)), d'autant plus qu'avec l'apparition des systèmes de communication portatifs (GSM, Wifi, RFID...), la gestion de l'environnement électromagnétique de n'importe quel système devient difficilement prédictible. Ces perturbations peuvent également provenir des conditions opérationnelles d'usage (variation de tension ou de fréquence générant des interférences électromagnétiques et augmentant ainsi les risques de perturbations dans les circuits), ce qui peut entraîner des dysfonctionnements entraînant des pertes économiques ainsi que des problèmes pour la sécurité et même la santé humaine (Guttowski et al., 2003; Shahparnia and Ramahi, 2004).

Plusieurs réunions avec des experts industriels en CEM, nous ont permis d'identifier leur rôle et leurs principales contraintes.

Leur objectif principal est d'éviter les problèmes de CEM (dysfonctionnements dus à des perturbations électromagnétiques de composants en interaction), et notamment de protéger les composants sensibles (récepteurs/capteurs) des IEM survenant lors la phase d'intégration de tous les équipements électriques/électroniques du véhicule. Ainsi leur tâche principale consiste à prédire les risques entre les composants E/E en interaction et à trouver des solutions réduisant les probabilités de dysfonctionnements des composants E/E.

Pour cela, ils doivent définir ou valider une architecture physique qui ne génère pas d'interactions physiques indésirables entre les composants des systèmes mécatroniques et vis-à-vis de leur environnement opérationnel. Par conséquent, ils doivent évaluer si l'architecture proposée répond aux spécifications CEM correspondantes, mais aussi prévoir les risques CEM, ou les mesurer au travers de tests expérimentaux, afin d'éviter de nombreuses boucles itératives coûteuses dans la phase finale d'intégration du système.

En effet, une tâche importante des experts CEM consiste en une description précise des «plans de tests expérimentaux» permettant de vérifier et de valider les besoins du client. Que ce soit pour le respect des normes EM, ou pour assurer le bon fonctionnement du véhicule (fonctionnalité des composants), en satisfaisant la sécurité et le confort des usagers, les systèmes devront être soumis à des tests de champ EM.

Pour autant, les experts souhaiteraient pouvoir intervenir plus tôt, dès la phase amont, pour d'une part participer au choix de l'architecture du concept, en identifiant les architectures susceptibles de causer de nombreux risques CEM, et d'autre part mieux cibler les essais expérimentaux à mettre en œuvre (Günsaya et al., 2003).

C'est pourquoi les experts ont besoin de mettre en œuvre des modélisations multiphysiques dès les premières phases de conception. De manière générale, deux types de problèmes doivent être traités :

- L'analyse multiphysique « intrasystème » ou « la CEM fonctionnelle », qui est indépendante de l'environnement extérieur du système et dont les interférences EM se créent entre les composants internes. Par exemple, dans le cas d'un véhicule dont la carcarasse est assimilée à une cavité électromagnétique avec des ouvertures, l'expert peut modéliser les perturbations EM par des sources potentielles internes, via les réseaux de câblage des circuits électriques (alimentant les vitres électriques par exemple), auxquelles peuvent s'ajouter aussi des phénomènes d'origine thermique ou dynamique.
- L'analyse multiphysique « extrasystème » ou « avec l'environnement extérieur », qui est caractérisée par les interférences EM qui se créent entre le système et son environnement externe au cours de son utilisation, le plus souvent via des ondes (comme par exemple un téléphone ou une antenne). Dans ce cadre d'analyse, le constructeur doit suivre les directives européennes dont le principe pourrait se résumer à « un système ne doit pas perturber et ne doit pas être perturbé ». Autrement dit, le constructeur doit évaluer les IEM générées par son système dans son environnement d'usage et s'assurer qu'elles sont inférieures à un certain seuil, et de la même manière valider l'aptitude de son dispositif ou système à fonctionner de façon satisfaisante dans un environnement électromagnétique prédéterminé, en fonction des niveaux de sévérité appliqués.

La Figure 26 illustre schématiquement quelques interactions multiphysiques qui nécessitent une analyse « intrasystème » et « extrasystème » dans le cas d'une automobile.

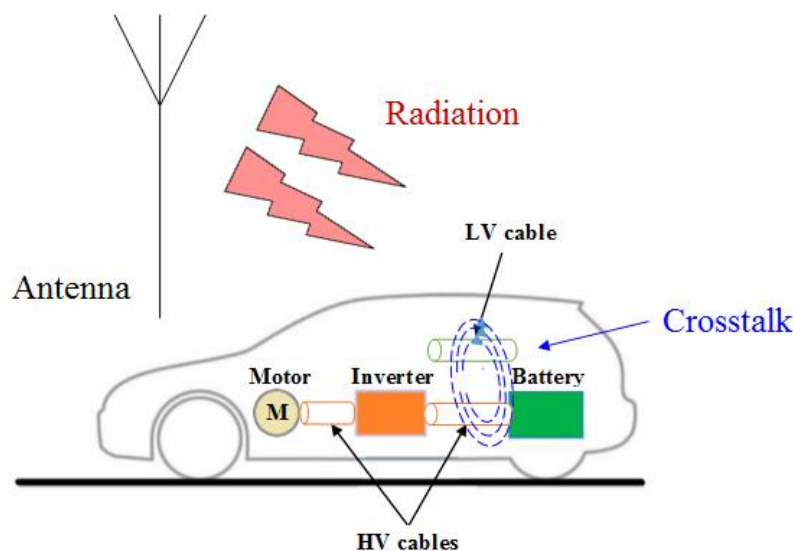


Figure 26 : Exemple d'interactions multiphysiques intrasystèmes et extrasystèmes d'un véhicule automobile.

Lorsque ces évaluations ne sont pas réalisées en phase amont afin de déterminer une architecture qui satisfasse les principales contraintes CEM, il est alors nécessaire, en phase de conception détaillée, d'utiliser la simulation pour déterminer les mesures correctives (par filtrage ou par blindage des câbles) qui limiteront le risque de perturbation et permettront donc d'assurer la protection du produit final.

3. Pratiques existantes

La compatibilité électromagnétique (CEM), comme d'autres disciplines d'ingénierie, est généralement intégrée dans un cycle de conception en V. Ce cycle est constitué de deux branches

principales : la première branche descendante correspondant à la conception des produits et la branche ascendante pour l'intégration, la vérification, la validation, la qualification et la certification des produits. La branche descendante est généralement divisée en trois phases principales : la phase de préconception, la phase de conception préliminaire et la phase de conception détaillée. Dans la phase de préconception, la première étape est l'analyse des besoins du client et la définition des exigences. Les spécifications des exigences CEM sont généralement définies par les intégrateurs de systèmes puis sont déclinées pour les sous-traitants/équipementiers. Elles peuvent être définies soit à partir de normes (pour le niveau du système), soit en réutilisant des spécifications internes existantes résultant des expériences précédentes. Ces exigences spécifient généralement les conditions des tests que le système ou les sous-systèmes doivent réussir pour satisfaire les exigences. Celles-ci adressent principalement les niveaux d'émission/immunité des composants E/E en mode conduit et en mode rayonné, les tensions et les courants de circuits électriques (y compris leur forme et leur plage de fréquences). Les experts en CEM peuvent également se voir imposer des composants existants (par exemple COTS) ou des composants avec un comportement d'interaction connu, permettant ainsi de stipuler des règles de ségrégation à partir de macro-modèles simplifiés ou de modèles empiriques. Mais ces règles et données approximatives qui aboutissent à des marges supérieures sont de moins en moins acceptables.

Sur la base de ces exigences dérivées, l'architecte Système fournit alors une architecture fonctionnelle puis logique, avant de proposer des architectures physiques alternatives avec des composants à évaluer. Une fois l'architecture conceptuelle choisie, la conception préliminaire puis détaillée sont réalisées.

Les spécifications de performance CEM (en immunité et en émission) sont utilisées à différents niveaux du cycle en V : par exemple lors de l'évaluation des niveaux d'agression, pour justifier un choix d'architecture. Elles interviennent également à différents niveaux du système : au niveau du système, lorsque l'architecte Système vérifie que le système satisfait les contraintes normatives, au niveau des équipements (sous-systèmes) pour vérifier qu'ils satisfont les cahiers des charges techniques (vérification), même si ça ne garantit pas qu'ils satisferont aux exigences du système (validation), enfin au niveau des composants pour éliminer ceux qui sont trop sensibles dans les phases de vie du système pour la mission considérée.

Pour vérifier toutes ces spécifications, l'architecte Système s'appuie généralement sur des modèles et des plans de tests expérimentaux établis. En effet, en raison de la complexité des phénomènes d'IEM, de nombreux tests expérimentaux sont encore exécutés afin de vérifier le comportement de chaque équipement et de la structure dans son ensemble, souvent dans une chambre anéchoïque. Par conséquent, l'utilisation de simulations numériques EM au niveau des équipements et au niveau système est également largement répandue afin d'améliorer la résolution des problèmes EM et de réduire les délais et les coûts de développement. Néanmoins, la durée habituelle des simulations et tests physiques EM courants peut s'étendre sur plusieurs semaines.

Pour cela, afin de réduire le temps d'analyse des risques, souvent les experts en CEM : (i) réutilisent des composants ou des architectures appropriés, puis étudient «l'écart par rapport au précédent» avec certains modèles paramétriques ; (ii) effectuent des calculs plus précis uniquement sur les nouveaux (sous-)systèmes innovants ; (iii) prennent en compte les perturbations électromagnétiques déclarées à partir des retours des clients pour faire face à des sources de perturbation auxquelles ils n'avaient pas pensé.

En parallèle, les experts CEM sont généralement interpellés trop tardivement (une fois le concept choisi, c'est-à-dire au stade de la conception détaillée) et doivent plutôt trouver des

solutions pratiques pour atténuer les interférences électromagnétiques (IEM) plutôt que de proposer une toute nouvelle architecture 3D adaptée (Nuns et al., 1993; Shen et al., 2014) : choisir un câblage pertinent (paire de fils torsadés) et un blindage approprié permet d'atténuer l'ampleur des champs de couplage, optimiser l'alimentation des équipements sources et victimes pour qu'ils ne soient pas en fonctionnement en même temps, réduire les surfaces de boucles de courant en rapprochant les composants des plans de masse, utiliser des techniques de filtrage, etc.

Les méthodes citées sont des solutions pratiques efficaces pour remédier aux effets EM induits excessifs, mais qui génèrent la plupart du temps des coûts additionnels importants.

4. Analyse des améliorations potentielles

L'évaluation des IEM n'est pas aussi simple que celles d'autres physiques. En effet, les modes de couplages sont beaucoup plus nombreux qu'en thermique par exemple et dépendent non seulement de la position et de la géométrie des composants, mais aussi des caractéristiques électriques, des ondes de signaux qui peuvent provoquer des phénomènes émergents non linéaires avec des lois physiques complètement différentes (par exemple cavité et résonance) et sont sensibles aux phénomènes thermiques (variation de la température) pouvant accentuer la dégradation du fonctionnement du système.

Aussi, il est très important de prendre en compte l'expertise des spécialistes, pour analyser les besoins des clients et les normes et directives, et ainsi exprimer les contraintes EM auprès de l'architecte Système, dès la phase amont de conception. Pour permettre à l'architecte Système d'intégrer ces contraintes au sein de son modèle Système en SysML, nous proposons de développer une extension SysML EM qui intégrera toute la sémantique nécessaire aux spécificités de cette discipline.

Puis une méthode pourra être proposée pour identifier qualitativement les couplages EM, et ainsi réduire le nombre d'analyses numériques et tests expérimentaux nécessaire pour l'évaluation qualitative d'une architecture physique donnée.

Enfin, une fois ces couplages potentiels identifiés et les contraintes géométriques transmises à l'environnement 3D, l'évaluation du comportement des IEM identifiées, à partir de l'architecture 3D à évaluer, pourra alors être réalisée dans l'environnement de calcul ou de simulation.

Les développements proposés sont synthétisés sur la Figure 27, et seront détaillés dans les chapitres suivants du manuscrit.

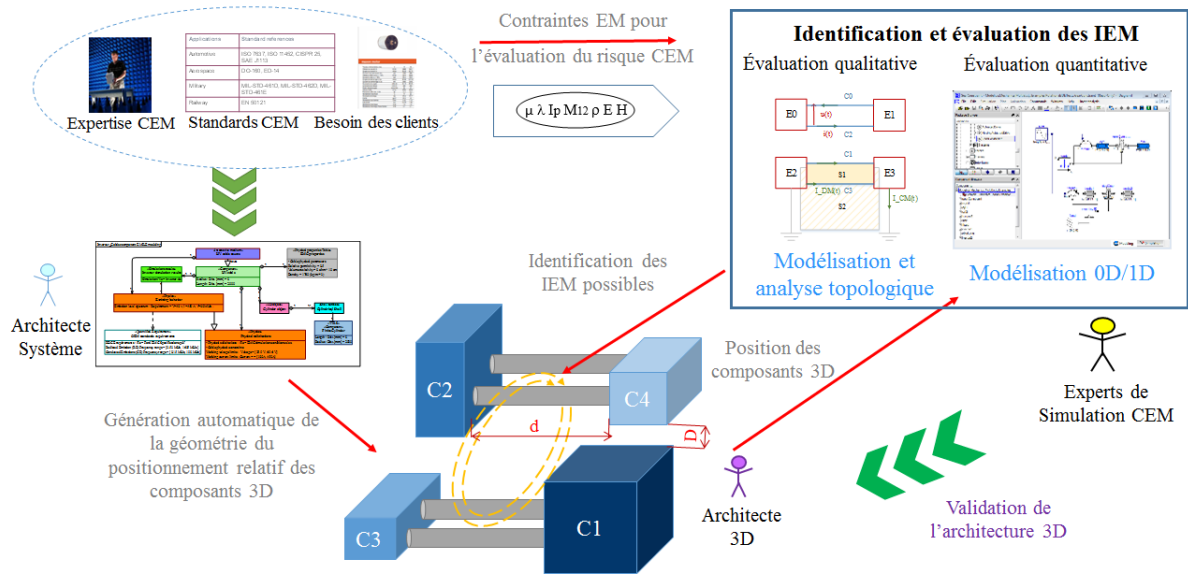


Figure 27 : Proposition du processus d'évaluation des IEM en phase amont (s'appuyant sur l'approche SAMOS)

V. Synthèse

Dans l'environnement industriel et dans des secteurs aussi variés que l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatial et l'aéronautique, les systèmes mécatroniques doivent être développés selon un processus bien défini pour fournir un système global opérationnel et fiable. Dans ce processus de développement, la première étape est la définition du cahier des charges : fonctions détaillées de l'équipement et de ses contraintes fonctionnelles et environnementales (thermiques, vibratoires, électromagnétiques (EM), etc.).

Il est donc important, quelle que soit la discipline, de pouvoir intégrer dès la phase amont de conception les contraintes des experts dans le modèle Système en SysML, géré par l'architecte Système. En effet, celui-ci doit avoir une vision complète des exigences de l'ensemble des experts pour définir une architecture physique 3D de concept qui satisfasse leurs contraintes multiphysiques et géométriques, plutôt que demander aux experts, en phase de conception détaillée de trouver des solutions pratiques additionnelles onéreuses pour atténuer les interactions multiphysiques, et qui conduisent à de nombreuses et longues itérations entre les différents acteurs de la conception. C'est pourquoi nous proposons d'évaluer les architectures 3D de concept sous contraintes multiphysiques dès la phase de préconception, sans attendre la phase de conception détaillée (Figure 28).

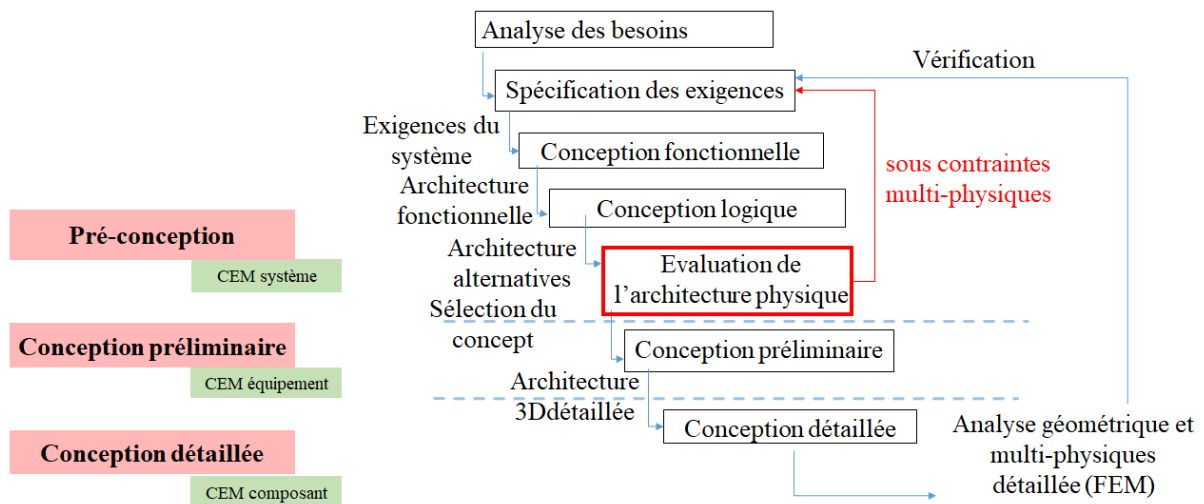


Figure 28 : Positionnement de nos travaux de thèse

Afin que l'évaluation de ces interactions multiphysiques des architectures 3D proposées puisse être efficace et pertinente, il s'agit d'abord d'identifier qualitativement ces différentes interactions potentielles, afin de limiter les évaluations quantitatives et ainsi réduire le temps du cycle de conception. Ainsi, le type des modélisations (périmètre du système, niveau de détails, précision, incertitudes...) des comportements physiques mis en jeu dans ces interactions devra être minutieusement choisi pour être en cohérence avec le degré de maturité de la conception en phase amont.

Par ailleurs, il est crucial, dans ce contexte de collaboration multidisciplinaire d'assurer la cohérence des données entre les parties prenantes, même si de nombreux outils de modélisation ne sont pas encore directement interopérables. Cette cohérence est d'autant plus importante dans le contexte MBSE dans lequel nous nous plaçons, que ce soit dans le processus de spécification, de vérification et de validation des exigences, que dans celui de traçabilité des données tout au long du processus d'évaluation.

Enfin, afin d'assurer une collaboration efficace des acteurs et des échanges de données correspondants, l'extension de l'approche SAMOS à la multiphysique devrait s'appuyer sur 3 types d'environnement : un environnement en SysML pour le modèle Système, un environnement 3D pour l'architecte 3D et un ou des environnements de modélisation du comportement (multi)physique.

Dans la suite de cette thèse, nous avons donc choisi de nous concentrer sur l'évaluation d'une architecture 3D sous contraintes EM et d'intégrer les contraintes EM dans la modélisation du système, afin de prendre en compte, dès la phase de préconception, les exigences EM de l'environnement opérationnel système et les interactions physiques entre les composants multidomains internes. Cela nécessite d'abord de définir les exigences EM, et notamment les paramètres permettant de détecter les risques de perturbations EM associés au positionnement des composants 3D. Nous proposons donc d'aborder dans le prochain chapitre le développement d'un nouveau profil SysML qui gèrera non seulement les contraintes EM et la définition des IEM, mais aussi les exigences géométriques liées aux IEM.

Chapitre 3. *Modélisation EM dans EMILE*

Après avoir analysé le besoin des différentes équipes disciplinaires et notamment des experts CEM pour l'évaluation de l'architecture 3D sous contraintes EM dès les premières phases de conception, nous nous focalisons dans ce chapitre sur la prise en compte des contraintes EM dès la phase de spécification au sein du modèle Système (géré par l'architecte Système).

En effet, certains auteurs proposent des approches pour l'évaluation des IEM basées sur l'architecture 3D dès les premières phases de conception, mais sans prendre en considération le niveau de spécification CEM. Par ailleurs, les exigences EM sont généralement définies à travers plusieurs normes ou expertises métiers. Cependant, elles ne sont pas intégrées dans une approche MBSE afin de soutenir la cohérence et la traçabilité requises pour les processus de vérification et de validation. Certaines approches existantes basées sur les langages SysML ou UML traitent bien l'architecture 3D mais n'adressent pas encore le domaine des interactions EM. Par conséquent, une nouvelle extension SysML dédiée à la modélisation EM est nécessaire, afin de spécifier les contraintes EM et géométriques requises pour l'évaluation de l'architecture 3D pendant la phase de préconception.

Après avoir présenté l'extension SysML EMILE développée durant cette thèse, nous décrivons son implémentation au sein d'un outil SysML. Puis, nous précisons le choix des composants du cas d'étude tout en détaillant leurs spécificités et surtout leurs criticités vis-à-vis les IEM. Enfin, la dernière section présente les entretiens de validation réalisés avec quelques partenaires industriels et la comparaison de notre proposition avec des travaux connexes existants.

I. L'extension SysML EMILE pour la spécification des contraintes EM

A. Besoins

Nous avons vu que trois facteurs sont nécessaires pour générer des IEM qui peuvent donc causer des problèmes de CEM : une source (signal qui fournit un environnement agressif), un chemin de transmission (assurant la fonction de transfert de couplage) et un récepteur, suffisamment sensible pour être perturbé par le bruit.

Pour limiter ce risque, il faut inhiber ou réduire les niveaux d'émission des sources d'interférence, intercepter les voies de couplage par des mesures de prévention (par exemple, le blindage ou distanciation) et renforcer l'immunité des équipements sensibles (par exemple par filtrage).

Les interactions EM potentielles sont nombreuses (Figure 18 du Chapitre 1) et leurs équations comportementales sont abondamment disponibles dans la littérature comme le montre le Tableau 1 du Chapitre 1.

Dans les faits, leur apparition dépend essentiellement de la fréquence des signaux. Par exemple, le couplage par impédance commune (CI ⑪) est critique à basse fréquence (< 1 MHz), alors que les autres couplages sont nuisibles à haute fréquence ($>$ quelques MHz). En parallèle, l'occurrence des différents couplages rayonnés dépendra du rapport $\frac{L}{\lambda}$ entre la longueur L du fil et la longueur d'onde λ du signal agressif. Par ailleurs, à haute fréquence, des couplages inductifs et capacitifs peuvent apparaître simultanément. De même, en champ proche, les modes commun et différentiel (respectivement MC et MD) coexistent également en fonction de la position relative des fils source et victime. En champ lointain, même si c'est le mode commun qui est pris en compte, ses conséquences en MC et MD doivent être évaluées. (Kaiser, 2004; Maurice, 2017). Aussi, même si

les phénomènes EM sont généralement très complexes, une modélisation simplifiée permet, dans un premier temps d'estimer de nombreux risques d'IEM afin de pouvoir éviter les architectures les plus problématiques.

Concernant ces mécanismes de couplage EM, comprenant les couplages par conduction et par rayonnement, trois types principaux peuvent être distingués (Hesener, 2010) :

- le couplage résistif/galvanique qui se produit lorsque le bruit est transféré via des connexions électriques (couplage par conduction), principalement en fonction de la topologie électrique ;
- le couplage par diaphonie entre les câbles sous la forme d'un couplage capacitif (où les champs électriques constituent la principale voie de transmission) et d'un couplage inductif (basé sur les champs magnétiques généralement à haute fréquence) ;
- le couplage radiatif, se produisant généralement à haute fréquence et transmis par des ondes électromagnétiques.

Dans la pratique, deux objectifs principaux guident les experts CEM :

- Gérer les interférences électromagnétiques pour s'assurer que le produit développé est conforme à la réglementation et passe les tests réglementaires CEM (également appelés conformité CEM ou électromagnétique)
- Réduire les interférences électromagnétiques afin que le système conçu fonctionne de manière fiable dans tous les modes de fonctionnement, avec une efficacité satisfaisante et sans être perturbé par d'autres équipements à proximité.

Pourtant, les limites de niveau d'émission/réception définies dans les normes sont plus basées sur ce que les laboratoires d'essai peuvent facilement mettre en œuvre que sur ce que l'équipement subira dans son installation réelle. Par conséquent, il est important que la spécification des contraintes EM par l'extension EMILE permette non seulement de saisir les **exigences issues des normes/standards d'essais** mais aussi de répondre au second objectif, **en intégrant des contraintes EM réelles** pouvant être **vérifiées par simulation ou par calcul**, tout en respectant une approche d'IS (SAMOS) (MBSE) afin d'éviter la détection tardive de problèmes d'IEM basés sur l'architecture 3D de concept.

Concernant justement les contraintes géométriques, la conception de nouvelles architectures innovantes des systèmes complexes basés sur les technologies de l'information offre de nombreuses alternatives de placements de composants. La moindre modification de passages de câbles pour relier ces composants électroniques et électriques (E/E) à l'intérieur du véhicule va être susceptible de générer des IEM. C'est pourquoi, les **contraintes géométriques** sont toutes aussi **déterminantes** dans la prise en compte des interactions EM. En outre, l'introduction de la modularité dans la plupart des secteurs industriels a considérablement augmenté les possibilités de placement 3D : les composants les plus courants, qui sont généralement choisis dans les bibliothèques de composants électroniques (sensibles aux IEM) doivent ainsi respecter certaines géométries "standards" spécifiques qui sont susceptibles d'affecter leurs IEM. Par exemple, en ce qui concerne le développement de l'avionique modulaire, un ordinateur de contrôle de vol peut être composé de diverses cartes électroniques logées dans des racks situés dans différentes baies de l'avion. Ces cartes électroniques peuvent être facilement remplacées dans le temps pour répondre à une nouvelle fonction, conformément au concept de reconfigurabilité. Comme la CEM dépendra à la fois du comportement EM de chaque carte et de son emplacement dans l'avion, il pourrait être nécessaire **d'évaluer un grand nombre de configurations possibles**. Ainsi, l'évaluation de tels

cas dans les phases de conception amont par le biais d'un Sketcher multi-physique 3D peut présenter un avantage en termes de coût tout en réduisant le temps dédié aux essais.

Pour répondre à ces challenges, l'extension SysML EMILE (ElectroMagnetic Interactions Layout Extension) développée au sein de la plateforme SAMOS permettra de spécifier les contraintes EM au sein du modèle système, depuis les exigences initiales jusqu'à la spécification des conditions de simulation, supportant ainsi la prise en compte des besoins des experts CEM en phase amont.

B. Exigences EM

Les experts en EM ont besoin de définir les exigences EM principales, notamment (i) le niveau d'émission des composants en interaction (c'est-à-dire la puissance rayonnée ou conduite générée par un composant) et leur niveau d'immunité (c'est-à-dire la sensibilité du composant aux agressions électromagnétiques), (ii) les conditions de charge électrique du composant (par exemple la variation de tension/courant/fréquence) ou encore (iii) les conditions environnementales (antenne externe...). Ces spécifications peuvent être définies, soit à partir de normes existantes, soit en réutilisant des spécifications de systèmes existants antérieurs ou encore en utilisant certaines règles métier avec des approximations empiriques.

L'introduction de spécifications normatives dans les exigences fait souvent référence à la spécification des niveaux d'émission et d'immunité des composants soumis à des essais expérimentaux spécifiques. L'extension EMILE peut intégrer à la fois le spectre du signal d'entrée (en tant que limites de niveau d'émission) et les limites de niveau d'immunité de chaque composant, définies comme des *exigences quantifiées*. Le spectre du signal d'entrée peut être représenté soit par un tableau présentant, pour chaque gamme de fréquence (Hz), les valeurs de crête et moyenne du champ (V/m), soit par un lien de référence vers le document descriptif correspondant (image, pdf, etc.).

Pour cela, EMILE permet de définir les exigences des composants EM en rassemblant les paramètres physiques intrinsèques des composants dans un tableau de *propriétés physiques*. Ce tableau contient les propriétés du matériau potentiellement connues du composant (perméabilité magnétique, conductivité thermique, permittivité diélectrique), considérées comme homogènes. Ces informations peuvent être directement extraites des documentations techniques des composants ou des normes. En ce qui concerne les exigences liées aux conditions de simulation EM, elles peuvent être définies dans les *sollicitations physiques* qui décrivent les conditions extrinsèques de simulation EM (c'est-à-dire les valeurs des paramètres) et être spécifiées comme des *exigences quantifiées*.

En traitant les spécifications antérieures de composants connus, l'approche SAMOS MBSE permet de capitaliser et de réutiliser facilement les éléments existants de n'importe quelle modélisation système, puisqu'il est simple de copier et de récupérer un ensemble d'exigences existantes à partir d'un autre modèle SysML. En effet, EMILE a été développé de manière additive afin qu'il puisse être utilisé avec n'importe quel modèle SysML précédent existant.

C. Modélisation géométrique

Comme le comportement EM de tout composant E/E dépend généralement de sa géométrie, et comme les interférences EM rayonnées sont significativement influencées par la distance entre les composants sources et les composants victimes, les informations géométriques et la position relative de ces composants sont indispensables pour évaluer n'importe quel comportement EM d'un système. Pour cela, la nouvelle extension SysML EMILE a été développée de manière

complémentaire à l'extension SysML géométrique existante GERTRUDe (Geometric Extension Related to TTRS Reference for a Unified Design) développée par R. Barbedienne (Barbedienne et al., 2014). GERTRUDe permet de spécifier d'une part des informations géométriques des composants en enrichissant l'architecture du système avec des informations géométriques (forme et position 3D des composants), et d'autre part des contraintes de positionnement relatif.

Ainsi, dans EMILE, un *composant* est défini comme un élément physique ayant une géométrie spécifique. Il possède des *propriétés physiques* (intrinsèques) et des *sollicitations physiques* extrinsèques (en fonction de ses conditions d'environnement), mais ne contient pas d'équation de comportement physique.

En effet, la géométrie du composant est définie à travers trois niveaux de description géométrique : i) *l'objet 3D* qui représente la géométrie complète du composant (forme et topologie) ; ii) *l'enveloppe* décrivant la géométrie de toute la surface du composant ; et iii) l'ensemble de la ou des *face(s)* de l'enveloppe du composant. Chaque *face* comprend différents paramètres, tels que l'aire et les dimensions du contour, et est liée à ses *SATT* (Surfaces Associées Technologiquement et Topologiquement) (ou *TTRS* en anglais (Technologically and Topologically Related Surfaces)) correspondantes qui gèrent sa topologie. Le concept de *SATT*, proposé par Clément et al (Clément et al., 1998), classe les surfaces en sept sous-ensembles ou classes différentes, selon leur invariance cinématique de mouvement. Ces *classes SATT* sont : sphérique, plane, cylindrique, hélicoïdale, révolutionnaire, prismatique et complexe. Pour chaque classe, il est possible d'associer un Élément Géométrique de Référence Minimal *EGRM* (en anglais : MGRE = Minimal Geometric Reference Element), qui est la combinaison minimale d'objets géométriques simples nécessaire pour localiser et orienter n'importe quelles *SATT* liée à cette classe. Ces objets géométriques simples, appelés Élément Géométrique Réduit *EGR* (en anglais : RGE = Reduced Geometric Element) sont : le plan, la droite et le point. Enfin, 13 contraintes prédéfinies entre deux *EGRM* considérés permettent de positionner relativement les *SATT* les unes par rapport aux autres (Clément et al., 1998). Le positionnement des composants est spécifié par certaines contraintes *SATT* qui assurent alors la modélisation de la topologie de la géométrie des composants. Ces informations géométriques, incluant des paramètres géométriques intrinsèques, peuvent générer des *Exigences Quantifiées* ainsi que les paramètres physiques identifiés dans les sections suivantes.

En se focalisant sur le Sketcher 3D multi-physique développé, la génération des exigences géométriques existantes des composants (forme, dimensions et contraintes de positionnement) peut être automatiquement effectuée dans l'environnement 3D, en se basant sur des règles de transformation d'un modèle développé avec GERTRUDe.

D. Couplages EM

Une IEM est définie comme le signal électrique non désiré qui produit des effets indésirables dans un système E/E. Ce phénomène influence alors les performances des composants au regard des contraintes EM. Dans ce travail, les modèles de comportement des IEM ont été gérés de manière indépendante, sans tenir compte de leur couplage, et la décharge électrostatique ne sera pas non plus abordée.

Comme le Sketcher 3D multi-physique vise l'évaluation des IEM en fonction de la position 3D des composants, nous nous sommes focalisés sur les couplages EM rayonnés comme présenté dans le Tableau 3. Ces couplages adressent trois catégories de composants : câble, équipement/dispositif et antenne (pour tous les composants ayant un comportement "antenne émettrice/réceptrice"). Le mode de couplage EM rayonné dépend des composants interactifs mis en jeu : câble/câble, équipement/antenne et antenne/antenne. Ensuite, selon le chemin de

couplage, le couplage EM rayonné peut être présenté soit par un couplage de diaphonie capacitive/inductive classé par mode de propagation (mode commun ou mode différentiel) pour l'interaction entre deux câbles, soit par un couplage radiatif (champs proche et lointain) pour les interactions avec un composant de type « antenne ».

Tableau 3 : Modes de couplage EM rayonné

Interactive components	Coupling paths	Type
Cable / Cable	Inductive crosstalk	Differential Mode
	Capacitive crosstalk	Common Mode
Equipment/Antenna	Radiation	Near field
	(E, H fields)	Far field
Antenna / Antenna	Radiation	Near field
	(E, H fields)	Far field

Pour intégrer ces IEM dans EMILE, nous définissons un nouveau concept appelé *medium* qui est un support sémantique du comportement physique à considérer. Un *medium* est donc un composant spécifique incluant un comportement EM. Il existe deux types de *medium*.

Le *medium interactif*, qui est la partie en interaction d'un composant qui agit comme une source ou une victime dans un couplage d'IEM donné. Les paramètres extrinsèques EM (liés aux conditions physiques auxquelles le composant est exposé) de chaque *medium interactif* sont définis par le *comportement d'émission/réception*. Ce dernier contient toutes les données physiques nécessaires à la prédiction des risques liés aux IEM : forme d'onde de la source, valeurs seuils des composants électroniques, formes temporelles des signaux et spectres de fréquence en émission/immunité, etc. Ces paramètres peuvent hériter des informations spécifiques déjà intégrées dans les *sollicitations physiques*, en particulier celles issues de la configuration de simulation pour l'évaluation des IEM.

En parallèle, le *medium de couplage* contient les équations comportementales des IEM (c'est-à-dire les contraintes physiques entre deux mediums interactifs) liées au couplage électromagnétique considéré. Ces équations, largement disponibles dans la littérature, ont été synthétisées dans le Tableau 1 du Chapitre 1.

Par ailleurs, dans le cas des couplages de diaphonie en modes différentiel et commun, la surface générée par la boucle de courant victime considérée doit être prise en compte afin d'évaluer le risque d'IEM (Kharrat et al., 2018). Cette surface peut soit être calculée dans l'environnement 3D puis envoyée dans l'environnement de simulation, soit être exprimée dans des équations simplifiées avec certains paramètres géométriques des composants en fonction de leur distance.

Pour les couplages radiatifs, les géométries des composants émetteurs (*medium interactif source*) et récepteurs (*medium interactif victime*) sont critiques et concernent généralement les surfaces en regard l'une de l'autre. Il est ainsi intéressant d'introduire le concept de *face en interaction* (FI), qui correspond à la surface exposée de chaque composant en interaction (émettrice ou réceptrice) (*medium interactif*). Ces FI seront utilisées, dans EMILE, comme des interfaces physiques lors de la modélisation du couplage radiatif EM entre deux composants.

E. Simulation

Les conditions de simulation des IEM peuvent être soit spécifiées (sous forme d'exigences quantifiées), soit tracées (à partir des résultats de simulation). Dans les deux cas, cette configuration de simulation doit être présente dans EMILE afin d'assurer la cohérence et la traçabilité entre la modélisation du système et les environnements de simulation. Ainsi, chaque résultat de simulation doit être attaché à la sollicitation numérique du système correspondant dans l'environnement de simulation mais aussi dans l'environnement de l'architecte Système, en charge de la vérification. Par conséquent, dans le modèle système, toutes les informations nécessaires à la configuration de simulation sont définies par les conditions aux limites spécifiées dans les sollicitations physiques, et sont associées aux résultats de simulation qui incluent la référence du fichier numérique correspondant.

Enfin, toutes ces exigences géométriques et physiques (EM), implémentées dans le sketcher 3D multi-physique, peuvent alors être envoyées vers un environnement de simulation (par exemple par une transformation SysML-Modelica (Reichwein, 2012) ou vers l'environnement MATLAB/Simulink (Chabibi et al., 2018)).

F. Modèle de données

Le modèle de données EMILE intègre les données géométriques en englobant le modèle de données de l'extension SysML GERTRUDe développé par Barbedienne (Barbedienne et al., 2014), afin de préserver la même ontologie géométrique (Plateaux et al., 2017) et les règles de transformation de modèle associées pour la cohérence géométrique.

Le modèle de données EMILE a été décrit sur la Figure 29, en utilisant des classes UML incluant tous les concepts précédemment détaillés.

L'objet 3D est composé d'une surface *enveloppe* constituée de 1 à plusieurs *faces*, sa topologie SAT-T (TTRS) hérite des attributs de la *classe d'invariance cinématique* qui lui est associée, elle-même constituée par un Elément Géométrique de Référence Minimal EGRM (MRGE) qui définit sa position relative.

Le positionnement des composants est spécifié par certaines *contraintes géométriques*, qui permettent de générer une architecture 3D préliminaire incluant la forme des composants (paramètres géométriques intrinsèques) et leur position relative. Ainsi, l'ensemble de ces informations géométriques peut générer des *exigences quantifiées*.

Afin de modéliser les interactions physiques, nous définissons une entité particulière : le *medium* qui hérite tous les attributs du *composant* (propriétés, géométrie), mais qui en plus est physiquement interactif pour prendre en compte les propriétés émergentes liées aux aspects multiphysiques des composants et les lois de comportement locales et de structures. En se focalisant sur les interférences EM, nous avons défini un concept appelé *medium EM*. En effet, un *medium EM* est un *composant* spécifique sensible aux interactions EM.

Nous avons ensuite défini 2 types de *medium EM* :

Le *medium interactif*, qui est la partie en interaction d'un composant (source ou victime) dans un couplage EM donné. Il possède un *comportement EM* associé (en émission ou en réception, suivant qu'il est victime ou source) qui contient les paramètres EM extrinsèques : par exemple les niveaux d'émission et d'immunité max. Ces paramètres peuvent également être des informations spécifiques à intégrer dans les *sollicitations physiques*, comme les paramètres pour la configuration de simulation lors de l'évaluation du risque CEM.

Le *medium de couplage*, est un *medium EM* (défini entre deux *mediums interactifs*) qui contient les équations comportementales des interférences EM mises en jeu entre deux médiums interactifs. Ces lois de comportements sont définies dans des *contraintes physiques* et peuvent donner lieu à des exigences dérivées entre les composants en interaction, sous la forme d'*exigences quantifiées* imposant que le niveau de ce couplage EM ne dépasse pas un certain niveau.

Ensuite, un *medium EM* possède un ou plusieurs ports EM qui vont être des E/S de perturbations EM. Ces ports, définis comme une interface physique EM, possèdent des informations liées au flux ou au potentiel qu'ils transmettent (par exemple : flux/potentiel, valeur du courant, nature du signal ...) définies comme des attributs.

Enfin, l'évaluation des architectures sous contraintes EM nécessite de définir les conditions de sollicitations/paramétrage des simulations qui sont contenues dans les *sollicitations physiques* extrinsèques (en fonction des conditions d'environnement auxquelles elle est soumise). Ces *sollicitations physiques* correspondent à la configuration de la simulation/essais. Afin de pouvoir capitaliser et tracer les évaluations de différentes alternatives ou de différentes sollicitations, les résultats de chaque évaluation (*Simulation results*) doivent être rattachés au *Medium EM* et associés à la *sollicitation physique* correspondante.

Finalement, la spécification des contraintes EM se traduit par des principales exigences EM comme : (i) les paramètres électriques et physiques intrinsèques des composants liés à la CEM qui sont définis dans un *tableau de propriétés physiques* (issues de fiches techniques des composants), (ii) le niveau d'émission et d'immunité des composants en interaction (définis comme attributs du *comportement en émission/réception* d'un *médium interactif* (source ou victime)), les caractéristiques de sollicitation électrique d'un composant comme les plages de courant/tension/fréquence

admissibles ou encore les conditions environnementales/de simulation (définies dans les *sollicitations physiques*). Ces spécifications peuvent être définies, soit à partir de normes existantes, soit en réutilisant des spécifications de systèmes existants/ résultats de simulation antérieurs ou encore en utilisant certaines règles métiers avec des approximations empiriques. Lorsqu'elles sont associées à des valeurs, elles peuvent être définies comme des exigences quantifiées.

II. Implémentation de l'extension SysML EMILE

Un aperçu général des étapes du processus utilisant le profil EMILE, lors de la phase de préconception, est présenté dans un diagramme d'activités à la Figure 30. Ce diagramme montre comment EMILE joue un rôle central dans notre méthodologie MBSE afin de permettre l'évaluation de l'architecture 3D sous contraintes EM dès les premières phases de conception.

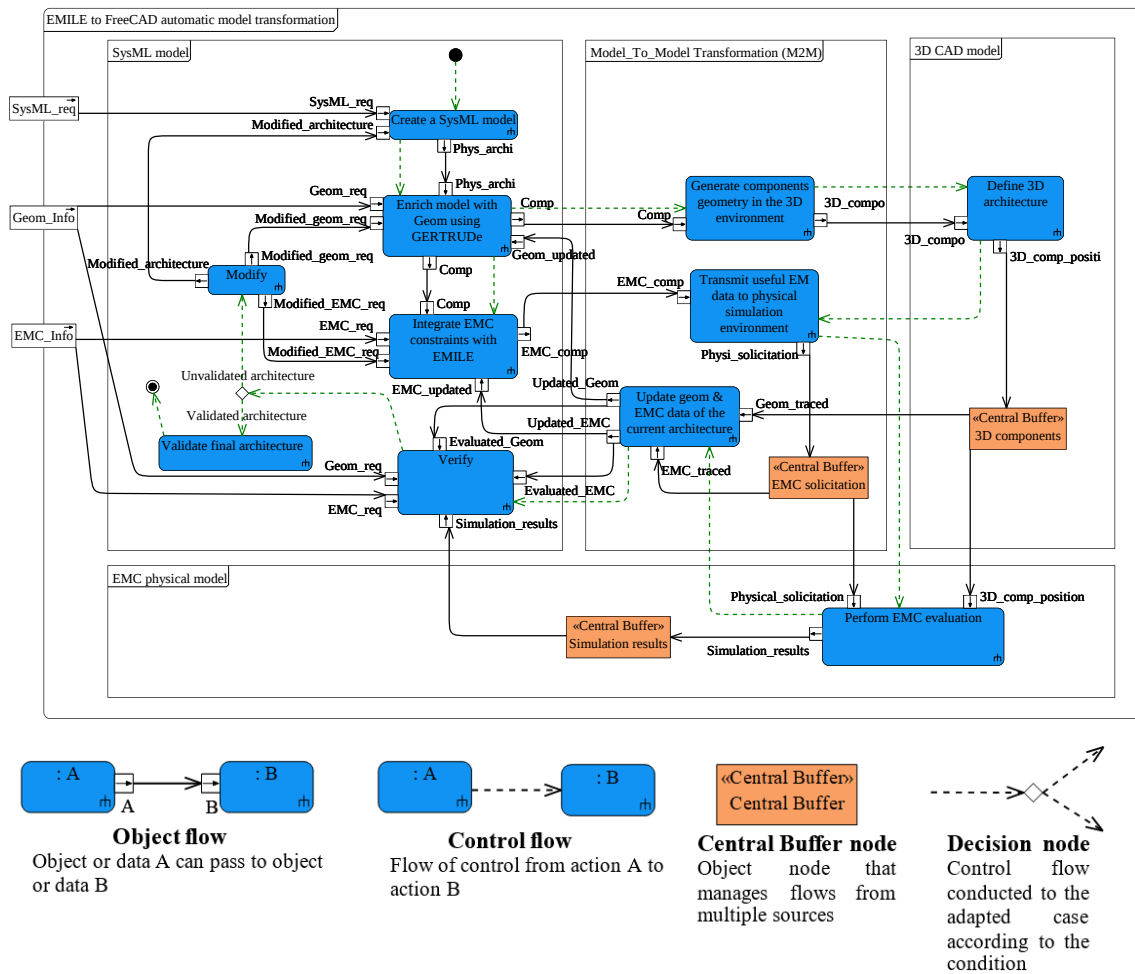


Figure 30 : Aperçu du processus basé sur EMILE dans un diagramme d'activités.

Pour commencer, un modèle SysML définit l'architecture système, y compris les sous-systèmes de composants. Ce modèle peut alors être enrichi avec des informations (forme, dimensions) et des exigences (contraintes géométriques, volume global ...) géométriques, grâce au profil GERTRUDE. Parallèlement, le modèle SysML peut aussi être enrichi avec des informations (propriétés physiques EM) et des exigences (notamment les normes CEM, seuils d'émission et de réception EM, contraintes EM...) EM basées sur le profil EMILE. Ensuite, une transformation de modèle entre le modèle SysML (dans l'outil de modélisation PTC Integrity Modeler) et le modèle de CAO 3D (dans l'outil FreeCAD) permet la génération des composants 3D de SysML dans l'environnement 3D, afin que les architectes 3D puissent construire une proposition d'architecture

3D pour l'évaluation. Cette transformation automatique de modèle à modèle (M2M) est supportée par l'utilisation d'un code développé en langage Python. De la même manière, les données EM correspondantes utiles dans le modèle SysML seront transmises à un outil de simulation physique (Dymola avec le langage Modelica ou Matlab), ainsi que les données géométriques (données de composants 3D, y compris leur positionnement) à l'environnement 3D, afin de soutenir l'évaluation des couplages EM. Ensuite, pour assurer la cohérence des données entre le modèle SysML du système et le modèle physique de simulation, les données géométriques et EM de l'architecture 3D évaluée en fonction de contraintes EM seront retracées dans le modèle SysML (pour mettre à jour les informations d'architecture). Cette étape permet notamment aux architectes Système de vérifier les exigences quantifiées géométriques et EM en utilisant les résultats de la simulation transmis à partir de l'environnement de simulation du comportement physique.

La nouvelle extension SysML pour la modélisation EM a été mise en œuvre avec le logiciel commercial PTC Integrity Modeler v8.4 et intégrée dans le Sketcher multi-physique 3D via une interface homme-machine spécifique, présentée au paragraphe II .F.

A. Nouveaux artefacts stéréotypés

Le profil EMILE intègre tous les nouveaux stéréotypes nécessaires pour définir les classes présentées dans le modèle de données (Figure 29), ainsi que les nouveaux diagrammes personnalisés afin de pouvoir intégrer la modélisation EM. Le diagramme de profil correspondant à la mise en œuvre du métamodèle EMILE est présenté à la Figure 31.

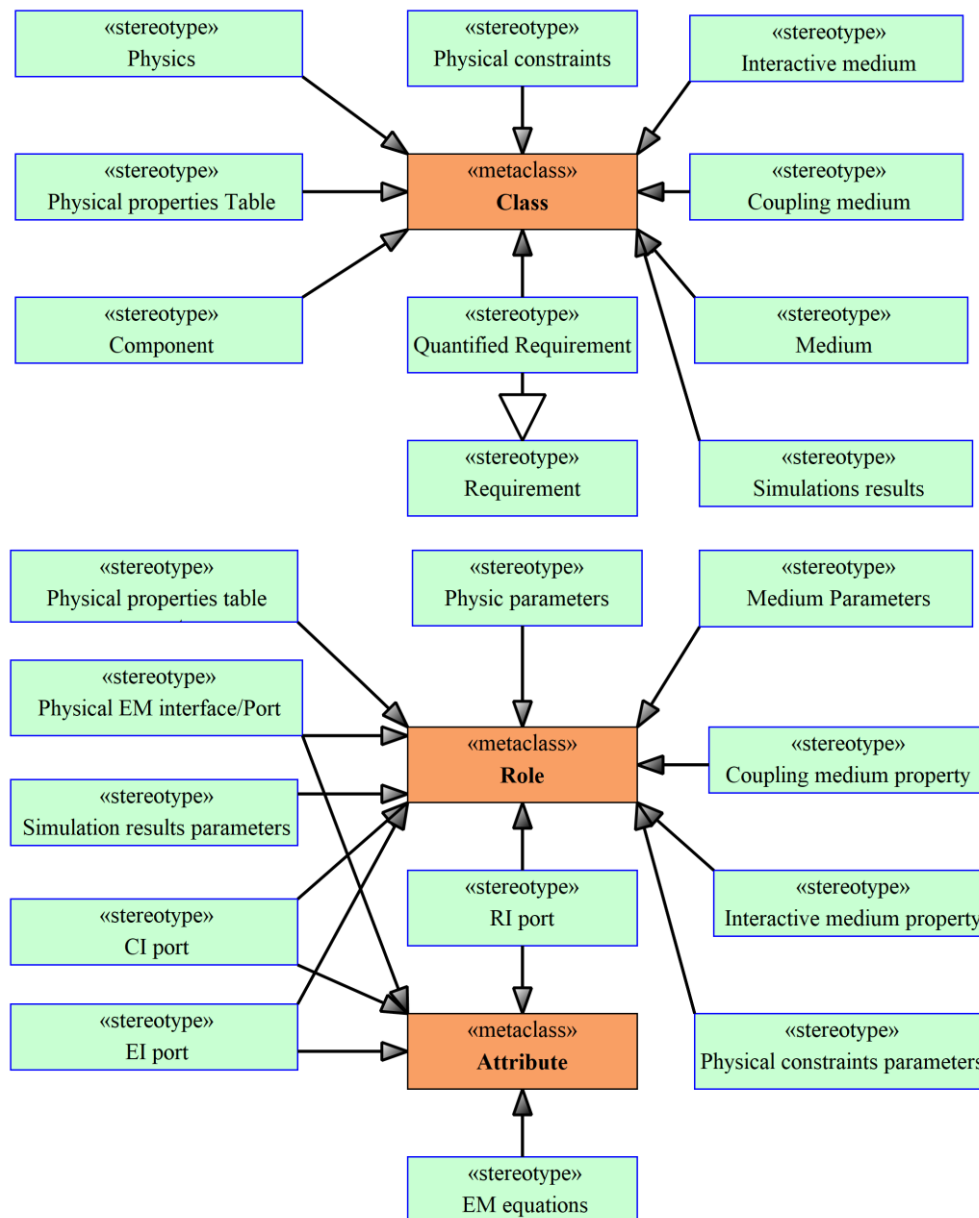


Figure 31 : Diagramme du profil EMILE

Ce diagramme de profil n'inclut pas les nouveaux diagrammes personnalisés, car ils ne font pas parties des stéréotypes dans la définition du standard UML. Toutefois, comme ils sont étendus à partir des diagrammes UML, l'environnement de modélisation de PTC Integrity modeler a permis leur implémentation, comme présenté ci-dessous.

B. Exigences

Afin de spécifier les exigences EM, soit pour les niveaux de CEM des composants, soit pour les spécifications normatives, les architectes Système doivent pouvoir définir divers niveaux de valeurs, paramètres physiques ou conditions environnementales qui seront utilisés dans les environnements 3D et de simulation. EMILE intègre ensuite un stéréotype d'exigence nommé *Exigence quantifiée*, qui permet de définir des exigences numériques en ajoutant certains attributs et leurs valeurs associées. Cette exigence quantifiée peut être placée à la fois dans un diagramme d'exigences pour affiner certaines exigences textuelles et dans un diagramme paramétrique physique (PPD) lorsqu'un paramètre de contrainte doit la satisfaire.

C. Informations géométriques

Tous les stéréotypes et diagrammes personnalisés déjà définis dans l'extension GERTRUDE ont été conservés dans EMILE.

Le stéréotype *Composant* a été défini à partir du bloc SysML, tout en intégrant les différents éléments géométriques et physiques définis précédemment et leurs contraintes correspondantes.

L'*AssemblyDiagram* (étendu à partir du diagramme de classes (CLD)) présente une construction hiérarchique de l'ensemble géométrique des éléments 3D du système (avec des liens de composition) tout en décrivant leur forme et leurs dimensions.

Le diagramme *STRD AssemblyParam* est étendu à partir d'un diagramme paramétrique (lui-même étendu à partir du diagramme STRucture composite). Ce diagramme doit être associé à un composant et permet de spécifier des relations mathématiques entre les paramètres de tous les composants. Il est dédié aux relations géométriques (notamment via les contraintes SAT^T) entre les paramètres des composants et leurs SAT^T (stéréotypes de blocs), le MRGE et le RGE. En effet, étant donné que les MRGE et RGE ne sont pas des stéréotypes de bloc mais simplement des classes, ils ne peuvent donc pas être intégrés dans un diagramme paramétrique SysML classique et nécessitent donc l'utilisation de *STRD AssemblyParam*.

D. Modélisation EM

Pour décrire le comportement EM dans EMILE, trois diagrammes personnalisés ont été développés.

Le premier diagramme est étendu à partir du diagramme de classes (CLD) et porte le nom de BDD Physique (*Physics_BDD*), car il est équivalent à un diagramme de définition de bloc pour la physique. Il permet de définir des vues physiques spécifiques des composants en interaction au sein de l'architecture du système, puisqu'un même composant (composé d'un seul matériau) peut avoir différents comportements physiques (EM, thermique, vibratoire). Par ailleurs, ce diagramme définit les mediums interactifs et de couplage liés aux couplages EM qui se produisent entre les composants considérés.

En fonction de la physique abordée (EM, thermique, dynamique...), différents types de mediums interactifs pour un même composant peuvent être modélisés. Par conséquent, le type de média interactif d'un composant est défini en spécifiant la physique concernée en tant que rôle d'une relation de généralisation / héritage.

Pour la modélisation des interactions physiques EM entre les composants, un diagramme étendu, basé sur un diagramme de structure composite, appelé *Physics IBD*, permet de représenter les couplages EM identifiés entre les composants. Il détaille les différents flux physiques entre les composants, leur medium interactif EM et leur moyen de couplage associé. Ces flux sont connectés via des ports stéréotypés spécifiés en fonction de la nature des flux de propagation : port RI pour une interaction rayonnante, port CI pour une interaction conduite (non traitée dans ces travaux) et port EI pour une «simple» interaction électrique. Il est essentiel de noter que ces ports RI et CI peuvent intégrer des informations géométriques si nécessaire : notamment pour traiter le couplage radiatif entre deux antennes, ces ports correspondront alors aux faces en interaction définies précédemment.

Le dernier diagramme développé est le *diagramme paramétrique physique (PPD)*, étendu à partir du diagramme paramétrique, il permet de décrire les équations mathématiques physiques (notamment celles du medium de couplage) et leurs liens avec les paramètres physiques du medium interactif

des composants impliqués. Un stéréotype *d'équation EM* a été défini afin de différencier les différentes physiques pouvant être utilisées dans un PPD.

Les diagrammes personnalisés précédemment définis dans EMILE permettront de supporter la modélisation et la simulation EM dans l'environnement de simulation.

E. Simulation

Le stéréotype «*Physic*» a été proposé pour identifier les informations liées à la configuration de la simulation (à savoir, sollicitations physiques et comportement d'émission / réception). Ces informations permettront de garantir la cohérence et la traçabilité des résultats des simulations, depuis l'environnement de simulation par rapport à la configuration de simulation spécifiée dans la modélisation du système.

F. IHM

La Figure 32 illustre une capture d'écran de l'extension EMILE SysML développée dans l'outil PTC Integrity Modeler. Ce profil a été défini dans un package pour aider les utilisateurs à faire simplement glisser les éléments d'EMILE dans le diagramme souhaité. Ce package contient à la fois le package physique permettant de définir toutes les données EM physiques requises et le package géométrique pour l'enrichissement géométrique 3D de composants (pris en charge par le profil GERTRUDE).

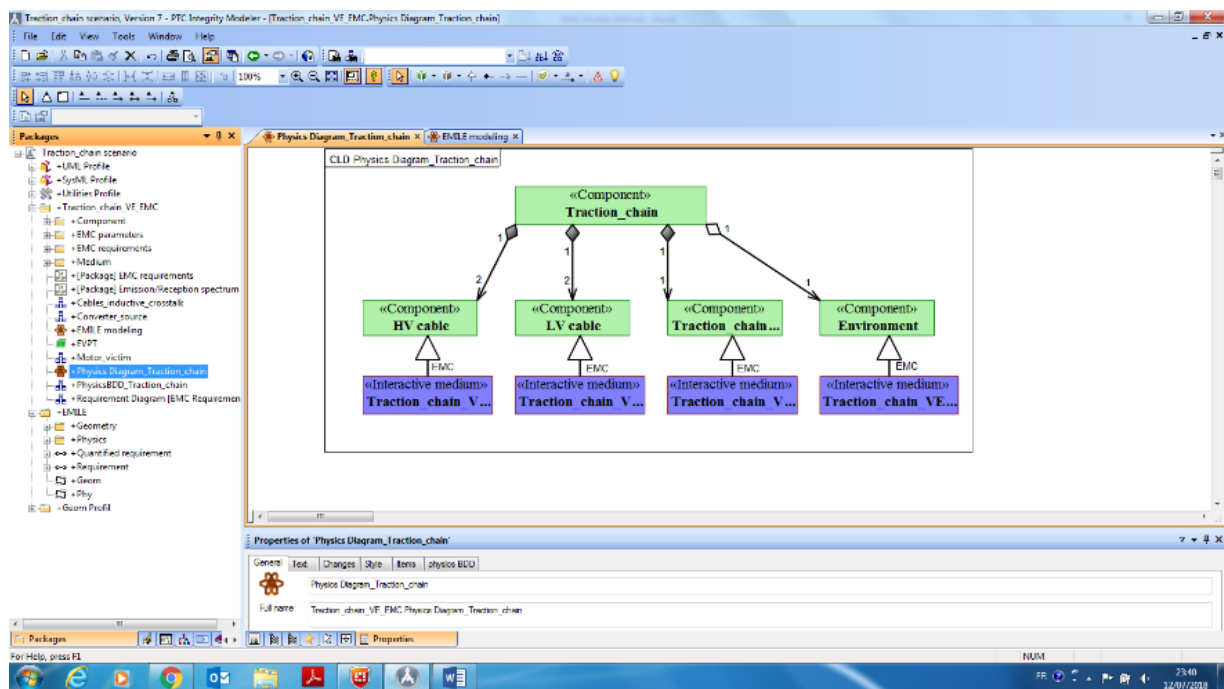


Figure 32 : Vue de l'implémentation EMILE dans l'environnement de l'outil PTC

Le développement de l'interface homme machine (IHM) d'EMILE est un enrichissement indispensable car il permet aux architectes Système de spécifier certaines exigences physiques et géométriques (Figure 33) et de définir le couplage EM qui sera nécessaire pour l'évaluation des IEM du système.

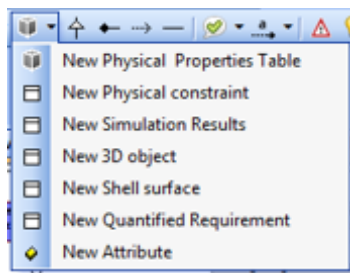


Figure 33 : Développement de nouveaux boutons basés sur des scripts pour le diagramme BDD physique

Tout d'abord, l'IHM développée comprend des menus de réglage (Set) permettant de compléter facilement une architecture physique existante avec des artefacts de certaines bibliothèques développées (Figure 34 et Figure 35). Par exemple, cela permet d'ajouter une nouvelle géométrie de composant ou un nouveau comportement physique à un composant en définissant simplement ses paramètres géométriques et physiques intrinsèques (par exemple le rayon et la longueur d'un cylindre fini).

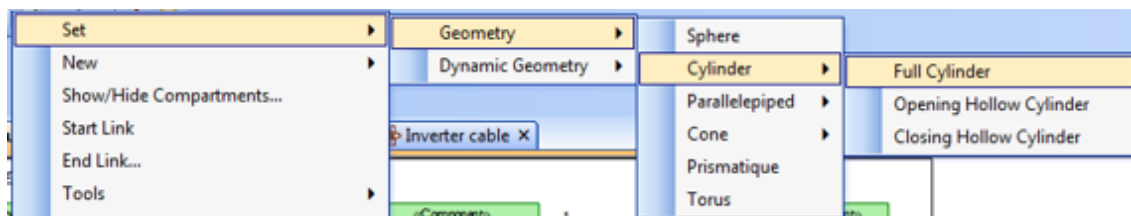


Figure 34 : Développement de nouveaux menus de configuration (IHM) pour définir une géométrie prédéfinie sur un composant



Figure 35 : Développement de nouveaux menus de configuration (IHM) pour définir une géométrie prédéfinie sur un medium interactif

La configuration d'un medium prendra en charge la transformation de modèle entre EMILE et l'environnement Modelica Simulation, car les modèles de comportement de couplage dépendent du type de medium (interactif ou couplage) (Figure 35).

De plus, l'IHM développée prend en charge à la fois la définition des exigences géométriques et physiques et le couplage EM considéré. En effet, elle permet simplement de créer des composants physiques à partir d'un nouveau menu «Physique» et de sélectionner l'élément stéréotypé nécessaire (Figure 36), que ce soit pour les besoins ou la modélisation du couplage EM.

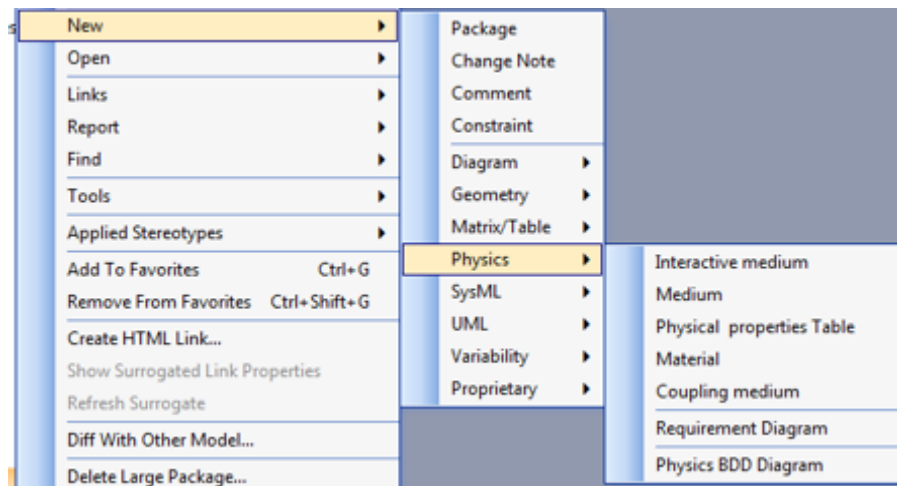


Figure 36 : Développement du menu Physique (IHM)

En parallèle, le concepteur peut également utiliser ou développer une bibliothèque d'objets géométriques et physiques prédéfinis dans le profil EMILE, en créant dans l'outil d'intégrité PTC des boutons (associés aux scripts correspondants) dans les sous-menus de la barre d'outils de chaque diagramme personnalisé défini à partir d'un objet schéma standard. Ces diagrammes personnalisés sont en général des diagrammes de classe UML ou des diagrammes de structure composite dans lesquels les utilisateurs peuvent ajouter des éléments physiques et géométriques (composants, medium, ports, etc.). Les boutons correspondants de la barre d'outils développée sont présentés à la Figure 37, la capture à gauche concerne la nouvelle barre d'outils du diagramme BDD Physique proposant les blocs : *Nouveau composant*, *Nouvelle physique*, *Nouveau medium interactif* ou *Nouveau medium de couplage* ; la capture de droite concerne la barre d'outils du diagramme IBD physique avec les fonctions : *Nouveau port EM conduit (CI)/rayonné (RI)/Electrique (EI)*, *Nouvelles contraintes physiques*, *Nouvelle équation EM*, à associer à un medium considéré.

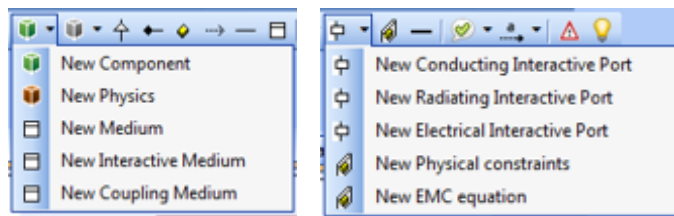


Figure 37 : Développement de nouveaux boutons basés sur des scripts (IHM) pour les diagrammes BDD physique et IBD physique

III. Cas d'étude : chaîne de traction d'un véhicule électrique (EVPT)

Ce profil SysML est illustré sur une étude de cas d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique (EVPT en anglais : Electric Vehicle Power Train) d'un Renault TWIZY 80 (Figure 38). Cet exemple nous permet de spécifier les composants 3D de l'EVPT sous contraintes EM. La validation complète de l'approche SAMOS dans le sketcher 3D multi-physique et notamment par des résultats de simulation sera développée dans les chapitres suivants.

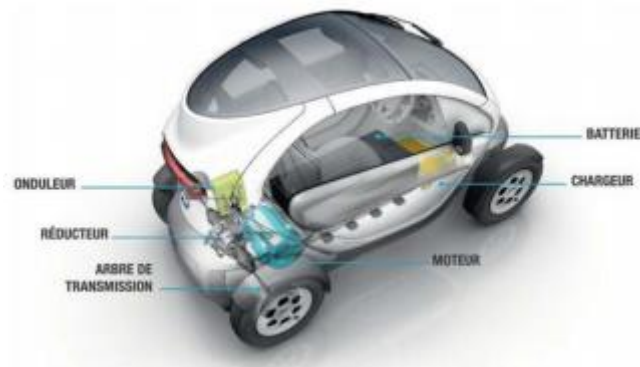


Figure 38 : Chaîne de traction du véhicule électrique Renault TWIZY 80 (Caillard, 2015)

Les systèmes de traction électrique jouent un rôle important dans le processus de développement des architectures automobiles. En effet, l'électrification permet une utilisation flexible des différentes sources d'énergie et crée ainsi une plus grande indépendance vis-à-vis des énergies fossiles (Chand et al., 2012). Cependant, ces chaînes de traction électriques restent un défi majeur pour les fabricants. En effet, le groupe motopropulseur électrique peut être exposé à des interférences électromagnétiques provenant de l'extérieur (environnement), mais il peut également être une source de perturbation et générer ainsi des interférences dans les composants et les câbles de communication à proximité. Ces perturbations critiques peuvent représenter un risque élevé non seulement pour le système de traction mais aussi pour les passagers (Guo et al., 2013a). Aussi, du point de vue de la CEM, l'intégration des EVPT dans les véhicules d'aujourd'hui représente un défi important.

Pour illustrer notre approche, l'architecture des composants E/E du scénario de la chaîne de traction du véhicule électrique (EVPT) Renault TWIZY 80 a été schématisée sur la Figure 39. Un système de propulsion électrique est composé d'un convertisseur de puissance, de batteries (batterie HT et batterie BT), d'un moteur électrique et de lignes de connexion électriques. Généralement, le convertisseur de puissance est connu pour être la principale source d'IEM, mais les autres composants de l'EVPT peuvent aussi être source de bruit ou faire partie du chemin de couplage dans le système EVPT.

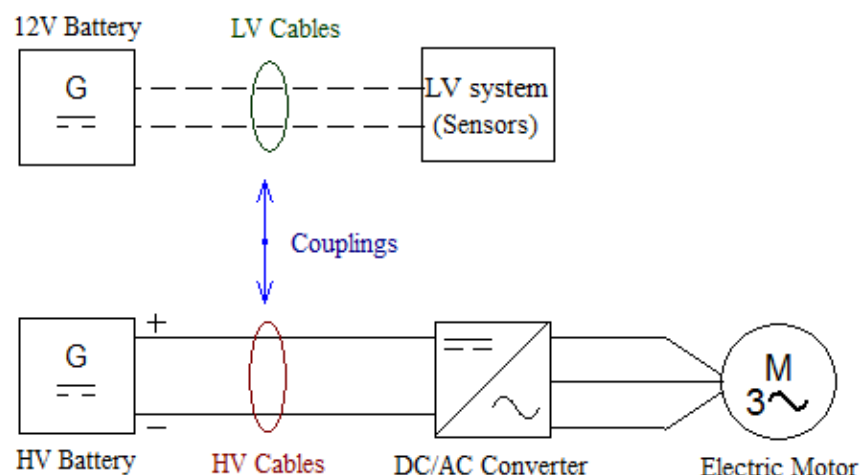


Figure 39 : Schéma de l'architecture des composants E/E de l'EVPT.

Voyons ci-dessous la spécificité de chacun de ces éléments et notamment leur criticité vis-à-vis des IEM, qui nous a amené à le choisir comme cas d'étude pour nos travaux.

A. Batterie Haute Tension (HT)

Dans l'EVPT, on peut distinguer deux types de batteries : une batterie haute tension (HT) qui alimente les systèmes HT (par exemple, le convertisseur de puissance) et une batterie auxiliaire 12V qui alimente les systèmes basse tension (BT) (par exemple les capteurs ou le réseau de bord).

La batterie HT, qui alimente le convertisseur de puissance, est l'un des principaux chemins de propagation des IEM. En effet, des émissions d'IEM peuvent résulter du cheminement du courant à travers la structure de la batterie (Figure 40). Par ailleurs, les IEM générées dépendent de la forme des batteries (cylindrique ou prismatique), l'agencement des éléments constituant la batterie et les propriétés du matériau utilisé (Guttowski et al., 2003). L'impédance de la batterie, qui varie en fonction des processus dynamiques du stockage d'énergie, quant à elle, peut également affecter fortement les interférences EM du système d'entraînement du véhicule (Guo et al., 2013b).

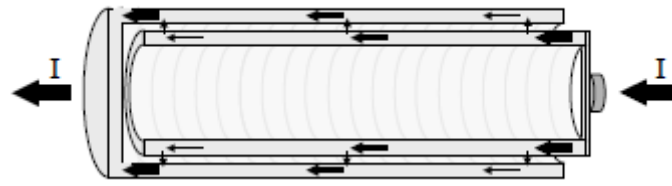


Figure 40 : Cheminement du courant électrique dans la batterie de puissance (Guttowski et al., 2003)

B. Convertisseur de puissance (Onduleur DC/AC)

Le convertisseur de puissance transforme la tension continue en tension alternative triphasée pour alimenter le moteur électrique. Il contient généralement des dispositifs de commutation à grande vitesse (par exemple des transistors bipolaires à grille isolée (IGBT)) qui sont connus pour être les principales sources d'interférences électromagnétiques dans les EVPT. En effet, le changement brutal d'état (ouvert et fermé) des semi-conducteurs (utilisés en commutation) provoque de brusques variations de tension $\frac{dv}{dt}$ et de courant $\frac{di}{dt}$. Ces variations sont susceptibles de générer dans le circuit HT des perturbations électromagnétiques (Jeschke et al., 2017), qui sont véhiculées sous forme de bruits conduits et de bruits rayonnés. D'ailleurs, ces champs électromagnétiques, rayonnés par les câbles de puissance, génèrent des perturbations de Mode Différentiel (MD) (dus aux courants sur les lignes de transmission) et des perturbations de Mode Commun (MC) (dus à la tension à la terre) (Costa et al., 2005b; Lardellier, 1996; Marlier, 2013; Melit, 2008). Dans ses travaux, Costa a identifié les différents chemins de propagation des courants de mode commun pour un système « convertisseur HT - câble - moteur » qui est illustré dans la Figure 41.

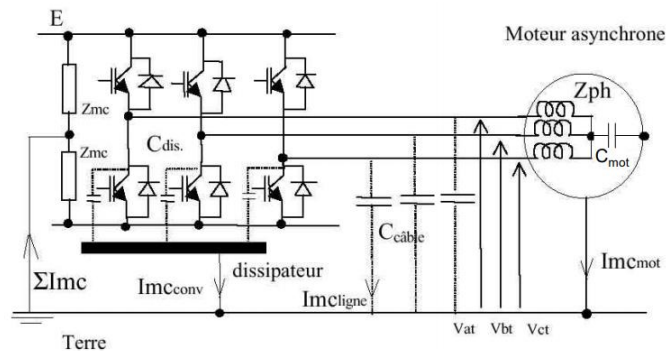


Figure 41 : Propagation des courants de mode commun au niveau de l'ensemble « convertisseur - câble - moteur » (Costa et al., 2005b)

A partir de ce schéma, on peut distinguer trois chemins de propagation :

- un couplage capacitif entre les semi-conducteurs et le dissipateur (relié à la terre par C_{dis}) ;
- un couplage capacitif au niveau des câbles de puissance entre les phases et le blindage (relié à la terre par $C_{câble}$) ;
- un couplage capacitif entre le moteur électrique et la carcasse (relié à la terre par C_{mot}).

D'autre part, les IEM à haute fréquence liées au convertisseur peuvent pénétrer dans le système de la batterie par exemple et affecter de manière significative les performances de ses éléments, comme elles peuvent également se propager aux différentes parties du véhicule électrique soit par conduction (via les lignes de transmission qui se couplent à travers des capacités parasites) ou par rayonnement. Ainsi, l'électronique de puissance génère un niveau élevé d'IEM qui doit être correctement estimé, afin d'éviter toute perturbation du système complet (Doorgah, 2012; Foissac et al., 2009).

C. Convertisseur DC/DC

Un convertisseur DC/DC convertit la tension continue (de la batterie HT) en une tension continue nécessaire pour les systèmes BT (12V). Or, le convertisseur DC/DC peut également être une source d'IEM. D'ailleurs, comme le convertisseur DC/AC, la commutation d'un convertisseur DC/DC peut engendrer des variations de tension et de courants provoquant ainsi des perturbations EM dans le circuit BT (Bhargava et al., 2011).

D. Moteur électrique

Les moteurs électriques à courant alternatif peuvent être également considérés comme source d'IEM. Aussi, il est important de déterminer l'impédance du moteur électrique en tant que partie du trajet du bruit et comment cette impédance varie en fonction de la fréquence (Guttowski et al., 2003). D'ailleurs, plusieurs travaux de recherche montrent que l'impédance d'un moteur électrique à courant alternatif a une influence significative sur le niveau des perturbations conduites (Moreau et al., 2008; Revol et al., 2010). En parallèle, la forte variation de tension (dV/dt) et de courant (di/dt) générées par les onduleurs intégrés à l'EVPT, peut provoquer des interférences EM de mode commun aux bornes du moteur, très nuisibles (Lai et al., 2004). Ces IEM peuvent alors également se propager, à travers des câbles d'interconnexions, et former des couplages EM (par conduction et/ou par rayonnement) endommageant ainsi aussi le module E/E de commande du moteur.

E. Câbles d'interconnexion électriques

Les câbles HT, qui relient le convertisseur de puissance au moteur électrique et à l'alimentation électrique, jouent un rôle déterminant dans l'émission du bruit du système EVPT. Habituellement, la connexion entre le convertisseur et le moteur est très courte pour obtenir de meilleurs résultats en termes de volume et de CEM. Or dans la plupart des concepts de véhicules électriques (VE), la position requise de la batterie HT, de l'électronique de puissance et de la machine électrique impose de longs faisceaux de câbles, qui peuvent être des sources d'interférences électromagnétiques (Reuter et al., 2013b) et provoquer ainsi des dysfonctionnements de composants (Willmann et al., 2015).

Enfin, comme les câbles reliant les composants E/E (c'est-à-dire les câbles HT et BT) sont positionnés à proximité l'un de l'autre, ils donnent lieu à des comportements de couplage variés (Chand et al., 2012), qui nécessite d'être évalués afin de prédire le risque CEM de l'architecture considérée (Konate et al., 2010).

F. Description des composants de la Twizy 80

En se référant aux références de la littérature et des sites documentaires web, nous avons défini des valeurs proches de la réalité pour les différents composants du système de la chaîne de traction du véhicule électrique TWIZY 80. Ces informations sont synthétisées dans le Tableau 4 et détaillent les données géométriques et électriques qui seront utilisées pour la modélisation avec EMILE.

Tableau 4 : Données approximatives sur les composants de l'EVPT de la Renault TWIZY 80.

Composants du véhicule électrique Renault TWIZY 80	Moteur	Réducteur	Onduleur DC/AC	Convertisseur DC/DC	Batterie HT	Batterie BT
Type	Moteur asynchrone type AMV 7118, 20V, 12 KW fabriqué de chez ISKRA (Moteur, 2014) Moteur asynchrone type AMV 7118, 20V, 12 KW fabriqué de chez ISKRA (Moteur, 2014)	Réducteur à 2 étages de type Comex s.p.a, avec rapport de réduction unique	Onduleur type MOSFET de type SEVCON GEN 4 size 4, avec une fréquence de découpage de 16 kHz (Onduleur TWIZY, 2015) Onduleur type MOSFET de type SEVCON GEN 4 size 4, avec une fréquence de découpage de 16 kHz (Onduleur TWIZY, 2015)	Hacheur (DC/DC) de type IES Synergy ELIPS 2000 (Convertisseur, 2012) Hacheur (DC/DC) de type IES Synergy ELIPS 2000 (Convertisseur, 2012)	Batterie type Lithium-ion, 220 v; 6.1 KWh de type LG Chem (Batterie, 2018) Batterie type Lithium-ion, 220 v; 6.1 KWh de type LG Chem (Batterie, 2018)	Batterie type AGM 12v power onic (Renault Twizy, 2014) Batterie type AGM 12v power onic (Renault Twizy, 2014)
Dimensions approximatives (mm)	Φ 200 L= 300	Φ 120 L= 340	L= 230 W= 170 H= 80	L= 410 W= 310 H= 70	L= 830 W= 480 H= 230	L= 310 W= 170 H= 215
Masses approximatives max (kg)	50	11.3	2.7	6.6	100	31.5

Les données géométriques des différents câbles (HT et BT), qui lient les équipements dans le système de la chaîne de traction du véhicule électrique, ont été estimées à partir des connaissances des experts interviewés, et sont précisées dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Géométrie estimées des différents câbles du cas d'étude

Câbles électriques	Câble 1 : de la batterie HT à l'onduleur	Câble 2 : de l'onduleur au moteur	Câble 3 : de la batterie HT au convertisseur DC/DC	Câble 4 : Câbles vers la masse
Diamètre approximatif	8 mm	1 cm	4 mm	4 mm
Longueur approximative	2 m	50 cm	3 m	2 m

La présence de signaux parasites dans l'EVPT peut considérablement réduire la fiabilité de tout composant susceptible de subir des perturbations électromagnétiques. Des circuits de surveillance et de protection sont généralement utilisés pour protéger les batteries et les autres composants sensibles à ces signaux indésirables. Ce scénario est alors trop sensible aux interférences EM et nécessite forcément une prédiction de ces perturbations dès les premières phases de conception.

Le cas d'étude de l'EVPT de la Renault TWIZY 80 sera donc utilisé dans les chapitres suivants pour valider la pertinence de l'extension SysML EMILE pour la spécification et la modélisation des couplages EM dans le modèle système géré par l'architecte Système en phase amont.

IV. *Discussions*

A. Entretiens avec des industriels et améliorations apportées

Lorsque les experts en EM ont été interrogés, ils ont confirmé la nécessité de pouvoir spécifier des exigences EM dès les premières étapes de conception, comme étant une étape primordiale pour l'évaluation de l'architecture du concept à développer.

En interrogeant les experts de l'industrie automobile sur l'approche proposée, ils ont souligné les besoins de modularité des produits et de réutilisation des composants. Par ailleurs, comme certaines propriétés des composants sont déjà définies au début de la conception de l'architecture, ils suggèrent que les informations de leurs fiches techniques puissent générer certaines exigences quantifiées, ainsi que les exigences liées à l'environnement du système. Ce besoin est satisfait par le tableau des propriétés physiques pouvant générer des exigences quantifiées (comme présenté dans la Figure 29),

En ce qui concerne l'intérêt de l'approche SAMOS pour les défis spatiaux, elle pourrait être utile pour déterminer les valeurs des attributs de conception des composants. En effet, à chaque nouvelle génération de lanceurs, le secteur spatial intègre un grand nombre de nouvelles technologies de l'information qui nécessitent une nouvelle approche innovante pour concevoir une nouvelle architecture de système. Par conséquent, les nouvelles contraintes EM correspondantes doivent être prises en compte dans l'évaluation CEM de leur nouvelle architecture système. SAMOS peut donc fournir un support adapté pour concevoir et spécifier à leurs sous-traitants les composants à développer et contraintes EM associées. Ces retours d'expérience nous suggèrent d'adapter le modèle de données EMILE en établissant **un lien de "génération" entre les résultats de simulations et les exigences quantifiées "dérivées"** qui en résultent (concernant les spécifications des sous-traitants). Ces suggestions ont été mises à jour dans le modèle de données EMILE avec des flèches pointillées en rouge.

Finalement, les "exigences quantifiées" mentionnées dans EMILE correspondent à la fois aux entrées ou aux sorties attendues de l'évaluation du comportement (par exemple les paramètres de masse, le niveau d'émission EM, etc), qui sera effectuée dans l'environnement de modélisation/simulation de SAMOS. Cette évaluation du comportement peut être effectuée dans une modélisation 0D/1D (par exemple en modelica sous Dymola) ou être basée sur des simulations ou des approches topologiques/mathématiques (par exemple, sur la base de la théorie du modèle KRON), comme expliqué dans le prochain chapitre. Dans cette optique, le diagramme de physique paramétrique (PPD) proposé dans EMILE peut déjà intégrer les équations mathématiques EM. Un processus de transformation des modèles pourra garantir l'échange d'informations de ces équations entre l'environnement SysML et l'environnement de la modélisation comportementale.

Une autre remarque des experts CEM concerne la modélisation du câble, certains ne modélisent pas les câbles physiquement comme étant un "composant en interaction" mais juste comme un

transmetteur de signal passif (de couplage) entre deux dispositifs actifs (comme s'il s'agissait d'un moyen de couplage EM physique volontaire ou involontaire avec des ondes guidées qui peuvent générer du bruit lorsqu'elles sont proches d'autres câbles). Cette remarque suggère une modification du modèle de données EMILE. En effet, l'intégration du comportement EM des composants a été initialement réalisée via un médium (avec un médium interactif qui agit comme une source ou une victime et contient tous les paramètres EM intrinsèques et un médium de couplage considéré comme le chemin physique entre deux médiums interactifs, intégrant les équations comportementales EM). Ainsi, un nouveau type de support appelé "support de transmission" peut être ajouté pour être conforme à la modélisation précédente du câble en tant que transmetteur. Cette modélisation est effectuée en définissant un nouveau type de médium interactif : le **médium de transmission** (il hérite tous les attributs et propriétés du **médium interactif**), sera utilisé pour les câbles qui transmettent des signaux, de la puissance, et sera généralement connecté entre deux **médiums interactifs**. Il intégrera les attributs du câble (comme l'impédance de propagation, la longueur, le blindage, la diaphonie, etc.) et les caractéristiques comportementales (atténuation, pertes, vitesse de propagation, vitesse de groupe) dans les lois de couplage EM impliquées entre les deux dispositifs connectés. Cette manière de modéliser est intéressante dans la perspective où les câbles considérés pourraient être remplacés à l'avenir par des technologies sans fil, et où les modèles pourraient alors être facilement mis à jour, puisque dans ce cas, la modélisation topologique de l'architecture n'aura pas besoin d'être modifiée, seule la loi de comportement de l'émetteur devra être changée.

En ce qui concerne les positions des câbles, ces experts définissent uniquement une "position EM" liée aux positions géométriques pertinentes traitées (par exemple, pour la diaphonie, elles correspondent à la hauteur entre le câble et la structure (châssis) et à la distance entre les deux câbles considérés). De la même manière, cette "position EM" est également nécessaire pour calculer les attributs de la propagation l'impédance, du couplage EM entre les appareils ou les phénomènes de diaphonie. Nous avons donc rajouté dans EMILE cette distance relative au comportement EM définie par la « **géométrie électrique** » et associée à l'interface/port physique EM du médium EM (qui peut être différente de la géométrie de l'objet 3D). Cette **géométrie électrique** est définie par tout ce qui permet de calculer les impédances et les couplages EM associés (couplage par diaphonie par exemple).

Toutes ces remarques ont été traitées et implémentées dans le modèle de données modifié d'EMILE, présenté à la Figure 42.

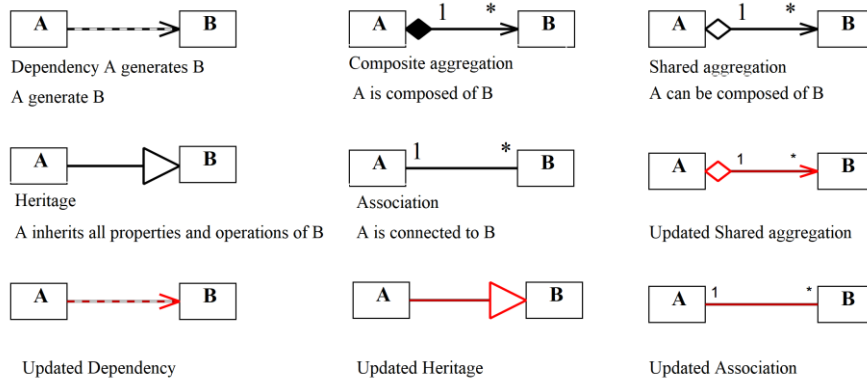
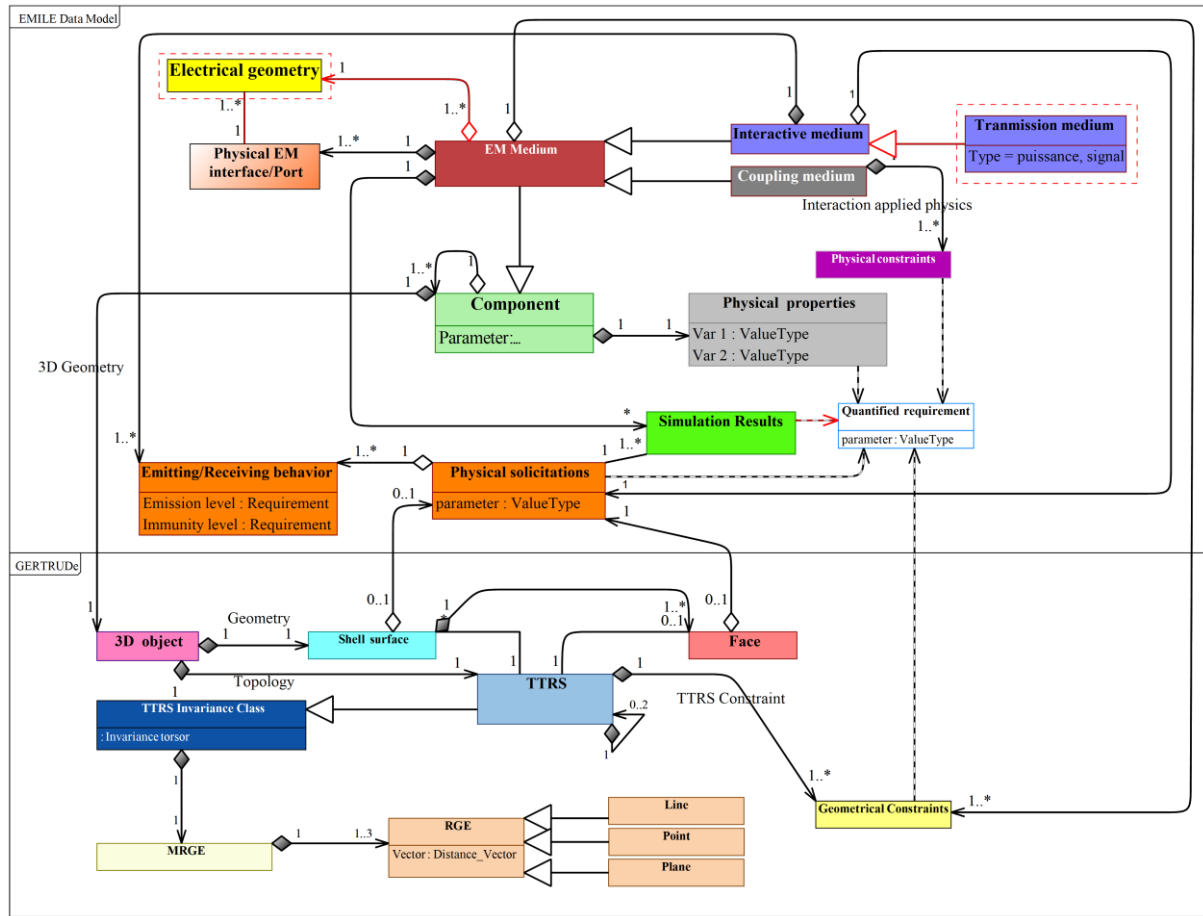


Figure 42 : Mise à jour du modèle de données d'EMILE suite aux retours d'expériences des experts.

Le diagramme **IBD physique** proposé dans EMILE pour la modélisation des flux en interaction est très intéressant pour les experts en CEM, car ces flux physiques (rayonnés ou conduits) et leurs attributs déterminent l'émergence de certains couplages EM, et semblent plus importants que leur localisation dans un environnement 3D contrairement aux architectes 3D. Même si les experts en CEM n'ont pas spécifiquement besoin de visualiser les câbles dans un environnement 3D, cette information reste importante pour leurs collègues architectes 3D qui ont la contrainte supplémentaire d'intégrer physiquement tous les composants.

D'après eux, l'avantage de SAMOS, en tant que cadre de collaboration pour l'évaluation de l'architecture est de permettre aux experts de travailler respectivement dans leur environnement de

modélisation habituel, tout en partageant et en retraçant tous les paramètres de conception communs et le choix d'architecture correspondant de la justification.

Enfin, la génération de spécifications techniques à partir du modèle de système SysML vers d'autres outils de simulation (comme Dymola, Simulink, etc.) est un défi actuel dans la plupart des projets des différents secteurs industriels (Di Natale et al., 2018). En effet, en interrogeant des experts en CEM sur leurs projets récents dans l'industrie automobile et spatiale, ils ont souligné qu'ils aimeraient utiliser des approches d'IS dès les premières étapes de la conception afin de générer automatiquement des modèles physiques dans un environnement de simulation, à partir des exigences EM définies dans l'environnement de modélisation de l'architecte Système, afin d'évaluer rapidement les IEM de leurs alternatives d'architectures.

B. Comparaison avec des travaux connexes

D'après la littérature scientifique, les profils SysML sont habituellement développés pour la transformation des modèles SysML vers des outils de simulation (Di Natale et al., 2018; Kapos et al., 2014; Kim, 2014). Il est possible de déduire de cette étude comparative un certain nombre d'avantages et de limites d'EMILE. Dans les faits, il n'existe aucune étude portant sur le développement de stéréotypes SysML pour la modélisation des exigences EM et leur transfert vers des outils de simulation correspondants, afin d'évaluer le comportement EM d'une architecture en fonction de la position 3D de ses composants, dès la phase de conception (objectif de l'approche SAMOS). En outre, notre approche vise la génération et la traçabilité des données physiques et géométriques dans un processus MBSE continu, ce qui n'est généralement pas le cas avec d'autres profils SysML. De plus, même si certains outils comme Syndeia® d'Intercax⁴, proposent de fédérer des modèles géométriques et physiques, leurs transformations de modèles se limitent aux données, sans gestion des contraintes (géométriques ou multiphysiques par exemple).

La pertinence du profil EMILE proposé dans le cadre de l'approche SAMOS a été mise en évidence par sa simplicité d'utilisation, même avec les modèles SysML existants (pour faciliter la réutilisation des modèles des conceptions précédentes), pour notamment décrire toutes les exigences EM d'un système dès les premières étapes de la conception. En outre, il permet la collaboration entre les architectes de systèmes et les experts en CEM, en proposant la modélisation simple des exigences EM, comprenant les interactions du système avec les acteurs internes (composants en interaction) et externes (environnement), leurs paramètres EM et les équations correspondantes par le biais de diagrammes SysML personnalisés. Cependant, comme l'utilisation de ce profil peut nécessiter pour les architectes Système une connaissance de base sur les IEM, une approche topologique des schémas électriques a été développée (Kharrat et al., 2020; Mouna Kharrat et al., 2018) pour identifier tous les couplages EM possibles et aider les architectes Système à identifier en amont les couplages EM (voir chapitre suivant).

Malgré les avantages précédemment présentés de l'approche SAMOS, la plate-forme logicielle correspondante nécessite beaucoup de travail de développement et de temps pour gérer les règles de transformation des modèles et le développement d'une IHM adaptée aux multiples acteurs de la conception impliqués (architectes Système, experts multidisciplinaires et architectes 3D). Cette tâche de mise en œuvre pour prototyper correctement nos idées scientifiques avec la contrainte de pouvoir être testé par des experts ou industriels est d'autant plus longue que nous n'avons pas l'expertise et la force de travail des développeurs d'outils commerciaux. Toutefois, cette plate-forme

⁴ <http://intercax.com/products/syndeia/>

logicielle est essentielle pour démontrer la pertinence de nos travaux de recherche dans le milieu scientifique et industriel.

Une autre limite actuelle est que ce profil n'a pas encore été testé sur un modèle de système plus complexe pour garantir sa fiabilité face à un très grand nombre de composants. Cela fait partie des perspectives de ce travail, qu'il faudra mener en collaboration avec les experts industriels impliqués.

V. Conclusion

Basé sur une approche MBSE, notre travail se concentre sur l'intégration des contraintes EM lors de la conception pour soutenir l'évaluation des concepts d'architecture 3D. Nous proposons dans ce chapitre une nouvelle extension SysML EMILE pour aider les architectes Système à définir, dans des modèles SysML, les informations EM requises par les experts CEM, comprenant les exigences EM et les couplages EM. Son contenu et sa mise en œuvre ont été détaillés au moyen de nouveaux stéréotypes et de diagrammes personnalisés. Ce profil basé sur l'extension SysML géométrique GERTRUDe peut être utilisé pour générer automatiquement une architecture 3D dans un environnement 3D (FreeCAD) en utilisant une approche de transformation de modèles, afin que les architectes 3D puissent fournir les informations d'architecture 3D choisies aux experts EM pour leur évaluation comportementale des IEM. De plus, EMILE permet de spécifier le comportement des couplages IEM, qui sera évalué dans un environnement de simulation (par exemple en Modelica dans l'outil Dymola, comme présenté dans le prochain chapitre). Nous avons également présenté le cas d'étude sur lequel notre démarche sera illustrée dans les chapitres suivants : le scénario d'une chaîne de traction de véhicule électrique a été choisi pour la criticité de ses composants vis-à-vis des interférences EM. Enfin, nous avons discuté des avantages et des limites d'EMILE par rapport à d'autres travaux de recherche et des améliorations à y apporter à partir des entretiens réalisés avec les partenaires industriels. Les chapitres suivants détailleront la modélisation EM en utilisant quelques méthodes d'évaluation des IEM, puis l'implémentation d'EMILE dans la plateforme SAMOS au travers du cas d'étude EVPT.

Chapitre 4. *Evaluation des risques d'IEM*

Dans le Chapitre 3, nous avons décrit l'extension SysML EMILE, qui permet à l'architecte Système d'intégrer les contraintes EM des experts CEM dans le modèle Système en SysML. Tandis que la spécification des données géométriques associées a permis la génération de l'architecture dans l'environnement 3D, la définition des contraintes EM et la description de la configuration des simulations à mettre en œuvre pour évaluer l'architecture, les experts CEM doivent alors évaluer le risque d'IEM de l'architecture de concept choisie dans leur environnement de calcul/de simulation dédié.

Dans ce chapitre, nous proposons une méthodologie basée sur l'évaluation des risques d'IEM, dans une approche MBSE, dont l'originalité s'appuie sur une évaluation préalable qualitative de ces risques pour cibler l'évaluation quantitative uniquement sur les couplages à risques identifiés et ainsi limiter le nombre et la durée des calculs et simulations apportées par les méthodes d'évaluation numériques existantes. Dans ce chapitre, les travaux portant sur la modélisation topologique se réfèrent aux notations de la théorie des graphes (Annexe 3).

I. *Objectif de l'approche*

Le processus d'évaluation des interférences EM que nous proposons est basé sur la combinaison entre la modélisation électromagnétique et l'approche topologique afin de supporter des évaluations à la fois qualitatives et quantitatives des interférences électromagnétiques (IEM) dans une approche MBSE (Figure 43).

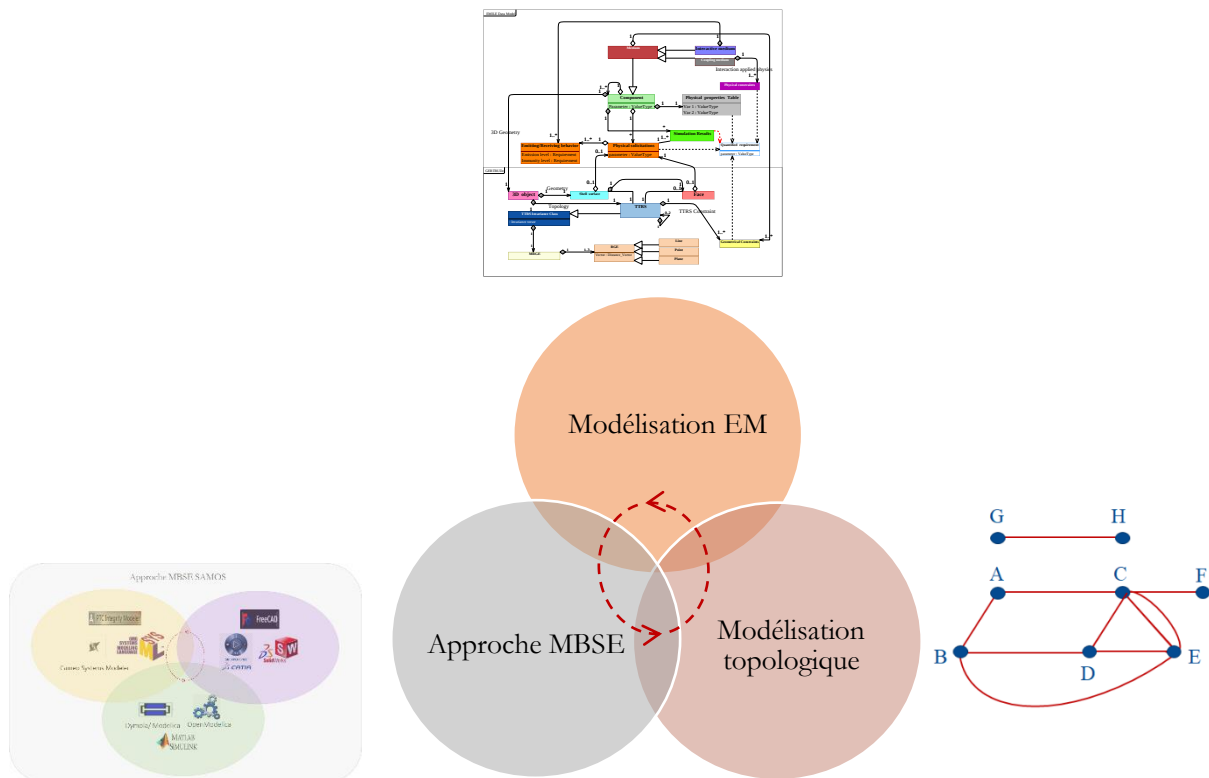


Figure 43 : Processus d'évaluation des IEM dans approche MBSE

Une fois que l'architecture du système a été définie, en spécifiant ses contraintes géométriques et électromagnétiques grâce à EMILE, l'architecture E/E, partie du système exposée aux IEM, est extraite pour être évaluée.

La première étape de notre approche consiste alors à évaluer qualitativement les risques d'IEM, en identifiant toutes les interactions EM potentielles possibles entre les composants, par la modélisation et l'analyse de la structure topologique de l'architecture E/E. Une méthodologie permet alors, suivant le type de couplage étudié, d'identifier automatiquement toutes les victimes et agresseurs associés.

Ensuite, la deuxième étape consiste, pour toutes les IEM identifiées, à évaluer quantitativement ces couplages, afin de pouvoir prédire et calculer le risque de perturbation.

Enfin, une dernière étape consiste à lister les couplages source/victime risqués à retenir (après élimination des couplages à faible risque) pour une éventuelle étude approfondie.

A ce stade, les architectures de concept qui présentent déjà des risques importants d'IEM, peuvent être éliminées au profit d'autres architectures moins risquées.

II. *Evaluation qualitative*

A. *Analyse de l'existant*

1. *Pratiques industrielles*

L'utilisation croissante des systèmes E/E, d'une part, et le manque de flexibilité dans le placement et la sélection des modules électroniques d'autre part, rendent les problèmes de CEM de plus en plus critiques pour les concepteurs de systèmes mécatroniques. Par ailleurs, l'apparition des interférences EM (due soit à l'interaction entre un équipement E/E avec un autre à proximité ou soit à l'interaction entre un équipement E/E et l'environnement qui l'entoure) augmente significativement les risques de perturbations dans les circuits, ce qui peut dégrader leur performance ou même entraîner leur défaillance. D'autre part, lors du processus de conception, la prise en compte des contraintes EM est essentielle. Or, de nombreuses normes CEM sont difficiles à mettre en œuvre en amont, où la connaissance des composants peut encore être imprécise, et les contraintes CEM sont souvent spécifiées plus tard en fonction des spécifications du client. Cependant, ces phénomènes doivent être évalués dès que possible, afin de limiter le risque d'IEM tout en faisant face aux défis technologiques industriels et aux exigences législatives et normes existantes. Par conséquent, une prédiction de ces risques demeure nécessaire afin de réduire les effets indésirables de ces interférences EM. Pour cela, certains industriels utilisent des « règles métiers », leur permettant d'estimer rapidement, dans un premier temps, le risque de perturbations EM, sans utiliser des codes de calcul chronophages.

- *Evaluation approximative*

Des évaluations approximatives peuvent être utilisées par les experts CEM en utilisant la formule du risque R de perturbations électromagnétiques définie par l'équation (7). Cette équation, proposée par O. Maurice (Maurice, 2007b) est considérée comme une formule intéressante puisqu'elle s'applique aux différentes échelles du système.

$$R = \frac{(W.S)}{P_c} \quad (7)$$

W est lié à l'énergie des sources (agresseurs ou environnement) en $[W/m^2]$;

S est la fonction de transfert qui transmet l'énergie des agresseurs aux victimes en $[m^2]$;

P_c est le seuil d'immunité de puissance des composants victimes en $[W]$.

W est déterminé par les caractéristiques électriques (tension, courant, densité du spectre d'émission) issues du circuit électrique. S dépend à la fois de la loi d'interaction qui modélise les IEM identifiées et des informations géométriques des composants. Pc est généralement fixé dans les exigences considérées.

Pour limiter ce risque, une réduction des niveaux d'émission des sources d'interférence demeure nécessaire, soit en isolant les chemins de couplage par des mesures préventives (telles que : le blindage ou l'éloignement entre les deux circuits source et victime), soit en renforçant l'immunité des équipements sensibles (par exemple par filtrage).

- Matrice d'interactions/ de risques

Les interactions entre les composants E/E d'une architecture donnée sont identifiées à partir du choix des composants physiques de l'architecture du système. Ces interactions identifiées peuvent ensuite être converties en une matrice d'interaction (appelée aussi matrice de risque ou matrice composants/composants) avec l'environnement et les composants internes de l'architecture, en les répartissant en lignes (composants/environnement sources) et en colonnes (composants/environnement victimes) comme schématisé dans le Tableau 6. En effet, la matrice d'interactions permet une visualisation synthétique des interactions EM à travers un raffinement à différentes échelles (système global, sous-systèmes, composants), afin d'avoir une vue partagée entre les différents experts CEM et architectes Système. Elle permet également une évaluation visuelle qualitative et rapide à travers d'une part, des composants choisis, et d'autre part, via un affichage coloré des dépendances à risques permettant ainsi de classer le niveau d'impact des interactions à risque (Maurice et al., 2011).

Tableau 6 : Matrice d'interaction/ de risque

Source \ Victime	Env.	Comp 2	Comp <i>i</i>	Comp <i>k</i>	Comp <i>n</i>
Env.				✓	✓
Comp 2			✓		
Comp <i>i</i>	✓			✓	✓
Comp <i>k</i>		✓			
Comp <i>n</i>				✓	

Par exemple, d'après le Tableau 6, on peut tirer les informations suivantes :

- Pour un niveau de système considéré, les interactions des composants sur eux-mêmes ne sont pas considérées et sont colorées en bleu (sur la diagonale) ;
- Les interactions entre les composants de natures différentes peuvent être :
 - o des interactions présentant aucun risque, colorées en vert ;
 - o des interactions à risque faible, colorées en orange : ces interactions nécessitent seulement des vérifications ;
 - o des interactions à risques forts, colorées en rouge : ces interactions peuvent entraîner des dysfonctionnements du système et nécessitent l'intervention obligatoire des experts en CEM pour l'évaluer.

Après avoir identifié les différentes interactions entre les composants E/E, les experts passent ensuite à l'évaluation quantitative de celles présentant un risque fort en se basant sur des modèles et calculs associés (exemple : méthode de Kron).

- Evaluation d'une probabilité

Une autre approche consiste à déterminer à la fois la probabilité de perturber un composant pour un niveau de contrainte donné X (tension, courant) supérieur à un niveau X_0 , et la probabilité que le signal de contrainte dépasse la valeur X_0 (Figure 44). La combinaison de ces deux fonctions utilisant des techniques telles que par exemple les plans d'expériences et liée à certaines hypothèses de distribution de probabilité, permet d'évaluer les niveaux des risques d'IEM et d'exprimer le risque de défaillance de la CEM et la marge correspondante liée à l'objectif de sûreté de fonctionnement (Maurice, 2018b).

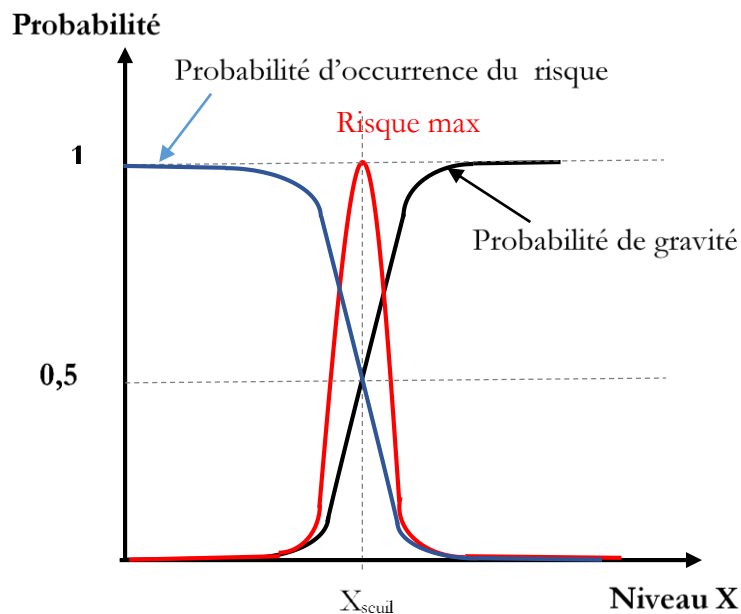


Figure 44 : Loi de probabilité de perturbation d'un composant (victime) en fonction de son niveau de contrainte

2. Travaux scientifiques existants

Notre approche liée à la topologie s'appuie sur les études de R. Plateaux (Plateaux, 2011), M. Miladi Chaabane (Chaabane, 2014) et N. Abdeljabbar Kharrat (Abdeljabbar Kharrat et al., 2018a), qui visent à développer une modélisation optimale unique de tout système mécatronique complexe, en analysant la connectivité des modèles comportementaux dans une approche à plusieurs niveaux et à plusieurs échelles. Plateaux a utilisé la modélisation topologique à la fois pour garantir la cohérence des modèles et la continuité des données pendant la phase de conception mécatronique (Penas et al., 2009; Plateaux et al., 2009) et pour formaliser la modélisation multiphysique des systèmes mécatroniques, tout en conservant le lien entre les exigences fonctionnelles et les architectures réalisables (Plateaux, 2011). Dans ses travaux de recherche, Miladi a développé une approche topologique pour la modélisation des systèmes mécatroniques, avec une représentation unifiée utilisant le langage MGS. Cette approche permet de modéliser un système dynamique et de spécifier les lois de comportement locales de chaque composant du système en dissociant sa topologie de sa physique (Chaabane, 2014). Cependant, cette approche topologique doit être évaluée sur un système plus complexe qui intègre à la fois la topologie et les contraintes multiphysiques au sein d'un même modèle. C'est pourquoi, Abdeljabbar a développé une nouvelle

méthodologie topologique pour la modélisation de systèmes multiphysiques, qui a été appliquée à des modèles dynamiques à topologie variable. L'intégration de la modification topologique a été appliquée à un pogo-stick (Abdeljabbar Kharrat et al., 2018a) et validée avec la modélisation de systèmes multiphysiques, en étudiant le cas de structures piézoélectriques (piézoélectrique à pile et à réseau) (Abdeljabbar Kharrat et al., 2018b).

En parallèle, de nombreuses approches de modélisation EM basée sur la topologie (Besnier, 2006; Kirawanich et al., 2005; Parmantier, 2004; Parmantier and Junqua, 2007) ont été proposées depuis des décennies autour du concept de « topologie électromagnétique » EMT (ElectroMagnetic Topology). Ce concept fournit une méthodologie utile pour l'analyse des interactions EM complexes (Baum, 1986, 1974; Tesche, 1978), en prédisant les interférences générées par des champs électromagnétiques externes. En pratique, elle comprend deux étapes :

- La première consiste en une description géométrique du problème en utilisant les concepts de "volumes" et de "surfaces", afin d'établir un « diagramme topologique » du problème. Cette décomposition de l'espace en régions favorise le cheminement de l'énergie parasite et l'analyse de l'interaction des champs EM avec le système complexe par décomposition en volumes ou en surfaces, permettant ainsi d'établir un « graphe d'interactions ». Chaque volume comprend différents niveaux de blindage et les interactions entre ces volumes sont possibles via des câbles, des parois, des cavités ou des ouvertures. Après avoir divisé, à travers un diagramme topologique, des zones appelées « volumes propres » qui sont délimitées par des « surfaces propres » (Messier, 1986), la structure de graphe topologique peut être décrite comme un « graphe basé sur les volumes » ou un « graphe basé sur les surfaces ». Le concept initial est celui de "volume". En effet, un volume peut être défini comme une région de l'espace dans laquelle les champs et les courants sont créés par la ou les mêmes sources d'interférence. Typiquement, une "source" est toute quantité de champ électromagnétique ou de type générateur de tension ou de courant susceptible de se coupler avec un système. La décomposition du système en volumes permet de définir la notion des sous-volumes. Ces sous-volumes sont soumis à la même source initiale que le volume extérieur mais avec un effet généralement atténué.
- La deuxième partie consiste en une description électromagnétique de l'interférence par la représentation graphique des interactions entre les volumes. Ce graphe d'interaction implique des sommets qui sont reliés par des arêtes afin de modéliser le chemin de l'interférence électromagnétique. Ce chemin correspond à un réseau dont la géométrie est imposée par le graphe d'interaction.

En effet, dans un graphe d'interaction basé sur les volumes :

- o les sommets de volume correspondent à des points de l'espace qui représentent généralement les équipements électriques, les parois, etc. ;
- o les sommets de surface sont des sommets de l'espace situés sur des surfaces topologiques qui permettent d'afficher certaines lignes de pénétration (signaux entre deux surfaces de nature différente).

Tandis que dans un graphe d'interaction basé sur les surfaces :

- o les sommets de surface correspondent à des points de l'espace à analyser ;
- o les liaisons entre les sommets de surface permettent d'afficher deux types de lignes (de pénétration ou de connexion) sur des surfaces topologiques.

Bien que cette méthode offre des modélisations intéressantes, elle présente néanmoins des limites notamment au niveau de l'évaluation quantitative pour la modélisation de grands systèmes (Parmantier et al., 1990) et à notre connaissance, elle ne permet pas de détecter les sources potentielles. Par exemple, Genender et al. proposent de déterminer le risque réaliste de différents environnements électromagnétiques, en se basant sur la combinaison de la "topologie EM" descriptive, des modèles statistiques et de l'analyse des arbres de défaillance (Genender et al., 2014). La "topologie EM" était bien adaptée aux systèmes hautement blindés avec des limites EM évidentes, mais ce type de topologie qualitative ne peut pas traiter l'étude EM des systèmes "ouverts", car elle développe des équations matricielles sans aucune géométrie différentielle contrairement à l'approche tensorielle. Dans ce contexte, Maurice a développé une technique mathématique basée sur l'analyse topologique tensorielle de réseau développée par G. Kron afin de calculer toutes les interactions EM rencontrées sur de grands systèmes (Maurice, 2018b, 2016a) comme détaillée dans la section (III.B.7).

B. Notre approche : modélisation et analyse topologique

1. Concepts et approche générale

Comme les IEM dépendent fortement des caractéristiques électriques des composants E/E, nous avons choisi de représenter les systèmes physiques étudiés par leur architecture E/E contenant les éléments électriquement actifs (composants ou impédances équivalentes de circuits, incluant toutes les sources et victimes potentielles).

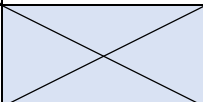
Le concept de notre méthodologie commence en première étape par l'identification de la structure physique et, de manière exhaustive, de tous les couplages possibles entre les composants (câbles, équipements et antennes) au travers d'une modélisation topologique : les sommets seront typés par les paramètres quantifiés de la CEM (tension U , courant I , fréquence F , etc.) et les liaisons entre ces différents composants par leurs paramètres géométriques (par exemple, dimensions, position) définis pour l'architecture 3D à évaluer.

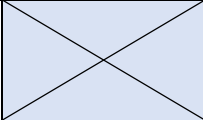
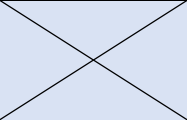
a) Définition du diagramme physique de l'architecture E/E

Comme les couplages EM portent uniquement sur les composants, des systèmes mécatroniques, de nature E/E, l'évaluation des risques d'IEM d'une architecture de concept peut donc se limiter à l'étude des interactions contenue dans l'architecture E/E du système.

Aussi, une représentation d'une architecture E/E physique générique est proposée sur la Figure 45 sous la forme d'un diagramme physique de l'architecture E/E, en utilisant la dénomination et la représentation du Tableau 8. Elle est composée d'un ensemble d'équipements, d'antennes et des câbles de liaison électriques, pouvant présenter l'ensemble des IEM précédemment décrites au § III.3 du Chapitre 1 (synthétisées dans le Tableau 7 par nature de composants). Cette représentation, appelée modélisation physique, peut être réalisée à partir d'un schéma électrique, électronique CEM, ou d'un schéma des connexions physiques des câbles.

Tableau 7 : IEM classées suivant la nature des composants source-victime

Victime Source	Equipement	Câble	Antenne	Boucle de courant
	Equipement 	Couplage capacitif Rayonnement champ proche	Rayonnement en champ lointain	Couplage inductif Rayonnement champ proche

Câble		• Couplage par conduction • Couplage par diaphonie capacitive		Couplage par diaphonie inductive
Antenne	Rayonnement en champ lointain	Rayonnement en champ lointain	Rayonnement en champ lointain	Rayonnement en champ lointain

Hypothèses :

- L'interaction EM d'un équipement sur un équipement sera modélisée comme une IEM Antenne/Antenne.
- L'agression d'un câble sur un équipement ou antenne (rayonnement en champ proche) sera négligée, car elle est très peu courante et généralement avec une faible amplitude et nous avons donc décidé que son étude n'était pas pertinente pour l'étude de concepts en phase amont.

Tableau 8 : Modélisation de la structure physique

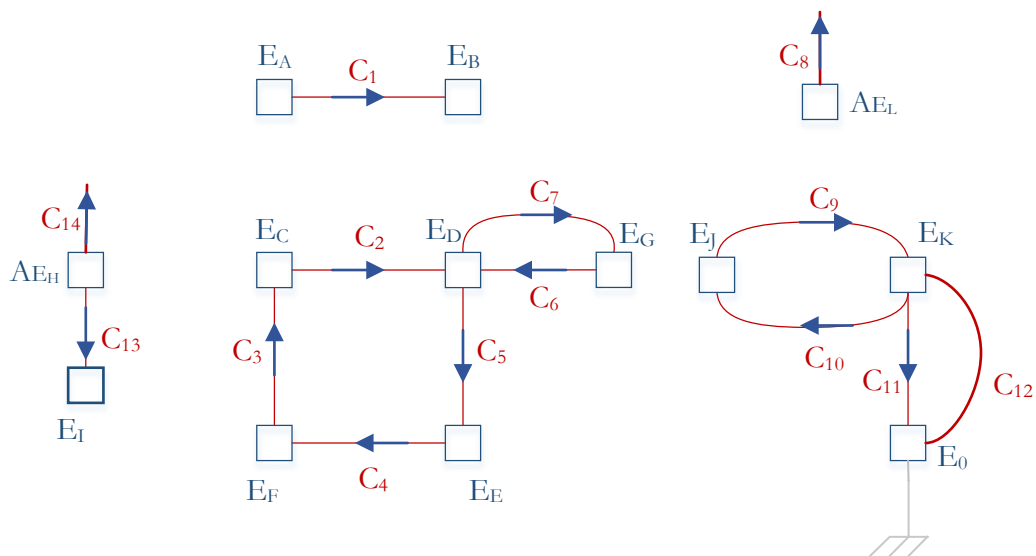
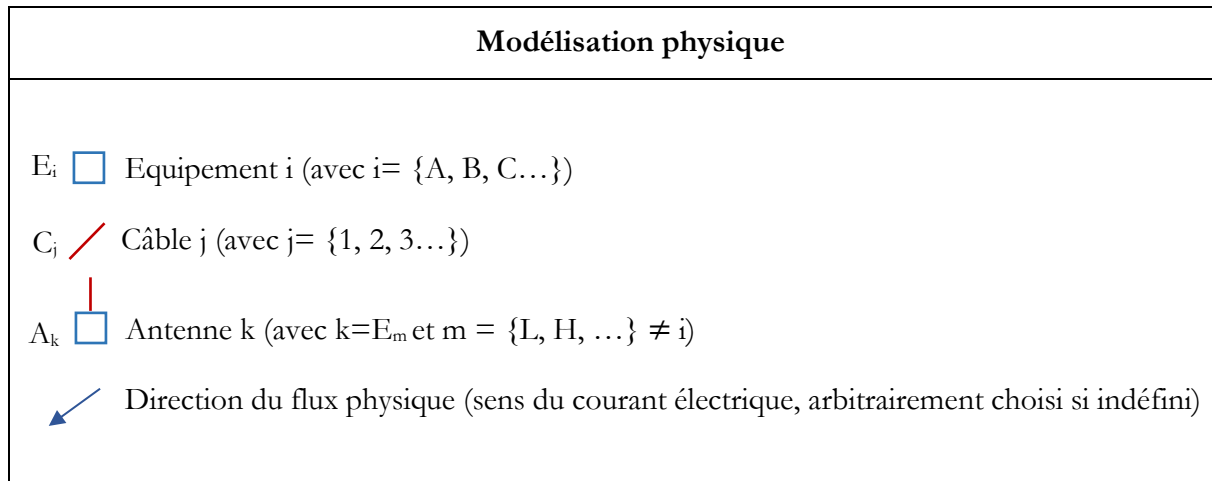


Figure 45 : Diagramme physique d'une architecture E/E générique

Remarquons que dans ce diagramme nous n'avons pas distingué les points de raccordement des câbles sur les équipements, puisque dans cette section, il s'agit de décrire l'analyse topologique mettant en évidence les IEM pour une évaluation qualitative. Nous verrons dans le Chapitre 5, que nos explorations de prototypage de différents scénarios d'implémentation nous ont amené à décliner une variante de cette approche en considérant un diagramme physique prenant en compte les connexions physiques (géométriques) des câbles sur les équipements, afin de permettre une résolution intégrée de l'évaluation qualitative et quantitative au sein d'un même environnement (Matlab).

b) Modélisation topologique de l'architecture physique

Les différents composants (équipements, câbles et antennes) sont alors modélisés topologiquement par des sommets et des arêtes (Figure 46), comme décrit dans le Tableau 9. L'antenne est modélisée comme un équipement avec un câble court (non raccordé) (Cecconi, 2011). Pour pouvoir distinguer les modes commun et différentiel, la masse est représentée comme un sommet particulier (dénommé arbitrairement « E0 »).

Tableau 9 : Modélisation topologique

Modélisation topologique		
Composant	Elément topologique	Représentation
Équipement actif ou raccordement physique à un équipement E_i	Sommet	 i
Câble de liaison C_j	Arête	 j
Masse 	Sommet	 E_0
Antenne A_k avec $k=E_m$	Sommet + arête	 $m \neq i$ m
Direction du flux physique (sens du courant électrique, arbitrairement choisi si indéfini)	Flèche	

Le graphe topologique de l'architecture physique générique est alors donné sur la Figure 46.

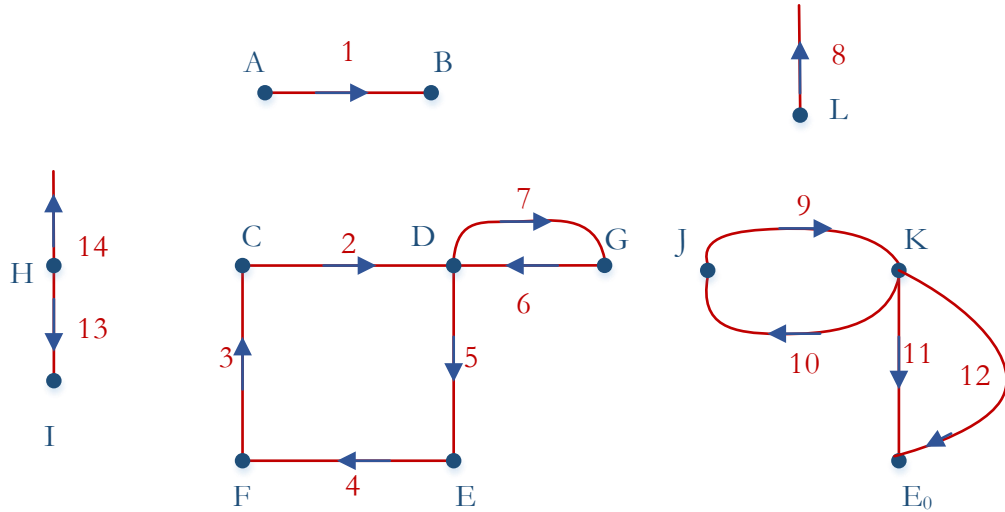


Figure 46 : Graphe topologique d'une architecture E/E générique

Nous définissons les connectivités du diagramme au travers de sa matrice d'incidence transposée δ^{0t} associée (Figure 47) :

$$\delta^{0t} = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C & D & E & F & G & H & I & J & K & L & E_0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Figure 47 : Matrice d'incidence transposée A/S de l'architecture générique : δ^{0t}

c) Analyse topologique

Pour chaque couple de couplage (composant/composant ou composant/boucle), conformément au Tableau 1 du Chapitre 1, nous avons présenté l'analyse topologique qui permet d'identifier toutes les IEM possibles avec leurs couples source/ victime associés.

Nous avons récapitulé ces informations dans un tableau de synthèse (Tableau 10). Ce tableau reprend :

- les numéros des couplages représentés sur Figure 18 du Chapitre 1,
- le nom et le type des couplages,

- les informations issues de l'architecture physique concernant la nature des sources/victimes, ainsi que les conditions physiques issues de la source requises pour l'émergence du couplage ainsi que l'impact du phénomène sur la victime,
- la description de l'analyse topologique (modélisation de la source/victime et identification des agresseurs et victimes),
- et enfin les paramètres physiques (issus des exigences/modélisation EM) et géométriques (issus des exigences/modélisation 3D) permettant d'établir la pertinence des couplages identifiés qualitativement par l'approche topologique.

Tableau 10 : Tableau de synthèse des IEM, incluant l'analyse topologique et la définition des contraintes physiques et géométriques nécessaires à l'évaluation quantitative.

1/12	Diaphonie inductive		Câble	di/dt générant un champ magnétique variable B	Boucle de courant MD	Apparition ddp dans Bv	A(rête)	M(aille)	2/ arêtes qui n'appartiennent pas à la maille victime via matrice d'interactions A/M	1/identification des mailles par matrice Laplacienne	Diaphonie inductive	Forte variation de di/dt Haute fréquence	Proximité de Cs/Bv(< d_seg) Surface boucle Victime> Smin Perturbation max si B perpendiculaire à Bv Cs et Bv parallèles
1/13					Boucle de courant MC (1 câble de la boucle victime relié à la masse)			M(aille) incluant E0					Apparaît si s<3h (s=distance entre source et victime, h=hauteur % à la masse) Surface boucle Victime> Smin Perturbation max si B perpendiculaire à Bv Cs et Bv parallèles
2/12	Rayonnement	Couplage inductif	Equipement	Champ magnétique variable B	Boucle de courant MD	Apparition ddp dans Bv	S(ommet)	M(aille)	2/ sommets qui n'appartiennent pas à la maille victime via matrice d'interactions S/M	1/identification des mailles par matrice Laplacienne + matrice A/M	Rayonnement en champ proche /Boucle	Champ magnétique B variable Haute fréquence	Proximité de Es-As/Bv ($r < 2D^2/l$) (D: plus grande dimension de E) Surface boucle V> Smin
2/13					Boucle de courant MC (1 câble de la boucle victime relié à la masse)			M(aille) incluant E0					
3/12			Equipement/ Antenne	Champ magnétique variable B	Boucle de courant MD	Apparition de ddp dans Bv	S(ommet)	M(aille)	2/ sommets qui n'appartiennent pas à la maille victime via matrice d'interactions S/M 3/ identification des As via la matrice d'incidence transposée A/S --> sommets à supprimer	1/identification des mailles par matrice Laplacienne + matrice A/M	Rayonnement en champ lointain/ Boucle		Distance de Es-As/Bv ($r > 2D^2/l$) (D: plus grande dimension de E) Surface boucle V> Smin
3/13					Boucle de courant MC (1 câble de la boucle victime relié à la masse)			M(aille) incluant E0					
4/12	Diaphonie capacitive		Câble	Différence de potentiel (tension) entre Cs et Cv générant un champ électrique variable E et une capacité parasite	Câbles en MD	Apparition de i dans le Cv	A(rête)	A(rête)	1/ identification des arêtes reliées à 2 nœuds (différents de E0), via la matrice d'incidence transposée	2/identification des arêtes (hors arête agresseur) reliées à 2 nœuds (différents de E0) par la matrice d'incidence transposée	Diaphonie capacitive	Forte variation de dv/dt Haute fréquence	Proximité Cs/Cv d<d_seg Perturbation max si parallélisme du champ E avec le câble victime
4/12					Câbles en MC (reliés à la masse)			1/ identification des arêtes reliées à 2 nœuds (différents de E0), via la matrice d'incidence transposée					
5/6/12		Couplage capacitif	Antenne/ Equipement		Câbles en MD	Apparition de i dans le Cv	S(ommet)	A(rête)	2/ identification des sommets (différents de E0) non reliées à l'arête victime, via la matrice d'incidence transposée 3/ identification des As --> sommets à supprimer	1/identification des arêtes (hors arête agresseur) reliées à 2 nœuds (différents de E0) par la matrice d'incidence transposée	Rayonnement en champ proche	Fort champ électrique variable E et haute fréquence car courant parasite proportionnel au champ E et à la fréquence	Proximité de Es/Cv d< d_seg Surface boucle V> Smin Perturbation max si parallélisme du champ E avec le câble victime (parallélisme des circuits S et V)
5/6/13					Câbles en MC (reliés à la masse)				2/ identification des sommets (différents de E0) non reliées à l'arête victime, via la matrice d'incidence transposée 3/ identification des As --> sommets à supprimer				
7/12			Equipement/ Antenne		Câbles en MD	Apparition de i dans le Cv	S(ommet)	A(rête)	2/ identification des sommets (différents de E0) non reliées à l'arête victime, via la matrice d'incidence transposée	1/identification des arêtes (hors arête agresseur) reliées à 2 nœuds (différents de E0) par la matrice d'incidence transposée	Rayonnement en champ lointain		Distance de S/V ($r > 2D^2/\lambda$) (D: plus grande dimension de E) Perturbation max si parallélisme du champ E avec le câble victime
7/13					Câbles en MC (reliés à la masse)				2/ identification des sommets (différents de E0) non reliées à l'arête victime, via la matrice d'incidence transposée				
8/9/10		Diffraction		Champ électrique E et magnétique B	Equipement/ Antenne	Diffraction perturbatrice entre S et V	S(ommet)	S(ommet)	1/ identification des sommets (différents de E0)	2/ identification des sommets (différents de E0 et du sommet agresseur)		Champ $E=(30Pe.Ge)^{1/2} \cdot r^{-1}$ important (r =distance entre E/A source et E/A victime; Pe= Puissance source; Ge= Gain source)	Perturbation sur la V dépendant de la géométrie de S et V et de la distance entre S et V
11	Impédance commune	Couplage conduit	Boucle de courant	Courant dans Bs	Boucle de courant MD avec branche commune	Apparition d'une ddp dans Bv	M(aille)	M(aille)	1/Identification de toutes les mailles via matrice laplacienne 2/Identification des couples de mailles ayant une branche commune via la matrice d'interactions M/M		Couplage conduit	Impédance "Z=R+jLw" de la branche commune importante Paramètres électriques (R, L) dépendant des paramètres géométriques	Paramètres géométriques du Cs et Cv (longueur, section, distance entre eux)
					Boucle de courant MC (1 câble de la boucle victime relié à la masse) avec branche commune			M(aille) incluant E0	1/Identification de toutes les mailles via la matrice laplacienne 2/Identification des couples de mailles (dont une contenant E0) ayant une branche commune via la matrice d'interactions M/M				

i) Couplage Composant/Boucle

Nous avons extrait une partie de l'architecture générique pour présenter le couplage Composant/Boucle, par le graphe topologique présenté à la Figure 48.

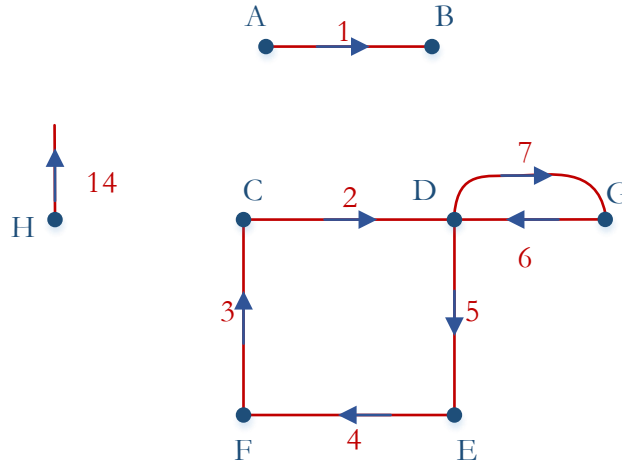


Figure 48 : Extrait de l'architecture pour analyse du couplage Composant/Boucle

Pour identifier les couples agresseur/victime, la première étape consistera à identifier toutes les boucles (mailles) existantes dans le graphe.

• Identification des boucles victimes

Ce processus d'identification, que nous avons automatisé sous Matlab (voir Chapitre 5) consiste d'abord à intégrer les données de connectivité résultant du graphe topologique. Pour cela, nous construisons la matrice d'incidence transposée A/S (δ^{0t}) Arêtes (vecteurs supports des câbles) – Sommets (équipements), avec la convention de signe correspondante aux flux définis dans le diagramme physique (Figure 49).

$$\delta^{0t} = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C & D & E & F & G & H \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 14 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figure 49 : Matrice d'incidence transposée A/S : δ^{0t}

Ensuite, nous calculons la matrice Laplacienne (S/S) $L = \delta^0 \times \delta^{0t}$ (Figure 50). Cette matrice, définie par la loi de Kirchhoff, permet d'identifier le degré (nombre d'arêtes connectées) de chaque sommet sur la diagonale. En effet, les différentes boucles seront identifiées en sélectionnant itérativement les sommets de plus bas degré, et en les retirant de la matrice d'incidence (S/A) δ^0 avant l'itération suivante.

La première itération de calcul consiste alors à exclure les sommets de degré 1 (et les lignes et colonnes associées), qui correspondent aux sommets à arête unique, et sont alors considérés

comme des sommets "morts". Ainsi, dans notre exemple, les sommets A, B et H doivent être supprimés (Figure 50).

$$L = \delta^0 \times \delta^{0t} = \begin{array}{c|cccccccc} & A & B & C & D & E & F & G & H \\ \hline A & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ D & 0 & 0 & -1 & 4 & -1 & 0 & -2 & 0 \\ E & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ F & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 2 & 0 & 0 \\ G & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

Figure 50 : Matrice Laplacienne S/S , $L = M_I \times M_I^t$

Après l'élimination des sommets ayant le degré 1, la matrice Laplacienne se réduit, comme le montre la Figure 51. La même procédure est répétée en éliminant à chaque fois les sommets en lignes et colonnes qui ont le plus petit degré sur la diagonale, avant de traiter ensuite les sommets adjacents pour permettre la détection des mailles de courant.

$$L = \delta^0 \times \delta^{0t} = \begin{array}{c|ccccc} & C & D & E & F & G \\ \hline C & 2 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ D & -1 & 4 & -1 & 0 & -2 \\ E & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ F & -1 & 0 & -1 & 2 & 0 \\ G & 0 & -2 & 0 & 0 & 2 \end{array}$$

Figure 51 : Matrice Laplacienne L réduite

Ensuite, pour chaque itération suivante, nous devons évaluer une nouvelle matrice Laplacienne réduite avec des degrés de sommets mis à jour en tenant compte des sommets supprimés. Ce processus est complété par l'identification des boucles/ mailles liées aux sommets de degré 2. Pour chaque sommet analysé, l'adjacence des sommets connectés permet de définir les boucles correspondantes à 2, 3 ou 4 sommets. Dans notre exemple, nous détectons directement les mailles à 2 sommets (DG) et à 4 sommets (CDEF).

Nous obtenons ainsi la liste de toutes les mailles existantes, c'est-à-dire de toutes les boucles pouvant être des victimes du couplage étudié. L'algorithme pour l'identification des boucles victimes est présenté sur la Figure 52.

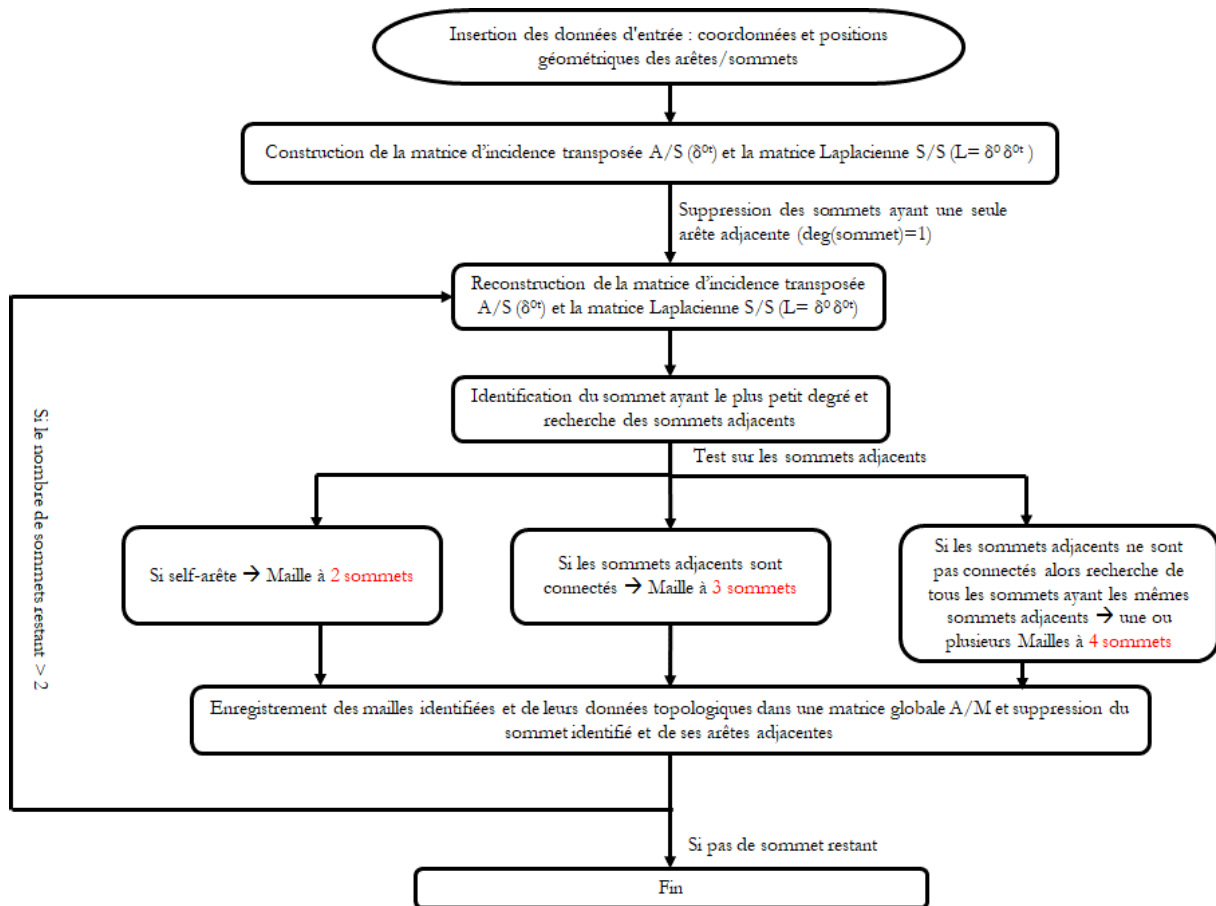


Figure 52 : Algorithme du programme d'identification de boucles de courant victimes

- Identification des agresseurs potentiels

- Câbles agresseurs

La dernière étape consiste à construire une matrice d'interactions Arête/Maille (Figure 53) qui contient toutes les boucles de victime identifiées en colonne en fonction des arêtes impliquées (avec une convention de signe suivant le choix du sens du flux donné arbitrairement au niveau des câbles de liaison). A partir de cette matrice, on peut alors identifier tous les agresseurs potentiels pour chaque boucle victime, en extrayant les arêtes (vecteurs supports de câbles) qui n'appartiennent pas à la maille/boucle étudiée (ayant comme valeur « 0 » sur la colonne de la boucle étudiée). Par exemple, pour la maille/ boucle de victime CDEF identifiée, toutes les arêtes ayant la valeur « 0 » (cadre rouge) sont des agresseuses potentielles pour cette boucle.

$$M_{A/M} = \begin{matrix} & \begin{matrix} CDEF & DG \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 14 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figure 53 : Matrice d'interactions décrivant les arêtes impliquées dans les mailles (victimes) identifiées

- Equipements/ Antennes agresseurs

Afin d'identifier également tous les équipements qui peuvent être sources pour chaque boucle victime identifiée, on construit une matrice d'interaction Sommets (Equipements) / Maille (boucles identifiées réparties en colonne) (Figure 54). Ainsi, les équipements agresseurs pour chaque boucle de courant victime identifiée correspondent aux sommets (équipements/antennes) n'appartenant pas à la boucle étudiée (ayant une valeur nulle pour la maille/colonne considérée). Pour la maille/boucle CDEF, les équipements agresseurs correspondent aux sommets dont les valeurs sont nulles (cadre rouge).

$$M_{S/M} =$$

	C	D	E	F	DG
A	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0
C	1	1	1	1	0
D	1	1	1	1	1
E	1	1	1	1	0
F	1	1	1	1	0
G	0	0	0	0	1
H	0	0	0	0	0

Figure 54 : Matrice d'interactions décrivant les sommets impliquées dans les mailles (victimes) identifiées

Pour distinguer parmi ces agresseurs les antennes des équipements, il suffit d'identifier dans la matrice d'incidence transposée δ^{0t} (Figure 49), toutes les arêtes qui ne sont connectées qu'à un seul sommet.

Dans notre exemple, seule l'arête 14 n'est reliée qu'à un sommet (H), donc l'agresseur H est une antenne.

ii) Couplage Composant/Composant

Le graphe topologique de l'architecture générique (Figure 46) a été utilisé pour l'analyse topologique des couplages Composant/ Composant.

• Couplage par diaphonie capacitive : couplage Câble/Câble

Le principe de couplage par diaphonie capacitive apparaît lorsque deux câbles à des tensions différentes sont rapprochés, une perturbation est générée sous forme d'une capacité parasite générant un courant perturbateur. Les câbles de potentiel différent sont affectés l'un par l'autre, d'un champ électrique qui crée une réserve de charges électriques comme un condensateur. La modification du potentiel v entre les deux conducteurs nécessite alors un courant i dans ou hors des conducteurs pour les charger ou décharger. Aussi, dans un système mécatronique, tous les câbles de liaison peuvent être potentiellement perturbés par ce type d'IEM. On distinguera deux cas, celui où les deux câbles sont reliés à la masse (E0) (couplage en MC), et le cas où les deux câbles sont en MD. Dans ce couplage, il y a une perturbation mutuelle d'un câble sur l'autre, donc les deux sont sources et victimes.

Identification des victimes/agresseurs

Afin d'identifier les couples de câbles en interaction, dans la matrice d'incidence transposée Arêtes-Sommets δ^{0t} de l'architecture générique (Figure 47) :

- Pour le couplage en MC, on identifiera chaque arête reliée à l'équipement E_0 (c'est-à-dire pour tout câble connecté à la masse) (cadre bleu) comme un câble victime, les autres câbles non reliés à la masse sont considérés comme ses câbles agresseurs (Figure 55) ;
- Pour le couplage en MD, tout câble lié à deux équipements (sommets) différent de l'équipement E_0 peut interagir avec tout autre câble lié à deux équipements (sommets) différent de l'équipement E_0 .

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	E_0
1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1
13	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0

Figure 55 : Matrice d'incidence transposée A/S (δ^{0t}) avec identification du MC (en bleu) et des antennes (en rouge)

Afin de mieux identifier la pertinence des couples de câbles générateurs de cette perturbation, plusieurs critères devront être considérés dans l'évaluation quantitative tels que : les contraintes géométriques (distance 3D entre les composants en interaction, l'angle entre les câbles (pour le parallélisme des câbles), etc.) ainsi que les paramètres physiques (fréquence, tension, etc.).

- Couplage par rayonnement en champ proche : couplage Equipement/Câble

A partir de la matrice d'incidence transposée A/S (δ^{0t}) donnée sur la Figure 55, nous pouvons identifier tous les équipements agresseurs pour chaque câble de liaison. En effet, pour chaque câble (arête) lié entre deux équipements (sommets), tout équipement (sommet) qui n'est pas lié à ce câble (valeur « 0 ») est un agresseur potentiel en champ proche, pourvu que les conditions de proximité (architecture 3D) soient respectées : distance r entre les deux ($r < 2D^2/\lambda$) avec D = la plus grande dimension de l'équipement).

- Couplage par rayonnement en champ lointain

Ce type de couplage intervient entre une antenne source et d'autres équipements victimes et parfois entre un équipement source et une antenne victime. Cette interaction intervient lorsque la distance r entre la source et la victime respecte la contrainte $r > 2D^2/\lambda$ (avec D = la plus grande dimension la source).

- **Couplage Antenne/Câble (A/C)**

L'identification des câbles victimes consiste à trouver toutes les connexions (arêtes) entre deux équipements (sommets) dans la matrice d'incidence transposée. Ensuite, de la même façon, l'identification des antennes agresseuses consiste à identifier les câbles qui ne sont liés qu'à un seul équipement (sommet) différent de l'équipement E_0 . A partir de la matrice d'incidence transposée Arête/Sommet (Figure 55), seuls les câbles ayant les numéros 8 et 14 (cadres rouges) sont connectés respectivement aux équipements correspondant aux lettres H et L. Ainsi, tous les câbles à proximité des deux antennes identifiées peuvent être des câbles victimes.

- **Couplage Antenne/Equipement (A/E)**

Pour chaque antenne agresseuse (identifiée suivant la méthode précédente), en repartant de la matrice d'incidence transposée, chaque équipement (sommet) n'étant pas lié à un câble de cette antenne est un équipement potentiellement victime d'un couplage en champ lointain. Autrement dit, pour le câble 8 par exemple, tous les équipements ayant des valeurs nulles « 0 » peuvent être des équipements victimes pour l'antenne associée au câble 8.

- **Couplage Antenne/Antenne (A/A)**

A partir de la matrice d'incidence transposée Arête-Sommet, on peut identifier toutes les antennes existantes de l'architecture. Ainsi, chaque antenne peut être à la fois agresseur et victime pour les autres antennes à proximité. Afin d'identifier laquelle des antennes joue le rôle de la source (prépondérante), des critères physiques doivent être pris en compte.

- **Couplage Equipement/Antenne (E/A)**

De la même façon, on peut identifier dans la matrice d'incidence transposée tous les équipements agresseurs (sommets) qui ne sont pas liés aux câbles (arêtes) associés aux équipements d'antennes. De la même manière, chaque câble associé à un seul et unique équipement constitue une antenne victime pour les autres équipements à proximité.

d) Analyse du risque de perturbation CEM

Après avoir identifié tous les couplages d'IEM possibles, considérant le niveau de contraintes EM X « vu » par un composant, l'évaluation quantitative du risque peut s'exprimer comme le rapport R défini dans la formule suivante :

$$R = \frac{X}{X_{seuil}} \quad (8)$$

En effet, le risque d'IEM peut être défini comme un ratio par rapport à un seuil à dépasser ou une limite maximale d'une ou plusieurs grandeurs physiques, en accord avec les exigences définies par EMILE dans le modèle Système. La valeur de risque pour laquelle le couplage ne pourra pas être négligé, sera définie par la suite comme le risque critique $R_{critique}$.

Cette formule permet de réduire le nombre d'IEM potentielles, en éliminant les IEM dont l'évaluation quantitative a permis de trouver un risque trop faible pour être pris en compte à ce stade de la conception (phase amont).

Ainsi, après l'évaluation quantitative, deux situations se présenteront pour chaque IEM d'un couple agresseur/victime donné :

- Si $R < R_{critique}$ ➔ Cette IEM ne présente pas de risque important ;
- Si $R > R_{critique}$ ➔ Il faudra une analyse spécifique de cette IEM.

Il suffit alors de définir une matrice de pertinence M_p , en mettant des « 1 » sur les couples agresseur/victime dont le risque est supérieur au $R_{critique}$, et de multiplier les matrices de couplage par cette matrice, pour filtrer les IEM à risque non négligeable.

La synthèse du processus global est donnée dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Synthèse du processus d'évaluation qualitative

		Matrice associée	Ligne/colonne	Descriptif
Processus	1-Structure physique topologique	Matrice d'incidence transposée A/S	Sommets=équipements Arêtes=câbles	Connectivité des composants
	2-Structure topologique	Matrices d'interaction	A/Maille S/Maille δ^{ot}	Identifier les couples agresseur/victime
	3- Evaluation du risque	Matrice de pertinence	Matrice avec des « 0 » lorsque le risque d'une IEM est négligeable et des « 1 » pour les IEM à retenir	Evaluer, à partir des résultats de l'évaluation quantitative, la pertinence de toutes les IEM potentielles
	4- Identification des IEM à risque non négligeables	Matrice d'interaction modifiée = Matrice d'interaction * Matrice de pertinence	A/Maille S/Maille Matrice d'incidence transposée	Filtrer les IEM pertinentes (quantitativement)

2. Application à une IEM particulière : la diaphonie étrangère

La diaphonie est un phénomène indésirable par lequel les signaux d'un circuit ou d'un chemin d'un système de transmission créent des perturbations sur un autre circuit ou chemin. La diaphonie étrangère, quant à elle, est le bruit électromagnétique qui peut se produire dans un câble et qui est causé par d'autres câbles adjacents au câble en question, par opposition aux signaux contenus dans les fils d'un même câble (Lim et al., 2015; Mardiguian, 2003).

a) Structure topologique

Considérons le schéma d'une architecture E/E (composé d'un ensemble d'équipements E_i , de deux antennes, des câbles électriques de connexion C_i et d'un plan de masse) sur la Figure 56, son diagramme physique (Figure 57) et son schéma électrique équivalent associé (Figure 58).

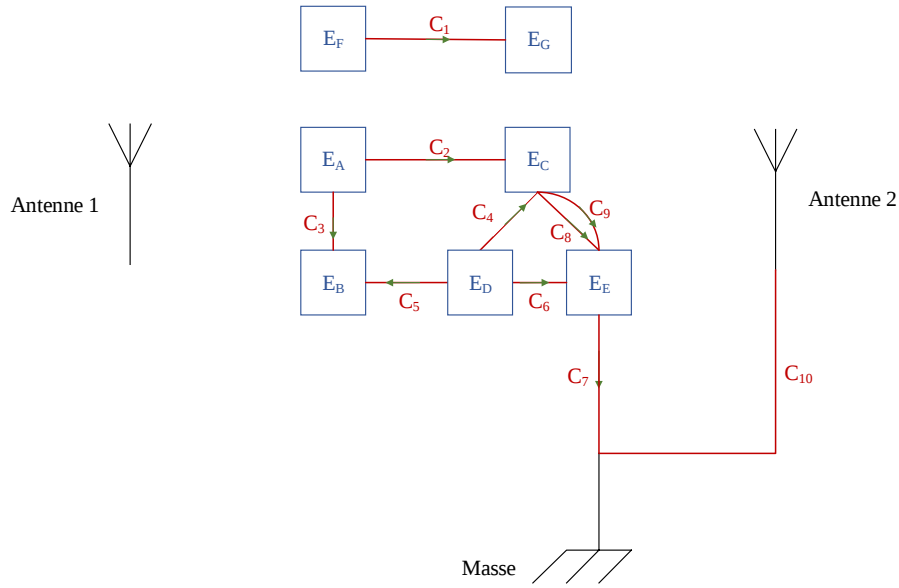


Figure 56 : Schéma initial d'une architecture E/E en interaction

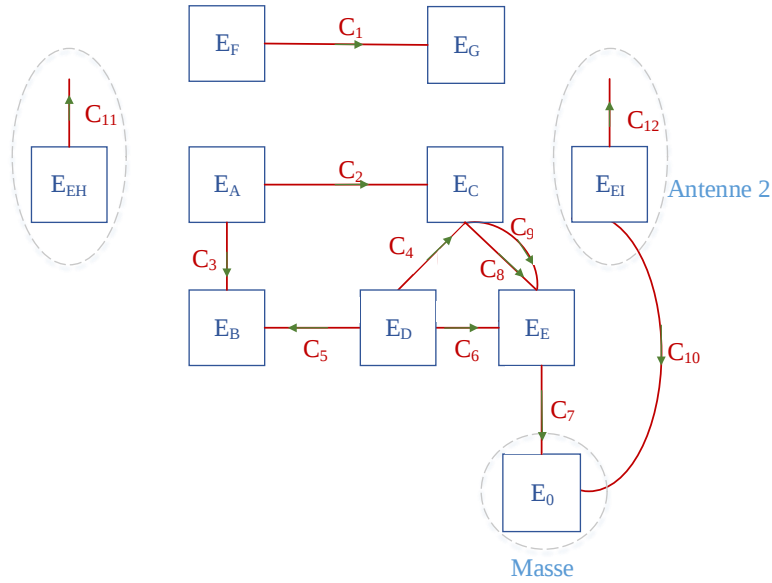


Figure 57 : Diagramme physique de l'architecture physique E/E

La Figure 58 présente le schéma électrique de cette architecture E/E comprenant l'impédance équivalente de chaque composant avec leurs tensions de circuit correspondantes. Dans ce schéma électrique équivalent, les équipements, ainsi que les câbles électriques, sont représentés respectivement par leurs impédances équivalentes Z_{Ei} et Z_{Ci} ; les tensions correspondantes pour chaque circuit électriques sont représentées par V_i ; Pour les deux antennes radios, l'onde électromagnétique impose une différence de potentiel V_{ai} le long des deux antennes qui sont modélisées chacune par une impédance d'antenne Z_{ai} et une capacité de base C_{ai} (Cecconi, 2011).

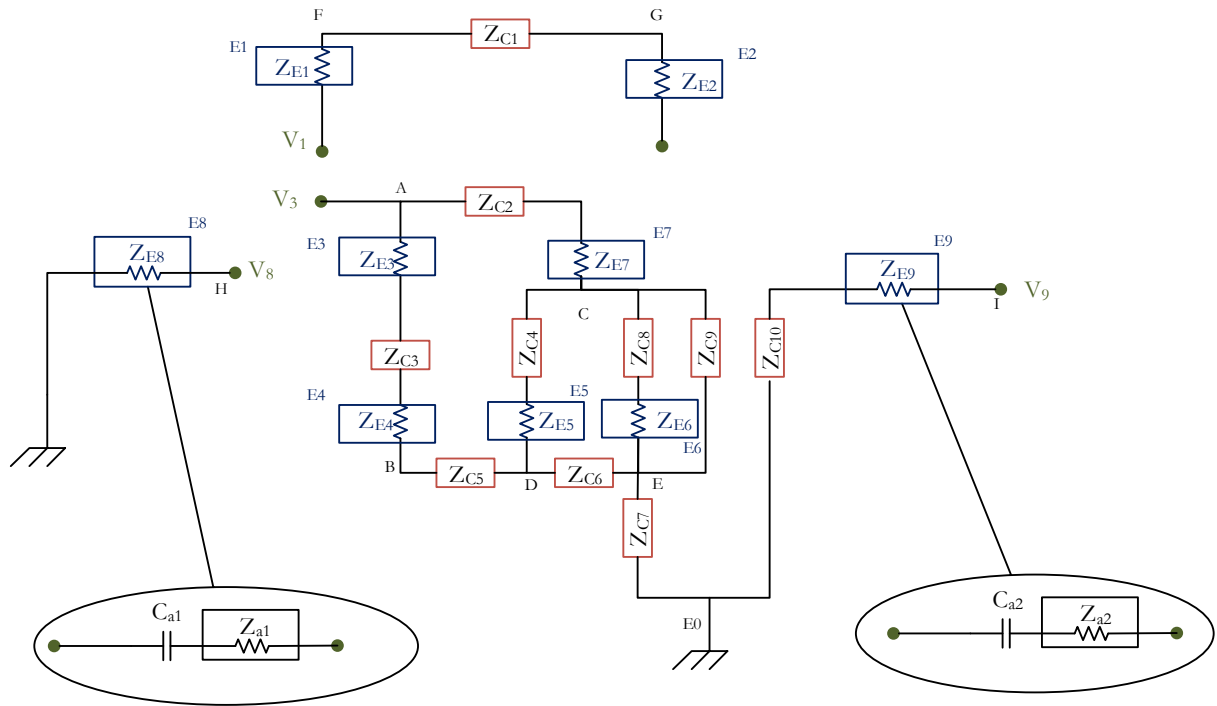


Figure 58 : Schéma électrique équivalent de l'architecture E/E

Ensuite, comme tout composant peut agir comme une source ou une victime par rapport à un autre composant proche, nous effectuons alors la modélisation topologique correspondant au diagramme physique (Figure 57), pour générer le graphe topologique présenté sur la Figure 59. Dans ce graphe topologique, les composants (que ce soit équipement, antenne, câble ou masse) sont représentés conformément au Tableau 9.

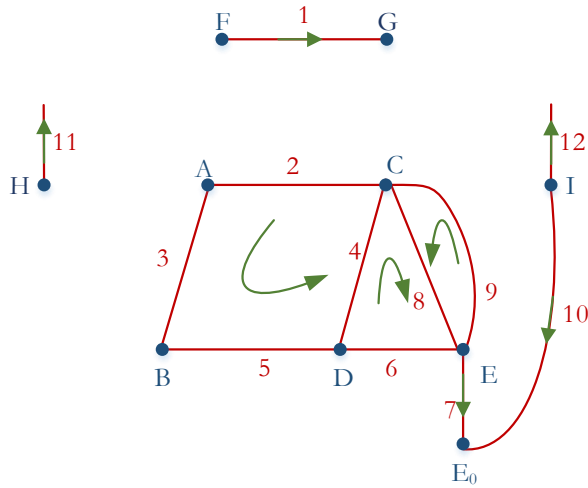


Figure 59 : Graphe topologique de l'architecture E/E

Comme l'interaction physique est supportée par les câbles, on peut ainsi construire la matrice (A/S) correspondant à la connectivité Câble-Équipement. Cette matrice, basée sur le diagramme physique, est appelée matrice d'incidence transposée δ^{0t} incluant la direction des flux de courant (Figure 60).

$$\delta^{0t} = \begin{matrix} & A & B & C & D & E & F & G & H & I & E_0 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix} & \left[\begin{array}{ccccccccccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{array} \right] \end{matrix}$$

Figure 60 : Matrice d'incidence transposée δ^{0t} entre les arêtes et les sommets

L'analyse du schéma électrique, de la matrice d'incidence transposée et d'autres matrices (ex. matrice Laplacienne et d'interaction) permet d'identifier les perturbations potentielles des interférences EM à prendre en compte pour l'évaluation quantitative.

En ce qui concerne le couplage de diaphonie inductive étrangère, il nécessite une boucle victime (de courant). Ainsi, notre approche topologique est d'abord basée sur l'identification des boucles de courant pour détecter les victimes potentielles de la diaphonie étrangère. Ensuite, pour chaque boucle de courant (victime) reconnue, nous identifierons ses agresseurs potentiels, avant de classer le couplage correspondant en diaphonie étrangère inductive. Ce processus d'évaluation qualitative est valable, quel que soit son mode de couplage (commun ou différentiel).

b) Identification des victimes/ boucles

La première étape est l'identification de toutes les boucles victimes actuelles, à partir du graphe topologique et de la matrice d'incidence transposée δ^{0t} correspondante (Figure 60).

Physiquement, il existe un couplage par diaphonie lorsque les trois conditions suivantes relatives au nombre de boucles de courant N_{cl} , au nombre de câbles N_c et au nombre d'équipements (N_E) sont remplies : $N_{cl} \geq 1$, $N_c \geq 3$, $N_E \geq 2$.

La formule mathématique fournissant l'ensemble des boucles de courant $\mathfrak{B}_m$ contenues dans le graphe topologique (Mouna Kharrat et al., 2018), est basée sur les éléments de la matrice d'incidence transposée δ^{0t} correspondante (entre les câbles C_n et les équipements E_m) et est détaillée en (9) :

$$\mathfrak{B}_m = \left\{ \begin{array}{l} \text{sign}(C_i, E_k) = \text{sign}(C_j, E_l) \\ \text{sign}(C_i, E_l) = -\text{sign}(C_i, E_k) \\ \text{sign}(C_j, E_k) = -\text{sign}(C_j, E_l) \\ \neq 0 \end{array} \right\} \quad (9)$$

avec $i, j = \{0 \dots n\}$; $k, l = \{0 \dots m\}$; $(k \neq l)$ and $(i \neq j)$

Pour faciliter l'identification systématique de ces boucles par une analyse topologique, nous proposons un processus d'identification automatisé consistant d'abord à intégrer les données de connectivité résultant du graphe topologique (Figure 59).

Ensuite, à partir de la matrice d'incidence transposée δ^{0t} calculée (Figure 60), nous calculons la matrice Laplacienne $L = \delta^0 \times \delta^{0t}$ (Figure 61), pour identifier les degrés des sommets sur la diagonale. Cette matrice permet d'identifier toutes les boucles/mailles existantes dans une architecture E/E donnée. Ce processus d'identification est réalisé tout en éliminant à chaque itération les sommets possédant le degré le plus faible (en diagonale) et en analysant l'adjacence des sommets connectés à chaque sommet étudié. Ainsi, dans notre exemple les sommets F, G et H doivent être supprimés.

$$L = \delta^0 \delta^{0t} = \begin{array}{c} \begin{array}{c} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \\ G \\ H \\ I \\ E_0 \end{array} \begin{array}{c} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \\ G \\ H \\ I \\ E_0 \end{array} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 4 & -1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 3 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & -1 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \end{array}$$

Figure 61 : Matrice Laplacienne $\delta^0 \times \delta^{0t}$ des sommets avec leurs degrés à la diagonale correspondant à l'itération 1

Après, on élimine tous les sommets ayant le plus petit degré (égal à 1) en diagonale de la matrice Laplacienne et les arêtes mortes (arêtes 11 et 12). On recalcule la matrice Laplacienne sans prendre en compte ces sommets et on élimine à chaque itération les sommets possédant le degré égale à 1, donc ici on supprime le sommet I (Figure 62) puis E_0 (Figure 63).

$$L = \delta^{0t} \delta^0 = \begin{array}{c} \begin{array}{c} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ I \\ E_0 \end{array} \begin{array}{c} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ I \\ E_0 \end{array} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 4 & -1 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 3 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & -1 & 4 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \end{array}$$

Figure 62 : Matrice Laplacienne $\delta^0 \times \delta^{0t}$ réduite correspondant à l'itération 2

$$L = \delta^{0t} \delta^0 = \begin{array}{c} \begin{array}{c} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ E_0 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{c} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ E_0 \end{array} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 4 & -1 & -2 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 3 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & -1 & 4 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \end{array}$$

Figure 63 : Matrice Laplacienne $\delta^0 \times \delta^{0t}$ réduite correspondant à l'itération 3

On itère jusqu'à la suppression de tous les sommets de degré 1.

Après l'élimination de tous les sommets ayant un degré égal à 1, nous recalculons la matrice Laplacienne sur le nouveau graphe topologique mis à jour après la suppression des sommets F, G, H, I et E_0 et nous passons ensuite à éliminer les sommets de degré 2. Dans cette matrice, les sommets A et B possèdent le plus petit degré (2) sur la diagonale. Ainsi, l'itération suivante consiste à éliminer ces sommets A et B (Figure 64).

$$L = \delta^{0t} \delta^0 = \begin{array}{c} \begin{array}{c} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{c} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{array} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 4 & -1 & -2 \\ 0 & -1 & -1 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & -2 & -1 & 3 \end{bmatrix} \end{array} \end{array}$$

Figure 64 : Matrice Laplacienne $\delta^0 \times \delta^{0t}$ réduite correspondant à l'itération 4

La procédure d'élimination des sommets en lignes et colonnes, ayant le plus petit degré sur la diagonale, se répète afin de pouvoir traiter ensuite les sommets adjacents permettant la détection des différentes mailles de courant existantes dans l'architecture étudiée. Par exemple, l'élimination des sommets A et B permettent la détection de la boucle ABDC.

Ainsi, la matrice Laplacienne se réduit, comme le montre la Figure 65. Dans cet exemple, on doit alors éliminer le sommet D (cadre bleu) pour la détection de la boucle DCE.

$$L = \delta^{0t} \delta^0 = \begin{array}{c} \begin{array}{c} C \\ D \\ E \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{c} C \\ D \\ E \end{array} \begin{bmatrix} 3 & -1 & -2 \\ -1 & 2 & -1 \\ -2 & -1 & 3 \end{bmatrix} \end{array} \end{array}$$

Figure 65 : Matrice Laplacienne $\delta^0 \times \delta^{0t}$ réduite correspondant à l'itération 5

Enfin, pour chaque itération suivante, nous devons évaluer une nouvelle matrice Laplacienne réduite avec des degrés de sommets mis à jour en tenant compte des sommets supprimés. Ce processus est complété par l'identification des boucles liées aux sommets à 2 degrés. Pour chaque sommet analysé, l'adjacence des sommets connectés permet de définir les boucles correspondantes de 2, 3 ou 4 sommets (Figure 66). Dans cet exemple, nous pouvons tirer la détection de ces boucles/ mailles suivantes : ABDC (maille à 4 sommets), DCE (deux mailles à 3 sommets puisqu'on a une self-arête) et CE (maille à 2 sommets).

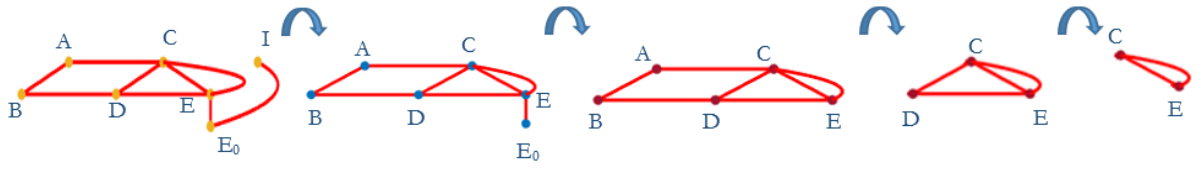


Figure 66 : Évolution du graphe topologique au cours des itérations successives du processus d'identification des boucles

Ainsi, toutes les boucles de courant (mailles) identifiées sont réparties dans une matrice d'interactions $M_{A/M}$ reportées en colonnes. Les lignes de cette matrice sont choisies arbitrairement pour définir l'ensemble de toutes les arêtes. Ensuite, pour chaque boucle victime identifiée, nous choisissons arbitrairement son orientation (Figure 59). Ainsi, les signes de valeurs -1/+1 dans la matrice $M_{A/M}$ sont définis pour être cohérents avec l'orientation fixe (Figure 67).

Dans notre cas, nous nous concentrons sur l'identification simple de toutes les boucles existantes sans aucune considération électromagnétique. Par exemple, la boucle identifiée nommée ABDC est une boucle de 4 sommets connectés aux arêtes suivantes 2, 3, 4 et 5.

$$M_{A/M} = \begin{matrix} & \begin{matrix} ABDC & DCE & CE & DCE \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figure 67 : Matrice d'interaction $M_{A/M}$ des boucles de courant (mailles) identifiées en fonction des arêtes orientées

c) Identification des agresseurs

Ensuite, pour chaque boucle de courant identifiée, nous identifions les agresseurs potentiels correspondants dans l'architecture E/E du système. En effet, pour la diaphonie, les agresseurs potentiels sont toutes les arêtes qui sont à la fois traversées par un courant et n'appartiennent pas à la boucle victime considérée.

En considérant la matrice d'interaction $M_{A/M}$, les agresseurs potentiels de chaque boucle victime (c'est-à-dire une colonne donnée), correspondent aux arêtes (valeurs des lignes) dont les valeurs sont égales à 0 (Figure 67). Par exemple, pour la boucle de courant identifiée appelée ABDC, toutes les arêtes sources possibles sont celles qui correspondent aux valeurs 0 (1, 6, 7, 8, 9, 10 et 11).

d) Identification du risque d'IEM par diaphonie inductive

Pour raffiner le risque d'IEM par diaphonie inductive, nous avons besoin d'informations physiques (électriques) complémentaires sur les paramètres électriques que nous pourrions récupérer des environnements de modélisation EM ou 3D. En effet, le couplage inductif est défini

par la présence d'un courant variable perturbateur (10) traversant un câble "agressif" entre deux équipements (Mouna Kharrat et al., 2018).

$$\exists i_i(t) \neq 0 \setminus \{C_i, (E_k, E_l)\} \neq \{\emptyset\} | (E_k, C_i) = -(E_l, C_i) \neq 0 \} \quad (10)$$

Cette évaluation quantitative est détaillée dans les sections suivantes.

III. *Evaluation quantitative*

Le niveau croissant d'intégration des systèmes multi-domaines exige que le risque d'IEM, compte tenu de l'architecture 3D des composants E/E, soit abordé. En effet, le risque d'interférences dépend d'une part des paramètres physiques (tels que par exemple l'intensité du champ émis), d'autre part, il dépend des paramètres géométriques (tels que les dimensions des composants E/E et la position entre eux). Or, la connaissance de ces paramètres exige l'intervention des experts en CEM afin d'éviter de mauvaise prédiction des différents niveaux d'interférence EM. Ainsi, une évaluation des interférences électromagnétiques est nécessaire afin de prédire et analyser le risque d'IEM. Cette évaluation consiste en la quantification de l'interaction tout en s'appuyant sur des méthodes de calcul analytique ou numérique. Finalement, connaissant le niveau de contraintes EM X « vu » par un composant, le risque d'IEM peut se traduire par la relation (11) :

$$R = \frac{X}{X_{seuil}} \quad (11)$$

A. *Approches existantes*

L'évaluation quantitative des IEM est généralement réalisée à l'aide de divers outils de simulation basés sur la résolution des équations de Maxwell, tels que la méthode des moments (MoM) (Harrington, 1993), la méthode des éléments finis (Silvester and Ferrari, 1996), la méthode des éléments finis de frontière (BEM) (Brebbia et al., 2012; Harrington, 1993), le domaine temporel des différences finies (FDTD) (Kunz and Luebbers, 1993; Taflove and Hagness, 1995) et la modélisation des lignes de transmission (TLM) (Ney and Le Maguer, 2003; Paul, 2008, 1987; Paul and Abraham, 1981). Les experts choisissent l'un ou l'autre suivant leurs avantages et leurs spécificités.

1. *La méthode des Moments (MoM)*

La méthode des Moments (MoM) a été introduite dans l'électromagnétisme par Harrington dans les années 1960. Elle est considérée comme l'un des outils le plus puissants pour le calcul numérique des champs électromagnétiques et est d'ailleurs fréquemment utilisée pour l'analyse des problèmes de CEM (Parmantier, 2004). L'utilisation de cette méthode, principalement pour les problèmes d'antennes et de diffusion électromagnétique, est basée sur la résolution d'équations intégrales transformées en un système d'équations linéaires (Leman, 2009).

Elle présente des avantages (elle est relativement rapide et est implémentée dans de nombreux logiciels commerciaux, etc.) par rapport aux autres approches numériques, en particulier pour les grandes surfaces électriques et/ou structures filaires (Brüns et al., 2017). Elle est très efficace pour analyser les problèmes de rayonnement sans limite, les configurations PEC (conducteur électrique parfait) et les diélectriques homogènes. Pour autant, la méthode MoM exige que la solution soit bien conditionnée et que les erreurs soient contrôlables (Annexe 4). Par ailleurs, cette méthode n'est pas adaptée aux analyses des géométries complexes et non homogènes. Enfin, les besoins en mémoire et en temps de calcul requis par cette méthode augmentent considérablement avec le nombre de segments de maillage.

2. *La méthode des éléments finis (FEM)*

La méthode des éléments finis (FEM) est l'une des méthodes numériques qui transforme une relation fonctionnelle en un système d'équations linéaires. Depuis les années 1970, cette méthode a connu un grand développement dans de nombreux domaines de la physique grâce à son aptitude à s'appliquer à des structures avec des géométries complexes (NEY, 2006). Les techniques d'éléments finis exigent que tout le volume de la configuration étudiée soit maillé, contrairement aux techniques d'intégration de surface, qui exigent seulement que les surfaces soient maillées. Aussi, chaque élément maillé peut avoir non seulement des propriétés de matériau complètement différentes de celles des éléments voisins mais il doit aussi contenir la géométrie de l'élément, les contraintes d'excitations et les conditions aux limites.

La méthode des éléments finis est très puissante pour la modélisation des configurations non homogènes et complexes, les diélectriques, les surfaces métalliques minces et les conducteurs électriquement petits et étroitement couplés. En revanche, elle ne convient pas à la modélisation de fils minces et électriquement longs et n'est donc pas adaptée à la modélisation des nombreux problèmes d'IEM faisant intervenir ce type d'éléments. Par ailleurs, elle nécessite des conditions aux limites exhaustives afin de limiter le domaine de calcul (du maillage) principalement pour les structures ouvertes dans l'espace libre. Finalement, cette méthode est rigoureuse, mais elle requiert également un temps de calcul très important et une grande capacité de mémoire du calculateur (Jithesh and Pande, 2003; Sumithra and Thiripurasundari, 2017).

3. *La méthode des éléments finis de frontière (BEM)*

La méthode des éléments finis de frontière (BEM) est une méthode numérique basée sur la méthode des résidus pondérés (Sumithra and Thiripurasundari, 2017). Elle est particulièrement adaptée à l'analyse des champs électromagnétiques qui repose sur la résolution de la représentation intégrale des équations de Maxwell avec une frontière discrète. Cette méthode est semblable à la méthode MoM puisqu'elle utilise la même formulation de surface, la seule différence concerne ses fonctions de base et de pondération qui ne sont définies que sur une surface. D'autre part, la méthode BEM supporte la résolution d'un problème 3D dans la même façon qu'un problème de frontière 2D, ce qui permet de réduire le nombre d'inconnues et de l'appliquer ainsi à des problèmes à domaine ouvert pour lesquels les solutions des problèmes volumiques, telles que la FEM, sont limitées (Pommerenke and Sakaguchi, 2002). Cette méthode présente plusieurs avantages qui consistent notamment dans la possibilité de modéliser des structures hétérogènes complexes ainsi que de calculer des champs rayonnés sans aucune condition absorbante, aux surfaces extérieures du maillage volumique. Même si cette méthode présente beaucoup d'avantages mais elle a également plusieurs inconvénients puisqu'elle n'est pas adaptée ni aux géométries complexes, ni aux conducteurs électriquement courts et est limitée par un temps de calcul très important.

4. *La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)*

La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD : Finite Difference Time Domain) est une méthode de résolution d'un système d'équations aux dérivées partielles par un calcul de différences finies. Cette méthode, appelée aussi méthode de Yee (Kane Yee, 1966; Yee and Chen, 1997), permet d'obtenir directement l'évolution du champ électromagnétique en fonction du temps, puis à partir de la réponse temporelle et en se basant sur des transformées de Fourier, la réponse fréquentielle du système peut être facilement déduite. Cette technique d'analyse numérique est basée sur la discrétisation des équations de Maxwell directement dans les domaines temporel et spatial. D'ailleurs, les équations de Maxwell sont souvent discrétisées en cellules élémentaires de maillage, de forme généralement parallélépipédiques, afin d'obtenir une solution

numérique pour les problèmes de champs électrique E et magnétique H impliquant ainsi des objets tridimensionnels complexes dont les formes et les caractéristiques de matériaux sont arbitraires (Cabello et al., 2017; Mix et al., 1998).

La méthode FDTD est pertinente pour l'analyse des structures non homogènes et à géométrie très complexe du fait de sa robustesse pour la résolution de problèmes d'interaction électromagnétique. En revanche, cette méthode n'est pas adaptée ni pour les géométries de surfaces ni pour les conducteurs électriquement courts. De plus, une forte fréquence d'étude ainsi que la présence de quelques objets ayant de grands volumes contenant petites géométries complexes, peuvent imposer un maillage très fin de la structure qui demande alors un long temps de calcul ainsi qu'un espace mémoire très important.

5. *La méthode TLM*

Bien que la méthode TLM (Transmission-Line Modeling) présente des similitudes avec la méthode FDTD, elle est unique. En effet, la méthode TLM est une technique spéciale de calcul des différences finies dans le domaine temporel. Cette méthode, développée par Christopoulos dans les années 1970 (Christopoulos, 1995), est basée sur une discrétisation spatio-temporelle des équations de Maxwell. Cette discrétisation consiste en des cellules élémentaires parallélépipédiques pour l'analyse de la propagation des ondes électromagnétiques via un réseau virtuel de lignes de transmission interconnectées. Cependant, contrairement à la méthode FDTD qui utilise soit un maillage pour le calcul du champ électrique E soit un maillage pour le calcul du champ magnétique B , la méthode TLM utilise un seul maillage à la fois pour les champs E et B où les sommets sont interconnectés par un réseau de lignes de transmission virtuelles (Mescoco, 2013).

Comme la méthode FDTD, la méthode TLM présente des avantages et des inconvénients. Certes, l'avantage majeur de la TLM, par rapport aux autres techniques, est la possibilité d'analyser des structures à géométries très complexes. D'autre part, elle offre une grande flexibilité étant donné qu'elle peut incorporer des propriétés de champs EM et leur interaction avec les frontières et les milieux des matériaux. Cependant, la méthode TLM nécessite un temps de calcul élevé pour les grands systèmes, car plus le maillage est complexe plus la mémoire nécessaire par sommet est importante. Ces différents points rendent la méthode TLM plus coûteuse en termes de calcul par rapport aux précédentes méthodes.

6. *La modélisation analytique*

La modélisation analytique permet l'évaluation quantitative des interférences EM en s'appuyant sur des formules et des lois physiques. Cette approche est supportée par l'analyse des équations physiques correspondantes vis-à-vis du couplage identifié et de son mode de propagation (différentiel et commun). Elle consiste en la résolution des équations de Maxwell, généralement combinée à la discrétisation et aux maillages des surfaces, en se basant à la fois sur les paramètres physiques et géométriques des composants (câbles source/victime). L'évaluation quantitative est alors basée non seulement sur les équations physiques mais aussi sur la structure topologique de l'architecture E/E définie.

L'avantage principal de cette méthode est qu'elle s'appuie sur des équations mathématiques, rapides à calculer, permettant la synthèse d'un dimensionnement géométrique ou physique d'une architecture et pas seulement l'analyse d'une architecture particulière dans des conditions de simulation données, proposée dans les méthodes précédentes. Elle peut ainsi être facilement couplée dans un processus d'optimisation (PIDO= Process Integration Design Optimization), sans augmenter considérablement les temps de calcul.

Une description plus détaillée du processus est présentée ci-dessous dans le cas d'une IEM particulière : la diaphonie étrangère dans la section C.

7. *La méthode de KRON*

Comme un système est généralement constitué de plusieurs sous-systèmes, il est judicieux d'avoir une vision macroscopique de chaque sous-système afin d'analyser les liens entre eux. Une telle approche topologique peut fournir une métrique, qui donne la valeur de chaque connexion, permettant ainsi d'analyser les différents chemins de propagation des perturbations EM. Cette approche topologique, appelée approche d'ingénierie basée sur l'Analyse Tensorielle des Réseaux, a été développée par Gabriel Kron pour les machines électriques et a été étendue aux problèmes de CEM (Maurice, 2016a). Ainsi, l'analyse tensorielle permet de prendre en compte non seulement les perturbations conductrices mais aussi les couplages de rayonnement ainsi que les couplages non linéaires tout en étudiant les IEM de manière abstraite. Les bases de l'analyse tensorielle sont rappelées dans l'Annexe 4. Dans ses travaux, Maurice a adapté la méthode de G. Kron pour l'analyse des IEM dans les grands systèmes actuels (Maurice, 2007b). Cette méthode, basée sur une approche topologique via la représentation des diagrammes et graphes topologiques associés permet ainsi une bonne visualisation du problème d'ensemble. Puis une modélisation des interactions entre les sous-systèmes, à travers des circuits électriques équivalents, où chaque circuit peut être représenté par un ensemble de résistances, d'inductances et de capacités liées à des forces électromotrices (fem) relatives aux IEM, permet une analyse physique de ces phénomènes d'IEM. Les équations, relatives aux interactions multiphysiques mises en jeu, peuvent être facilement déduites grâce à l'utilisation des espaces tensoriels et notamment des éléments constitutifs du système (arêtes, sommets et mailles). La résolution de ces équations tensorielles s'effectue alors dans l'espace le mieux adapté afin de retrouver les courants perturbés dans les différents systèmes électroniques.

Finalement, en s'appuyant sur une modélisation de la structure topologique et algébrique de façon rigoureuse d'un système E/E via un système d'équations simples, l'efficacité du formalisme de l'analyse tensorielle est justifiée pour résoudre les problèmes d'IEM issus des réseaux électriques.

B. *Analyse et choix des méthodes*

Les méthodes d'évaluations citées précédemment telles que : la méthode des moments (MoM), la méthode des éléments finis (FEM), la méthode des éléments finis de frontière (BEM), la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) ou la méthode TLM sont très populaires dans le domaine de la CEM. En effet, chacune de ces méthodes peut offrir de bons résultats d'évaluation et de prédiction EM pour l'étude d'un phénomène spécifique donné.

Néanmoins, lors de la phase de conception, une simulation de l'ensemble d'une architecture système est nécessaire pour chaque scénario de contraintes environnementales et de missions opérationnelles, ce qui accroît considérablement le nombre et le temps de l'analyse quantitative, d'où l'intérêt d'utiliser une analyse qualitative préalable pour identifier l'origine des perturbations potentielles qui sont responsables des dysfonctionnements et ainsi permettre la limitation des essais numériques et expérimentaux.

Par ailleurs, les outils de simulation nécessitent la disponibilité d'outils numériques coûteux et ne permettent pas de générer/synthétiser la solution, ce sont des outils d'analyse d'une architecture donnée dans une configuration de sollicitation donnée, c'est pourquoi les approches analytiques ou tensorielles telle que la méthode de Kron, qui permettent une mise en équation souple du système complexe à travers une vision plus proche de la physique, sont de bonnes alternatives pour cibler

plus précisément la solution d'architecture qui répondra aux exigences définies par EMILE en amont. Aussi, même si dans le cadre de l'approche SAMOS, chaque expert est libre d'utiliser la méthode d'évaluation quantitative qui lui semble la plus appropriée à son étude et à ses contraintes matérielles et temporelles, dans le cadre de cette thèse, nous avons privilégié le prototypage de nos approches via les 2 dernières méthodes présentées : analytiques et tensorielle de Kron.

C. Approches prototypées sur la diaphonie étrangère

a) Modèle analytique

Dans cette partie, il s'agit d'évaluer quantitativement le système en s'appuyant sur les formules physiques impliquées dans la diaphonie inductive.

En effet, la diaphonie inductive apparaît lorsqu'un courant variable traversant un câble fait apparaître un champ magnétique $\vec{B}$ dans une boucle proche (Figure 68).

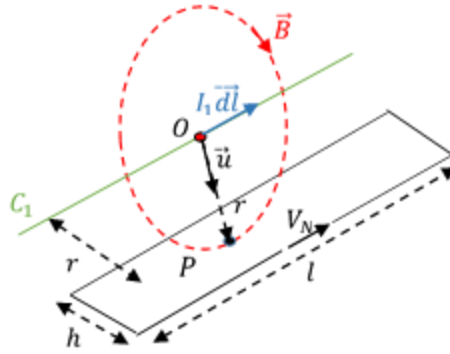


Figure 68 : Champ magnétique crée dans la boucle victime

La première étape consiste donc à identifier toutes les arêtes "sources" alimentées par une source de tension V_s qui génère un courant variable I_s . En se basant sur les équations détaillées dans l'Annexe 1, on peut définir pour chaque arête alimentée, le champ d'induction magnétique $\vec{B}$, émis dans chaque boucle victime associée, qui est décrit par la loi Biot-Savart :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} = \frac{\mu_0 I_s}{4\pi} \int_{wire} \frac{\vec{dl} \wedge \vec{u}}{r^2} \quad (12)$$

Où

$\vec{dl}$: élément de ligne vectorielle de direction dans le même sens que le courant I_s ;

μ_0 : constante magnétique ;

r : distance entre la position de $(\vec{dl})$ et l'endroit où le champ magnétique est calculé ;

$\vec{u}$: vecteur unitaire de direction dans le sens de $\vec{dl}$.

Ce calcul est effectué dans Matlab en additionnant tous les champs électromagnétiques calculés en chaque point d'une zone discrétisée relatif à la surface d'une boucle (Figure 69).

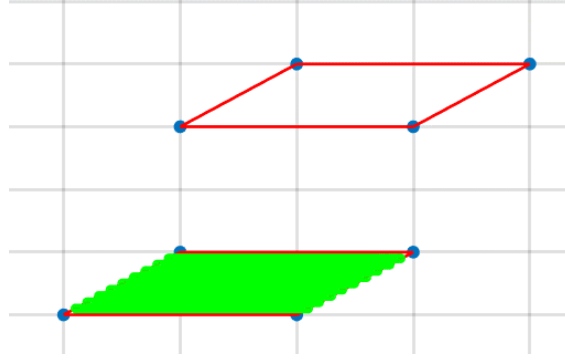


Figure 69 : Discretisation d'une surface de boucle

Ensuite, à partir du champ magnétique calculé, on peut déterminer la force électromotrice e induite, dans la boucle de surface S , par la loi de Lenz-Faraday, qui correspond à la tension supplémentaire qui sera générée dans la boucle du fait de la diaphonie inductive :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -\mu_0 S \frac{d\vec{H}}{dt} \cdot \vec{n} \quad (13)$$

avec
$$\phi = \vec{B} \cdot S \vec{n} \quad (14)$$

En supposant que les longueurs des câbles supposés parallèles, constituant les boucles, sont électriquement courtes ($l < 0,25 \lambda$ avec λ , longueur d'onde du signal perturbateur), on peut supposer que le câble source et la boucle victime sont liés via une inductance mutuelle M .

Ensuite, chaque boucle de courant peut être définie par une impédance caractéristique, une inductance de ligne, une résistance de ligne et une capacité de ligne, qui sont exprimées en fonction de la géométrie et de la position des câbles concernés (Figure 70), sur la base des expressions suivantes (Mardiguian, 2003; Maurice, 2018b, 2016a, 2007b, 2007c) :

Impédance caractéristique d'un câble coaxial (Lampin, 2005) :

$$Z_c = 60 \ln \left(\frac{R}{r} \right) \quad (15)$$

Inductance de ligne :
$$L_a = \frac{Z_c}{v} l \quad (16)$$

Capacité de ligne :
$$C_a = \frac{1}{Z_c v} l \quad (17)$$

Résistance des lignes :
$$R_a = \frac{\rho}{S} l \quad (18)$$

Avec v : vitesse de propagation ; l : longueur de la ligne ; R : rayon extérieur du câble ; r : rayon de l'âme intérieure.

En diaphonie inductive, les boucles de courant source et victime sont couplées par l'inductance mutuelle M exprimée par :

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \left(1 + \left(\frac{h}{s} \right)^2 \right) \quad (19)$$

Avec μ_0 : perméabilité magnétique de l'espace libre ; h est la distance entre les câbles de la boucle victime ; s est la distance entre la boucle source et la boucle victime (calculée ici au point médian de chaque boucle).

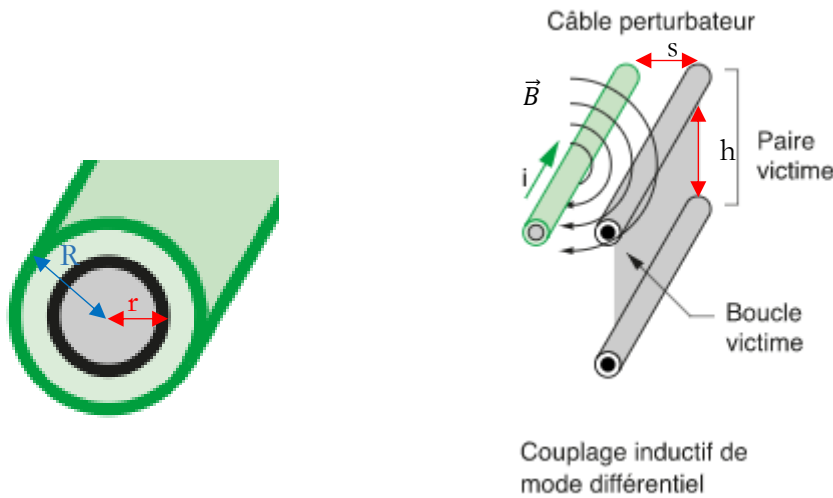


Figure 70 : Paramètres géométriques utilisés dans les équations de la diaphonie inductive

Ensuite, nous évaluons le courant induit I_v dans chaque boucle de courant identifiée, afin de calculer la tension perturbatrice résultante V_v aux bornes de la résistance de charge R_L (aux bornes du composant victime).

$$V_v = R_L I_v \quad (20)$$

Cette tension perturbatrice calculée permet d'évaluer le risque d'ITEM, en la comparant à la tension limite V_{limite} définie pour le composant correspondant dans les exigences initiales définies par EMILE dans le modèle Système.

b) Méthode de Kron

La méthode de Kron proposée par O. Maurice, consiste en une modélisation topologique simplifiée de l'ensemble des interactions physiques entre les composants E/E contenus dans les systèmes complexes. Elle a été appliquée ici aux perturbations par diaphonie inductive.

Dans la méthode de Kron, l'architecture topologique est composée de boucles de courant appelées mailles (m_i), de sommets (E_i) et d'arêtes C_i ayant des impédances électriques Z_i ($i = 0..n$). Pour le couplage par diaphonie inductive, on a deux circuits (source et victime) qui sont reliées par une inductance mutuelle M_{12} . La méthode Kron peut alors être décrite en cinq étapes :

- 1- La définition de la matrice d'impédance Z_e entre les câbles en interaction (reportés en lignes et colonne de la matrice) permet de déterminer l'ensemble de toutes les impédances d'arêtes Z_{ii} (sur la diagonale) :

$$Z_e = \begin{matrix} & C_0 & \dots & C_i \\ \begin{matrix} C_0 \\ \vdots \\ C_i \end{matrix} & \begin{bmatrix} Z_{00} & \dots & \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ & \dots & Z_{ii} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (21)$$

- 2- La détermination du vecteur de tension de source E_b impliqué dans l'ensemble du système lié à l'espace des arêtes :

$$E_b = \begin{matrix} C_0 \\ \vdots \\ C_i \end{matrix} \begin{bmatrix} V_{11} \\ \vdots \\ V_{i1} \end{bmatrix} \quad (22)$$

- 3- La détermination de la matrice de couplage M_c entre les câbles en interaction (reportés en ligne et colonne) afin d'identifier tous les couplages possibles K_{ij} dans l'espace des arêtes.

$$M_c = \begin{matrix} C_0 \\ \vdots \\ C_i \end{matrix} \begin{bmatrix} C_0 & \dots & C_i \\ K_{00} & \dots & K_{0i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & \dots & K_{ii} \end{bmatrix} \quad (23)$$

- 4- La définition de la matrice de connectivité $C_{c \rightarrow m}$ (câbles reportés en ligne et les mailles en colonne) permet d'identifier toutes les arêtes impliquées dans chaque boucle/maille et ainsi de corréler l'espace des arêtes avec l'espace des mailles. Cette matrice ne contient que des 0 et 1.
- 5- L'analyse du problème lagrangien dans l'espace des mailles, puis la résolution éventuelle en résolvant les équations suivantes (Maurice, 2007b) avec un outil numérique :

$$\begin{cases} E_m = C_{e \rightarrow m}^t \cdot E_e \\ Z_m = C_{e \rightarrow m}^t \cdot (Z_e - M_e) \cdot C_{e \rightarrow m} \\ E_m = Z_m \cdot I_m \\ V_v = R_v \cdot C_{e \rightarrow m}(i, :) \cdot I_m \end{cases} \quad (24)$$

La résolution de ces équations nous donne la tension résultante V_v aux bornes du composant victime.

IV. Discussions

Même s'il existe de nombreuses méthodes numériques et approches topologiques pour l'évaluation des IEM, peu d'entre elles qui abordent le couplage de la modélisation topologique en fonction de la position 3D entre les composants E/E dès les premiers stades de la conception. En effet, les évaluations EM quantitatives actuelles sont généralement effectuées tard, une fois qu'un prototype numérique ou physique a été construit. Celles basées sur la simulation sont à la fois trop longues et coûteuses face aux contraintes de temps très courts des programmes de développement de produits actuels. Par conséquent, l'analyse des problèmes EM potentiels doit être traitée le plus tôt possible dès le début de la conception, avant la phase de conception détaillée où les changements architecturaux sont très lourds. Or, comme la distance entre les composants E/E a un impact important sur les performances CEM (Aimé et al., 2009), l'architecture 3D doit être évaluée dès la phase de conception afin de vérifier que les niveaux d'émission/immunité des composants E/E choisis répondent aux exigences EM prédéfinies, sans avoir à effectuer de longues simulations numériques.

Par conséquent, nos travaux de thèse sont basés sur une analyse topologique qui permet de faciliter non seulement la schématisation d'un système complexe à travers des diagrammes

topologiques simples et de leurs matrices associées, mais aussi de faciliter, grâce à la mise en œuvre d’algorithmes permettant d’automatiser la démarche, l’évaluation amont pour prédire les IEM risquées.

En effet, à titre d’exemple sur la diaphonie étrangère, l’algorithme développé permet d’identifier d’une part, toutes les boucles de courant qui peuvent exister dans une architecture E/E donnée pour permettre une évaluation qualitative préliminaire systématique. D’autre part, on peut facilement déduire les sources de perturbations tout en évaluant quantitativement le système à travers les équations physiques correspondantes et en tenant compte de la position géométrique entre les composants E/E. Pour l’évaluation quantitative, le formalisme de l’analyse tensorielle confirme son efficacité à résoudre des études de réseaux électriques tout en modélisant la structure topologique et algébrique de façon rigoureuse via un système d’équations simples.

V. Conclusions

Ce chapitre présente une approche proposée dans le cadre MBSE SAMOS, pour l’évaluation qualitative et quantitative des interférences électromagnétiques (IEM). Notre approche permet de soutenir la prédiction des IEM dès les premières phases de conception, en combinant la modélisation EM et l’approche topologique dans une approche MBSE. Cette approche permet de détecter les perturbations EM en tenant compte de la position entre les composants en interaction et des paramètres utiles nécessaires pour évaluer (via une brève évaluation quantitative) leur comportement EM résultant, avant de vérifier si leur niveau constitue un risque par rapport aux exigences EM. La mise en œuvre d’une évaluation qualitative préliminaire permet ainsi d’identifier l’existence de toutes les interférences électromagnétiques potentielles entre les composants E/E d’une architecture 3D donnée. Pour cette première étape, nous avons développé une modélisation et analyse topologique basée sur le schéma de connexion physique des composants. Ensuite, l’évaluation de ces IEM est réalisée de manière quantitative, en se basant sur deux approches peu coûteuses en temps et moyens matériels : une approche analytique comprenant des équations mathématiques basées sur des lois physiques prenant explicitement en compte la géométrie et la position relative des composants, et une approche tensorielle de Kron résolvant un problème physique via un graphe en géométrisant le problème puis en générant le système d’équations associé à ce graphe. Ainsi, l’approche analytique présente un avantage significatif qui est la capacité d’échanger des paramètres géométriques conformément au processus collaboratif SAMOS, afin, d’une part, de les comparer avec les exigences de l’architecte Système et, d’autre part, de les échanger avec l’architecte 3D, chargé de concevoir l’architecture 3D dans son environnement. La méthodologie développée, basée sur la combinaison entre une approche topologique et une approche MBSE pour l’évaluation des IEM dès les premières phases de conception, est applicable à tous types de couplage, quel que soit le mode de propagation (commun ou différentiel). Afin de la valider, nous avons pu la comparer avec d’autres approches utilisées dans la littérature, et l’appliquer au cas d’étude d’une chaîne de traction du véhicule électrique, pour le cas de la diaphonie étrangère. Ces travaux sont présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 5. *Implémentation dans SAMOS et application sur un cas d'étude*

Dans les chapitres 2, 3 et 4, nous avons présenté respectivement nos travaux concernant l'analyse du besoin, la modélisation et l'évaluation des interférences électromagnétiques. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur des développements et approches, qui doivent être maintenant intégrés afin de permettre leur exploitation dans un cadre MBSE. Ce chapitre présente donc l'implémentation de la combinaison de ces contributions au sein de l'approche globale « SAMOS » (Architecture spatiale basée sur la multiphysique et l'organisation des systèmes), illustrée sur le cas d'étude de l'EVPT décrit au Chapitre 3.

La première partie de ce travail a consisté à adapter l'approche SAMOS initiale (Barbedienne et al., 2015a) aux besoins des experts CEM. Puis, nous présentons l'implémentation de nos développements au sein de l'outil Sketcher 3D EM, en s'appuyant sur la transformation de modèles et le transfert de paramètres entre les 3 environnements de conception (SysML, 3D et simulation/calculs), et en s'appuyant sur le scénario de la chaîne de traction d'un véhicule électrique.

I. Adaptation de l'approche SAMOS

L'approche MBSE (Ingénierie des systèmes basée sur les modèles) SAMOS (Barbedienne et al., 2015a) permet d'évaluer le comportement physique d'une architecture 3D tout en répondant aux attentes des équipes multidisciplinaires lors de la phase de préconception, pour réduire les délais et les coûts de conception. En effet, ce processus (Figure 11 du Chapitre 1.II) commence tout d'abord par la spécification, par les architectes Système, dans l'environnement SysML de toutes les exigences géométriques et multiphysiques nécessaires auxquelles devra répondre l'architecture de concept évaluée. Ensuite, ces exigences sont automatiquement transférées dans un modèle 3D et un modèle de simulation via un processus de transformation des modèles. A cette étape, les architectes 3D peuvent compléter ou modifier l'architecture de concept proposée (par exemple en affectant un volume ou en repositionnant les composants), afin de répondre aux exigences géométriques précédemment définies par les architectes Système. Les équipes de simulation peuvent alors ajouter de nouvelles exigences physiques nécessaires afin d'évaluer et simuler l'architecture 3D proposée en se basant sur des modèles analytiques. Finalement, toutes les informations du modèle 3D et les résultats de simulation associés sont retracées, via une transformation inverse du modèle, vers le modèle SysML pour conserver les informations justifiant la sélection de l'architecture finale auprès de l'architecte Système. Cette approche permet de préserver la traçabilité et la cohérence de la conception au travers du lien établi entre les processus d'IS et les processus de simulation, et notamment par l'échange des spécifications et la transformation de modèles appropriés (données géométriques et physiques). Barbedienne et al. avaient déjà implémenté et validé l'approche SAMOS pour évaluer l'architecture 3D sous contraintes géométriques et thermiques dans un sketcher 3D thermique (Barbedienne et al., 2015b), mais n'avaient pas adressé les autres contraintes multiphysiques rencontrées couramment dans les systèmes mécatroniques, telles que les IEM ou la dynamique.

C'est pourquoi, nos travaux de recherche ont porté sur l'extension de ces travaux aux IEM et aux contraintes dynamiques (Kharrat et al., 2017). Par manque de temps, nous avons dû concentrer nos efforts sur l'intégration de cette approche MBSE pour l'évaluation de l'architecture 3D sous contraintes EM. Pour pouvoir répondre aux besoins des experts CEM, nous proposons alors de modifier légèrement l'approche SAMOS pour préserver les environnements de travail de chaque

inter-acteur (Figure 71), notamment pour les experts métiers (CEM) qui pourront ainsi travailler dans leur environnement de modélisation/simulation.

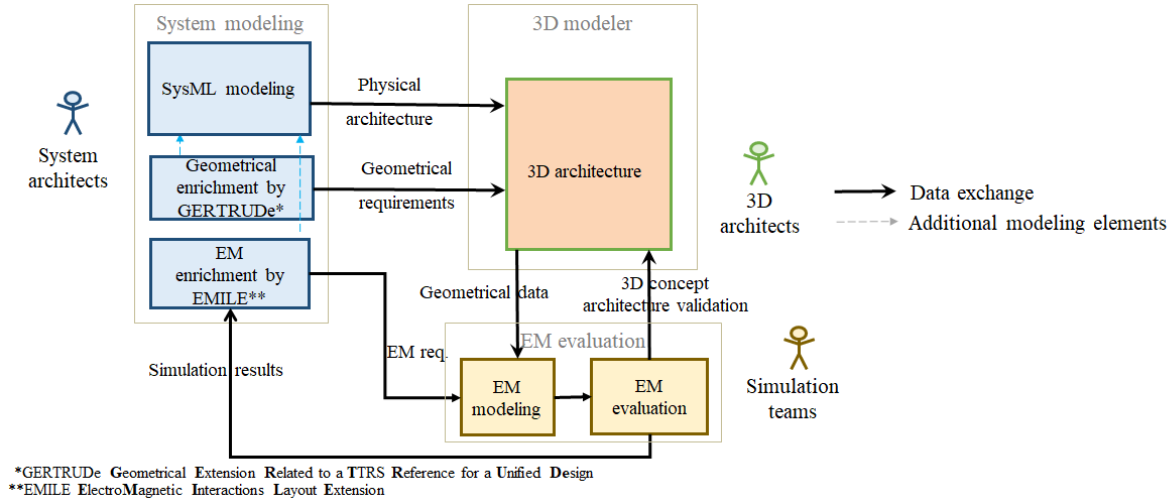


Figure 71 : Adaptation de l'approche SAMOS pour les IEM

En effet, l'évaluation des IEM, dès les premières phases de conception, permettra à la fois d'éliminer les architectures de concept potentielles susceptibles de générer de nombreux risques d'IEM et de mieux cibler les tests expérimentaux à réaliser (Günsaya et al., 2003). Par rapport aux contraintes thermiques qui peuvent être modélisées par des résistances thermiques, ou avec des équations linéaires que les experts peuvent enrichir avec certains attributs complémentaires ou des non-linéarités dans des modèles analytiques pour rendre leur modèle plus réaliste, la difficulté supplémentaire de la modélisation EM réside dans le fait que les nombreux couplages EM existants requièrent souvent des méthodes et outils dédiés pour évaluer quantitativement les IEM qui dépendent non seulement de l'architecture 3D des composants mais également des paramètres électriques de l'architecture E/E susceptibles de provoquer des phénomènes émergents non linéaires. C'est pourquoi nous avons proposé d'adapter SAMOS en réalisant l'évaluation des IEM dans un outil choisi par l'expert CEM.

Nous allons voir comment les développements présentés aux Chapitre 3 et Chapitre 4 s'insèrent dans l'approche SAMOS grâce à leur implémentation au sein du sketcher 3D EM, et l'illustration du cas d'étude de l'EVPT décrit au Chapitre 2.

II. Implémentation du processus global dans le sketcher 3D EM

A. Sketcher 3D EM

Le processus global du sketcher 3D EM, présenté dans la Figure 72, s'appuie sur l'intégration de deux extensions SysML. L'extension GERTRUDE (Geometrical Extension Related to TTRS Reference for a Unified Design), développée par R. Barbedienne, permet d'enrichir la sémantique de SysML en géométrie et donc de spécifier les exigences relatives à la forme et position des composants, tandis que la nouvelle extension EMILE (ElectroMagnetic Interactions Layout Extension) permet de décrire les IEM et de générer les exigences EM associées nécessaires aux autres activités d'évaluation d'architecture 3D de concept. Cette plateforme présente également les outils et les modules développés afin de supporter la méthodologie proposée et d'assurer la cohérence et la traçabilité entre les modèles. Ainsi grâce à ces deux extensions SysML, les spécifications des contraintes du système peuvent générer la modélisation géométrique dans l'outil 3D de CAO et la modélisation EM par simulation ou calcul intégrant une analyse topologique

3D EM pour assurer la cohérence des données entre les trois environnements (SysML-3D-Modelica).

1. Exigences

La spécification et la modélisation des couplages EM ont été réalisées sur le groupe motopropulseur du véhicule électrique Renault TWIZY 80 (Figure 73), en prenant en compte la géométrie des composants et les contraintes EM, afin de valider la pertinence de l'ensemble des données intégrées dans l'extension SysML EMILE.

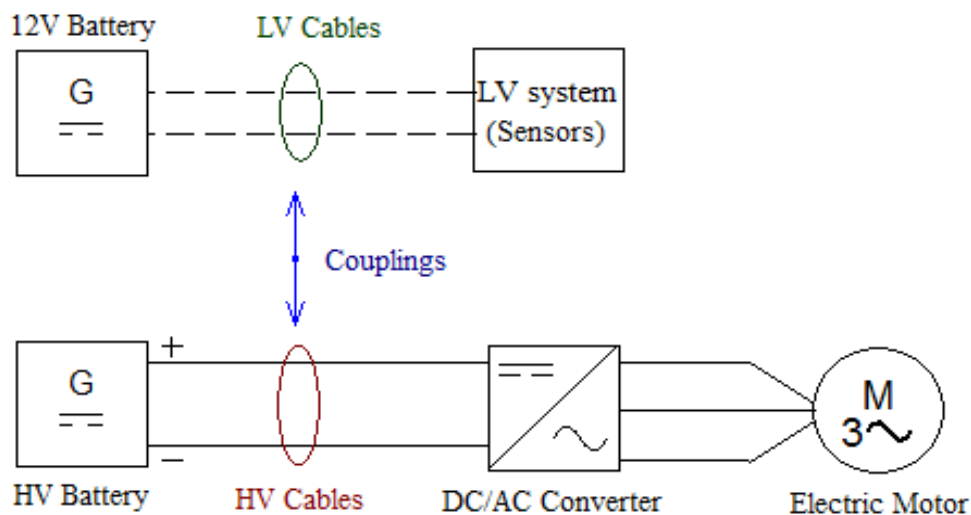


Figure 73 : Architecture de la chaîne de traction de la Twizy80.

Conformément à l'approche MBSE, l'évaluation des couplages d'IEM porte sur certains composants et certaines propriétés de l'environnement, et les résultats quantitatifs doivent être comparés aux valeurs limites EM acceptables. Par conséquent, les architectes du système doivent d'abord spécifier toutes ces exigences et la modélisation EM dans un environnement familier (l'extension SysML EMILE), avant de procéder aux évaluations qualitatives et quantitatives.

Lors de la phase de conception, l'extension SysML EMILE permet ainsi de spécifier certaines exigences physiques et géométriques afin de définir les contraintes à respecter par l'architecture du système : paramètres géométriques des composants E/E (forme, dimensions, position 3D, etc.), leurs propriétés électriques (telles que : fréquence, tension, courant) et leurs propriétés physiques EM (propriétés des matériaux, niveaux d'émission/immunité/spectre en fonction de la fréquence). À cette étape, un ensemble d'exigences supplémentaires peut être défini comme la spécification de contraintes géométriques (ex : parallélisme, contact...) ou règles métiers (par exemple, une distance de ségrégation afin d'imposer une distance minimale entre deux composants E/E). Ainsi, nous avons défini, en fonction des besoins des clients, les exigences du scénario EVPT en se basant sur les compétences et les normes des experts en CEM. Ces exigences comprennent les propriétés EM des composants, les valeurs limites spécifiées par les normes, les sollicitations physiques, les limites minimales et maximales admissibles et enfin les informations géométriques (géométrie des composants et contraintes de positionnement relatif). L'ensemble de ces exigences EM et géométriques est synthétisé dans le Tableau 12. Ces exigences initiales sont dérivées de la littérature disponible sur les composants et les caractéristiques électriques de l'EVPT (Mardiguian, 2003), qui ont été estimées lorsqu'elles n'étaient pas disponibles.

Tableau 12 : Exigences initiales du scénario d'EVPT

Paramètres				Valeurs
Tension HT nominale (V_s)				$V_s = [46V, 58V]$
Puissance d'immunité des composants victimes				$P_C = 18 \text{ dBm} = 63 \text{ mW}$
Intensité HT maximale				$I_{smax} = 360 \text{ A}$
Plage de fréquence nominale				$f = [100 \text{ Hz}, 1 \text{ MHz}]$
Tension limite du composant victime				$Vv_{limit} = 0.2V$
Paramètres géométriques	$\varnothing$	$\varnothing_{\text{câble HT}} \approx 8 \text{ mm}$	$\varnothing_{\text{câble BT}} \approx 4 \text{ mm}$	Diamètre du câble HT/ BT
	L	$L_{\text{câble HT}} = L_{\text{câble BT}} \approx 2m$		Longueur du câble HT/ BT

Un extrait de ces exigences EM pour le scénario EVPT est présenté dans un diagramme d'exigences sur la Figure 74.

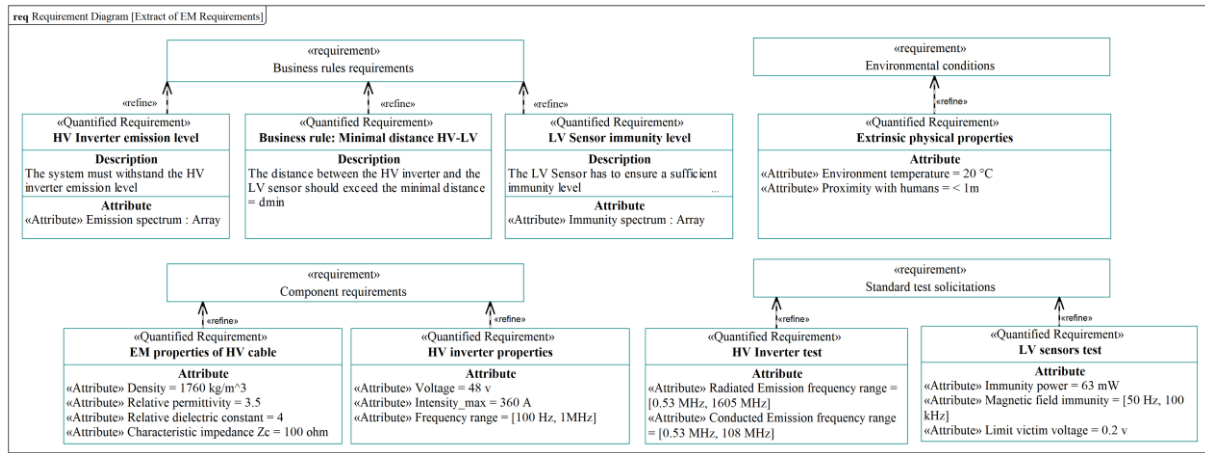


Figure 74 : Extrait des exigences physiques de l'architecture de l'EVPT.

2. Modélisation géométrique SysML- 3D

a) Modélisation géométrique en SysML

Concernant les exigences géométriques, l'extension GERTRUDE incluse dans EMILE permet de définir la forme et dimensions des composants dans un diagramme d'assemblage. La Figure 75 présente ce diagramme pour l'architecture de la Twizy incluant les différents composants E/E avec leurs informations géométriques 3D.

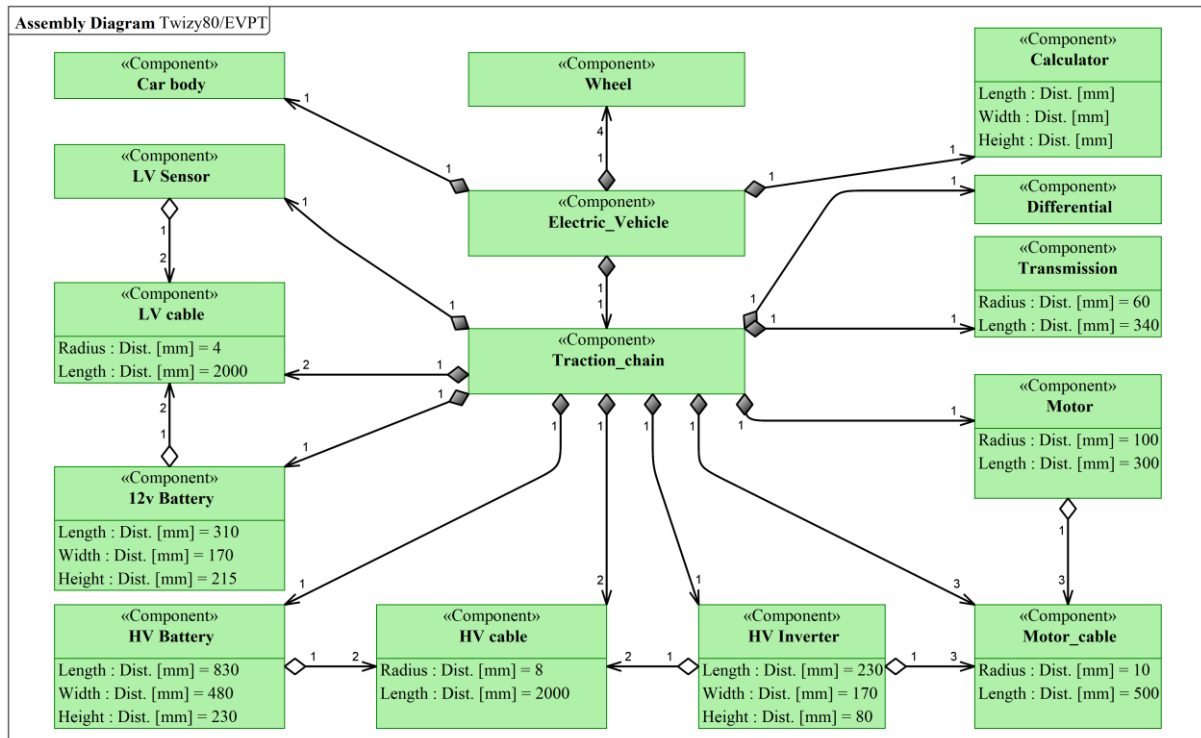


Figure 75 : Architecture de la Twizy 80 avec un focus sur l'EVPT avec définition de la géométrie des composants E/E

b) Connexion SysML- Modélisation 3D

Cette architecture, géométriquement enrichie, peut être ensuite automatiquement transférée dans l'environnement 3D de l'outil FreeCAD via des règles de transformation de modèles. Ces règles sont basées sur des scripts qui permettent de générer directement les composants 3D définis avec leurs dimensions géométriques décrites dans le modèle Système enrichi par l'extension SysML GERTRUDE. Cette transformation de modèle commence par l'importation des composants géométriques présents dans le diagramme d'assemblage via le bouton "importer à partir de SysML" (développé dans l'environnement 3D), puis par la génération de la géométrie des composants souhaités dans l'environnement 3D, afin de garantir la cohérence de ces exigences (Figure 76). En cas de modifications supplémentaires de l'environnement 3D (forme, dimensions, positions, contraintes, etc.), la traçabilité de ces changements pourra être finalement assurée par un simple clic sur le bouton «exporter vers SysML» renvoyant ainsi les modifications au modèle SysML.

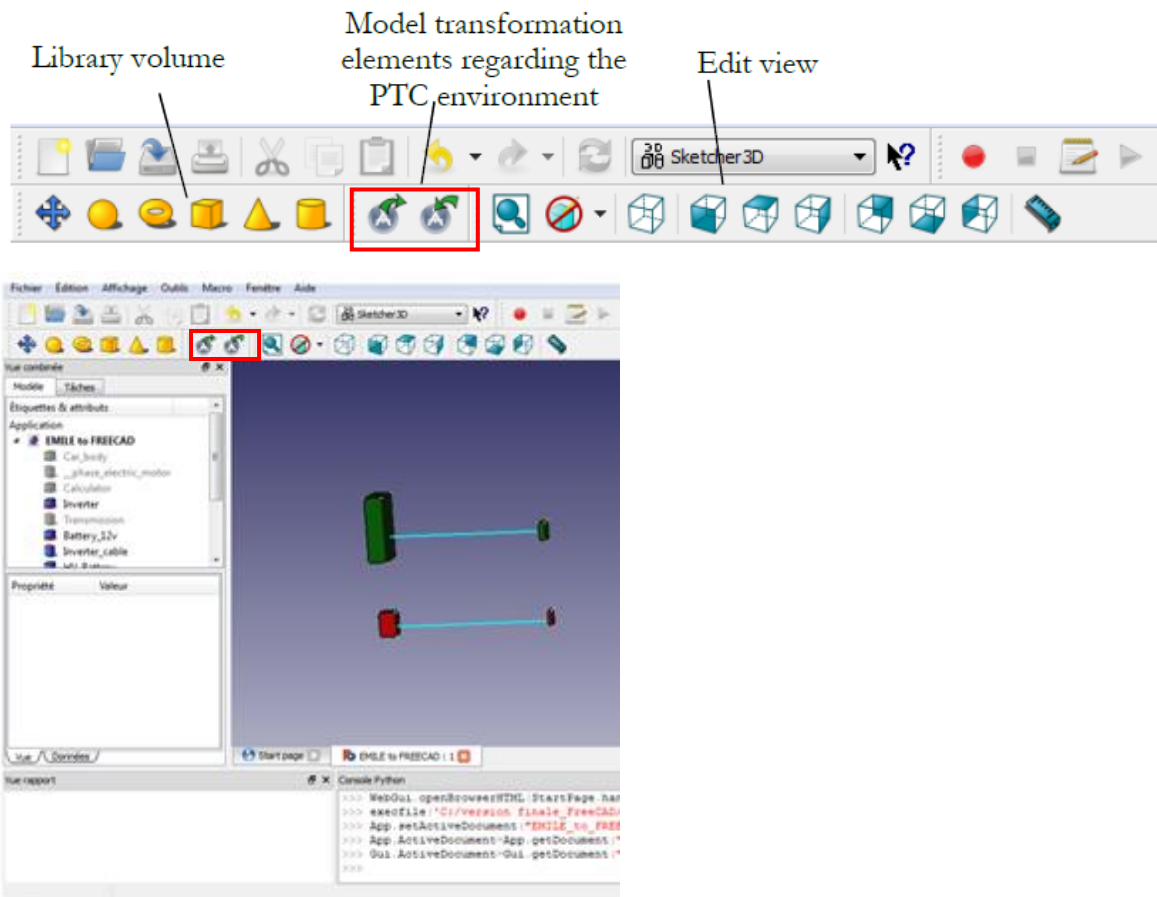


Figure 76 : IHM pour l'importation de modèles SysML dans l'environnement 3D (FreeCAD) et export correspondant.

Ainsi, cette transformation de modèle permet de construire automatiquement l'architecture 3D (comprenant la géométrie prédéfinie et les contraintes de position des composants 3D) pour permettre aux architectes 3D de mettre à jour leur position et leurs dimensions si nécessaire (Figure 77).

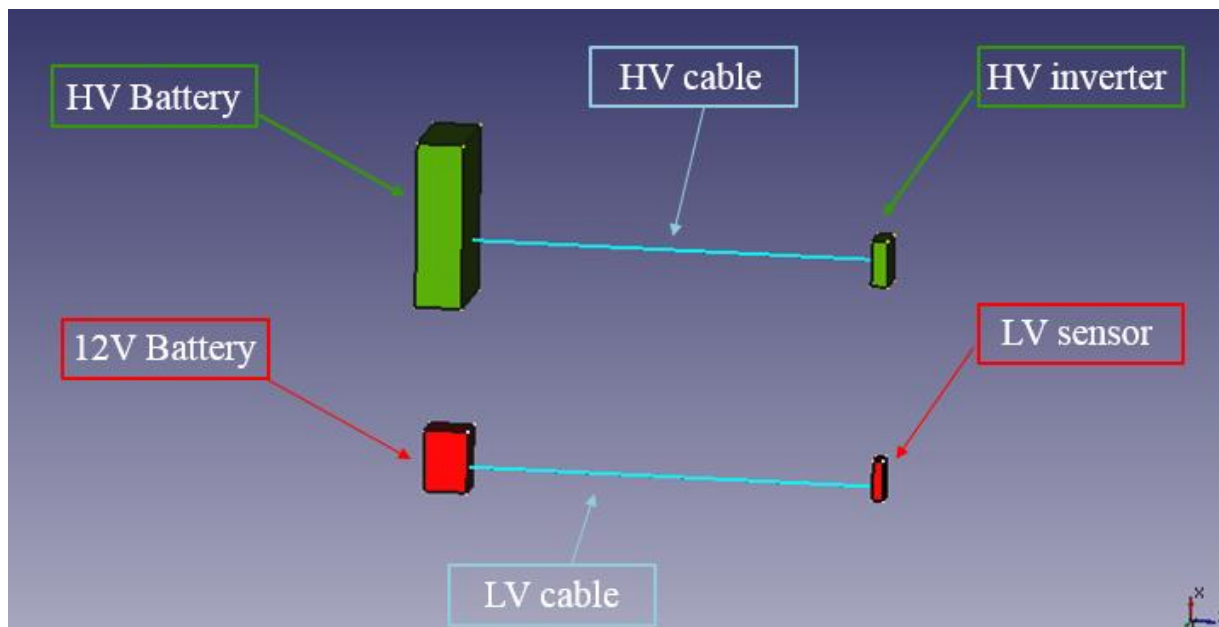


Figure 77 : Architecture 3D de l'EVPT générée automatiquement de l'environnement SysML vers l'environnement FreeCAD

3. Modélisation EM

Dans cette partie, nous présentons, à titre d'exemple, la modélisation d'une IEM entre deux composants de l'architecture EVPT : le couplage par diaphonie (inductive en mode différentiel et capacitive en mode commun) entre deux câbles (issus des circuits HT et BT). En effet, cette IEM dépend fortement de la position 3D des composants, notamment au travers de l'inductance mutuelle et de la capacité parasite générées, dont les expressions simplifiées sont données en

$$(25M_{12} = \frac{\mu}{4 \times \pi} \times L \times \ln \left(1 + \left(\frac{2 \times h}{s} \right)^2 \right) \quad (25) \text{ et } (26).$$

$$M_{12} = \frac{\mu}{4 \times \pi} \times L \times \ln \left(1 + \left(\frac{2 \times h}{s} \right)^2 \right) \quad (25)$$

$$C_{12} = \frac{\epsilon \times L \times \ln \left(1 + \left(\frac{2 \times h}{s} \right)^2 \right)}{\left(\ln \left(\frac{4 \times h}{d} \right) \right)^2} \quad (26)$$

Avec:

- μ : perméabilité magnétique absolue du milieu entourant le câble ;
- ϵ : permittivité électrique absolue du milieu ;
- L : longueur des câbles ;
- h : hauteur entre les câbles et la masse de retour commune ;
- s : distance entre les câbles ;
- d : diamètre du câble.

Ces équations prennent en compte les hypothèses suivantes :

- la longueur des câbles est électriquement courte : leur longueur physique est courte par rapport au quart de longueur d'onde (λ) du signal EM qu'ils véhiculent ($L < \frac{\lambda}{4}$) ;
- tous les câbles ont des propriétés identiques (géométriques et physiques).

Le choix de ces équations simplifiées pour l'exemple s'appuie sur le fait que :

- nous adressons la phase de préconception, et
- qu'il n'impacte pas les travaux et contributions que nous proposons.

a) Modélisation en SysML

Nous avons vu dans le Chapitre 3 que l'extension SysML EMILE permet de définir des exigences physiques EM, mais également de modéliser le comportement EM des composants. En effet, elle permet d'abord de décrire les IEM d'une architecture en définissant les média interactifs impliqués dans ce couplage au sein d'un diagramme BDD Physique. La Figure 78 détaille ce diagramme dans le cas de l'EVPT, en présentant les composants impliqués dans le couplage de diaphonie considéré.

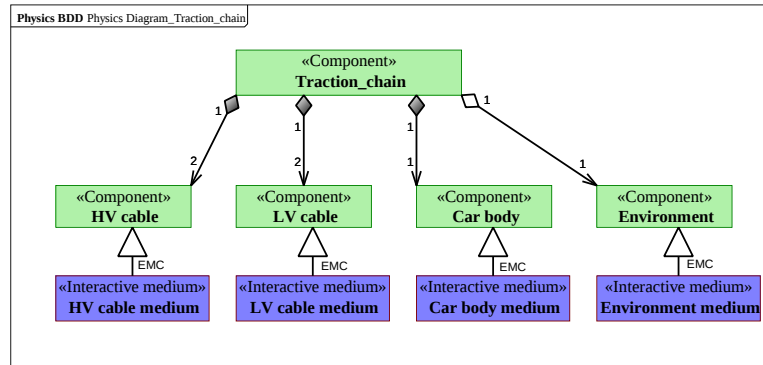


Figure 78 : Diagramme BDD physique des composants impliqués dans le couplage d'IEM considéré (diaphonie)

Ensuite, les principaux éléments de modélisation de la source d'IEM générée par l'onduleur (par diaphonie), via une ligne de transmission (composant le câble HT), sont décrits à la Figure 79.

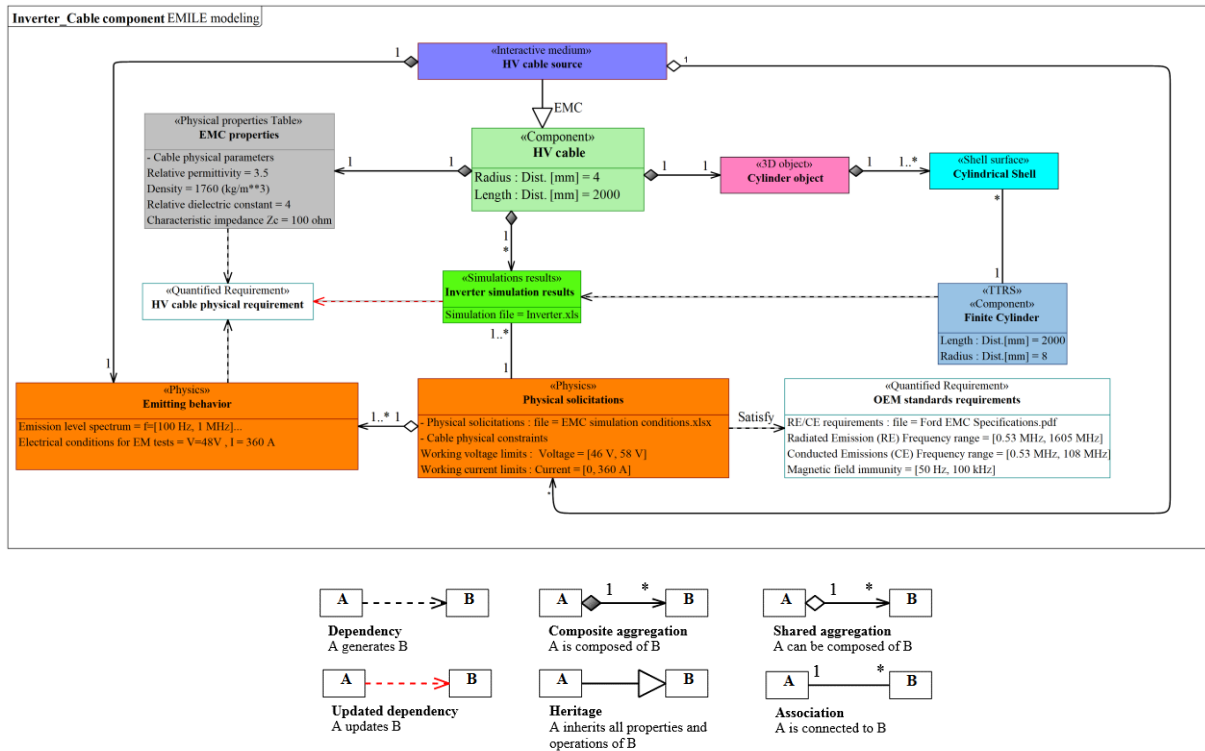


Figure 79 : Description des artefacts EMILE liés au câble HT (raccordé à l'onduleur)

Comme le couplage EM de diaphonie, dans lequel le câble de l'onduleur est impliqué, dépend de sa géométrie et de la position 3D des composants impliqués (câbles HT et câbles LV), certaines informations géométriques, via l'extension SysML GERTRUDe, ont été ajoutées à cet élément d'architecture pour générer le « composant » associé (qui inclut ces éléments géométriques). Il est composé d'un objet 3D (ici un cylindre pour représenter le câble), lui-même constitué d'une enveloppe cylindrique associée au TTRS du cylindre fini, pour gérer sa position.

En parallèle, le medium interactif *HV cable source* est un « composant » particulier (interactif) défini par le comportement EM du composant *HV cable*, en tant que source EM dans une IEM donnée (ici la diaphonie) : il contient toutes les informations liées à son comportement émetteur « Emitting behavior » décrivant par exemple le spectre des niveaux d'émissions EM dans un environnement donné (de tension, courant et fréquence). Les propriétés physiques intrinsèques

« EMC properties » du câble HT permettent de spécifier les caractéristiques EM du câble HT tandis que la description des sollicitations physiques « Physical solicitations » est éventuellement définie pour décrire les conditions de simulation appliquées au câble HT pour l'étape d'évaluation quantitative du risque d'IEM.

Pour décrire le couplage de diaphonie, nous utilisons des diagrammes IBD physiques qui contiennent un medium de couplage de diaphonie (respectivement inductive « *Inductive crosstalk* » sur la Figure 80 et capacitive « *capacitive crosstalk* » sur la Figure 81). Ces media de couplage contiennent respectivement les paramètres d'inductance mutuelle M12 et de capacité parasite C12. Les liens entre le medium de couplage et les media interactifs (les câbles HV et LV), voire avec d'autres composants, comme la carrosserie de la voiture en tant que masse (puisque'on suppose un couplage en mode commun) sont établis via des ports EM spécifiques qui dépendent des flux de propagation impliqués : des ports RI pour les interactions par rayonnement, les ports CI pour les interactions conduites et les ports EI pour les interactions électriques.

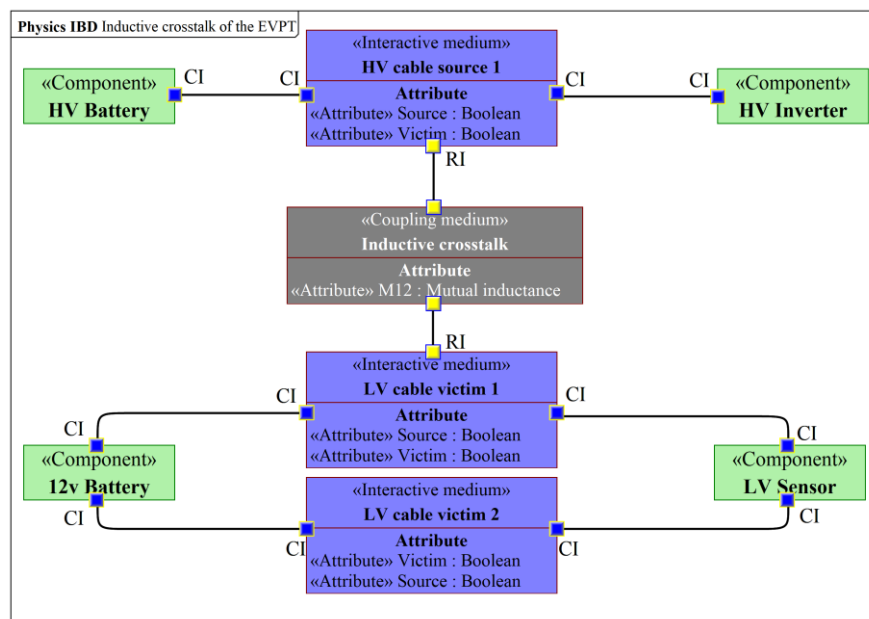


Figure 80 : Diagramme IBD physique pour la définition du couplage par diaphonie inductive

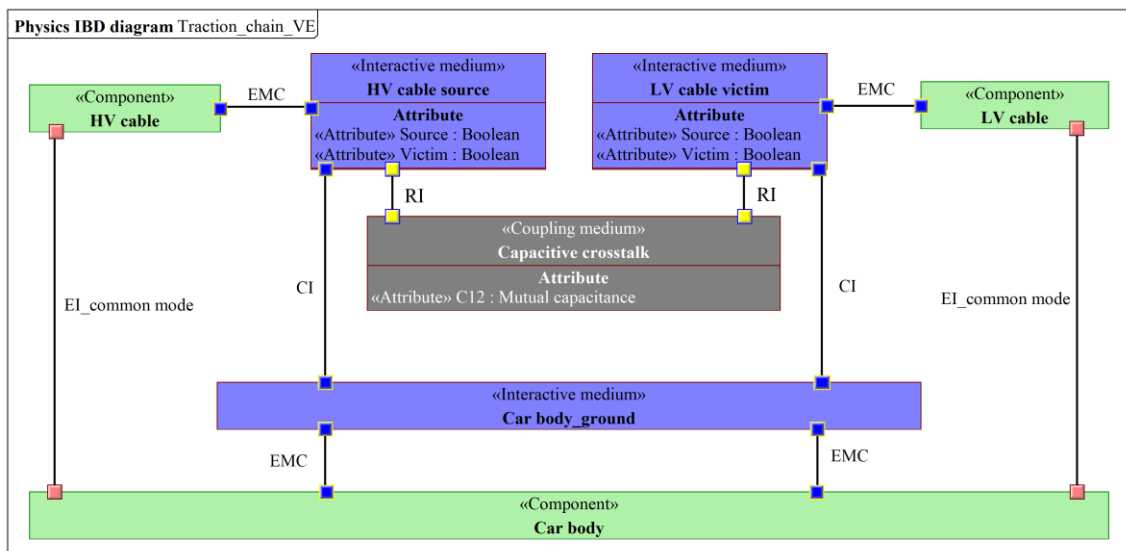


Figure 81 : Diagramme IBD physique pour la définition du couplage par diaphonie capacitive.

Par ailleurs, les mediums de couplage contiennent les équations de diaphonie (inductive ou capacitive) en fonction des paramètres géométriques des câbles et peuvent être utilisés dans un diagramme paramétrique physique (PPD) pour exprimer la contrainte physique correspondante entre les media interactifs impliqués (par exemple entre *HV cable source* et *LV cable victim* dans le cas de la diaphonie capacitive (Figure 82), en lien avec les contraintes géométriques de position associées.

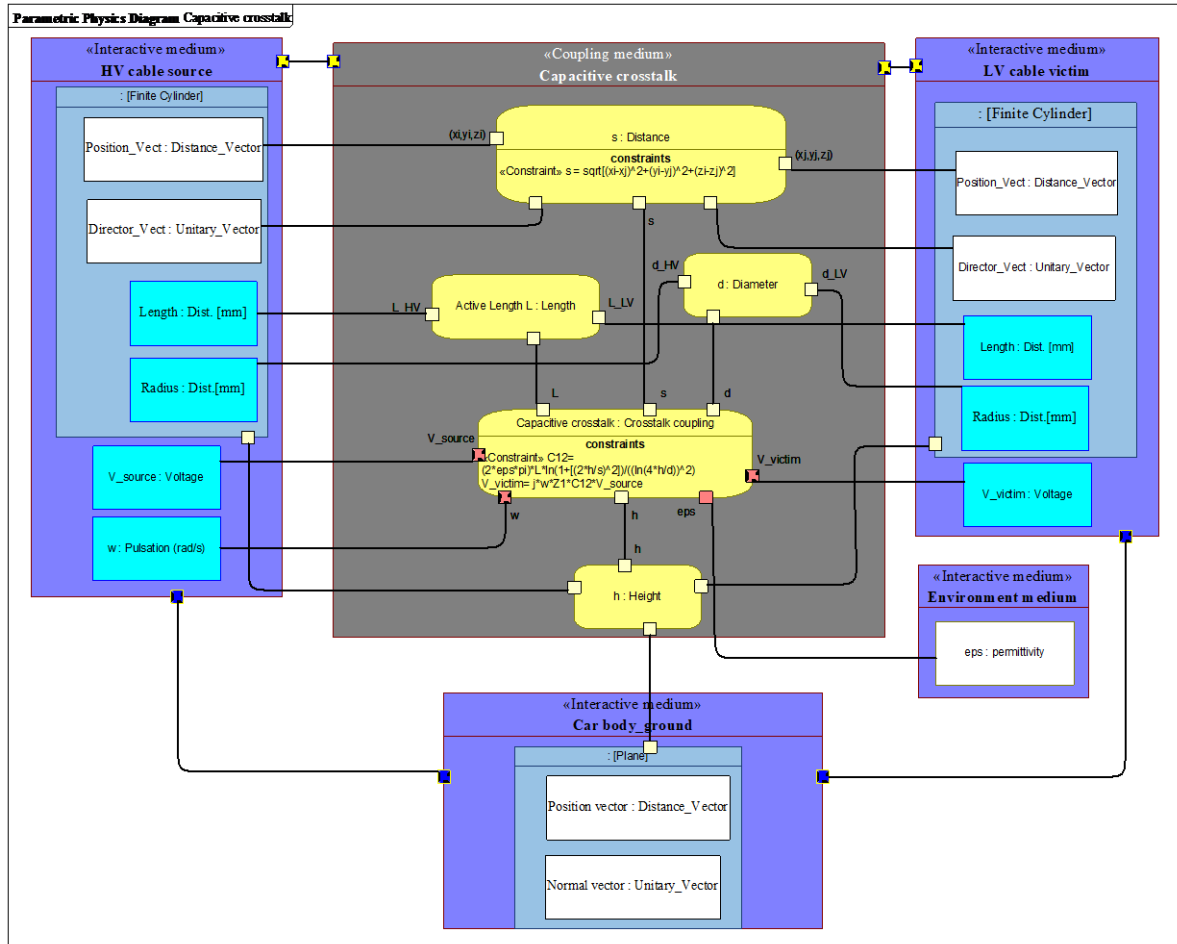


Figure 82 : Exemple de diagramme paramétrique physique (PPD) pour la diaphonie capacitive en MC.

Pour la suite, nous avons considéré dans notre scénario que le couplage par diaphonie inductive était prédominant devant le couplage par diaphonie capacitive.

b) Connexion SysML-Modélisation EM

La transformation ou la fédération de modèles entre SysML et Modelica ou Matlab/Simulink peut être réalisée via l'utilisation de divers outils (Cameo/Model Center/Syndia ...).

Tandis que la transformation de modèles SysML s'appuie sur un alignement sémantique des langages respectifs, généralement implémenté par le développement de profils UML ou extensions SysML, d'autres techniques comme la fédération de modèles permettent d'assurer l'interopérabilité des modèles via le partage de paramètres communs.

Comme l'outil de modélisation SysML (PTC Integrity Modeler), utilisé pour implémenter les extensions GERTRUDE et EMILE, ne possède pas en propre de fonctionnalités de transferts/transformations de modèles vers des environnements de simulation (tel que Modelica ou Matlab/Simulink), ce processus n'a pas pu être implémenté directement dans le sketcher 3D

EM, même si cela pourrait faire l'objet d'un développement informatique ultérieur. Pour autant, nous avons étudié les différentes possibilités existantes, pour en préciser le périmètre.

- Transformation de modèles

Pour la transformation SysML-Modelica, les informations définies dans le Tableau 13 par Paredis et al. (Paredis et al., 2010), définissent les correspondances de langage entre les différents éléments SysML et Modelica nécessaires pour la transformation des modèles de l'environnement Système (SysML) vers des modèles de simulation compréhensibles (Modelica).

Tableau 13 : Comparaison entre les éléments/ la sémantique et les diagramme SysML et Modelica (Paredis et al., 2010)

Diagram	Modelica	Internal Block	Parametric	Activity
Model Definition	Model	Block	Constraint Block	Activity
Model Usage	Component	Part Property	Constraint Property	Action
Port Definition	Connector	Block, Value Type, Flow Spec.	Value Type	Block, Value Type
Port Usage	Component	Flow Port	Parameter	Object Node
Edge	Connection	Connector	Binding Connector	Object Flow

Plus récemment, pour faciliter la transformation de modèles SysML vers des modèles de simulation, NoMagic, récemment racheté par Dassault Systems, a défini avec l'OMG (Object Management Group) une nouvelle spécification/norme SysPhS (SysML Extension for Physical Interaction and Signal Flow Simulation), qui définit le mappage des éléments SysML dans les modèles Modelica et Simulink (y compris Stateflow, Simscape) (OMG, 2018). Elle est mise en œuvre sous la forme d'une transformation unidirectionnelle de blocs SysML sélectionnés et prend en charge à la fois la boîte noire et/ou l'implémentation complète qui comprend les paramètres, les machines d'état, les structures internes avec ports, les interfaces et les connecteurs. Des modèles SysML purs non annotés peuvent être exportés, l'utilisation du profil SysPhS ou de bibliothèques n'est pas nécessaire pour les cas de base comme les structures de boîte noire. Les modèles et diagrammes exportés sont prêts à être ouverts dans les outils Simulink ou Modelica pour des améliorations ultérieures de la mise en œuvre, le débogage, la simulation et la génération de code.

- Cameo Systems Modeler v19.0 SP3

S'appuyant sur cette spécification, cette transformation a été implémentée dans l'outil Cameo Systems Modeler v19.0 SP3. Ainsi chaque élément (présenté dans le diagramme physique paramétrique, Figure 82) peut être modélisé dans un diagramme interne de block (ibd) contenant les équations physiques et incluant les paramètres géométriques des composants définis avec GERTRUDE/EMILE. Puis, une fois exporté, le modèle en Modelica ou en Simulink, permet de modifier et d'ajouter des blocs spécifiques dans l'environnement de simulation pour paramétrer la simulation.

Dans la Figure 83, nous avons modélisé un modèle de couplage inductif (équivalent au diagramme de la Figure 80) pour le scénario EVPT dans un diagramme ibd. Ce modèle se compose de deux circuits (source et victime) qui sont reliés par une mutuelle inductance M_{12} .

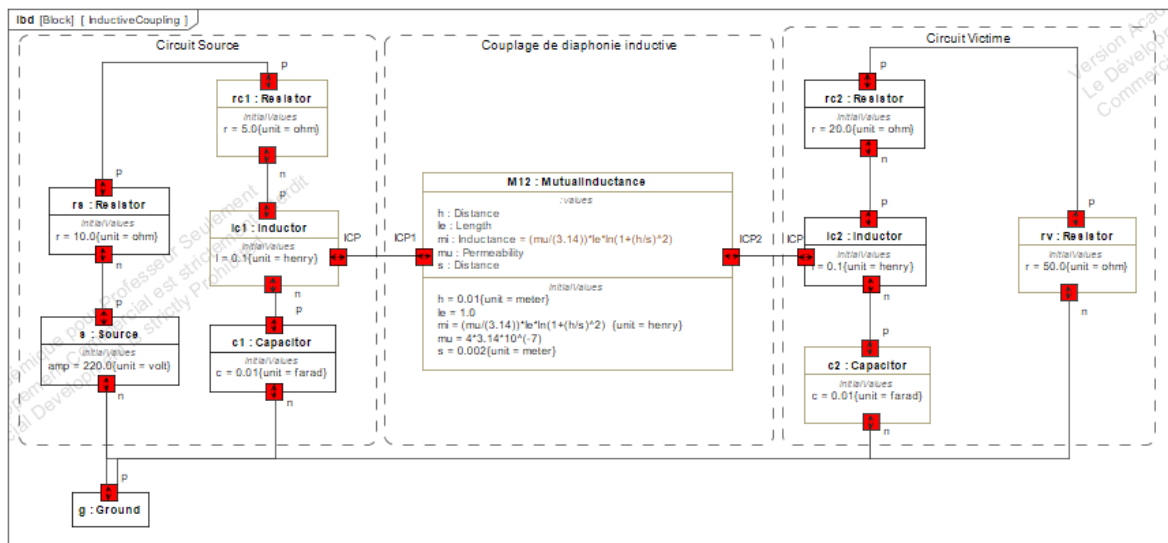


Figure 83 : Diagramme ibd du couplage inductif sous Cameo

Chacun des éléments du circuit électrique peut être représenté par un diagramme paramétrique contenant les équations de couplage. Par exemple, la mutuelle inductance et l'inducteur sont modélisés dans un diagramme paramétrique comme le montrent la Figure 84 et la Figure 85. Les ports en jaune et en rouge correspondent respectivement aux ports géométriques et aux ports électriques physiques.

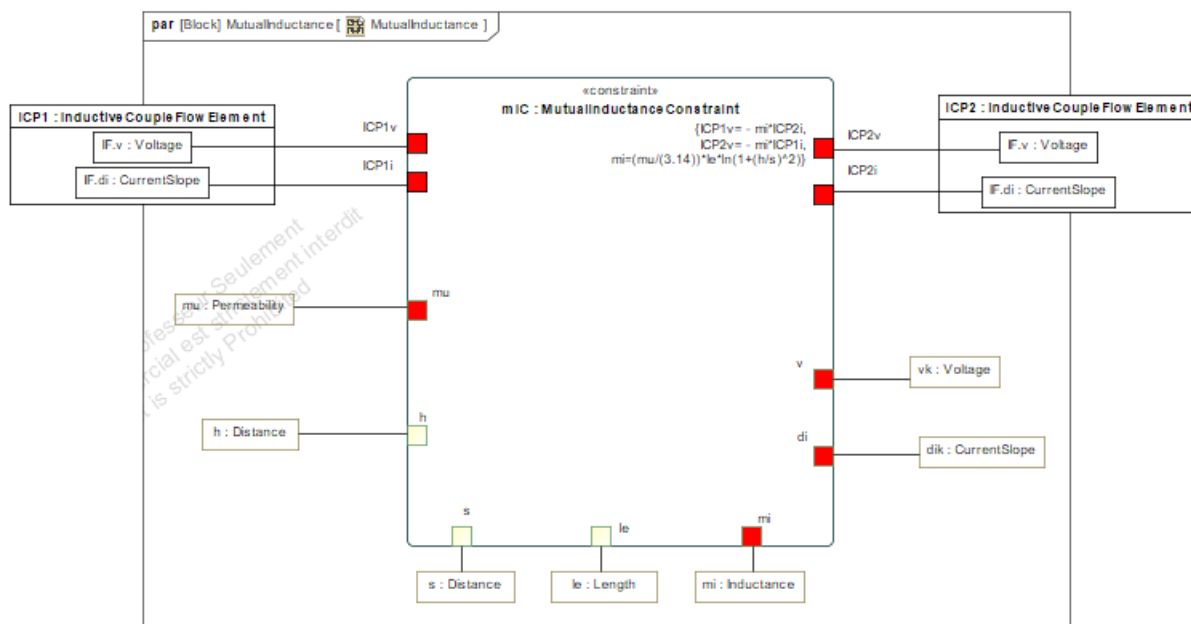


Figure 84 : Diagramme paramétrique de l'inductance mutuelle sous Cameo

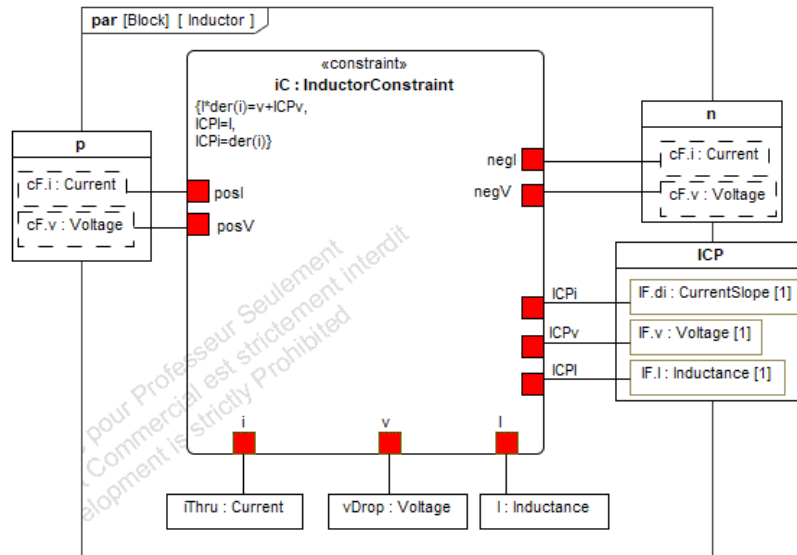


Figure 85 : Diagramme paramétrique de l'inducteur sous Cameo

L'étape suivante consiste alors à exporter le modèle complet SysML vers Modelica sous forme d'un modèle textuel contenant toutes les informations physiques et géométriques correspondantes (Figure 86).

```

model Inductor
  extends TwoPinElectricalComponent;
  Inductance l;
equation
  l*der(iThru)=vDrop+ICP.v;
  ICP.l=l;
  ICP.di=der(iThru);
  0=p.i+n.i;
  vDrop=p.v-n.v;
  iThru=p.i;
end Inductor;

model Ground
equation
  p.v=0;
end Ground;

model MutualInductance
  extends TwoInductiveCouplePin;
equation
  ICP1.v=-mi*ICP2.di;
  ICP2.v=-mi*ICP1.di;
  mi=(mu/(3.14))*le*ln(1+(h/s)^2);

```

Figure 86 : Aperçu de code Modelica généré directement de l'outil Cameo

Cette fonctionnalité prometteuse requiert néanmoins une grande rigueur de modélisation pour que la transformation soit opérationnelle. Toutefois, en supposant de transposer les extensions SysML GERTRUDe et EMILE dans Cameo, cette fonctionnalité permettrait d'automatiser le transfert des modèles EM depuis EMILE vers un environnement Modelica, facilitant la cohérence des données au sein de SAMOS.

- Fédération de modèles
 - Model Center MBSE®

ModelCenter est un outil d'intégration des processus et d'optimisation de la conception (PIDO). Le module ModelCenter MBSE® permet aux utilisateurs de relier les modèles paramétriques SysML définis dans Rational Rhapsody® ou MagicDraw®, ou de SysSim dans PTC Integrity Modeler aux flux d'analyse multidisciplinaire développés dans ModelCenter. Cet outil peut intégrer des outils de simulation comme Simulink® ou OpenModelica (Guizani et al., 2014), voire même des modèles 3D paramétrés pour optimiser le positionnement en fonction de critères d'optimisation. En effet, il génère automatiquement des modèles ModelCenter à partir de diagrammes paramétriques (modèles analytiques), d'activités et de machines d'état en SysML pour les insérer dans l'exécution du flux de travail avec d'autres outils disciplinaires (simulation, 3D ou autres) (Kaslow et al., 2014). L'avantage de cet outil est qu'il permet d'automatiser les flux de travail de simulation (exécution de modèles, intégration de modèles et exploration de l'espace de conception en évaluant différentes configurations de conception) et d'analyser les résultats pour vérifier la conformité aux exigences provenant de SysML grâce au mode MBSE Analyzer (les exigences non satisfaites sont automatiquement mises en évidence). L'IHM semble facile à utiliser et l'outil intègre de nombreux outils disciplinaires, en permettant l'automatisation de la vérification des exigences SysML. Néanmoins, il permet la simulation que de modèles causaux et reste une solution onéreuse (Paredis, 2008), que nous n'avons pas pu tester.

- InterCax / Syndeia®

InterCax propose des solveurs de diagrammes paramétriques en SysML pour plusieurs outils, tout en proposant l'interopérabilité de ces diagrammes avec des logiciels comme Matlab, Mathematica®, OpenModelica. En parallèle, il propose une plateforme logicielle « Syndeia® », pour l'ingénierie intégrée basée sur des modèles, qui permet aux équipes d'ingénieurs de développer et de gérer en collaboration et simultanément un fil numérique pour tout système/produit complexe en fédérant des modèles et des données provenant de divers écosystèmes d'outils de modélisation et de simulation, d'applications d'entreprise et de référentiels de données. En particulier, Syndeia® fournit une passerelle entre SysML (par exemple MagicDraw®, Rhapsody®), et des outils de simulation (Matlab/Simulink®, OpenModelica). Malheureusement, nous n'avons pas trouvé de publications ni pu essayer cette passerelle, qui semble prometteuse, si elle permet de vérifier facilement le respect des exigences quantifiées (géométriques et physiques) d'EMILE via les résultats de simulation de l'évaluation quantitative EM.

c) Modélisation en Modelica

Ainsi, afin de modéliser le comportement EM du couplage par diaphonie inductive entre les composants de l'architecture de l'EVPT, nous nous sommes appuyés sur la modélisation d'un modèle électrique équivalent en Modelica dans l'environnement de simulation (Dymola). La Figure 87 présente le modèle électrique du couplage par diaphonie inductive, qui est composé par deux circuits source et victime qui sont en interaction par une mutuelle inductance M12. Dans le circuit source, on trouve : une tension, une impédance de source (R_s) et une impédance du câble source ($Z_{\text{cable-source}}$). Quant au circuit victime, il comprend une impédance de câble victime ($Z_{\text{cable-victim}}$) et une impédance de charge (R_{load}). L'objectif de cette partie est de calculer la tension aux bornes de l'impédance de charge R_{load} afin d'identifier l'impact du couplage par diaphonie inductive sur le composant victime.

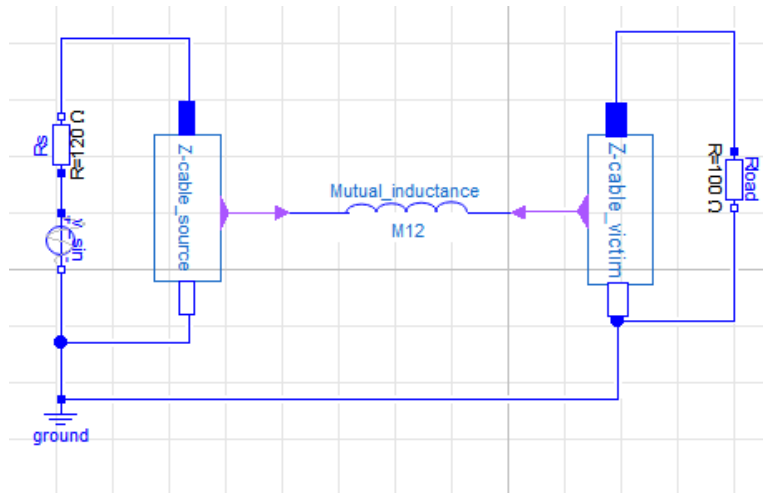


Figure 87 : Modèle électrique du couplage par diaphonie inductive

Ensuite, comme le couplage par diaphonie dépend fortement des paramètres géométriques des composants (dimensions) et notamment de la distance entre les composants en interaction, nous avons intégré dans l'équation de la mutuelle inductance ces paramètres géométriques (tels que par exemple dans notre cas la distance entre les câbles d'un même circuit (source ou victime) et la distance entre les câbles source et victime). Pour les implémenter, nous avons modifié le modèle Modelica afin de les afficher dans une fenêtre (Figure 88). En effet, il suffit simplement de cliquer sur le composant « Mutual_inductance », pour entrer les valeurs de distances entre les composants source et victime nécessaires pour le calcul de la mutuelle inductance.

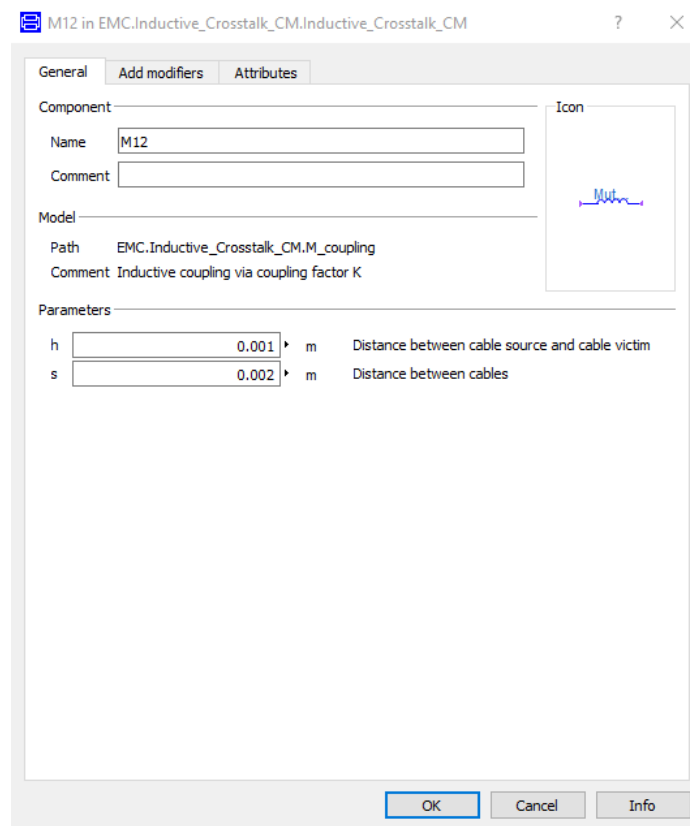


Figure 88 : Aperçu de la fenêtre ajoutée pour l'implémentation des valeurs pour les paramètres géométriques dans le modèle EM.

d) Connexion 3D- Modelica

Pour automatiser le processus SAMOS, il semble intéressant d'extraire les paramètres 3D (géométries et distances) des composants de l'environnement 3D afin de les importer automatiquement dans l'environnement de calcul ou de simulation et effectuer l'évaluation quantitative. Nous avons donc étudié cette possibilité dans les environnements FreeCad/ Dymola.

A partir de l'architecture 3D du scénario générée dans l'environnement 3D de l'outil FreeCAD, les dimensions géométriques des composants 3D peuvent être directement extraites dans un fichier Excel via l'atelier « Spreadsheet » de l'outil FreeCAD. La Figure 89 montre le tableau contenant tous les paramètres géométriques des composants 3D de l'architecture (dimensions et distance entre deux câbles en interaction dans le scénario EVPT).

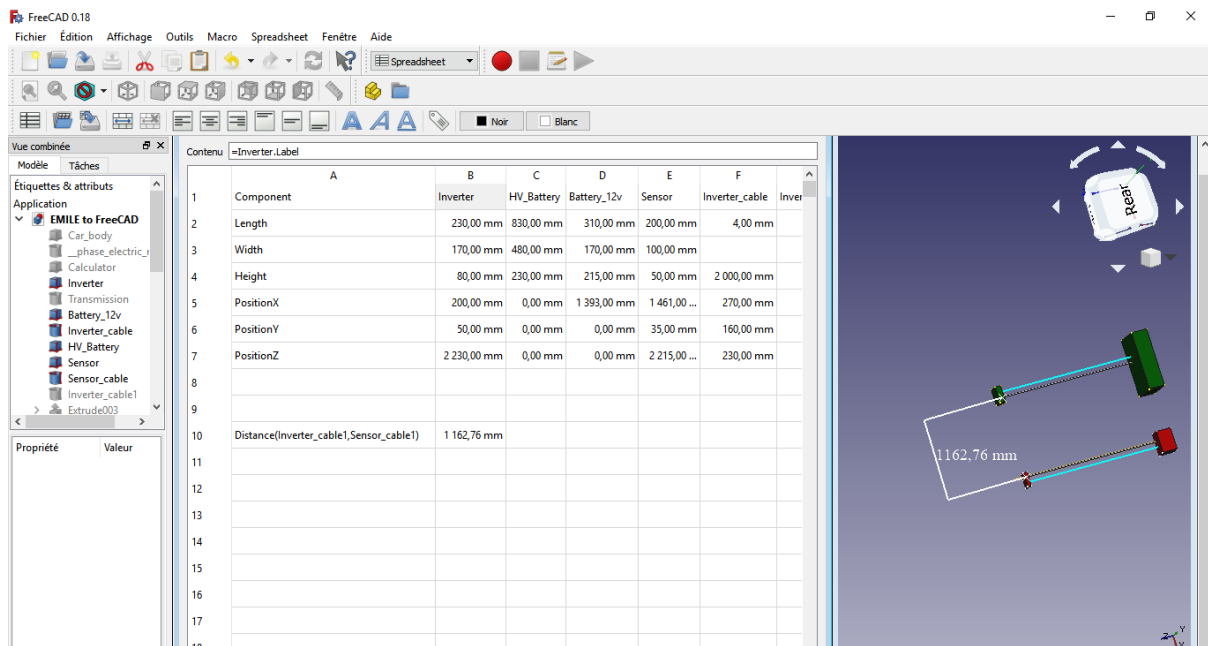


Figure 89 : Aperçu de l'atelier "Spreadsheet" sous FreeCAD

Pour l'export du fichier, il suffit de cliquer sur le Bouton « export to CSV» et de taper l'extension souhaitée (.csv ou .txt) comme montre la Figure 90.

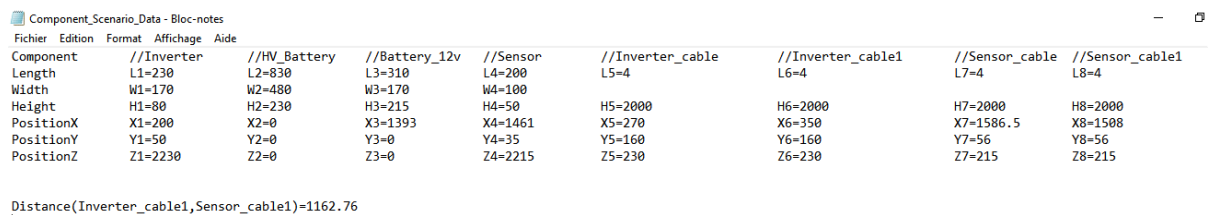


Figure 90 : Fichier (.txt) contenant les paramètres géométriques exportés depuis FreeCAD

Ensuite, afin de pouvoir lire toutes les données du fichier (.txt) dans l'outil Dymola/Modelica, un code textuel sous Modelica permet de facilement modifier le modèle et ainsi d'importer toutes les informations géométriques des différents composants de l'architecture 3D (Figure 91) sous forme de paramètres dans Dymola.

```

model Inductive_model
import Modelica.SIunits;
import Modelica.Utilities.Examples.readRealParameter;
import Modelica.Utilities.Streams;
import Modelica.Utilities.Files;

parameter String file = Modelica.Utilities.Files.loadResource("C://Users/kharzratm/Desktop/Component_Scenario_Data.txt");
parameter SIunits.Length L1 = readRealParameter(file, "L1")
  "Length";
parameter SIunits.Height H1 = readRealParameter(file, "H1")
  "Height";
parameter SIunits.Breadth B1 = readRealParameter(file, "B1")
  "Breadth";
parameter SIunits.Length L2 = readRealParameter(file, "L2")
  "Length";
parameter SIunits.Height H2 = readRealParameter(file, "H2")
  "Height";
parameter SIunits.Breadth B2 = readRealParameter(file, "B2")
  "Breadth";
parameter SIunits.Length L3 = readRealParameter(file, "L3")
  "Length";
parameter SIunits.Height H3 = readRealParameter(file, "H3")
  "Height";
parameter SIunits.Breadth B3 = readRealParameter(file, "B3")
  "Breadth";
parameter SIunits.Length L4 = readRealParameter(file, "L4")
  "Length";
parameter SIunits.Height H4 = readRealParameter(file, "H4")
  "Height";

```

Figure 91 : Code de l'import des paramètres géométriques sous Dymola

Une fois le modèle Modelica généré, on peut alors affecter les valeurs de ces paramètres aux différents composants de l'architecture 3D tout en ajoutant également les paramètres physiques correspondants. Par exemple, dans la Figure 92, en cliquant sur le composant « Sensor_Cable », on peut identifier les paramètres géométriques importés en plus des paramètres physiques.

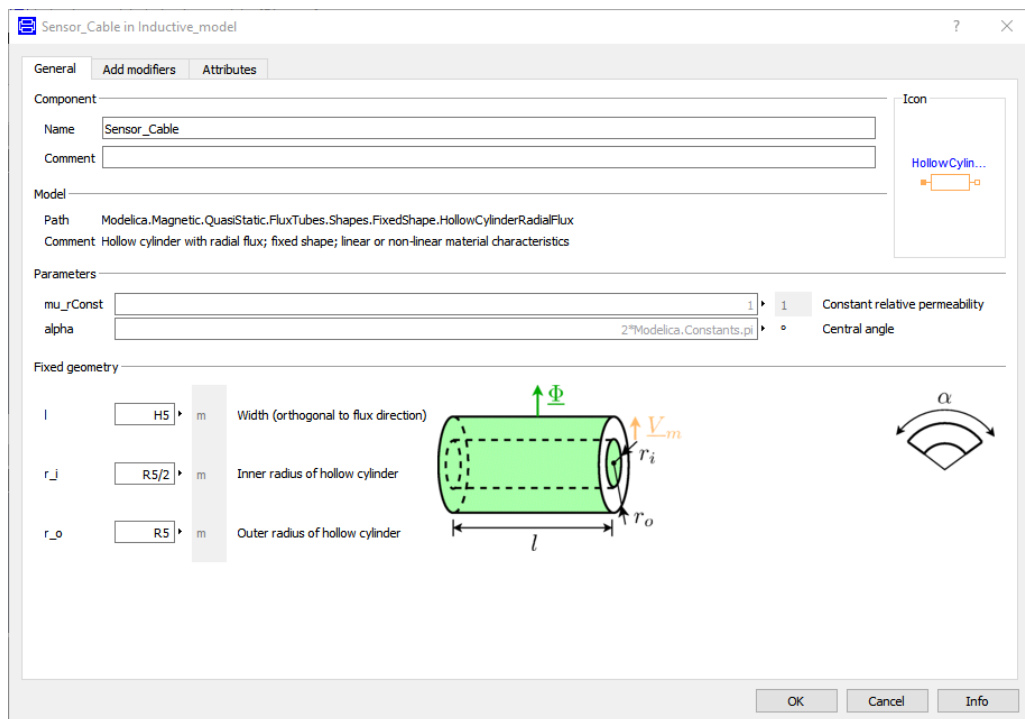


Figure 92 : Affectation des valeurs géométriques pour les composants physiques dans l'outil Dymola

Ce premier travail de développement a permis d'explorer, tester et prototyper certaines transformations de modèles et transfert de paramètres entre les trois environnements. En effet, ces outils commerciaux actuels commencent à proposer des solutions pour pouvoir assurer la cohérence des données et modèles entre plusieurs environnements métiers dans un cadre collaboratif de conception. Pour autant, même si certaines solutions semblent prometteuses, leur implémentation dans le cadre du processus SAMOS a montré certaines difficultés et limites.

C. Intégration de l'évaluation qualitative et quantitative au sein d'un même environnement (Matlab)

L'objectif de ce développement vise à implémenter l'intégration d'une évaluation qualitative et quantitative à partir d'une architecture pouvant provenir de trois environnements (SysML, Modélisation multidisciplinaire et 3D), dans un environnement unique.

Dans cette partie, nous avons implémenté de l'évaluation qualitative et quantitative d'une IEM câble/câble : la diaphonie inductive étrangère (entre câbles et pas entre fils) du scénario EVPT, dans l'environnement Matlab.

1. Evaluation qualitative des IEM par diaphonie inductive

Pour l'évaluation qualitative, nous avons suivi la méthodologie basée sur la modélisation topologique décrite au Chapitre 4 § II.B.

Pour générer le diagramme topologique, nous avons mentionné au Chapitre 4, la possibilité de partir d'architectures de nature différente. Nous en détaillons ici le concept.

- Le diagramme physique peut être extrait d'un diagramme interne de bloc (ibd) en SysML de l'architecture E/E (Figure 93) en reprenant l'ensemble des composants (équipements et câbles dans le cadre de l'IEM par diaphonie) et leurs connexions physiques (flux électriques connectant deux ports de composants différents).

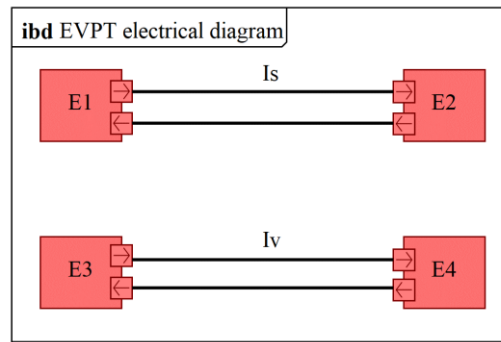


Figure 93 : Schéma électrique de l'EVPT dans un diagramme interne de bloc

- Le diagramme physique peut être extrait d'un schéma électrique ou CEM issu d'un environnement de modélisation métier des experts EM. Pour le cas d'étude de l'EVPT, un schéma électrique équivalent de l'architecture E/E de l'EVPT, incluant tous les composants E/E susceptibles d'être interactifs au niveau EM, est représenté sur la Figure 94.

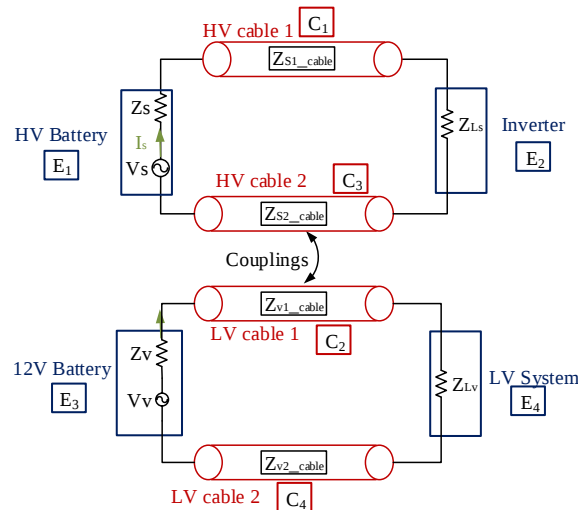


Figure 94 : Schéma électrique équivalent du scénario EVPT en MD.

- Enfin, la modélisation topologique peut reposer sur l'architecture 3D des composants E/E. Dans ce cas, les connexions topologiques entre les composants correspondent à leurs points de contact géométriques. Par exemple, deux câbles raccordés au même équipement généreront deux sommets pour cet équipement composant dans le diagramme topologique. Ainsi le schéma représentatif des connexions physiques des composants de l'architecture 3D E/E à l'origine du couplage par diaphonie dans l'EVPT, et sa modélisation topologique associée sont présentés sur la Figure 95.

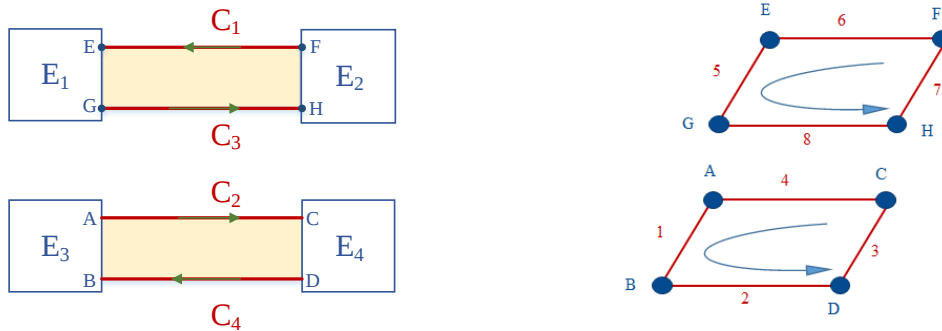


Figure 95 : Diagramme physique (à gauche) et topologique (à droite) à partir de l'architecture 3D des composants E/E de l'EVPT

Ensuite, à partir d'un code développé par Matlab (Figure 96), la matrice d'incidence transposée (Arêtes/ Sommets) et la matrice Laplacienne (Sommets/ Sommets) sont automatiquement générées comme détaillées dans la Figure 97 et la Figure 98.

```
Delta(Ipas,IndiA(Ipas))=-1; % la matrice delta prend -1 pour le premier noeud selectionné de la branche
Delta(Ipas,IndiB(Ipas))=1; % la matrice delta prend 1 pour le deuxième noeud selectionné de la branche
end
%%
MAT = Delta'*Delta; % transposé(delta)*delta
matrice_incidence = Delta; % Initialisation de la matrice d'incidence Delta
matrice_laplacienne = MAT; % Initialisation de la matrice MAT qu'on modifie à chaque itération
delta = Delta; % Initialisation de la matrice delta qu'on modifie à chaque itération
```

Figure 96 : Code Matlab pour la génération de la matrice d'incidence transposée et la matrice Laplacienne

```
matrice_incidence =
```

-1	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	-1	0	0	0	0
0	0	1	-1	0	0	0	0
1	0	-1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-1	0	1	0
0	0	0	0	0	0	1	-1
0	0	0	0	0	1	0	-1
0	0	0	0	1	-1	0	0

Figure 97 : Matrice d'incidence transposée du scénario EVPT générée sous Matlab

```
matrice_laplacienne =
```

2	-1	-1	0	0	0	0	0
-1	2	0	-1	0	0	0	0
-1	0	2	-1	0	0	0	0
0	-1	-1	2	0	0	0	0
0	0	0	0	2	-1	-1	0
0	0	0	0	-1	2	0	-1
0	0	0	0	-1	0	2	-1
0	0	0	0	0	-1	-1	2

Figure 98 : Matrice Laplacienne du scénario EVPT générée sous Matlab

Conformément au processus décrit à la section II.B du Chapitre 4, l'évaluation qualitative commence par l'identification des boucles de courant (mailles) présentes dans l'architecture E/E du scénario d'EVPT. Ces boucles (composées de 2, 3 ou 4 sommets) sont identifiées par le

programme développé en Matlab (Figure 99), dont l'algorithme a été détaillé sur la Figure 52, et le résultat donné sur la Figure 100.

```

if TEST<3

disp(['identified current loop',' : ',name(1),name(2)]);
loop = [loop; [name(1) name(2) ' ']];

end

[nb nn]=size(delta);

end

loops = loop(:,1:4) % Identifier toutes les boucles de courant

```

Figure 99 : Code Matlab pour l'identification de toutes les boucles de courants

```

loops =

2x4 char array

'ABDC'
'EGHF'

```

Figure 100 : Identification des boucles de courant identifiées par le programme Matlab

Ensuite, pour chaque boucle de victime identifiée, nous construisons la matrice d'interaction (Arêtes/Mailles) via un code Matlab (Figure 101). Puis, à partir de cette matrice d'interaction, les agresseurs potentiels correspondants ont été déterminés (Figure 102) en sélectionnant les branches qui sont à la fois traversées par un courant et n'appartiennent pas à cette boucle (cadre bleu dans la Figure 102).

```

for Ipas=1:2
for Jpas=1:4
PMAX(find(loop(Ipas,Jpas)==VVV(:,1) & loop(Ipas,Jpas+1)==VVV(:,2)),Ipas)=1;
PMAX(find(loop(Ipas,Jpas)==VVV(:,2) & loop(Ipas,Jpas+1)==VVV(:,1)),Ipas)=-1;
end
end

%PMAX

MATGLO = PMAX(1:8,:)-PMAX(9:16,:);
Matrice_Interaction=(MATGLO)/2

```

Figure 101 : Code Matlab pour la génération automatique de la matrice d'interaction

Matrice_Interaction =

1	0
-1	0
1	0
1	0
0	1
0	-1
0	1
0	1

Mat_{interaction} =

	ABDC	EGHF
1	1	0
2	-1	0
3	1	0
4	1	0
5	0	1
6	0	-1
7	0	1
8	0	1

Figure 102 : Identification des agresseurs potentiels à partir la matrice d'interaction sous Matlab

Enfin, en considérant dans notre exemple les courants variables perturbateurs dans les câbles HT (C1 et C3), nous identifions chaque diaphonie inductive possible entre ces câbles HT et la boucle victime correspondante (ABDC), afin d'évaluer ensuite quantitativement les niveaux des IEM correspondantes.

2. Evaluation quantitative par modèle analytique des IEM par diaphonie inductive

Une modélisation analytique peut être appliquée au scénario d'EVPT, en s'appuyant sur les équations physiques de la diaphonie inductive et l'architecture 3D des composants. Cette approche analytique consiste en la résolution sous Matlab des équations de Maxwell, combinée à la discrétisation et aux maillages des surfaces de boucle de courant identifiées, en fonction des géométries et des positions des composants (récupérées à partir de l'architecture 3D).

Après avoir évalué qualitativement l'architecture E/E et avoir identifié toutes les boucles victimes de courant avec leurs agresseurs potentiels respectifs, l'étape suivante consiste à récupérer les paramètres électriques (impédances électriques des câbles agresseurs et de la boucle de courant victime) afin de pouvoir calculer l'impédance équivalente du circuit victime et par suite calculer le courant I_S du circuit source. Dans notre exemple de l'EVPT, nous avons deux boucles considérées comme deux circuits sources et victimes (Figure 103).

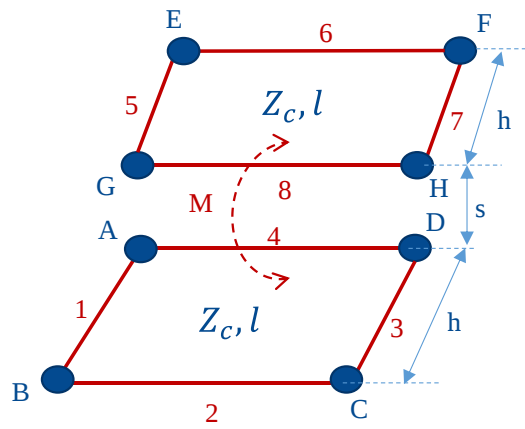


Figure 103 : Paramètres géométriques pris en compte pour le scénario d'EVPT

Ensuite, en appliquant la loi de Biot-Savart et en utilisant deux fonctions de surface (permettant de calculer la surface de chaque boucle identifiée) et de maillage (permettant de discrétiser la surface de boucle victime) comme présentées sur la Figure 104 et la Figure 105, nous pouvons calculer le champ magnétique B pour chaque point de la boucle victime (Figure 106).

```
function [SS] = Surface(Xnoeu,Ynoeu)
AB=[ (Xnoeu(1)-Xnoeu(2)) Ynoeu(1)-Ynoeu(2) ];
AC=[ (Xnoeu(1)-Xnoeu(3)) Ynoeu(1)-Ynoeu(3) ];
SS = abs(AB(1)*AC(2) - AB(2)*AC(1))/2;
end
```

Figure 104 : Fonction pour le calcul de la surface de boucle sous Matlab

```

function [cordo] = maillage(Xnoeu,Ynoeu)

Noeu = 3; % Nb Noeuds
Nbranche = 3; % Nb branches
Xnoeu = Xnoeu+1e-3*rand(1,3);
Ynoeu = Ynoeu+1e-6*rand(1,3);
NAME = ['A' 'B' 'C'];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calcul CHAMP B

A= min(Xnoeu):0.001:max(Xnoeu); % axe X
B= min(Ynoeu):0.001:max(Ynoeu); % axe Y

[XX,YY] = meshgrid(A,B);
[p,q] = size(XX);
for Ipas = 1:p*q;
    cordo(Ipas,1)=XX(Ipas);
    cordo(Ipas,2)=YY(Ipas);
end

```

Figure 105 : Fonction du maillage des boucles de courant victime sous Matlab

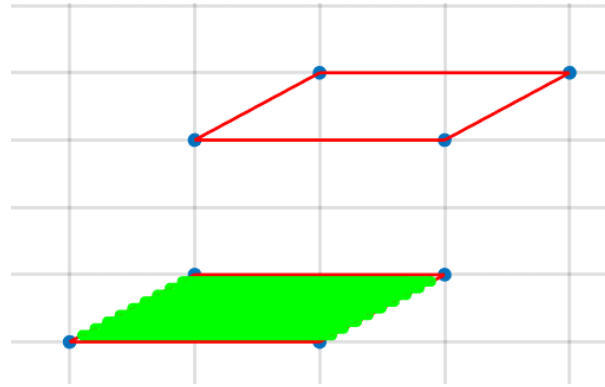


Figure 106 : Résultat de maillage de la boucle victime de courant victime sous Matlab

L'étape suivante consiste à calculer la fem induite e dans la boucle de courant. Cette tension permet ainsi d'évaluer le courant induit I_v , afin de calculer la tension perturbatrice résultante V_v aux bornes du composant de la boucle de courant victime identifiée. La Figure 107 montre un aperçu du code Matlab permettant de calculer les différentes équations précédemment détaillées dans le domaine fréquentiel.

```

Is=Vs./Zeq;
B_moy=Nu*Is*sum(B_A)/length(B_A);
E=-B_moy*S(1)*p;
Vv(j)=( (p.*Mu(Indice,1)*Rv) ./ (Rv+L1*p+Zc2) ) *Is;

```

Figure 107 : Aperçu des équations physiques du couplage de diaphonie inductive sous Matlab

Enfin, la tension V_v aux bornes du composant victime peut alors être comparée à la tension limite V_{limit} définie pour le composant correspondant dans les exigences initiales EM, afin de prédire le risque de perturbation de l'IEM générée par la diaphonie inductive.

Les résultats de cette évaluation quantitative sont donnés dans la section suivante.

D. Evaluation quantitative comparative entre un modèle analytique et une approche tensorielle (Kron)

Dans ces travaux, nous testons et comparons deux méthodes d'évaluation quantitatives, qui nous apparaissent pertinentes pour la phase de préconception, car peu chronophages : le modèle analytique décrit précédemment et l'approche tensorielle de Kron.

Dans ce cadre, l'évaluation quantitative des perturbations d'IEM est basée sur l'analyse des lois physiques décrivant chaque type de couplage. Cette étape peut être réalisée par différentes méthodes, qu'elles soient analytiques ou numériques, en fonction des habitudes des experts, de la

phase de conception et des contraintes de temps. Pour le scénario EVPT, nous nous concentrons sur l'analyse de la diaphonie inductive, avec deux méthodes de résolution différentes. La première (analytique) intègre des paramètres géométriques explicites (notamment ici, d comme la distance entre les câbles de la boucle source et de la boucle victime (supposée identique pour l'exemple) et s comme la distance entre la boucle source et la boucle victime) comme le montre la Figure 103. Quant à la deuxième (de Kron), elle est basée sur une approche tensorielle, et est détaillée dans les parties suivantes. Nous utilisons la même impédance caractéristique $Z_c = 100 \, \Omega$ pour les boucles source et victime avec la même longueur pour les câbles source/victime ($l = 2m$).

Comme nous avons déjà décrit l'évaluation quantitative par le modèle analytique au § II.C.2, nous détaillons ici la deuxième approche, avant de présenter les résultats comparatifs de ces deux méthodes sur le cas de diaphonie inductive de l'EVPT.

1. Approche de KRON

Maurice propose une approche topologique, initialement proposée par Kron pour les circuits électriques (Gabriel Kron, 1959), pour aborder les problèmes de CEM des systèmes complexes (Maurice, 2007b). Elle consiste à modéliser l'ensemble des interactions physiques entre les composants électroniques contenus dans les systèmes complexes, en tenant compte à la fois des perturbations conductrices et des couplages radiatifs (même non linéaires). Cette approche est basée sur une modélisation topologique simplifiée des sous-systèmes, puis sur le développement d'un calcul utilisant tout type de modèles (basés sur des calculs 3D, des tests expérimentaux, des équations analytiques, etc.).

Dans le scénario EVPT, nous sommes partis du schéma électrique de l'architecture E/E de l'EVPT (Figure 108) pour générer la modélisation topologique correspondante, composée de deux boucles de courant (appelées mailles m_1 et m_2) (Figure 109). Chaque boucle de courant a deux sommets (E_i) et deux arêtes C_i , comprenant leurs paramètres spécifiés tels que leurs impédances électriques Z_i . La diaphonie inductive entre ces deux circuits est représentée par une inductance mutuelle M_{12} .

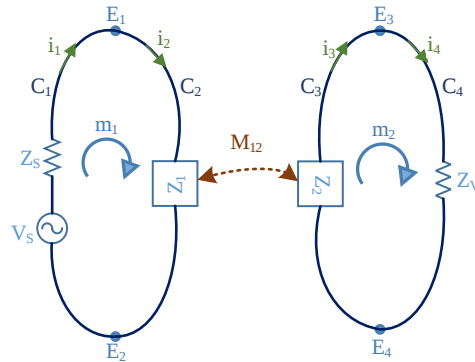


Figure 108 : Modélisation électrique du scénario EVPT par la méthode de Kron

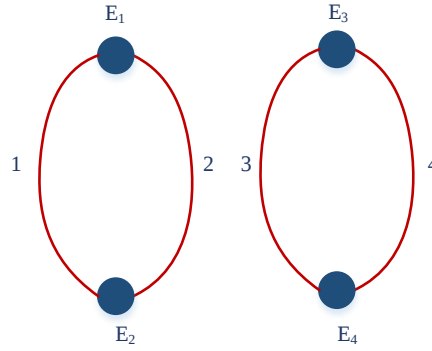


Figure 109 : Modélisation topologique du scénario EVPT par la méthode de Kron

La méthode Kron peut être décrite en quatre étapes :

- 1- Déterminer l'ensemble de toutes les impédances de branche Z_i , et le vecteur de tension source E_b impliqué dans l'ensemble du système lié à l'espace des branches (Figure 110) :

$$Z_e = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} Z_S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_v \end{bmatrix} \end{matrix}; E_b = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} V_S \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figure 110 : Matrice d'impédance et vecteur de tension source

$$\text{Avec } Z_S = R_S; Z_1 = R_1 + L_1 p + \frac{1}{c_{1p}}; Z_2 = R_2 + L_2 p + \frac{1}{c_{2p}}; Z_v = R_v$$

- 2- Ajouter le couplage M_i (ici l'inductance mutuelle) entre les branches dans la matrice de couplage (Figure 111) :

$$M_c = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \text{avec } M = M_{12}p$$

où M_{12} = l'inductance mutuelle entre la branche 1 et la branche 2 ; p = l'opérateur de Laplace.

Figure 111 : Mise à jour de la matrice de couplage

- 3- Définir la matrice de connectivité $C_{C \rightarrow m}$ pour identifier les branches impliquées dans chaque boucle/maille et pour corréler l'espace des branches avec l'espace des mailles ;

$$C_{C \rightarrow m} = \begin{matrix} & \begin{matrix} m_1 & m_2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

- 4- Analyser le problème lagrangien dans l'espace maille, puis le résoudre éventuellement en résolvant les équations suivantes (Maurice, 2016b) avec un outil numérique (ici Matlab) :

$$\begin{cases} E_m = C_{e \rightarrow m}^t \cdot E_e \\ Z_m = C_{e \rightarrow m}^t \cdot (Z_e - M_e) \cdot C_{e \rightarrow m} \\ E_m = Z_m \cdot I_m \\ V_v = R_v \cdot C_{e \rightarrow m}(4, :). I_m \end{cases}$$

La résolution des équations précédentes est illustrée par les courbes sur les Figure 112 et Figure 113, qui présentent la tension résultante V_v aux bornes du composant victime.

2. Résultats

Nous calculons l'effet de la diaphonie inductive en utilisant les deux méthodes différentes : la méthode analytique avec la prise en compte explicite des paramètres géométriques (h, s) provenant de la position des composants et dont le diagramme topologique a été extrait de l'architecture 3D, et la méthode de Kron (avec une considération géométrique implicite dans les impédances et l'inductance mutuelle) dont le modèle topologique a été généré à partir d'un schéma électrique.

La Figure 112 présente la tension victime calculée en fonction de la fréquence du signal source, tant pour le modèle analytique que pour la méthode de Kron, sur la base des mêmes valeurs de paramètres physiques communs : les valeurs des paramètres géométriques (pour le modèle analytique) $h = 1$ mm ; $r = 0,43$ mm et $s = 2$ mm et l'impédance caractéristique calculée correspondante $Z_c = 100 \Omega$ et l'inductance mutuelle $M = 2.23 \text{ v } 10^{-8} H$.

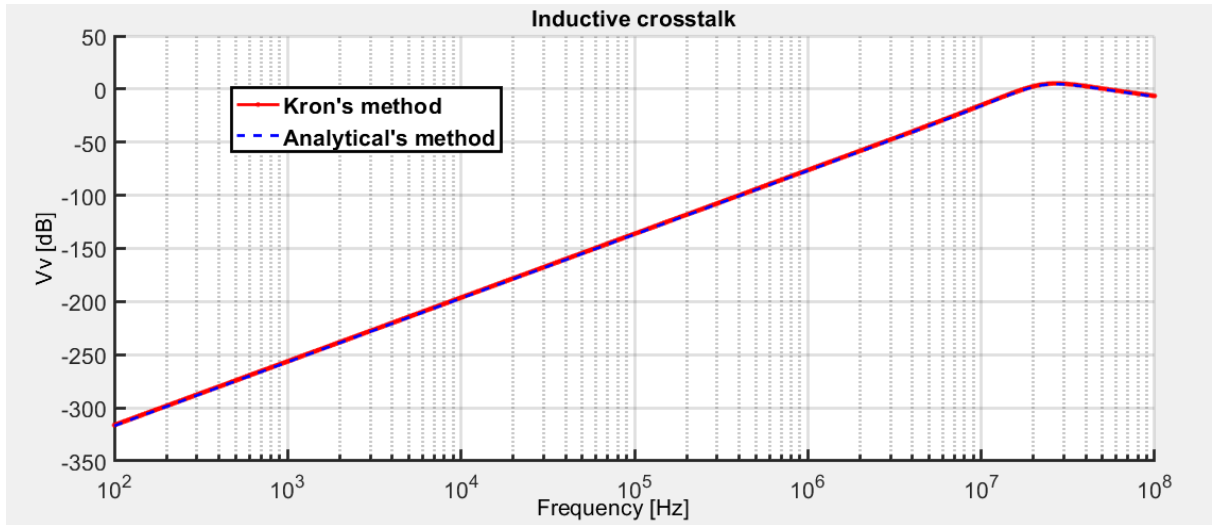


Figure 112 : Tension de la victime du scénario EVPT pour les approches analytiques et de Kron pour les paramètres M et Z_c constants

De ces courbes, on peut déduire que, sur la base des mêmes valeurs des paramètres communs (M and Z_c), les courbes de tension de la victime calculées à partir de ces deux approches sont similaires. De plus, la diaphonie magnétique augmente avec la fréquence. En effet, à basse fréquence, les courbes sont presque linéaires et la tension victime augmente avec la fréquence, alors qu'à haute fréquence, après un pic maximum (résonance), les courbes diminuent lentement. Cette forte résonance apparaissant dans le couplage est située autour de $f = 2.5 \cdot 10^7$ MHz. Comme notre onduleur couvre généralement une plage de fréquences de 100 Hz à 1 MHz, nous pouvons en déduire que la résonance du système se situe en dehors de la plage de fonctionnement et que, par conséquent, le fonctionnement du système présente un faible risque de perturbations électromagnétiques dans cette plage de fréquences. Ensuite, nous calculons la diaphonie inductive

lors de la modification des paramètres géométriques (h et s), les tensions de la victime calculées qui en résultent sont indiquées à la Figure 113.

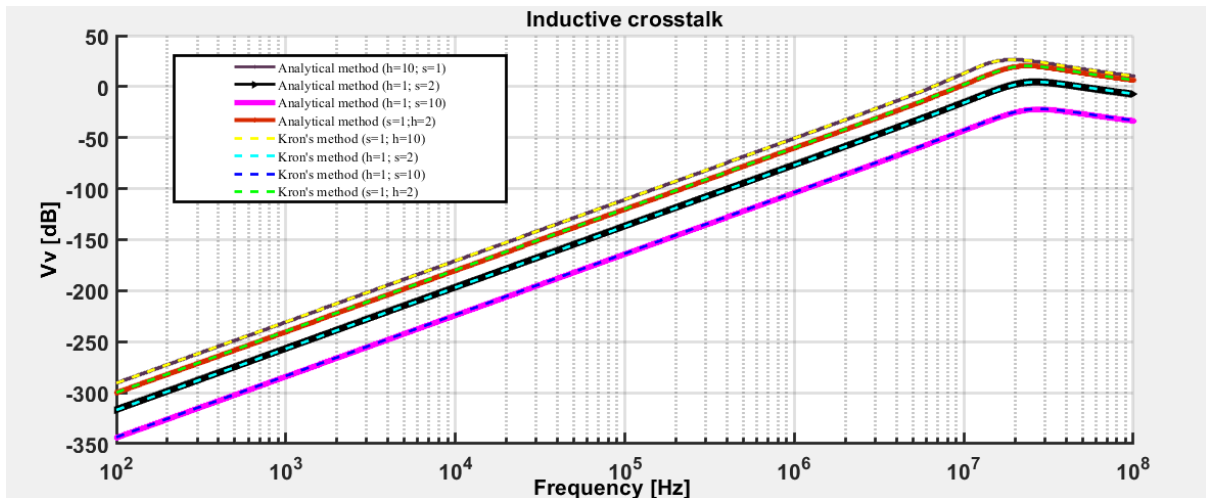


Figure 113 : Tension de la victime du scénario EVPT pour les approches analytique et de Kron avec différentes valeurs de $d(mm)$ et $s(mm)$

À partir des courbes de la Figure 113, nous visualisons la dépendance de la diaphonie inductive avec la fréquence et la position relative des câbles. La distance h joue alors un rôle important puisqu'elle détermine directement la surface des boucles, donc l'inductance mutuelle. Ainsi, en faisant varier la distance h pour s constante, la diaphonie inductive augmente. Par ailleurs, avec h constante, la diaphonie inductive diminue en fonction de l'augmentation de la distance s entre la boucle victime et la boucle source. Enfin, plus les boucles source et victime sont éloignées, plus le couplage par diaphonie est faible.

III. Discussions

Nous avons comparé notre approche d'évaluation qualitative basée sur un processus topologique à d'autres approches existantes, telles que la méthode de l'arbre couvrant minimum (MST) et les recherches en profondeur (DFS). L'objectif principal de ces méthodes est de minimiser le nombre de liens de connexion en trouvant un seul chemin entre toutes les paires de nœuds. La méthode MST fournit un sous-ensemble de branches d'un graphe non orienté, pondéré par les branches et connecté. Ce graphe (MST) relie tous les sommets ensemble, sans aucun cycle et avec le poids total des arêtes le plus faible possible. Mais cette méthode ne permet pas d'identifier directement les cycles (correspondant à notre cas de boucles de courant). D'autres approches topologiques existent dans la littérature pour détecter les mailles (ou cycles) dans des graphes orientés et non orientés (Dijkstra and Scholten, 1980; Oliva et al., 2018), et les seules méthodes traditionnelles qui assurent la détection des cycles dans un graphe orienté ou non orienté s'appuient sur la DFS (Oliva et al., 2018; Safar et al., 2009). Ces méthodes exploitent le fait qu'un graphe a une boucle/un cycle si et seulement si la méthode DFS atteint un "back-edge" (branche qui relie un sommet à un sommet qui a déjà été visité avant son parent). Cette approche est assez efficace dans un contexte limité, mais nous avons rencontré plusieurs problèmes lors de son application dans notre graphe topologique d'étude de cas. En effet, cette méthode ne pouvait pas atteindre tous les nœuds adjacents au nœud déjà défini avec un seul chemin, ce qui nécessite un temps de calcul plus long ou plusieurs paramètres supplémentaires à ajouter à la méthode DFS. De plus, elle ne permet de détecter que les boucles élémentaires (et non les boucles complémentaires). Finalement, notre approche topologique pour l'évaluation qualitative des IEM permet d'identifier, à partir d'un graphe complexe avec des nœuds déjà définis, toutes les boucles existantes, même non élémentaires.

En ce qui concerne l'évaluation quantitative, de nombreuses méthodes sont disponibles, en fonction des usages des experts CEM et des outils EM à leur disposition. Sur la base des Figure 112 et Figure 113, qui présentent les résultats calculés à partir de deux exemples de modèles (analytiques et de Kron), nous avons observé que la tension victime calculée est inchangée quelle que soit la méthode de résolution. Cependant, une différence est que la première modélisation avec le modèle analytique basée sur les lois physiques prend en compte explicitement la géométrie et la position relative entre les composants, alors que l'analyse par la méthode de Kron utilise les équations électriques sans aucune considération explicite de la géométrie et des positions des composants (qui sont "encapsulés" dans les valeurs d'impédance caractéristique et d'inductance mutuelle). Par conséquent, en ce qui concerne l'approche SAMOS et sa mise en œuvre dans l'environnement Sketcher 3D EM, le choix d'un modèle physique EM où les paramètres géométriques et les positions relatives des composants peuvent être facilement extraits/entrés, permettra à la fois de comparer ces paramètres avec les exigences géométriques et physiques de l'architecte Système et de les partager avec l'architecte 3D dans l'environnement 3D (dans un cycle d'optimisation). Par ailleurs, une fois l'évaluation quantitative terminée, et les IEM les moins risquées éliminées, nous pouvons mettre à jour le modèle Système en SysML, en décrivant les couplages (pour une architecture donnée) à prendre en compte pour la suite, dans des diagrammes *Physics ibd*. Ce processus formalise la traçabilité des résultats de l'évaluation qualitative/quantitative des IEM via EMILE. De cette manière, sa conformité avec le processus collaboratif défini pour l'évaluation de l'architecture 3D sous contraintes électromagnétiques sera assurée.

IV. Conclusions

Ce chapitre présente d'une part l'implémentation de notre approche dans le cadre MBSE SAMOS au sein du Sketcher 3D EM, afin d'évaluer qualitativement et quantitativement les couplages d'interférences électromagnétiques (IEM), et d'autre part, l'application de notre approche sur un cas d'étude de la chaîne de traction de Twizy80.

Pour cela, nous avons légèrement modifié l'approche SAMOS afin de préserver les environnements de travail de chaque inter-acteur notamment pour les équipes 3D et de simulation. Puis, nous avons présenté différents scénarios d'implémentation qui ont fait l'objet de développements dans le Sketcher 3D EM. Les premiers travaux ont permis de décrire le processus SAMOS sur le cas d'étude de l'EVPT, et ont adressé l'étude et l'implémentation de différents moyens de connecter des modèles issus des trois environnements (SysML-3D-Modelica) du Sketcher 3D EM, pour pouvoir assurer la cohérence des données et modèles entre plusieurs environnements métiers dans un cadre collaboratif de conception. Nous avons vu, que parmi les solutions proposées dans des outils commerciaux actuels, certaines semblaient prometteuses et mériteraient une exploration plus approfondie de leur faisabilité d'implémentation dans le cadre du processus SAMOS. La deuxième partie de nos travaux visait à implémenter l'intégration d'une évaluation qualitative et quantitative dans un environnement unique (Matlab). L'intérêt de ces travaux réside dans l'automatisation de la détection des boucles victimes de l'IEM par diaphonie en s'appuyant sur la modélisation topologique de l'architecture 3D de l'EVPT, et de l'évaluation quantitative du risque d'IEM, via un modèle analytique. En effet, cette automatisation offre une grande facilité d'utilisation tout en réduisant le temps dédié à l'évaluation des IEM. Enfin la dernière partie de ce chapitre présente les résultats de l'évaluation quantitative d'une IEM par diaphonie inductive étrangère du cas d'étude de l'EVPT, au travers de 2 approches : un modèle analytique et l'approche tensorielle de Kron. Cette étude montre une cohérence des résultats entre les deux approches, même si elles diffèrent l'une de l'autre dans leur prise en compte des paramètres géométriques (position et géométrie des

composants), qui est explicite dans le modèle analytique, tandis qu'elle est implicite dans la méthode de Kron (puisqu'ils n'apparaissent que dans la valeur des impédances et inductance mutuelle).

Conclusion générale et perspectives

I. Cadre général

Il est communément admis que les décisions prises au début des étapes de la conception, notamment lors des compromis pour les choix d'architecture de concept, ont un impact majeur sur les coûts globaux du cycle de vie du système. Cela est d'autant plus critique pour les systèmes mécatroniques dont l'essor rapide et croissant repose sur la forte intégration de nouvelles technologies dans les systèmes actuels. En effet, la conception des systèmes mécatroniques est un processus délicat et complexe, notamment en raison du nombre croissant de composants à inclure dans un volume compact, où des problèmes de géométrie et de couplages multiphysiques apparaissent souvent. Cette complexité implique alors de gérer les interactions multiphysiques (thermiques, électromagnétiques et vibratoires), non seulement entre les composants multidomains mais aussi entre les différentes disciplines des acteurs de la conception. Ainsi, ces systèmes nécessitent le déploiement d'une approche transversale multidisciplinaire, basée sur l'ingénierie Système (IS) afin de garantir l'intégrité du produit global en imposant des spécifications techniques à toutes les équipes multidisciplinaires pour développer le produit avec une vision systémique. En parallèle, les approches d'ingénierie système basées sur des modèles (MBSE) ont bénéficié de nombreuses méthodologies de conception collaborative pour assurer non seulement la cohérence et la traçabilité entre les niveaux de conception mais aussi faciliter le choix de la meilleure architecture de solution. En effet, la phase de conception est une phase cruciale pour les architectes de systèmes qui doivent évaluer rapidement différents concepts d'architecture physique. Or, les outils d'évaluation ne sont généralement utilisés qu'une fois que l'architecture physique d'un concept a été choisie, c'est-à-dire en phase de conception détaillée, sans s'assurer au préalable que l'architecture 3D correspondante de ce concept ne génère pas d'interactions physiques indésirables entre les composants de ces systèmes.

Dans ce contexte, nos recherches ont porté sur l'extension d'une approche collaborative d'ingénierie système basée sur les modèles (MBSE) appelée « SAMOS » déjà appliquée à la thermique et proposée par R. Barbedienne (Barbedienne et al., 2015b, 2015a), à l'évaluation de l'architecture 3D de concept sous contraintes EM. Notre objectif était de répondre à la question : « Comment intégrer les contraintes EM (et les géométries non détaillées) en phase amont, afin de supporter le choix de la meilleure architecture physique de concept mécatronique et donc réduire le temps et le coût de conception de ces systèmes ? »

II. Contributions

L'approche SAMOS a été légèrement modifiée pour l'évaluation des interférences électromagnétiques (IEM), afin de préserver, au sein du Sketcher 3D EM, les environnements de travail de chaque inter-acteur : un environnement SysML pour l'architecte Système, un environnement 3D (FreeCAD) pour l'architecte 3D et un environnement de modélisation/simulation (Modelica, Matlab), comme détaillé sur la Figure 114.

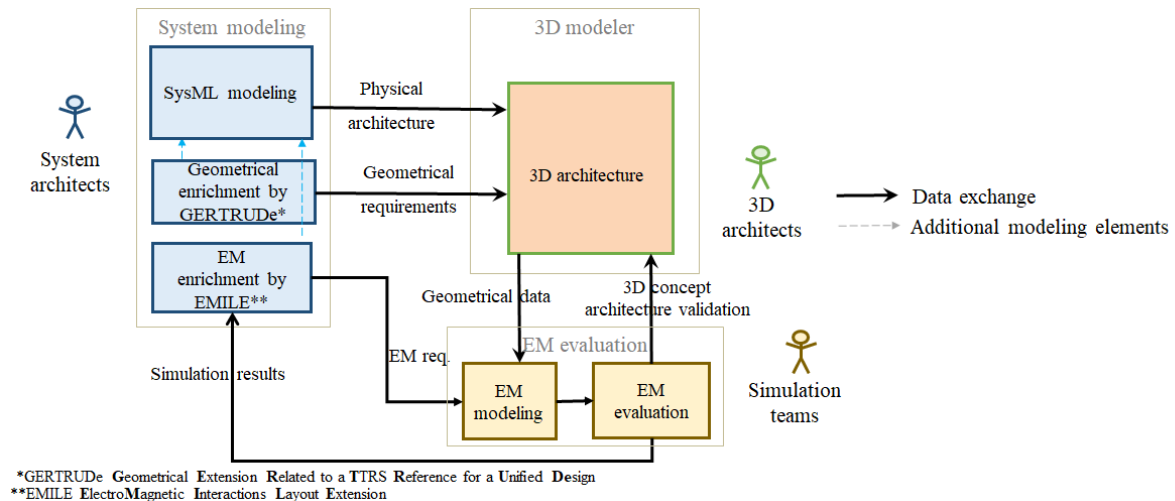


Figure 114 : Adaptation de l'approche SAMOS adaptée pour les IEM

Ce processus vise à évaluer, prédire les risques CEM et vérifier que l'architecture considérée répond aux exigences EM prédéfinies. Or, si certains travaux existants proposent des approches d'évaluation EM basées sur l'architecture 3D dès le début de la conception, ils ne tiennent pas compte du niveau de spécification. En effet, les exigences EM sont généralement bien décrites dans des normes ou des standards OEM, mais elles ne sont pas intégrées dans une approche MBSE pour assurer la cohérence et la traçabilité requises pour les processus de vérification et de validation. Certaines approches MBSE existantes basées sur les langages SysML ou UML adressent bien l'architecture 3D mais pas les contraintes EM. Une nouvelle extension SysML dédiée à la modélisation EM est donc nécessaire, afin de générer les spécifications EM nécessaires à l'évaluation de l'architecture 3D sous contraintes EM lors de la phase de préconception. Notre première contribution s'est donc focalisée sur une tâche préliminaire nécessaire à l'implémentation de l'approche SAMOS pour les contraintes EM : le développement d'une extension SysML appelée EMILE (ElectroMagnetic Interactions Layout Extension) afin d'intégrer les contraintes et la modélisation EM basée sur la géométrie, dans le modèle Système. Ce profil prend en charge la définition des exigences CEM, la description du mode de couplage électromagnétique et la spécification de la configuration de la simulation, grâce à une interface Homme-Machine personnalisée développée.

La deuxième contribution a consisté à évaluer les risques d'IEM de l'architecture physique de concept basée sur l'approche MBSE SAMOS par la combinaison d'une approche topologique et de la modélisation EM. Cette approche permet alors de supporter le processus d'évaluation qualitative et quantitative des interférences électromagnétiques (IEM) lors de la conception des systèmes mécatroniques. En effet, cette deuxième contribution peut être divisée en deux parties différentes :

- La première partie porte sur l'évaluation qualitative et exhaustive de toutes les IEM potentielles possibles entre les composants E/E en interaction, en se basant sur la modélisation topologique de l'architecture choisie. Ainsi, la méthodologie proposée, permet d'identifier automatiquement toutes les victimes et agresseurs associés pour chaque type de couplage étudié (que ce soit en mode différentiel ou commun).
- Ensuite, une fois les IEM potentielles qualitativement identifiées, une évaluation quantitative peut être effectuée suivant différentes méthodes et dans des environnements métiers dédiés. Comme notre objectif est d'évaluer quantitativement l'architecture E/E

prédéfinie en phase de préconception, nous avons choisi deux méthodes basées sur les différentes lois de la physique pour chaque type de couplage (modèle analytique et de Kron) que nous avons appliquées au calcul de la diaphonie inductive.

Cette évaluation exhaustive amont permet ainsi de réduire le risque de modifications tardives et coûteuses de l'architecture.

Une dernière contribution concerne l'étude et le prototypage de différents développements pour l'implémentation de ces contributions au sein du sketcher 3D EM, appliqués sur le cas d'étude de la chaîne de traction de la Twizy 80. Ces travaux ont ainsi permis d'illustrer les différents concepts développés et leur potentiel pour une exploitation professionnelle.

III. Perspectives

Pour faciliter le transfert et l'exploitation rapide de nos travaux en milieu industriel, il serait intéressant de tester l'implémentation de l'extension EMILE dans un environnement logiciel permettant la transformation de modèles vers des outils de modélisation physique (par exemple : Modelica ou Matlab/Simulink), d'étendre la validation de la généralisation de notre approche à d'autres exemples de systèmes mécatroniques (par exemple, les microsystemes), en collaboration avec un groupe d'utilisateurs industriels.

Une deuxième perspective consiste à étendre nos travaux de thèse pour l'évaluation de l'architecture 3D de concept sous contraintes dynamiques et son intégration dans une approche MBSE SAMOS, au travers d'un Sketcher 3D Dynamique. En effet, après avoir présenté dans le chapitre 2 les besoins des experts dynamiciens concernant l'évaluation d'architecture 3D de concept en phase amont, nous avons déjà identifié quelques pistes de travail qui pourraient être utiles pour ces futurs travaux (M. Kharrat et al., 2018). La première concerne le développement d'une extension SysML dédiée pour le comportement dynamique permettant d'intégrer des exigences en dynamique nécessaires pour l'évaluation de l'architecture 3D. Par la suite, dans un environnement de calcul/simulation, une analyse pourrait être menée en s'appuyant sur une architecture 3D, composée de géométries de volumes simples avec k points de fixation ($k = 1 \text{ à } n$) où chaque composant serait défini par des masses et ses points de fixation par des ressorts. Cette analyse s'appuierait également sur une bibliothèque de comportements dynamiques des composants (facilement manipulables) comprenant les fonctions de transfert paramétriques calculées entre les points de fixation. Enfin, dans l'environnement 3D, une librairie de composants de fixations, d'amortisseurs pourraient être ajoutée à la librairie de composants à géométrie simplifiée pour ébaucher rapidement l'architecture 3D dynamiquement enrichie, à évaluer.

Enfin, concernant l'approche SAMOS, une dernière perspective pourrait être d'étudier dans quelle mesure la réalité virtuelle (RV) et la réalité augmentée (RA) (Basso et al., 2012; Evans et al., 2020) pourraient proposer un environnement collaboratif adapté pour tous les acteurs multidisciplinaires afin de supporter l'évaluation en phase amont d'architectures 3D dans un contexte MBSE. En effet, les méthodes de visualisation 3D basées sur la réalité virtuelle et la réalité augmentée consistent d'une part à améliorer la compréhension de la géométrie des systèmes, et d'autre part, elles permettent de mettre en œuvre des interactions avec des modèles abstraits tels que des modèles système ou de simulation. D'ailleurs, les environnements virtuels actuels permettent de mettre en contact direct les utilisateurs/concepteurs avec les données et les exigences dérivées (par exemple à partir des diagrammes SysML ou Capella) dès les premières phases de conception, favorisant ainsi une collaboration efficace entre tous les acteurs de disciplines différentes et facilitant également la compréhension de ces informations sans expertise particulière (Gräßler and Pottebaum, 2020; Lutfi and Valerdi, 2020). Par conséquent, ces environnements

collaboratifs de RV et de RA pourraient être très utiles pour poursuivre nos travaux sur l'évaluation d'architectures de concept dans un cadre collaboratif MBSE.

IV. Publications

- Kharrat M, Penas O, Plateaux R, Trabelsi H, Choley JY, Louati J, Haddar M (2017), Towards a 3D conceptual architecture framework, based on multi-physical constraints. In: 2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE). pp 1–8. (Best paper award)
- Kharrat M, Penas O, Trabelsi H, Louati J, Choley J-Y, Haddar M (2017), Conceptual design of an Electro-Mechanical actuator under thermal constraints, CMSM 2017.
- Kharrat M, Trabelsi H, Penas O, Louati J, Choley J-Y, Haddar M (2018), Integration of dynamic modeling in a conceptual architecture framework, applied in a Traction-Chain of Electric Vehicle, ICAV'2018.
- Kharrat M, Abdeljabbar N, Penas O, Plateaux R, Louati J, Miladi Chaaben M, Choley J-Y, Haddar M, (2018) EMC risk assessment process through a topological analysis. 12th France-Japan/10th Europe-Asia Congress on Mechatronics, Mie, Japan MECATRONICS.
- Kharrat M, Penas O, Plateaux R, Trabelsi H, Choley JY, Louati J, Haddar M, (2020), “Integration of Electromagnetic Constraints as of the Conceptual Design through a MBSE Approach”, IEEE Systems Journal.
- Kharrat, M., Penas, O., Abdeljabbar Kharrat, N., Plateaux, R., Choley, J. Y., Louati, J. & Haddar, M. (2020). Topological approach for assessment of electromagnetic interferences to support mechatronic conceptual design. *Mechanics & Industry*, 21(6), 609.

Références bibliographiques

- 3DEXPERIENCE. Qu'est-ce donc que 3DEXPERIENCE Collaborative Business Innovator ? 2019. <https://blog.cadmes.com/fr/3dexperience-collaborative-business-innovator> (accessed July 6, 2020).
- Abdeljabbar Kharrat N, Plateaux R, Miladi Chaabane M, Choley J-Y, Karra C, Haddar M. Integration of topological modification within the modeling of multi-physics systems: Application to a Pogo-stick. *Comptes Rendus Mécanique* 2018a;346:351–65. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2018.01.004>.
- Abdeljabbar Kharrat N, Plateaux R, Miladi Chaabane M, Choley J-Y, Karra C, Haddar M. Topological Modeling of 2D Piezoelectric Truss Structure Using the MGS Language. In: Haddar M, Chaari F, Benamara A, Chouchane M, Karra C, Aifaoui N, editors. *Design and Modeling of Mechanical Systems—III*, Cham: Springer International Publishing; 2018b, p. 349–60. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66697-6_35.
- Abdeljabbar N. Conception d'une méthodologie appliquée aux modèles dynamiques multi-physiques à topologie dynamique. PhD Thesis. Université Paris-Saclay (ComUE), 2019.
- Adin I, Mendizabal J, Del Portillo J. Impact of Electromagnetic Environment on Reliability Assessment for Railway Signalling Systems: Computer Science & IT Book Chapter | IGI Global. *Railway Safety, Reliability, and Security: Technologies and Systems engineering*, IGI Global; 2012, p. 23.
- AFNet. STEP AP 242 benchmark. Le numérique : Moteur de transformation et de croissance des filières industrielles 2015. <http://afnet.fr/dotank/sps/plm-committee/ap242benchmark/> (accessed November 8, 2019).
- Aimé J, Ardon V, Clavel E, Roudet J, Loizelet P. EMC behavior of static converters thanks to radiated field modeling using an equivalent electrical circuit. *IECON 2009, Porto, Portugal: 2009*, p. 4104–9. <https://doi.org/10.1109/IECON.2009.5415097>.
- Alaeldine A, Maurice O, Cordi J, Perdriau R, Ramdani M. EMC-ORIENTED ANALYSIS OF ELECTRIC NEAR-FIELD IN HIGH FREQUENCY. *ICONIC 2007, 2007*.
- Alestra S, Ferrières X, Parmantier JP, Perraud R, Rachidi F, Rubinstein A, et al. THE EU FRAMEWORK V PROJECT “GEMCAR”: CEM TECHNIQUES INVESTIGATED. In *15th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility 2003:7*.
- Alexandersson S. Automotive Electromagnetic Compatibility. Ph. D. dissertation/Lic. thesis, Department of Industrial Electrical ...; 2008.
- Alvarez Cabrera AA, Focken MJ, Tekin OA, Woestenenk K, Erden MS, De Schutter B, et al. Towards automation of control software: A review of challenges in mechatronic design. *Mechatronics* 2010;20:876–86. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.05.003>.
- Andrianarison E, Piques J-D. SysML for embedded automotive Systems: a practical approach. *Conference on Embedded Real Time Software and Systems*, 2010.
- ANSI/EIA-632. EIA STANDARD Processes for Engineering a System. *ELECTRONIC INDUSTRIES ALLIANCE* 1998; 1999.
- Arbaoui A, Asbik M. Constraints Based Decision Support for Site-Specific Preliminary Design of Wind Turbines. *Energy and Power Engineering* 2010;02:161. <https://doi.org/10.4236/epe.2010.23024>.
- Atkinson GJ, Mecrow BC, Jack AG, Atkinson DJ, Sangha P, Benarous M. The Analysis of Losses in High-Power Fault-Tolerant Machines for Aerospace Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2006;42:1162–70. <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.880869>.
- Barbedienne Romain. Interaction management in conceptual design for the assessment of 3D system architectures under multi-physical constraints : application to thermal analysis. thesis. Paris Saclay, 2017.

- Barbedienne R. Interaction management in conceptual design for the assessment of 3D system architectures under multi-physical constraints: application to thermal analysis. University Paris-Saclay, QUARTZ Laboratory 2017.
- Barbedienne R, Messaoud YB, Choley JY, Penas O, Ouslimani A, Rivière A. SAMOS for Spatial Architecture based on Multi-physics and Organisation of Systems in conceptual design. 2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), 2015a, p. 135–41. <https://doi.org/10.1109/SysEng.2015.7302746>.
- Barbedienne R, Penas O, Choley JY, Gasser L. TheReSE: SysML extension for thermal modeling. 2015 Annual IEEE Systems Conference (SysCon) Proceedings, Vancouver, BC: 2015b, p. 301–8. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2015.7116768>.
- Barbedienne R, Penas O, Choley J-Y, Hehenberger P. Modeling framework for a consistent integration of geometry knowledge during conceptual design. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 2019;19:021009.
- Barbedienne R, Penas O, Choley JY, Rivière A, Warniez A, Monica FD. Introduction of geometrical constraints modeling in SysML for mechatronic design. 2014 10th France-Japan/ 8th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS2014- Tokyo), Tokyo, Japan: 2014, p. 145–50. <https://doi.org/10.1109/MECATRONICS.2014.7018580>.
- Basso V, Rocci L, Pasquinelli M, Vizzi C, Bar C, Marelli M, et al. Innovation in space domain multidisciplinary engineering mixing MBSE, VR and AR. Joint Virtual Reality Conference of ICAT, EGVE and EuroVR, 2012, 2012, p. 57.
- Batterie. Batterie HT du Renault twizy 80 2018. <http://www.h2osmose.com/twizy/> (accessed July 3, 2020).
- Baum CE. Electromagnetic topology for the analysis and design of complex electromagnetic systems. *Fast Electrical and Optical Measurements*, Springer; 1986, p. 467–547.
- Baum CE. How to think about EMP interaction. *Proceedings of the 1974 Spring FULMEN Meeting*, 1974.
- Baysal MM, Roy U, Sudarsan R, Sriram RD, Lyons KW. Product information exchange using open assembly model: Issues related to representation of geometric information. *ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2005, p. 601–612.
- Benhassine S, Maurice O. APPLICATION D'UNE METHODOLOGIE COHERENTE SUR UN COUPLAGE SUR VEHICULE. In *Proceedings of 18ème Colloque International et Exposition sur la Compatibilité Electromagnétique* 2016:6.
- Benjeddou A, Deü J-F. A two-dimensional closed-form solution for the free-vibrations analysis of piezoelectric sandwich plates. *International Journal of Solids and Structures* 2002;39:1463–1486.
- Besnier P. Electromagnetic topology: An additional interaction sequence diagram for transmission line network analysis. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2006;48:685–692.
- Bhargava A, Pommerenke D, Kam KW, Centola F, Lam CW. DC-DC buck converter EMI reduction using PCB layout modification. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2011;53:806–813.
- Blanchard BS. *System Engineering Management*. 4 edition. Hoboken, N.J: Wiley; 2008.
- Bock C. SysML and UML 2 support for activity modeling. *Systems Engineering* 2006;9:160–186.
- Boehm BW. A spiral model of software development and enhancement. *Computer* 1988:61–72.
- Böhnke D, Reichwein A, Rudolph S. Design Language for Airplane Geometries Using the Unified Modeling Language. *Proceeding of ASME2009, International Design Engineering Technical Conferences, Computers and Information in Engineering Conference* 2009:661–70. <https://doi.org/10.1115/DETC2009-87368>.

- Boudon B. Méthodologie de modélisation des systèmes mécatroniques complexes à partir du multi-bond graph: application à la liaison BTP-fuselage d'un hélicoptère. PhD Thesis. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM, 2014.
- Boujut J-F, Laureillard P. A co-operation framework for product-process integration in engineering design. *Design Studies* 2002;23:497–513.
- Bouyssou D, Marchant T, Pirlot M, Tsoukias A, Vincke P. Evaluation and Decision Models with Multiple Criteria: Stepping stones for the analyst. Springer Science & Business Media; 2006.
- Bradley D. Mechatronics: Electronics in Products and Processes. Routledge; 2018.
- Brebbia CA, Telles JCF, Wrobel LC. Boundary element techniques: theory and applications in engineering. Springer Science & Business Media; 2012.
- Bricogne-Cuignières M. Méthode agile pour la conception collaborative multidisciplinaire de systèmes intégrés: application à la mécatronique 2015:362.
- Brüns H, Vogt A, Findekle C, Schröder A, Magdowski M, Robinson MP, et al. Modeling Challenging EMC Problems Using the Method of Moments. *Electromagnetic Compatibility Magazine, IEEE* 2017.
- Bruns H-D, Schuster C, Singer H. Numerical electromagnetic field analysis for EMC problems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2007;49:253–262.
- Burnham K. Automotive system integration for EMC. 2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility Signal/Power Integrity (EMCSI), 2017, p. 1–20. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2017.8078132>.
- Cabello MR, Fernández S, Pous M, Pascual-Gil E, Angulo LD, López P, et al. SIVA UAV: A case study for the EMC analysis of composite air vehicles. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2017;59:1103–1113.
- Cacciola P, Tombari A. A Ground Motion Model in Proximity of Vibrating Buildings. *Proceedings of the 8th International Conference on Computational Stochastic Mechanics (CSM 8)*, Research Publishing Services; 2018, p. 103–12. https://doi.org/10.3850/978-981-11-2723-6_11-cd.
- Caillard P. Conception par optimisation d'une chaîne de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique. PhD Thesis. 2015.
- Canbaz B, Yannou B, Yvars P-A. Improving process performance of distributed set-based design systems by controlling wellbeing indicators of design actors. *Journal of Mechanical Design* 2014;136.
- Cao Y, Liu Y, Paredis CJJ. System-level model integration of design and simulation for mechatronic systems based on SysML. *Mechatronics* 2011;21:1063–75. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2011.05.003>.
- Carter DNJ. The Past, Present and Future Challenges of Aircraft EMC. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine* 2012;1:4.
- Casimir J-B, Duforêt C, Tawfiq I, Chevalier Y. Raideur dynamique de plaques relative aux effets de membrane. *Mécanique & Industries* 2000;1:423–429.
- Casimir J-B, Khadimallah MA, Nguyen MC. Formulation of the dynamic stiffness of a cross-ply laminated circular cylindrical shell subjected to distributed loads. *Computers & Structures* 2016;166:42–50.
- Caso R, Buffi A, Nepa P, Michel A. Multifunctional modular antenna for near-field ultra-high frequency radio frequency identification readers. *IE'T Microwaves, Antennas & Propagation* 2016;10:843–9. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2015.0632>.
- Caso R, Michel A, Buffi A, Nepa P, Isola G. A modular antenna for UHF RFID near-field desktop reader, *IEEE*; 2014, p. 204–7. <https://doi.org/10.1109/RFID-TA.2014.6934228>.
- Cassiolato C. Inductive Coupling and how to Minimize their Effects in Industrial Installations | SMAR - Industrial Automation. SMAR 2011. <http://www.smar.com/en/technical->

- article/inductive-coupling-and-how-to-minimize-their-effects-in-industrial-installations (accessed December 6, 2018).
- Cecconi B. Mesures Radio Spatiales: Goniopolarimétrie. *Comptes Rendus de l'Ecole de Goutelas: Radio Astronomie Basse Fréquence* 2011;30.
- CENELEC - EN 50215. CENELEC - EN 50215 - Railway Applications - Testing of Rolling Stock After Completion of Construction and Before Entry into Service | *Engineering360* 1999.
- CENELEC - EN 50238. CENELEC - EN 50238 - Railway applications – Compatibility between rolling stock and train detection systems | *Engineering360* 2003. <https://standards.globalspec.com/std/1271324/cenelec-en-50238> (accessed May 9, 2018).
- CENELEC - EN 50388. CENELEC - EN 50388 - Railway Applications - Power supply and rolling stock - Technical criteria for the coordination between power supply (substation) and rolling stock to achieve interoperability | *Engineering360* 2012. <https://standards.globalspec.com/std/1631007/cenelec-en-50388> (accessed May 9, 2018).
- Chaabane MM. Modélisation géométrique et mécanique pour les systèmes mécatroniques. PhD Thesis. Ecole Centrale Paris, 2014.
- Chaabane MM, Plateaux R, Choley J-Y, Karra C, Rivière A, Haddar M. Topological approach to solve frame structures using topological collections and transformations. *Comptes Rendus Mécanique* 2014;342:466–77. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2014.05.005>.
- Chabibi B, Anwar A, Nassar M. Model Integration Approach from SysML to MATLAB/Simulink. *Journal of Digital Information Management* 2018;16:289.
- Chahine I, Bunlon X, Lafon F, Daran F de, Matossian P. An Original Approach Based on Data Exchange Between Car Manufacturers and Suppliers to Estimate Susceptibility Threshold by Numerical Simulation at Early Design Stage. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2013;55:342–52. <https://doi.org/10.1109/TEM.2012.2221465>.
- Chami M, Aleksandraviciene A, Morkevicius A, Bruel J-M. Towards solving MBSE adoption challenges: the D3 MBSE adoption toolbox. *INCOSE International Symposium*, vol. 28, Wiley Online Library; 2018, p. 1463–1477.
- Chami M, Bruel J-M. A Survey on MBSE Adoption Challenges, Berlin, Germany: 2018.
- Chand B, Hähre K, Kechie J, Dickmann S. An EMC study of an electrical powertrain for transportation systems. *Adv Radio Sci* 2012;10:227–32. <https://doi.org/10.5194/ars-10-227-2012>.
- Chauvin F, Fanmuy G, Systèmes D. System Engineering on 3DEXPERIENCE Platform-UAS Use Case. *CSDM (Posters)*, Citeseer; 2014, p. 113–126.
- Chen C, Xu X. Modeling the conducted EMI emission of an electric vehicle (EV) traction drive. 1998 IEEE EMC Symposium. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No.98CH36253)*, vol. 2, 1998, p. 796–801 vol.2. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.1998.750301>.
- Chen Z, Frei S. Near-field measurement based prediction of antenna test results below 30 MHz in CISPR 25 setups, *IEEE*; 2016, p. 17–22. <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2016.7739294>.
- Chevallier G. Amortir les vibrations et les instabilités sans se mettre dans tous ses états. PhD Thesis. 2012.
- Chevallier G, Ghorbel S, Benjeddou A. A benchmark for free vibration and effective coupling of thick piezoelectric smart structures. *Smart Materials and Structures* 2008;17:065007.
- Choley JY, Hammadi M, Roumizadeh B, Penas O. Multi-physics Issues for 3D Electronics. Yokohama, Japan 2010.
- Christopoulos C. The transmission-line modeling method: TLM. Oxford University Press; 1995.

- Clarke CA, Larsen WE. Aircraft Electromagnetic Compatibility (No. D6-53840). BOEING COMMERCIAL AIRPLANE CO SEATTLE WA; 1987.
- Clément A, Rivière A, Serré P, Valade C. The TTRSs : 13 Constraints for Dimensioning and Tolerancing. *Geometric Design Tolerancing: Theories, Standards and Applications*, Springer, Boston, MA; 1998, p. 122–31. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5797-5_9.
- Convertisseur. Convertisseur DC/DC 2012. <https://www.twizy-forum.de/index.php/forum/19-Tips-und-Tricks/16737-Technische-Daten-Twizy-Lader-DC-DC-Wandler> (accessed July 3, 2020).
- Costa F, Vollaie C, Meuret R. Modeling of conducted common mode perturbations in variable-speed drive systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2005a;47:1012–21. <https://doi.org/10.1109/TEM.2005.857365>.
- Costa F, Vollaie C, Meuret R. Protocole d'identification des sources équivalentes de mode commun dans les convertisseurs statiques. *J3eA* 2005b;4:011.
- CRESITT Industrie. La CEM : Aspects physiques et technologie 2004.
- Cutting D, Noppen J. An extensible benchmark and tooling for comparing reverse engineering approaches. *International Journal on Advances in Software* 2015;8:115–124.
- Cuvilier J. Cours de CEM : Notions élémentaires 2000.
- Darkawi A. La Compatibilité Électromagnétique (CEM) 2016:106.
- Demoulin B. Initiation à la Compatibilité Electromagnétique 2004:264.
- Den Hartog JP. Mechanical vibrations. Courier Corporation; 1985.
- Derumaux M. Sur la modélisation et la simulation de liaisons soumises à des chocs pyrotechniques 2009:161.
- Détienne F, Martin G, Lavigne E. Viewpoints in co-design: a field study in concurrent engineering. *Design Studies* 2005;26:215–241.
- Di Natale M, Perillo D, Chirico F, Sindico A, Sangiovanni-Vincentelli A. A Model-based approach for the synthesis of software to firmware adapters for use with automatically generated components. *Software & Systems Modeling* 2018;17:11–33. <https://doi.org/10.1007/s10270-016-0534-0>.
- Dienot J-M. Investigations on electromagnetic noises and interactions in electronic architectures : a tutorial case on a mobile system. *Mediterranean Telecommunications Journal* 2012;2:pp 58 –73.
- Dijkstra EW, Scholten CS. Termination detection for diffusing computations. *Information Processing Letters* 1980;11:1–4.
- Dion J-L, Chevallier G, Peyret N. Improvement of measurement techniques for damping induced by micro-sliding. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2013;34:106–115.
- Djemal F. Analyse et optimisation des batteurs dynamiques non linéaires. PhD Thesis. Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris, 2015.
- Djemal F, Chaari F, Dion JL, Renaud F, Tawfiq I, Haddar M. Performance of a non linear dynamic vibration absorbers. *Journal of Mechanics* 2015;31:345.
- Djemal F, Chaari F, Dion JL, Renaud F, Tawfiq I, Haddar M. Asymptotic numerical method for the dynamic study of nonlinear vibration absorbers. *International Journal of Applied Mechanics* 2014;6:1450053.
- Do EY-L, Gross MD, Neiman B, Zimring C. Intentions in and relations among design drawings. *Design Studies* 2000;21:483–503.
- DoD D of D. Systems engineering fundamentals. Systems management college; 2001.
- Donins U. Software development with the emphasis on topology. *East European Conference on Advances in Databases and Information Systems*, Springer; 2009, p. 220–228.
- Doorgah N. Contribution à la modélisation prédictive CEM d'une chaine d'entraînement. PhD Thesis. Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2012.
- Doran T. IEEE 1220: for practical systems engineering. *Computer* 2006;39:92–94.

- Dumouchel P-E, Masfaraud S. (PDF) Electric gearbox optimization with Artificial Intelligence. ResearchGate 2018.
- Duperray B. Caractérisation dynamique des matériaux et réduction des nuisances vibroacoustiques: l'apport des vibrations. Partie 2. Acoustique & Techniques 2009;4–9.
- Durisic D, Staron M, Tichy M, Hansson J. Assessing the impact of meta-model evolution: a measure and its automotive application. *Softw Syst Model* 2017;1–27. <https://doi.org/10.1007/s10270-017-0601-1>.
- Duval F, Mazari B, Maurice O, Fouquet F, Louis A, Le Guyader T. MODELING OF BUNDLE WITH RADIATED LOSSES FOR BCI TESTING. In: INSA Toulouse F, editor. 3rd International Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, Toulouse, France: 2002, p. 27–30.
- Dyballa T, ter Haseborg JL. Investigations of the EM-coupling in the near and far field of a transmitting antenna according to EUROCAE ED-130. 2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE; 2010, p. 802–806.
- Ecole Supérieur de Plasturgie. COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE : COUPLAGES DES PERTURBATIONS 2001.
- Egot-Lemaire S, Klingler M, Lafon F, Marot C, Koné L, Baranowski S, et al. Modeling Methodology of Automotive Electronic Equipment Assessed on a Realistic Subsystem. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2012;54:1222–33. <https://doi.org/10.1109/TEM.2012.2200899>.
- El Fellous K. Contribution à l'élaboration d'une méthode d'analyse reposant sur une approche «équivalent circuit» pour l'étude de la pénétration d'ondes électromagnétiques dans une cavité. PhD Thesis. Limoges, 2010.
- Estefan Jeff A. Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies 2008;70.
- Estefan Jeff A. Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies. INCOSE; 2008.
- EUROCAE ED 14. EUROCAE ED 14 - ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND TEST PROCEDURES FOR AIRBORNE EQUIPMENT | Engineering360 1997. <https://standards.globalspec.com/std/9935773/eurocae-ed-14> (accessed May 9, 2018).
- Evans G, Hoover M, Winer E. Development of a 3D Conceptual Design Environment Using a Head Mounted Display Virtual Reality System. *Journal of Software Engineering and Applications* 2020;13:258. <https://doi.org/10.4236/jsea.2020.1310017>.
- Fiorèse S, Jean-Pierre M, Collectif AFIS. Découvrir et comprendre l'ingénierie système. Cépaduès éditions; 2012.
- Flint JA, Ruddle AR. THE GEMCAR PROJECT— GENERIC GUIDELINES FOR THE MODELLING OF AUTOMOTIVE EMC. In Proceedings of ARMMS 2001 RF and Microwave Conference 2001;7.
- Foissac M, Schanen J-L, Vollaie C. Compact EMC model of power electronics converter for conducted EMC studies in embedded networks. *Automotive Power Electronics* 2009;8.
- Ford Norms. FMC1278-Electromagnetic Compatibility Specification For Electrical/Electronic Components and Subsystems 2016.
- Forsberg K, Mooz H. 7.17. System Engineering for Faster, Cheaper, Better. INCOSE International Symposium, vol. 8, Wiley Online Library; 1998, p. 917–927.
- Forsberg K, Mooz H. The Relationship of System Engineering to the Project Cycle. INCOSE International Symposium 1991;1:57–65. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.1991.tb01484.x>.
- Forsberg K, Mooz H, Cotterman H. Visualizing project management: models and frameworks for mastering complex systems. John Wiley & Sons; 2005.
- Fortescue P, Swinerd G, Stark J. Spacecraft Systems Engineering. John Wiley & Sons; 2011.
- Fowler J. STEP for data management, exchange and sharing 1995.

- Frei S, Jobava RG, Topchishvili D. Complex approaches for the calculation of EMC problems of large systems. In *Electromagnetic Compatibility, 2004. EMC 2004. 2004 International Symposium on*, vol. 3, IEEE; 2004, p. 826–31. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2004.1349929>.
- Freund E. ISO/IEC 15288: 2002, Systems Engineering-System Life-Cycle Processes. *Software Quality Professional* 2005;8:42.
- Friedenthal S, Moore A, Steiner R. OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™) Tutorial. *INCOSE International Symposium* 2008;18:1731–862. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2008.tb00914.x>.
- Friedenthal S, Steiner R, Moore A. *A practical guide to SysML: the systems modeling language*. Elsevier/Morgan Kaufmann; 2009.
- Frikha A, Bensetti M, Pichon L, Lafon F, Duval F, Benjelloun N. Magnetic Shielding Effectiveness of Enclosures in Near Field at Low Frequency for Automotive Applications. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2015;57:1481–90. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2015.2463677>.
- Gabriel Kron. *Tensors for Circuits*. Dover Publications. 1959.
- Gandelli A, Grimaccia F, Zich RE. EMC strategy in wireless sensor packaging. 2006 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE; 2006, p. 582–585.
- Genender E, Garbe H, Sabath F. Probabilistic Risk Analysis Technique of Intentional Electromagnetic Interference at System Level. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2014;56:200–7. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2013.2272944>.
- GENESYS acel. MIL-STD-461F – MIL-STAND-461F. Acel Genesys 2015. <http://www.acelgenesys.fr/glossaire/mil-std-461f-2/> (accessed May 10, 2018).
- Gero JS, Kannengiesser U. The situated function–behaviour–structure framework. *Design Studies* 2004;25:373–391.
- Good MC, Sweet LM, Strobel KL. *Dynamic models for control system design of integrated robot and drive systems* 1985.
- Grady JO. *System Requirements Analysis*. Elsevier; 2010.
- Gräßler I, Hentze J, Bruckmann T. V-Models for Interdisciplinary Systems Engineering. DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference, 2018, p. 747–756.
- Gräßler I, Pottebaum J. IMMERSIVE ABSTRACTION: A NEW MORPHOLOGY OF INTUITIVE INTERACTION WITH SYSTEM MODELS. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, vol. 1, Cambridge University Press; 2020, p. 1295–1304.
- Greco S, Ehr Gott M, Figueira JR. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys, 2005. <https://doi.org/10.1007/b100605>.
- Gross J, Messe C, Rudolph S. A model based thermal systems engineering approach. *SECESA Conference Lissabon, Portugal*, vol. 17, 2012, p. 19.
- Guizani A, Hammadi M, Choley J-Y, Soriano T, Abbes MS, Haddar M. Multidisciplinary approach for optimizing mechatronic systems: Application to the optimal design of an electric vehicle. *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2014 IEEE/ASME International Conference on*, IEEE; 2014, p. 56–61.
- Günsaya A, Smythe D, Ruddle AR. Whole vehicle electromagnetic modeling: developments and applications. In *ERA Conference on Vehicle Electronic Systems* 2003.
- Guo Y, Wang L, Liao C. MODELING AND ANALYSIS OF CONDUCTED ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN ELECTRIC VEHICLE POWER SUPPLY SYSTEM. *PIER* 2013a;139:193–209. <https://doi.org/10.2528/PIER13031101>.
- Guo Y, Wang L, Liao C. Research on Electromagnetic Interference in the Energy Dynamic Processes of Power Battery in Electric Vehicles. 2013 IEEE Vehicle Power and

- Propulsion Conference (VPPC), 2013b, p. 1–5.
<https://doi.org/10.1109/VPPC.2013.6671742>.
- Guttowski S, Weber S, Hoene E, John W, Reichl H. EMC issues in cars with electric drives. 2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility Symposium Record (Cat No03CH37446) 2003;2:777–82. <https://doi.org/10.1109/isemc.2003.1236706>.
- Hahn A. Vehicle sketch pad: a parametric geometry modeler for conceptual aircraft design. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2010, p. 657.
- Hamelin RD, Walden DD, Krueger ME. 4.4. 2 incose systems engineering handbook v3. 2: Improving the process for se practitioners. INCOSE International Symposium, vol. 20, Wiley Online Library; 2010, p. 532–541.
- Hammadi M, Choley JY, Penas O, Louati J, Rivière A, Haddar M. Layout optimization of power modules using a sequentially coupled approach. International Journal of Simulation Modelling 2011;10:122–132.
- Hamza G. Contribution aux développements des modèles analytiques compacts pour l'analyse vibratoire des systèmes mécatroniques. PhD Thesis. Paris Saclay, 2016.
- Hamza G, Choley J-Y, Hammadi M, Riviere A, Barkallah M, Louati J, et al. Pre-designing of a mechatronic system using an analytical approach with dymola. Journal of Theoretical and Applied Mechanics 2015;53:697–710.
- Harrington RF. Field computation by moment methods. Wiley-IEEE Press; 1993.
- Haskins C. 4.6.1 A historical perspective of MBSE with a view to the future. INCOSE International Symposium 2011;21:493–509. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2011.tb01220.x>.
- Hassine J. Describing and assessing availability requirements in the early stages of system development. Software & Systems Modeling 2015;14:1455–79. <https://doi.org/10.1007/s10270-013-0382-0>.
- Hassoun F. Étude de l'émission électromagnétique générée par une transmission haut débit sur un réseau de type XDSL ou PLC. PhD Thesis. 2006.
- Hertkorn P, Reichwein A. On a model driven approach to engineering design. DS 42: Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design, Paris, France, 28.-31.07. 2007, 2007, p. 69–70.
- Hesener A. Electromagnetic Interference (EMI) in Power Supplies. In Fairchild Semiconductor Power Seminar 2010;2011:16.
- Hillenbrand P, Tenbohlen S, Keller C, Spanos K. Understanding conducted emissions from an automotive inverter using a common-mode model, IEEE; 2015, p. 685–90. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2015.7256246>.
- Hmid A. Dynamique d'équipements avec des non linéarités de liaisons localisées: Application aux systèmes optiques d'éclairage. PhD Thesis. Lyon, 2016.
- Holt J, Perry S. SysML for Systems Engineering. IET; 2008.
- Hubert A, YVARS P-A, Meyer yann, Zimmer L. Conception préliminaire optimale des systèmes électriques. Une approche par synthèse. Symposium de Genie Electrique, Grenoble, France: 2016.
- Hubing TH. Performance-Based EMC Design Using a Maximum Radiated Emissions Calculator. Journal of Electromagnetic Engineering and Science 2013;13:199–207. <https://doi.org/10.5515/JKIEES.2013.13.4.199>.
- IEC61967. Measurement of Electromagnetic Emission, 150 KHz–1 GHz: General Conditions and Definitions—Part 1. International Electrotechnical Commission Standard IEC61967-1 2002.
- IEC62132. Measurement of Electromagnetic Immunity, 150 KHz–1 GHz: General and Definitions. IEC Standard 2007:62132-1.

- IEEE 1220. 1220-1998 - IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process 1998. <https://standards.ieee.org/standard/1220-1998.html> (accessed January 5, 2020).
- Iglesias M, Echeverria I, Arteché F, Piedrafita J, Pradas A, Arcega FJ, et al. A characterization of EM coupling in a fully electric 4-wheel drive vehicle. 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015, p. 656–61. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2015.7256241>.
- INCOSE. INCOSE Handbook 2010v3.2 | Engineering | Systems Engineering. 2010.
- INCOSE DDW. Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities. San Diego, US-CA: International Council on Systems Engineering 2015.
- ISO 11452-1:2015. Road vehicles -- Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy -- Part 1: General principles and terminology 2015. <https://www.iso.org/standard/59609.html> (accessed May 9, 2018).
- ISO 11452-2:2004. ISO 11452-2:2004 - Véhicules routiers -- Méthodes d'essai d'un équipement soumis à des perturbations électriques par rayonnement d'énergie électromagnétique en bande étroite -- Partie 2: Chambre anéchoïque 2014. <https://www.iso.org/fr/standard/36570.html> (accessed May 9, 2018).
- ISO 11452-7:2003. Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 7: Direct radio frequency (RF) power injection. ISO 2003. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/83/38302.html> (accessed August 18, 2020).
- ISO/IEC 15288. ISO/IEC 15288 : Systems and software engineering - System life cycle processes, International Organization for Standardization (ISO) 2008. https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=ISO%2FIEC%2015288&item_s_key=00404731&csf=ASA (accessed January 5, 2020).
- Jaguar Land Rover Norms. EMC-CS-2010JLR v1.2 -Electromagnetic Compatibility Specification For Electrical/Electronic Components and Subsystems 2010.
- Jankovic M, Bocquet JC, Stal Le Cardinal J, Bavoux J-M. INTEGRAL COLLABORATIVE DECISION MODEL IN ORDER TO SUPPORT PROJECT DEFINITION PHASE MANAGEMENT. DS 36: Proceedings DESIGN 2006, the 9th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia 2006. <https://www.designsociety.org/publication/19145/INTEGRAL+COLLABORATIVE+DECISION+MODEL+IN+ORDER+TO+SUPPORT+PROJECT+DEFINITION+PHASE+MANAGEMENT> (accessed June 18, 2019).
- Jankovic M, Holley V, Yannou B. Multiple-domain design scorecards: a method for architecture generation and evaluation through interface characterisation. Journal of Engineering Design 2012;23:746–66. <https://doi.org/10.1080/09544828.2012.706270>.
- Jeschke S, Maarleveld M, Baerenfaenger J, Hirsch H, Tsiapenko S, Waldera C, et al. Development of a passive impedance network for modeling electric vehicle traction batteries for EMI measurements. 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, 2017, p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2017.8094615>.
- Jithesh V, Pande DC. A review on computational EMI modelling techniques. 8th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, IEEE; 2003, p. 159–166.
- Johnson TA. Integrating models and simulations of continuous dynamic system behavior into SysML. Thesis. Georgia Institute of Technology, 2008.
- Johnson TA, Jobe JM, Paredis CJ, Burkhart R. Modeling continuous system dynamics in SysML. ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2007, p. 197–205.
- jojusimz. jojusimz/GEMINI. 2020.

- Jridi N. Contribution to modeling the dynamic behavior of an elastomeric device. PhD Thesis. 2017.
- Kaiser KL. Electromagnetic compatibility handbook. CRC press; 2004.
- Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 1966;14:302–7. <https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138693>.
- Kapos G-D, Dalakas V, Nikolaidou M, Anagnostopoulos D. An integrated framework for automated simulation of SysML models using DEVS. *SIMULATION* 2014;90:717–44. <https://doi.org/10.1177/0037549714533842>.
- Kapurch SJ. NASA systems engineering handbook. Diane Publishing; 2010.
- Kaslow D, Soremekun G, Kim H, Spangelo S. Integrated model-based systems engineering (MBSE) applied to the Simulation of a CubeSat mission. 2014 IEEE Aerospace Conference, IEEE; 2014, p. 1–14.
- Kawahara R, Dotan D, Sakairi T, Ono K, Nakamura H, Kirshin A, et al. Verification of embedded system's specification using collaborative simulation of SysML and simulink models. 2009 International Conference on Model-Based Systems Engineering, IEEE; 2009, p. 21–28.
- Kazi S, Whelton M, C P, Ballard G, Professor AA, Tommelein ID. A Knowledge Management Framework for Project Definition. 2002.
- Kharrat Mouna, Abdeljabbar N, Penas O, Plateaux R, Louati J, Chaabane MM, et al. EMC risk assessment process through a topological analysis. 2018 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics, IEEE; 2018, p. 21–26.
- Kharrat M, Penas O, Abdeljabbar Kharrat N, Plateaux R, Choley J-Y, Louati J, et al. Topological approach for assessment of electromagnetic interferences to support mechatronic conceptual design. *Mechanics & Industry* 2020;21:609.
- Kharrat M, Penas O, Plateaux R, Trabelsi H, Choley J, Louati J, et al. Towards a 3D conceptual architecture framework, based on multi-physical constraints. 2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE), 2017, p. 1–8. <https://doi.org/10.1109/SysEng.2017.8088314>.
- Kharrat M., Trabelsi H, Penas O, Louati J, Choley JY, Haddar M. Integration of dynamic modeling in a conceptual architecture framework, applied in a Traction-Chain of Electric Vehicle. *ICAV'2018* 2018.
- Kim SH. Automating building energy system modeling and analysis: An approach based on SysML and model transformations. *Automation in Construction* 2014;41:119–38. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.018>.
- Kim T-H, Kim D-C, Eo Y-S. Signal Transient and Crosstalk Model of Capacitively and Inductively Coupled VLSI Interconnect Lines. *JSTS:Journal of Semiconductor Technology and Science* 2007;7:260–6. <https://doi.org/10.5573/JSTS.2007.7.4.260>.
- Kirawanich P, Kranthi N, Islam NE, Yakura SJ. Electromagnetic Topology-Based Analysis of Coupling through Small Aperture on Cables of Communication Systems. *Electromagnetics* 2005;25:589–602. <https://doi.org/10.1080/02726340500214837>.
- Kleiner S, Kramer C. Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6. In: Abramovici M, Stark R, editors. *Smart Product Engineering*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2013, p. 93–102. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30817-8_10.
- Kluge R, Stein M, Varró G, Schürr A, Hollick M, Mühlhäuser M. A systematic approach to constructing families of incremental topology control algorithms using graph transformation. *Softw Syst Model* 2017;1–41. <https://doi.org/10.1007/s10270-017-0587-8>.

- Komoto H, Tomiyama T. A framework for computer-aided conceptual design and its application to system architecting of mechatronics products. *Computer-Aided Design* 2012;44:931–46. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2012.02.004>.
- Konate C, Kosonen A, Ahola J, Machmoum M, Diouris J-F. Power Line Communication in Motor Cables of Inverter-Fed Electric Drives. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2010;25:125–31. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2035279>.
- Korber B, Sperling D, Gonschorek KH. Study of field coupling mechanism at susceptibility testing of automotive components in the Gigahertz range. 2007 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2007, p. 329–32. <https://doi.org/10.1109/EMCZUR.2007.4388262>.
- Kossiakoff A, Sweet WN, Seymour SJ, Biemer SM. *SYSTEMS ENGINEERING PRINCIPLES AND PRACTICE*. John Wiley & Sons 2003;83:559.
- Kunz KS, Luebbers RJ. The finite difference time domain method for electromagnetics. CRC press; 1993.
- Kut T, Chand B, Lücken A, Dickmann S, Schulz D. EMC studies on systems with hybrid filter circuits for modern aircraft applications. *Advances in Radio Science* 2013;11:237–42. <https://doi.org/10.5194/ars-11-237-2013>.
- Kvan T. Collaborative design: what is it? *Automation in Construction* 2000;9:409–15. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(99\)00025-4](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(99)00025-4).
- Lafi S. A new hardware abstraction-based radiofrequency design methodology : foundations and case studies. phd. École de technologie supérieure, 2016.
- Lafon F, Daran FD, Ramdani M, Perdriau R, Drissi M. Immunity Modeling of Integrated Circuits: An Industrial Case. *IEICE Trans Commun* 2010;E93.B:1723–30. <https://doi.org/10.1587/transcom.E93.B.1723>.
- Lafon F, Maurice O, de Daran F, Lochot C, Calvet S. Exploitation of the ICEM model in an automotive application. *EMC Compo* 2004.
- Lai J-S, Huang X, Chen S, Nehl TW. EMI characterization and simulation with parasitic models for a low-voltage high-current AC motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2004;40:178–185.
- Lampin J-F. *Unité de Base: Transmission de l'Information* 2005:60.
- Lardellier M. Contribution à l'étude des perturbations électromagnétiques générées par des convertisseurs. PhD Thesis. 1996.
- Lardeur E. Improvement of the engineering efficiency in a systems engineering context, case of automotive products and related manufacturing systems engineering. PhD Thesis. 2003.
- Legendre A. Ingénierie système et Sûreté de fonctionnement: Méthodologie de synchronisation des modèles d'architecture et d'analyse de risques. PhD Thesis. 2017.
- Leman S. Contribution à la résolution de problèmes de compatibilité électromagnétique par le formalisme des circuits électriques de Kron. PhD Thesis. Lille 1, 2009.
- Leonard J. *Systems engineering fundamentals*. DEFENSE SYSTEMS MANAGEMENT COLL FORT BELVOIR VA; 1999.
- Li G, Hess G, Hoeckele R, Davidson S, Jalbert P, Khilkevich VV, et al. Measurement-Based Modeling and Worst-Case Estimation of Crosstalk Inside an Aircraft Cable Connector. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2015;57:827–35. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2377012>.
- Liang Y, Yao Y, Yu J, Chen X. Design of a novel meander line reader antenna for UHF near-field RFID, *IEEE*; 2016, p. 19–21. <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2016.7833913>.
- Lim JY, See KY, Chua EK. Impact of Circuit Impedance on Signal Crosstalk, 2015.
- Liu Y, Xie Y, Zhang Y. “Top-Down” Design Flow and Its Applications in Multi-Vehicle Communication System’s EMC Design. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China* 2010;39(5), 720–4.

- Lopez C, Malburet F, Barraco A. Minimisation des oscillations d'un système mécanique excité à l'aide d'une commande semi active. Application à un atterrissage d'hélicoptère 2005:8.
- Lutfi M, Valerdi R. Virtual Reality in Model Based Systems Engineering: A Review Paper. In: Stephanidis C, Antona M, Ntoa S, editors. HCI International 2020 – Late Breaking Posters, Cham: Springer International Publishing; 2020, p. 197–205. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60703-6_25.
- Ma Y, Wen Y, Zhang D. Prediction and Analysis of Crosstalk in High Speed EMUs. In Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE), 2013 IEEE 5th International Symposium On 2013:735–9.
- Madni A, Purohit S. Economic Analysis of Model-Based Systems Engineering. Systems 2019;7:12. <https://doi.org/10.3390/systems7010012>.
- Magnon D. Compatibilité électromagnétique 2006.
- Magnon D. Compatibilité électromagnétique 2005.
- Manchester K, Bird D. Thermal resistance: A reliability consideration. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology 1980;3:580–587.
- Mardiguian M. Manuel pratique de compatibilité électromagnétique: prédictions et solutions aux perturbations électromagnétiques. Lavoisier; 2003.
- Marlier C. Modélisation des perturbations électromagnétiques dans les convertisseurs statiques pour des applications aéronautiques. PhD Thesis. Lille 1, 2013.
- Martin JN. Processes for engineering a system: an overview of the ANSI/EIA 632 standard and its heritage. Systems Engineering 2000;3:1–26. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6858\(2000\)3:1<1::AID-SYS1>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6858(2000)3:1<1::AID-SYS1>3.0.CO;2-0).
- Masfaraud S, Danes F, Dumouchel P-E, De Vuyst F, Vayatis N. Automatized gearbox architecture design exploration by exhaustive graph generation 2016:11.
- Matei I, Bock C, Matei I. SysML extension for dynamical system simulation tools. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology; 2012.
- Maurice O. TACS 4 BISE & SUETAN. 2018a.
- Maurice O. Quelques exemples d'analyses théoriques en compatibilité électromagnétique. Bookelis; 2018b.
- Maurice O. Elements of theory for electromagnetic compatibility and systems. Bookelis; 2017.
- Maurice O. Adaptation of Kron's Tensorial Analysis of Network for the EMC Design and Analysis of Systems 2016a.
- Maurice O. Compatibilité électromagnétique - Notions fondamentales. Techniques de l'ingénieur 2016b;E1302 v2.
- Maurice O. Theoretical Application of the Tensorial Analysis of Network for EMC at the System Level. 2007a.
- Maurice O. La compatibilité électromagnétique des systèmes complexes. Cachan: Lavoisier; 2007b.
- Maurice O. Theoretical application of the tensorial analysis of network for EMC at the system level 2007c.
- Maurice O, Hubert G, Yalcin E, Lafon F. Notions de CEM des systèmes 2011:23.
- Maurice O, Reineix A. Proposition d'un formalisme comme support pour les études théoriques en systémique, 2011.
- McNair PAC, Olver AD. Prediction of compact antenna range performance by radiative coupling. Radio Science 1991;26:625–30. <https://doi.org/10.1029/90RS00968>.
- Melit M. Etude des perturbations dans les convertisseurs de l'électronique de puissance. PhD Thesis. 2008.
- Mescoco A. Etude des émissions électromagnétiques CPL large-bande: caractérisation, modélisation et méthodes de mitigation. PhD Thesis. 2013.
- Messier MA. EMP hardening topology expert system (Hard Top). Electromagnetics 1986;6:79–93.

- Meyer Y, Yvars P-A. Optimization of a passive structure for active vibration isolation: an interval-computation- and constraint-propagation-based approach. *Engineering Optimization* 2012;44:1463–89. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2011.652102>.
- Mhenni F, Choley J-Y, Penas O, Plateaux R, Hammadi M. A SysML-based methodology for mechatronic systems architectural design. *Advanced Engineering Informatics* 2014;28:218–231.
- MIL-STD 461. MIL-STD-461 ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE CHARACTERISTICS 2015. http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461_8678/ (accessed May 10, 2018).
- MIL-STD 462. MIL-STD-462 D MEASUREMENT ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE 1999. http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-462D_25262/ (accessed May 10, 2018).
- MIL-STD 464. MIL-STD-464 C INTERFACE ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENTAL 2010. http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-464C_28312/ (accessed May 9, 2018).
- Mishra D, Mishra S, Agnihotry P, Kaushik BK. Effect of Distributed Shield Insertion on Crosstalk in Inductively Coupled VLSI Interconnects. *ArXiv:10062820 [Cs]* 2010.
- Mix J, Haussmann G, Piket-May M, Thomas K. EMC/EMI design and analysis using FDTD. 1998 IEEE EMC Symposium. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No. 98CH36253), vol. 1, IEEE; 1998, p. 177–181.
- Mologni JF, Bonadiman M, Guimaraes AC, Alvarenga L, Colin A, Paulino JOS. Accelerating the Vehicle Development Process by Employing EMI and EMC Numerical Analysis Assisted by High Performance Computing. Warrendale, PA: SAE International; 2010a. <https://doi.org/10.4271/2010-36-0037>.
- Mologni JF, Bonadiman M, Guimarães AC, Alvarenga L, Colin A, Paulino JOS. Accelerating the vehicle development process by employing EMI and EMC numerical analysis assisted by high performance computing. *SAE Technical Paper*; 2010b.
- Montrol T, Jay J, Xin S, Knikker R, Decrescenzo M-L, Moureaux A. Construction d'un modèle thermique nodal pour la phase de prédimensionnement d'un équipement roue et frein aéronautique: méthodologie et simplifications, 2012.
- Mooz H, Forsberg K. The Dual Vee – Illuminating the Management of Complexity. *INCOSE International Symposium* 2006;16:1368–81. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2006.tb02819.x>.
- Moreau M, Idir N, Le Moigne P, Franchaud JJ. Utilization of a behavioural model of motor drive systems to predict the conducted emissions. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, IEEE; 2008, p. 4387–4391.
- Morgan D. A Handbook for EMC Testing and Measurement. vol. 8. Iet. 1994.
- Mori Y. Vibrations mécaniques: Applications aux matériels. ISTE Group; 2016.
- Moteur. Moteur électrique de la voiture Renault Twizy. *Jumping Jack Flash weblog* 2014. <https://jumpjack.wordpress.com/2014/08/25/specifische-tecniche-dettagliate-renault-twizy/> (accessed July 3, 2020).
- Moullec M-L, Bouissou M, Jankovic M, Bocquet J-C. PRODUCT ARCHITECTURE GENERATION AND EXPLORATION USING BAYESIAN NETWORKS. DS 70: Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia 2012. <https://www.designsociety.org/publication/32145/PRODUCT+ARCHITECTURE+GENERATION+AND+EXPLORATION+USING+BAYESIAN+NETWORKS> (accessed July 1, 2019).
- Muller G. Systems architecting: A business perspective. *INCOSE International Symposium*, vol. 21, Wiley Online Library; 2011, p. 1845–2142.

- Narayanappa P, Daseswararao YV. VIBRATION SUPPRESSION USING MECHATRONIC SYSTEMS 2013;3:4.
- Navuri K, Prakash D, Mani PB, Kumar AE. Shock Response Analysis of Mechanical Hardware of Flight Data Recorder. *Materials Today: Proceedings* 2017;4:8000–8009.
- Neumayer R, Stelzer A, Haslinger F, Held J, Schinco F, Weigel R. Continuous simulation of system-level automotive EMC problems. 2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No.03CH37446), vol. 1, 2003, p. 409–13 vol.1. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2003.1236631>.
- NEY M. Simulation électromagnétique: Outils de conception. *Techniques de l'ingénieur Electronique* 2006;4.
- Ney MM, Le Maguer S. The Transmission-Line Matrix (TLM) method: An efficient tool for passive component field modeling. *New trends and concepts in microwave theory and technics* 2003, 2003, p. 83–115.
- Nguyen AV. Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances de systèmes robotiques. PhD Thesis. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2015.
- Nuns J, Foch H, Metz M, Yang X. Radiated and conducted interferences in induction heating equipment: Characteristics and remedies. 1993 Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, IET; 1993, p. 194–199.
- Oliva G, Setola R, Glielmo L, Hadjicostis CN. Distributed Cycle Detection and Removal. *IEEE Transactions on Control of Network Systems* 2018;5:194–204. <https://doi.org/10.1109/TCNS.2016.2593264>.
- OMG. SysML Extension for Physical Interaction and Signal Flow Simulation 2018.
- OMG. About the XML Metadata Interchange Specification Version 2.5.1 2015. <https://www.omg.org/spec/XMI/About-XMI/> (accessed November 13, 2019).
- OMG. OMG Systems Modeling Language (OMG SysML) Version 1.2. 2010.
- Omori T, Sasaki H, Jingu H, Robin R-K. Antenna design and its application for near field disturbance measurement in upper VHF band, *IEEE*; 2009, p. 18–23. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2009.5284699>.
- Onduleur TWIZY. Onduleur SEVCON GEN4 Type2 2015. <http://www.renault-twizy.info/forum-twizy/remplacement-sevcon-gen4-type2-par-type-t1386.html> (accessed July 3, 2020).
- Pairedamonchai P, Sangwongwanich S. Exact common-mode and differential-mode equivalent circuits of inverters in motor drive systems taking into account input rectifiers. 2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2011, p. 278–85. <https://doi.org/10.1109/PEDS.2011.6147259>.
- Paredis C. System Analysis using SysML Parametrics: Current Tools and Best Practices 2008.
- Paredis CJJ, Bernard Y, Burkhart RM, Koning H-P de, Friedenthal S, Fritzson P, et al. 5.5.1 An Overview of the SysML-Modelica Transformation Specification. *INCOSE International Symposium* 2010;20:709–22. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2010.tb01099.x>.
- Parmentier J-. Numerical coupling models for complex systems and results. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2004;46:359–67. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2004.831818>.
- Parmentier JP, Alliot JC, Labaune G, Degauque P. Electromagnetic coupling on complex systems: Topological approach. *Interaction Notes* 1990;488.
- Parmentier J-P, Junqua I. EM topology: From theory to application. *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics* 7, Springer; 2007, p. 3–12.
- Paul CR. Analysis of multiconductor transmission lines. John Wiley & Sons; 2008.
- Paul CR. A Brief History of Work in Transmission Lines for EMC Applications. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2007;49:237–52. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2007.897162>.

- Paul CR. Derivation of common impedance coupling from the transmission-line equations. Eighth International Conference on Electromagnetic Compatibility, 1992., 1992, p. 196–201. <https://doi.org/10.1109/15.155847>.
- Paul CR. Sensitivity of Crosstalk to Variations in Wire Position in Cable Bundles. 1987 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zurich: 1987, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.1987.7570814>.
- Paul CR, Abraham RT. Coupling of Electromagnetic Fields to Transmission Lines. 1981 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1981, p. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.1981.7569923>.
- Paul CR, Edwards JH. Computer Aided Compatibility Prediction. 1971 IEEE International Electromagnetic Compatibility Symposium Record, 1971, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.1971.7567944>.
- Paviot T, Lamouri S, Cheutet V. A generic multiCAD/multiPDM interoperability framework 2011.
- Peak RS, Fulton RE, Nishigaki I, Okamoto N. Integrating engineering design and analysis using a multi-representation approach. *Engineering with Computers* 1998;14:93–114.
- Penas O, Plateaux R, Choley JY, Rivière A. The different complexity levels in mechatronic design process. 3rd International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications SKIMA, Fès, Morocco, 2009.
- Perry N, Mauchand M, Bernard A. Costs Models in Design and Manufacturing of Sand Casting Products. In: Bramley A, Brissaud D, Coutellier D, McMahon C, editors. *Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag; 2005, p. 69–80. https://doi.org/10.1007/1-4020-3482-2_6.
- Plateaux R. Continuité et cohérence d'une modélisation des systèmes mécatroniques basée(s) sur une structure topologique. PhD Thesis. Ecole Centrale Paris, 2011.
- Plateaux R, Choley JY, Penas O, Riviere A. Towards an integrated mechatronic design process. 2009 IEEE International Conference on Mechatronics, 2009, p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICMECH.2009.4957237>.
- Plateaux R, Penas O, Barbedienne R, Hehenberger P, Choley J-Y, Warniez A. Use of technologically and topologically related surfaces (TTRS) geometrical theory for mechatronic design ontology. *Computer-Aided Design and Applications* 2017;14:595–609. <https://doi.org/10.1080/16864360.2017.1280270>.
- Pommerenke D, Sakaguchi S. Application of Maxwell solvers to PD propagation. I. Concepts and codes. *IEEE Electr Insul Mag* 2002;18:15–21. <https://doi.org/10.1109/MEI.2002.1044317>.
- Pop A, Akhvlediani D, Fritzson P. Towards Unified System Modeling with the ModelicaML UML Profile. *International Workshop on Equation-Based Object-Oriented Languages and Tools* 2007:12.
- Poulichet P. Chapitre 1: Introduction à la Compatibilité électromagnétique 2010.
- Pratt MJ, Anderson BD. A shape modelling applications programming interface for the STEP standard. *Computer-Aided Design* 2001;33:531–43. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(01\)00052-5](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00052-5).
- Punz S, Hehenberger P, Follmer M, Zeman K. CUSTOMER ORIENTED CONCEPT DEVELOPMENT IN MECHATRONIC PRODUCT DESIGN. DS 60: Proceedings of DESIGN 2010, the 11th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia 2010. <https://www.designsociety.org/publication/29438/CUSTOMER+ORIENTED+CONCEPT+DEVELOPMENT+IN+MECHATRONIC+PRODUCT+DESIGN> (accessed July 1, 2019).
- Qamar A, Wikander J, During C. A mechatronic design infrastructure integrating heterogeneous models. 2011 IEEE International Conference on Mechatronics, IEEE; 2011, p. 212–217.

- Qin SF, Harrison R, West AA, Jordanov IN, Wright DK. A framework of web-based conceptual design. *Computers in Industry* 2003;50:153–64. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(02\)00117-3](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(02)00117-3).
- Qin Y, Lu W, Qi Q, Liu X, Zhong Y, Scott PJ, et al. Status, comparison, and issues of computer-aided design model data exchange methods based on standardized neutral files and web ontology language file. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 2017;17:010801.
- Rameau J-F, Alt L, Saint-Honorine C. PROVIDING DESIGN OF ANASSEMBLY MODELED BY A GRAPH 2012:31.
- Rameau J-F, Serré P. Dimensional perturbation of rigidity and mobility. *Computer-Aided Design* 2016;71:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.08.004>.
- Ranganathan S, Beetner DG, Wiese R, Hubing TH. An expert system architecture to detect system-level automotive EMC problems. *Electromagnetic Compatibility*, 2002. EMC 2002. IEEE International Symposium on, vol. 2, IEEE; 2002, p. 976–981.
- Reichwein A. SysML-Modelica integration. *OMG SysML Portal* 2012. http://www.omgwiki.org/OMGSysML/doku.php?id=sysml-modelica:sysml_and_modelica_integration (accessed May 10, 2018).
- Reichwein A. Application-specific UML profiles for multidisciplinary product data integration 2011.
- Reichwein A, Paredis CJ, Canedo A, Witschel P, Stelzig PE, Votintseva A, et al. Maintaining consistency between system architecture and dynamic system models with SysML4Modelica. *Proceedings of the 6th International Workshop on Multi-Paradigm Modeling*, ACM; 2012, p. 43–48.
- Renaud F, Dion J-L, Chevallier G, Tawfiq I, Lemaire R. A new identification method of viscoelastic behavior: Application to the generalized Maxwell model. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2011;25:991–1010.
- Renault Twizy. Batterie 12V. Renault Twizy 2014. <http://www.renault-twizy.info/forum-twizy/twizy-demarre-plus-tableau-bord-eteint-t657-40.html> (accessed July 3, 2020).
- Reuter M, Friedl T, Tenbohlen S, Kohler W. Emulation of conducted emissions of an automotive inverter for filter development in HV networks. *Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 2013 IEEE International Symposium on, IEEE; 2013a, p. 236–41. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2013.6670416>.
- Reuter M, Tenbohlen S, Köhler W. Influence of a traction battery's input impedance on conducted emissions of an automotive HV inverter. *2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2013b, p. 229–34. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2013.6670416>.
- Revol B. La CEM appliquée à l'électronique de puissance 2018.
- Revol B, Roudet J, Schanen J-L, Loizelet P. EMI study of three-phase inverter-fed motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2010;47:223–231.
- Richard D, Dubel Y. Valeo StARS Technology: A Competitive Solution for Hybridization, IEEE; 2007, p. 1601–5. <https://doi.org/10.1109/PCCON.2007.373178>.
- Richelli A. EMI Susceptibility Issue in Analog Front-End for Sensor Applications. *Journal of Sensors* 2016;2016:1–9. <https://doi.org/10.1155/2016/1082454>.
- Rill G. Vehicle modeling by subsystems. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 2006;28:430–442.
- Römer A, Pache M, Weißhahn G, Lindemann U, Hacker W. Effort-saving product representations in design—results of a questionnaire survey. *Design Studies* 2001;22:473–491.
- Royce WW. Managing the development of large software systems. *proceedings of IEEE WESCON*. Los Angeles 1970:328–388.

- RTCA DO-160. RTCA DO-160 - Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment | Engineering360 2007.
<https://standards.globalspec.com/std/1294414/rta-do-160> (accessed May 9, 2018).
- Ruddle AR, Martin AJM, Ward DD, Street W. QUANTITATIVE DATA COMPARISONS: APPLICATIONS AND EXPERIENCES IN AUTOMOTIVE EMC. In Zurich International EMC Symposium 2003:7.
- Rybak T, Steffka M. Automotive Electromagnetic Compatibility (EMC). Springer Science & Business Media; 2004.
- SAE international. Electrical interference by conduction and coupling - capacitive and inductive coupling via lines other than supply lines j1113/12_201711, electromagnetic compatibility (emc) standards, sae international 2017:42.
https://doi.org/10.4271/j1113/12_201711.
- Safar M, Alenzi K, Albehairy S. Counting cycles in an undirected graph using DFS-XOR algorithm. 2009 First International Conference on Networked Digital Technologies, 2009, p. 132–9. <https://doi.org/10.1109/NDT.2009.5272160>.
- Sanchez F, Budinger M, Hazyuk I. Dimensional analysis and surrogate models for the thermal modeling of Multiphysics systems. Applied Thermal Engineering 2017;110:758–771.
- Šarga P, Hroncová D, Čurilla M, Gmitterko A. Simulation of Electrical System using Bond Graphs and MATLAB/Simulink. Procedia Engineering 2012;48:656–64.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.567>.
- Sarlioglu B, Morris CT. More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft. IEEE Transactions on Transportation Electrification 2015;1:54–64. <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2426499>.
- Schamai W, Fritzson P, Paredis C, Pop A. Towards Unified System Modeling and Simulation with ModelicaML: Modeling of Executable Behavior Using Graphical Notations. 7th Modelica. Conference, Linköping University Electronic Press, Como, Italy.: F. Casella; 2009, p. 612–21. <https://doi.org/10.3384/ecp09430081>.
- Schlager KJ. Systems engineering-key to modern development. IRE Transactions on Engineering Management 1956:64–66.
- Schneider. Couplage capacitif — Guide de l'Installation Electrique 2017.
- SE Handbook Working Group. Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities. International Council on Systems Engineering (INCOSSE): San Diego, CA, USA 2011:1–386.
- Selim GMK, Wang S, Cordy JR, Dingel J. Model transformations for migrating legacy deployment models in the automotive industry. Software & Systems Modeling 2015;14:365–81.
<https://doi.org/10.1007/s10270-013-0365-1>.
- Sénéchal A. Réduction de vibrations de structure complexe par shunts piézoélectriques: Application aux turbomachines. PhD Thesis. Paris, CNAM, 2011.
- Seshu P. Substructuring and component mode synthesis. Shock and Vibration 1997;4:199–210.
- Shah JJ, Rogers MT. Functional requirements and conceptual design of the feature-based modelling system. Computer-Aided Engineering Journal 1988;5:9–15.
- Shahparnia S, Ramahi OM. Electromagnetic interference (EMI) reduction from printed circuit boards (PCB) using electromagnetic bandgap structures. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 2004;46:580–587.
- Shen M, Shah S, Eftekhari R. Study of electromagnetic interference on distribution conductors from parallel transmission line and practical mitigation solutions. 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, IEEE; 2014, p. 1–9.
- Shen W, Hao Q, Li W. Computer supported collaborative design: Retrospective and perspective. Computers in Industry 2008a;59:855–862.
- Shen W, Hao Q, Li W. Computer supported collaborative design: Retrospective and perspective. Computers in Industry 2008b;59:855–862.

- Shukla AK, Nirmala S. EMI/EMC for military aircraft and its challenges. 2006 9th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC 2006), IEEE; 2006, p. 101–107.
- da Silva MM, Desmet W, Van Brussel H. Design of mechatronic systems with configuration-dependent dynamics: simulation and optimization. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2008;13:638–646.
- Silvester PP, Ferrari RL. *Finite Elements for Electrical Engineers*. Cambridge University Press; 1996.
- Sjöstedt C-J. *Modeling and Simulation of Physical Systems in a Mechatronic Context*. DIVA 2009.
- Sormunen P. Development of the electrical load analysis capability for Airbus A350 in Finnair 2018:61.
- Spoto J, Chrisikos G, Heimlich M, Maas S. The importance and challenges of comprehending circuit and physical phenomena in RF system design and integration. 2006 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology Proceedings, IEEE; 2006, p. 1825–1828.
- Suh IS, Lee MY, Vu DD. Prototype design and evaluation of an FSAE-based pure electric vehicle with wireless charging technology. *Int J Automot Technol* 2014;15:1165–74. <https://doi.org/10.1007/s12239-014-0121-8>.
- Sumithra P, Thiripurasundari D. Review on computational electromagnetics. *Advanced Electromagnetics* 2017;6:42–55.
- Sun S, Drewniak J, Pommerenke D. Common-mode radiation resulting from handassembled cable bundles on automotive platforms. *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on EMC, vol. 2, IEEE; 2006, p. 298–303.* <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2006.1706315>.
- Sun Y, Chaoqun J. (2) The Current Status of Automotive Electromagnetic Compatibility Research. In *PIERS Proceeding* 2009.
- Tadros Y, Ranneberg J, Schäfer U. Ring shaped motor-integrated electric drive for hybrid electric vehicles. *Conférence EPE, Toulouse, 2003*.
- Taflove A, Hagness SC. *Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method*. Norwood, 2nd Edition, MA: Artech House, L995 1995.
- Tesche FM. Topological concepts for internal EMP interaction. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 1978:60–64.
- Tounsi Chakroun D. Formulation et mise en oeuvre d'un élément continu de coque axisymétrique raidie. PhD Thesis. Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris, 2015.
- Trabelsi H. Contribution à la prise en compte d'exigences dynamiques en conception préliminaire de systèmes complexes. PhD Thesis. 2014.
- Trabelsi H, Yvars P-A, Louati J, Haddar M. CSP approach and interval computation for the coupling between static and dynamic requirements in the preliminary design of a compression spring. *European Journal of Computational Mechanics* 2013;22:183–97. <https://doi.org/10.1080/17797179.2013.820888>.
- Trindade MA, Benjeddou A. Effective electromechanical coupling coefficients of piezoelectric adaptive structures: critical evaluation and optimization. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 2009;16:210–223.
- Tsai H-C. Reliable study of digital IC circuits with margin voltage among variable DC power supply, electromagnetic interference and conducting wire antenna. *Microelectronics Reliability* 2003;43:2001–9. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2003.08.010>.
- Turki S, Soriano T. A SysML extension for Bond Graphs support. *IEEE ICTA'05 Thessaloniki, Greece* 2005:6.
- Vosgien T, Van TN, Jankovic M, Eynard B, Bocquet J-C. Towards model-based system engineering for simulation-based design in product data management systems. *IFIP*

- International Conference on Product Lifecycle Management, Springer; 2012, p. 612–622.
- Vrignon B, Caunegre P, Shepherd J, Wu J. Automatic verification of EMC immunity by simulation. 2013 9th International Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo), 2013, p. 202–7. <https://doi.org/10.1109/EMCCompo.2013.6735201>.
- Wang AG, Ren GF. Study of crosstalk between the harnesses of TCU controller. 2016 13th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP), 2016, p. 444–7. <https://doi.org/10.1109/ICCWAMTIP.2016.8079891>.
- Wang L, Shen W, Xie H, Neelamkavil J, Pardasani A. Collaborative conceptual design—state of the art and future trends 2002:16.
- Wang Y, Yu S, Xu T. A user requirement driven framework for collaborative design knowledge management. *Advanced Engineering Informatics* 2017;33:16–28. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2017.04.002>.
- Warniez A, Penas O, Plateaux R, Soriano T. SysML geometrical profile for integration of mechatronic systems. 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2014, p. 709–14. <https://doi.org/10.1109/AIM.2014.6878162>.
- Wattiaux D, Verlinden O. Modelling of the Dynamic Behaviour of Electromechanical Relays for the Analysis of Sensitivity to Shocks and Vibrations. *Exp Mech* 2011;51:1459–72. <https://doi.org/10.1007/s11340-011-9478-z>.
- Weber S, Guttowski S, Hoene E, John W, Reichl H. EMI coupling from automotive traction systems. 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC'03., vol. 1, IEEE; 2003, p. 591–594.
- Willmann B, Rinkleff T, Obholz M, Vick R. Automotive industry's EMC requirements for voltage ripple in the high-voltage system of electrical vehicles, *IEEE*; 2015, p. 673–8. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2015.7256244>.
- Wolmarans JJ, Polinder H, Ferreira JA, Zeilstra D. A fault tolerant drive for high speed permanent magnet machines. *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2011, p. 1–10.
- Yan Y, Li QM. Low-pass-filter-based shock response spectrum and the evaluation method of transmissibility between equipment and sensitive components interfaces. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2019;117:97–115.
- Yao Y, Liang Y, Yu J, Chen X. A Broadband Near-Field UHF RFID Reader Antenna With Low Far-Field Gain. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2017;65:4869–74. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2731375>.
- Yee KS, Chen JS. The finite-difference time-domain (FDTD) and the finite-volume time-domain (FVTD) methods in solving Maxwell's equations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 1997;45:354–63. <https://doi.org/10.1109/8.558651>.
- Yvars P-A. A CSP approach for the network of product lifecycle constraints consistency in a collaborative design context. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2009;22:961–970.
- Zach M, Siedl D. A New Method for Simulation of Machining Performance by Integrating Finite Element and Multi-body Simulation for Machine Tools. *CIRP Annals* 2007;56:383–6. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.089>.
- Zamir R, Bar-Natan V, Recht E. System level EMC - from theory to practice. 2005 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2005. EMC 2005., vol. 3, 2005, p. 741–743 Vol. 3. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2005.1513622>.

- Zangui S, Berger K, Vollaire C, Clavel E, Perrussel R, Vincent B. Modeling the near-field coupling of EMC filter components, IEEE; 2010, p. 825–30. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2010.5711386>.
- Zhang Y, Zhang X, Ding Y, Jiang L. Research on Electromagnetic Compatibility of New Energy Vehicles. DEStech Transactions on Engineering and Technology Research 2017;0. <https://doi.org/10.12783/dtetr/icvmee2017/14638>.
- Zhao H, Li G, Wang N, Zheng S, Yu L, Chen Y. Study of EMC Problems with Vehicles. Information Computing and Applications, Springer, Berlin, Heidelberg; 2013, p. 159–68. https://doi.org/10.1007/978-3-642-53932-9_16.
- Zimmer L, Lafaye M, Yvars P-A. Modélisation d'exigences pour la synthèse d'architecture avionique: Application à la sûreté de fonctionnement, 2017.

Annexe 1 : Interférences ElectroMagnétiques (IEM)

L'évaluation des IEM nécessitent des courants, des tensions, des champs électriques ou magnétiques qui sont variables dans le temps. Par conséquent, dans la suite du manuscrit, lorsque l'on parlera de ces grandeurs électriques, on les supposera dépendantes du temps.

I. Transmission par conduction

A. Couplage par liaison directe

Dans le couplage par **liaison directe (LD)**, les perturbations se propagent de l'équipement source à l'équipement victime via un canal de transmission d'énergie ou d'information (Figure 115).

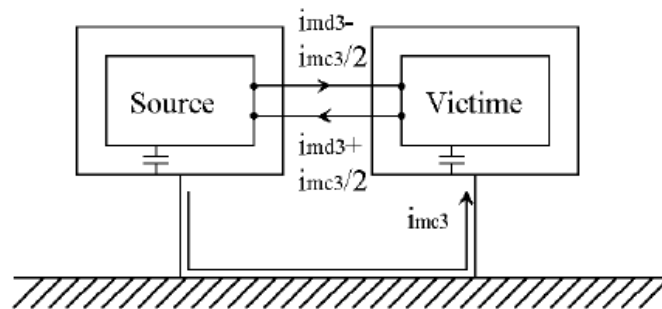


Figure 115 : Couplage par liaison directe en mode commun et différentiel (Magnon, 2006)

B. Couplage par impédance commune

Un couplage par **impédance commune (IC)** entre deux ou plusieurs mailles (ou circuits électriques) se produit lorsqu'une maille perturbatrice et une maille réceptrice ont en commun une branche commune dont l'impédance n'est pas négligeable. Cette impédance commune peut être par exemple : la liaison de masse, un réseau de distribution d'énergie, un conducteur de retour de différents signaux, etc. En effet, tout courant (utile ou parasite) qui circule dans un conducteur va générer une différence de potentiel (d.d.p) parasite entre ses extrémités. Dans la Figure 116, un courant qui circule dans la maille M1 a provoqué une tension parasite dans la maille M2. Cette tension parasite peut produire des IEM, qui proviennent soit du courant I_1 en fonctionnement normal, soit d'une source extérieure au système (comme par exemple la foudre...).

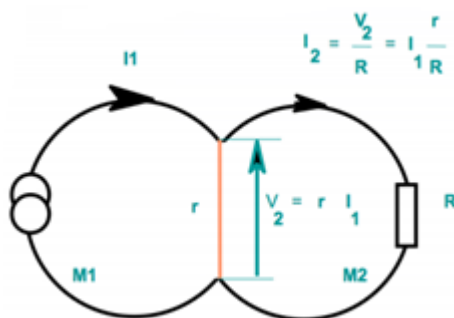


Figure 116 : Couplage par impédance commune (Darkawi, 2016)

Afin d'éliminer ces IEM créés par le couplage par impédance commune, il faut éviter les branches (ou tronçons) communes en reliant toutes les masses en un seul point (point d'interconnexion, Figure 117) ou diminuer leurs impédances (par exemple en augmentant la section des conducteurs).

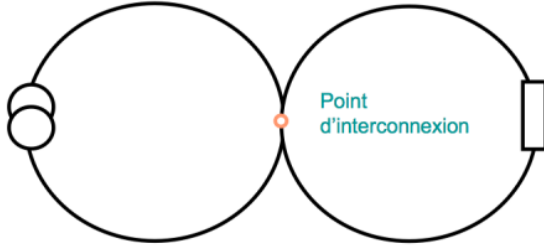


Figure 117 : Solution pour limiter le couplage par impédance commune (Darkavi, 2016)

II. Transmission par rayonnement

A. Couplage inductif

Le **couplage inductif**, appelé aussi **couplage magnétique**, est le résultat de l'interaction entre deux champs magnétiques issus de deux circuits électriques. La circulation du courant I_1 dans un conducteur (C_1) crée un champ magnétique $\vec{H}$ (Figure 118) qui rayonne autour de ce conducteur (C_1) par cette loi d'ampère (équation (27)) :

$$I_1 = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (27)$$

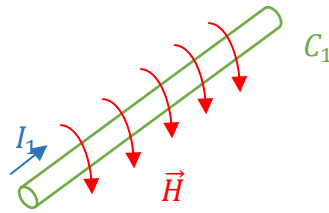


Figure 118 : Champ magnétique créé par le passage d'un courant dans un conducteur

En appliquant la loi de Biot-Savart (équation (28)) en un point P d'un conducteur à proximité (Figure 119), on obtient :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \int_{wire} \frac{d\vec{l} \wedge \vec{u}}{r^2} \quad (28)$$

Avec :

$d\vec{l}$ est l'élément de la ligne vectorielle ayant une direction de même sens que I_1 ;

μ_0 est la constante magnétique ;

r est la distance entre la position de $d\vec{l}$ et le point P où le champ magnétique est calculé ;

$\vec{u}$ est un vecteur unitaire dans la même direction de r .

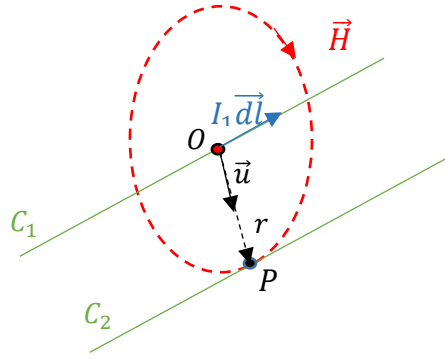


Figure 119 : Calcul du champ magnétique dans un point P en appliquant la loi de Biot-Savart

Ce courant I_1 , circulant dans un circuit fermé de surface S , donne lieu à un flux ϕ (Figure 120) et s'exprime par l'inductance L du circuit (équation (29)). La valeur de l'inductance dépend non seulement de la géométrie du circuit mais aussi des propriétés magnétiques du milieu contenant ce champ magnétique.

$$\phi = \iint B \cdot dS = L \cdot I_1 \quad (29)$$

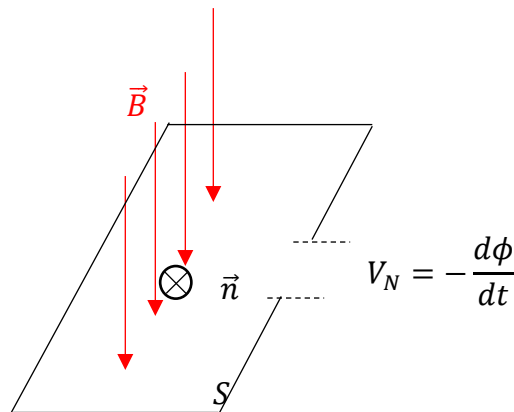


Figure 120 : Création de la tension induite V_N dans la boucle victime

La variation de ce flux de courant ϕ , généré dans le circuit 1, peut produire un champ magnétique $\vec{B}$ dans le circuit 2. Or ce champ magnétique de densité de flux $\vec{B}$ créé dans un circuit fermé de surface $\vec{S}$ génère une tension induite V_N , dérivée de la loi de Faraday, explicitée dans l'équation (30).

$$V_N = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(\int \vec{B} \cdot d\vec{S})}{dt} \quad (30)$$

Avec $\vec{S} = S \cdot \vec{n}$, vecteur orienté suivant la normale à la surface S . Dans le cas où la densité de flux magnétique varie de façon sinusoïdale dans une boucle fermée, l'expression de la tension induite se réduit alors à l'équation (31) :

$$V_N = j \cdot w \cdot B \cdot S \cdot \cos(\theta) \quad (31)$$

Où θ est l'angle entre la normale du circuit électrique $\vec{n}$ et la densité du flux magnétique $\vec{B}$; j est un nombre complexe et ω est la pulsation du phénomène périodique ($\omega = 2\pi f$). La Figure 121 illustre le couplage magnétique dans un circuit récepteur de surface S .

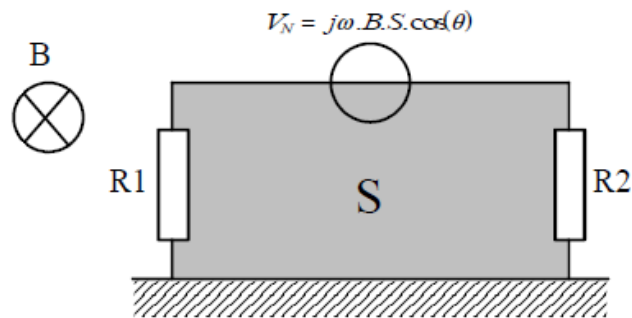


Figure 121 : Couplage inductif dans un circuit électrique récepteur (Poulichet, 2010)

Pour réduire l'effet indésirable du couplage magnétique, on peut agir directement soit sur la fréquence f via $\omega = 2\pi f$, soit sur la densité de flux magnétique $\vec{B}$, soit sur la surface de la boucle S , soit sur l'angle $\cos(\theta)$ entre S et $\vec{B}$ de la façon suivante :

- comme le couplage, entre les deux circuits source et victime, est directement proportionnel à la fréquence, on peut diminuer la fréquence du signal lorsque cela est possible ;
- agir sur $\vec{B}$: la densité de flux magnétique B peut être réduite en **éloignant physiquement** les circuits (ou dans d'autres cas en tordant les fils de la source). Une deuxième méthode consiste à utiliser un matériau de blindage magnétique afin d'atténuer le champ magnétique du conducteur.
- Agir sur $\cos(\theta)$: la **bonne orientation du circuit** source par rapport au circuit victime peut réduire le terme $\cos(\theta)$.
- Agir sur la surface S : **réduire la surface S de la boucle victime** permet de diminuer le couplage magnétique. Une première méthode consiste à torsader les fils électriques (ou éliminer le parallélisme entre les deux conducteurs) provoquant une diminution des champs magnétiques depuis les fils et par suite une réduction de la surface S du circuit récepteur. Quant à la deuxième méthode, si le couplage magnétique est en mode commun (courant de retour du circuit victime vers la terre), placer un conducteur sur le plan de masse peut diminuer la surface S de la boucle victime.

C. Couplage par diaphonie inductive

La diaphonie inductive correspond au phénomène physique qui se produit entre deux câbles électriques parallèles d'une certaine longueur. Ce phénomène est similaire à celui présenté dans le couplage inductif. Un courant variable I_1 circule dans un circuit fermé de surface S et crée un flux magnétique Φ exprimé par l'équation (1). Ce flux dans le circuit perturbateur se comportant comme une boucle, produit un champ magnétique variable $\vec{B}$ qui peut être intercepté par un conducteur voisin (Figure 122) et se traduire par une inductance mutuelle M .

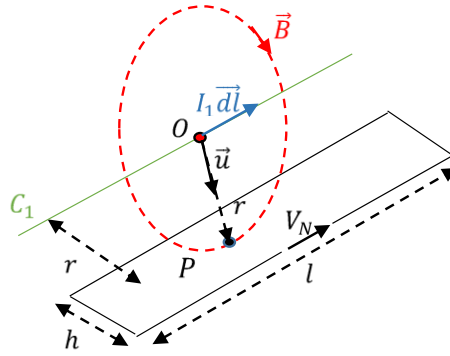


Figure 122 : Diaphonie inductive entre deux conducteurs

Le flux magnétique $\vec{B}$ crée une force contre-électromotrice dans le circuit victime définie par l'équation (29). Comme la composante $B.S.\cos(\theta)$ de l'équation (31) représente le flux magnétique total couplé au circuit récepteur, la relation de la tension victime dans le circuit victime peut s'exprimer par l'équation (32) :

$$V_N = j \cdot \omega \cdot M \cdot I_1 \quad (32)$$

avec I_1 , le courant dans le circuit émetteur et M l'inductance mutuelle entre le circuit émetteur et le circuit récepteur. Le circuit équivalent pour un couplage inductif/magnétique entre deux circuits est indiqué à la Figure 123.

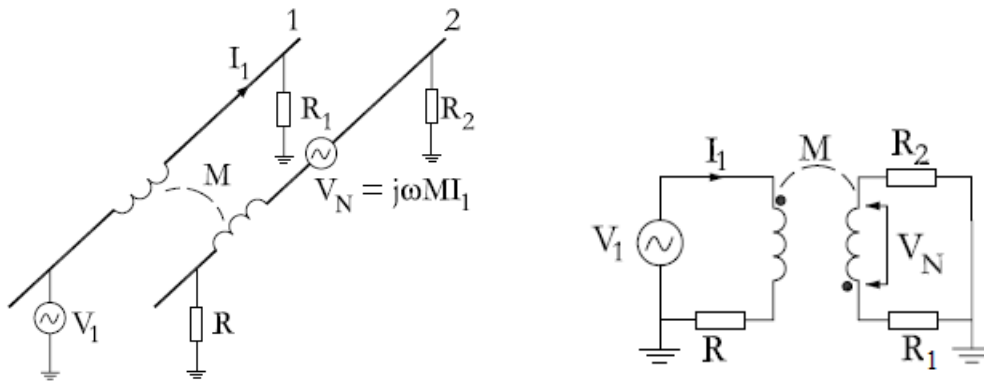


Figure 123 : Schéma de deux circuits source et victime en diaphonie inductive et son circuit équivalent correspondant (Alexandersson, 2008)

La tension électrique induite peut se matérialiser en mode différentiel ou en mode commun :

- La Figure 124 présente la modélisation du couplage par diaphonie inductive entre les deux circuits électriques en mode différentiel.

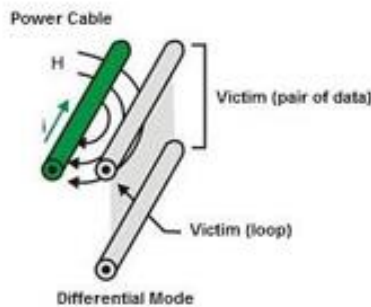
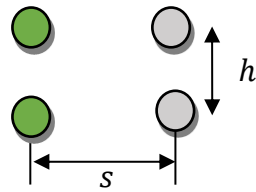


Figure 124 : Couplage par diaphonie inductive en mode différentiel (Cassiolato, 2011)

L'équation (33) donne la relation de l'inductance mutuelle M en mode différentiel pour une longueur des fils $l = 1m$ correspondante.



$$M_{MD} = \frac{\mu_0 L}{\pi} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{h}{s} \right)^2 \right) \quad [H] \quad (33)$$

Avec h , la hauteur entre les deux câbles (victime) et s , la distance entre le câble coupable et le câble victime.

- La Figure 125 présente la modélisation du couplage par diaphonie inductive entre deux circuits électriques en mode commun.

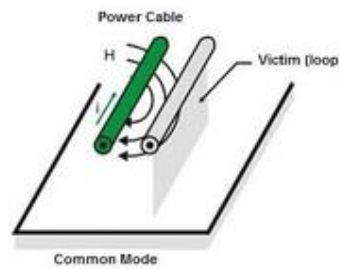
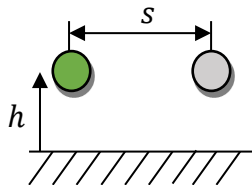


Figure 125 : Couplage par diaphonie inductive en mode commun (Cassiolato, 2011)

Quant à l'équation (34) présente la relation de l'inductance mutuelle M de mode différentiel pour une longueur correspondante des fils $l = 1m$.



$$M_{MC} = \frac{\mu_0 L}{2\pi} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{2h}{s} \right)^2 \right) \quad [H] \quad (34)$$

Avec h , la hauteur entre le câble (victime ou source) et la masse et s , la distance entre le câble coupable et le câble victime.

Ainsi, afin de réduire l'effet du couplage par diaphonie magnétique il faut agir soit sur la source, soit sur la victime ou sur le couplage.

- Agir sur la source : pour réduire le couplage par diaphonie inductive, on peut soit réduire l'intensité du courant I_1 pour réduire le champ magnétique généré, en augmentant par exemple l'impédance de la ligne coupable, soit blinder le câble coupable pour limiter son émission.
- Agir sur la victime : une **réduction de la surface** de la boucle victime (réduction de h) ou un blindage du câble victime permet de réduire l'inductance mutuelle M et par suite la tension induite par diaphonie magnétique.
- Agir sur le couplage : afin d'éliminer l'effet indésirable de la diaphonie inductive, une **séparation des câbles** source et victime (i.e augmentation de s) implique une diminution de l'inductance mutuelle M . Une autre solution consiste à éviter la disposition parallèle des câbles perturbateurs et perturbés en les croisant.

D. Couplage capacitif

Le **couplage capacitif**, également appelé **couplage électrique**, est le résultat de l'interaction de deux champs électriques entre deux circuits électriques. En appliquant la loi Faraday-Maxwell (équation (35)), un champ électrique $\vec{E}$ variable, appliqué sur un circuit électrique, fait apparaître une tension V_1 exprimée par l'équation (36) :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}V_1} \quad (35)$$

$$V_1 = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (36)$$

Avec:

$\vec{E}$ est le champ électrique ;

V_1 est le potentiel scalaire ;

$d\vec{l}$ est l'élément de la ligne vectorielle ayant une direction dans de même sens que i ;

a, b sont les bornes du conducteur.

Cette différence de potentiel (V_1), créée par un conducteur électrique fermé, génère un courant électrique i qui circule au travers de sa capacité parasite C_{12} non nulle entre ses deux extrémités comme montre la Figure 126 :

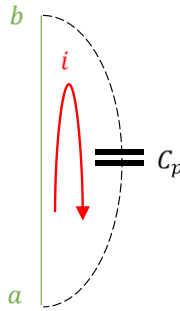


Figure 126 : Couplage capacitif dans un conducteur fermé

Le courant généré est alors exprimé par la relation (37) :

$$i = C_{12} \frac{dV_1}{dt} \quad (37)$$

Avec C_{12} , la capacité de couplage parasite du conducteur fermé.

Le niveau de perturbation dépend non seulement des variations de tension ($\frac{dV_1}{dt}$) mais aussi de la valeur de la capacité parasite de couplage C_{12} . Par ailleurs, ce courant parasite augmente avec l'augmentation de la variation de tension et de la fréquence.

La représentation de ce phénomène en MC et son schéma électrique équivalent sont présentés sur la Figure 127.

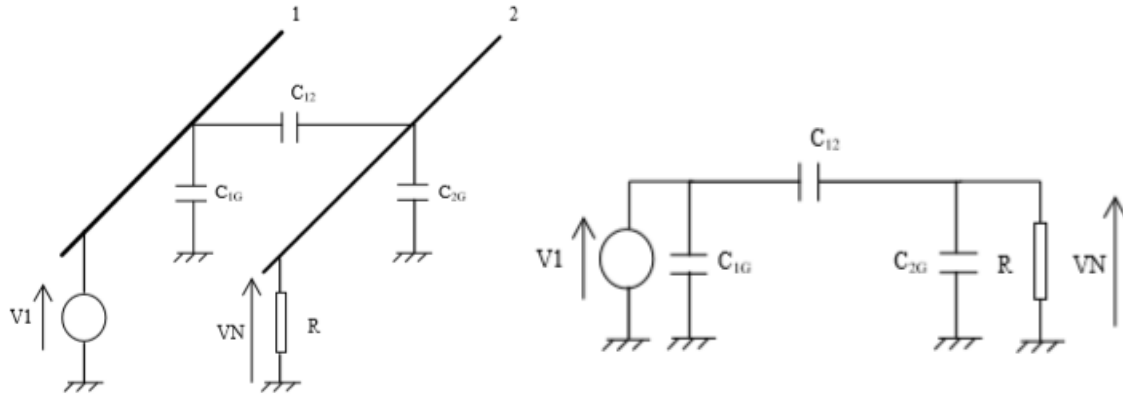


Figure 127 : Représentation du couplage capacitif en MC (à gauche) et son schéma équivalent (à droite) (Alexandersson, 2008)

D'après la Figure 127, le circuit 1 est le circuit perturbateur et le circuit 2 est le circuit récepteur. Chaque conducteur des deux circuits développe une capacité par rapport à la masse (par exemple via le raccordement des câbles électriques à un boîtier métallique).

En considérant la tension V_1 comme la source d'interférence, et la résistance R comme la résistance entre le conducteur récepteur 2 et la terre, la tension de bruit V_N , captée par le conducteur 2, peut être exprimée par l'équation (38) :

$$V_N = \frac{j\omega \left[\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G}} \right]}{j\omega + \frac{1}{R(C_{12} + C_{2G})}} \cdot V_1 \quad (38)$$

Dans de nombreux cas, il est difficile de modifier la tension V_1 ou même la fréquence f de la source de bruit pour réduire le couplage capacitif. Ainsi, les paramètres de la résistance R et de la capacité parasite C_{12} permettent de réduire ce couplage capacitif.

- Agir sur R : afin de diminuer la résistance R , il est nécessaire que le circuit victime possède une résistance R de faible impédance.
- Agir sur C_{12} : il est plus facile de diminuer la valeur de la capacité parasite puisque celle-ci dépend de **la géométrie et de l'orientation des conducteurs** et du blindage. Une première méthode consiste à **éloigner les conducteurs les uns des autres**, afin de réduire la capacité parasite. Une autre façon consiste à utiliser un blindage contre les champs électriques autour du conducteur victime. Enfin, une mise à la terre correcte du blindage est également nécessaire afin de fournir une protection efficace du champ électrique.

E. Couplage par diaphonie capacitive

Le phénomène de couplage par diaphonie capacitive s'appuie sur le couplage capacitif précédemment décrit. En effet, il se produit lorsqu'un champ électrique variable $E(t)$, créé par une tension électrique entre deux conducteurs perturbateurs, s'intercepte avec un conducteur voisin et fait apparaître un courant i dans ce conducteur. Ce couplage de champ électrique est équivalent à une **capacité parasite** ou **capacité de couplage C_{12}** qui générerait le même courant à travers le circuit.

D'après la Figure 127, trois capacités sont présentées dans le circuit de couplage :

- La capacité totale du conducteur 1 par rapport à la masse : C_{1G} ;
- La capacité totale du conducteur 2 par rapport à la masse : C_{2G} ;

- La capacité de couplage entre le conducteur 1 et le conducteur 2 : C_{12} .

Dans l'équation (38), généralement la résistance R est beaucoup plus faible que l'impédance des capacités $C_{12}+C_{2G}$, de sorte que cette équation (l'équation (38)) se simplifie suivant l'équation (39) :

$$V_N = j\omega RC_{12}V_1 = j2\pi fRC_{12}V_1 \quad (39)$$

Ainsi la tension de bruit V_N au niveau du conducteur 2 est :

- directement proportionnelle à la fréquence f de la source de bruit ;
- directement proportionnelle à la résistance R du circuit 2 lié à la terre ;
- directement proportionnelle à la capacité parasite C_{12} entre les deux circuits ;
- et elle est directement proportionnelle à l'amplitude de la tension de la source V_1 .

Le courant généré se matérialise dans le circuit victime suivant un mode différentiel ou un mode commun. Les figures et les équations correspondantes présentent le couplage en diaphonie capacitive pour ces deux modes pour une longueur des câbles $l = 1m$:

- Mode différentiel :

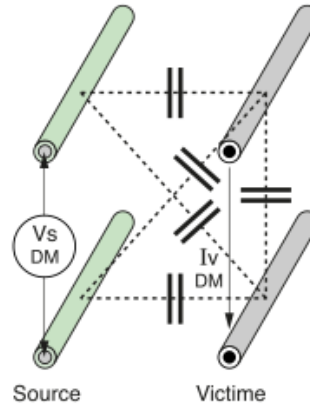


Figure 128 : Couplage par diaphonie capacitive en mode différentiel (Schneider, 2017)

D'après la Figure 128, $V_S DM$ est la source de tension perturbatrice en mode différentiel et $I_V DM$ est le courant perturbateur coté victime en mode différentiel.

L'équation de la capacité parasite pour un couplage par diaphonie capacitive en mode différentiel est donnée par l'équation (40) :

$$C_{1-2} = \pi\epsilon_r L \cdot \frac{\ln\left(1+\left(\frac{h}{s}\right)^2\right)}{\left(\ln\left(\frac{2h}{d}\right)\right)^2} \quad [F] \quad (40)$$

Avec h , la hauteur de la boucle (victime et source) ; s , la distance entre la boucle coupable et la boucle victime et d , le diamètre du câble (source ou victime si on suppose qu'ils ont le même diamètre).

- Mode commun :

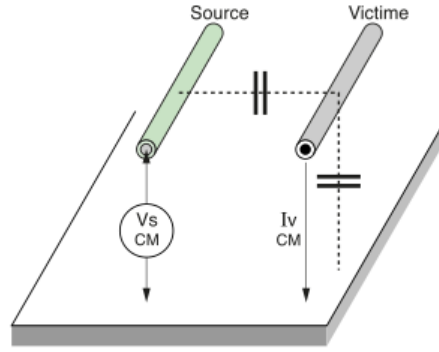
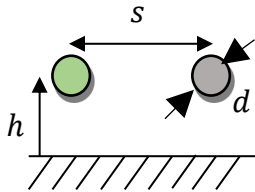


Figure 129 : Couplage par diaphonie capacitive en mode commun (Schneider, 2017)

Sur la Figure 129, $V_S \text{ CM}$ est la source de tension perturbatrice en mode commun et $I_V \text{ CM}$ est le courant perturbateur dans le conducteur victime en mode commun.

L'équation de la capacité parasite pour un couplage par diaphonie capacitive en mode commun est donnée par l'équation (41) :



$$C_{1-2} = 2\pi\epsilon_r L \cdot \frac{\ln\left(1 + \left(\frac{2h}{s}\right)^2\right)}{\left(\ln\left(\frac{4h}{d}\right)\right)^2} \quad [\text{F}] \quad (41)$$

Avec h , la hauteur entre la boucle (victime ou source) et la masse ; s , la distance entre la boucle coupable et la boucle victime et d , le diamètre du câble (source ou victime si on suppose qu'ils ont le même diamètre).

Enfin, afin de réduire l'effet du couplage par diaphonie capacitive, il faut agir soit sur la source, soit sur la victime ou sur le couplage.

- Agir sur la source : on peut soit réduire le rapport $\frac{dV_1}{dt}$, soit blinder le câble perturbateur.
- Agir sur la victime : le bon choix du diélectrique des câbles implique une réduction de leur permittivité relative ϵ_r ce qui réduit le couplage en diaphonie capacitive. Parallèlement, une réduction de la boucle victime (**réduction de h**) ou un blindage du câble victime permet de réduire la capacité mutuelle C_{12} et par suite réduire l'effet de la diaphonie capacitive. Une autre façon consiste à réduire les impédances du circuit victime ou **limiter le parallélisme des câbles**.
- Agir sur le couplage : afin d'éliminer l'effet indésirable de la diaphonie capacitive, une séparation des câbles source et victime (i.e **augmentation de s**) implique une diminution de la capacité mutuelle C_{12} . Une autre solution consiste à éviter la disposition parallèle des câbles perturbateurs et perturbés en les croisant, ou à **rapprocher les câbles** de la masse pour diminuer fortement la capacité parasite.

F. Couplage par rayonnement électromagnétique

En général, le terme "**rayonnement électromagnétique**" désigne les perturbations des champs électriques E et magnétiques H . Dans le monde réel, le rayonnement électromagnétique correspond à des radiations, émises par une source naturelle ou artificielle, et véhiculées dans le milieu ambiant sous forme de particules ou d'ondes électromagnétiques. En effet, tout conducteur

électrique où circule un signal de haute fréquence peut être une source de rayonnement, et tout conducteur électrique, qui est non protégé par un blindage, peut être influencé par un rayonnement électromagnétique.

Par ailleurs, la création des champs électriques et des champs magnétiques oscillant à la même fréquence, produit des ondes électromagnétiques se propageant à une vitesse qui dépend des caractéristiques du milieu considéré.

Dans le vide, leur longueur d'onde est liée à la fréquence f et à la célérité de l'onde $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, par cette simple équation (42) :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (42)$$

Plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est petite, plus les conducteurs se comportent comme une antenne émettrice, et par suite rayonnent des ondes électromagnétiques.

De façon générale, les propriétés caractéristiques du champ électromagnétique varient selon la distance r du conducteur à la source de rayonnement, la longueur d'onde λ , les caractéristiques de la source rayonnante et le milieu considéré.

Parallèlement, le champ électromagnétique est caractérisé par une impédance d'onde ($Z = \frac{E}{H}$) qui dépend non seulement des conditions de proximité entre une source et un point d'observation mais aussi du mode d'excitation de la source émettrice.

Dans un couplage par rayonnement, on peut distinguer trois zones qui peuvent apparaître autour d'une source rayonnante (Figure 130) :

- une zone proche ($r \ll \frac{\lambda}{2\pi}$) appelée zone de **champ proche** (ou zone réactive) qui se situe à proximité de la source : dans ce cas de couplage, on ne peut pas parler de rayonnement électromagnétique puisqu'une grande partie de l'énergie électrique et magnétique n'est pas liée à une onde électromagnétique qui se propage. Dans cette zone, on peut parler soit d'un couplage de champ magnétique ou de champ électrique.
- une zone de champ lointain (ou zone radiative) qui s'étend à l'infini de la source rayonnante ($r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$) : dans ce cas de couplage, on peut parler de rayonnement électromagnétique puisque la partie radiative de l'énergie électrique et magnétique de la source est prédominante et est liée à une onde électromagnétique qui se propage.
- une zone intermédiaire (ou zone de transition) située un peu plus loin autour de la source rayonnante ($r \approx \frac{\lambda}{2\pi}$) : qui assure la transition entre la zone de champ proche et la zone de champ lointain.

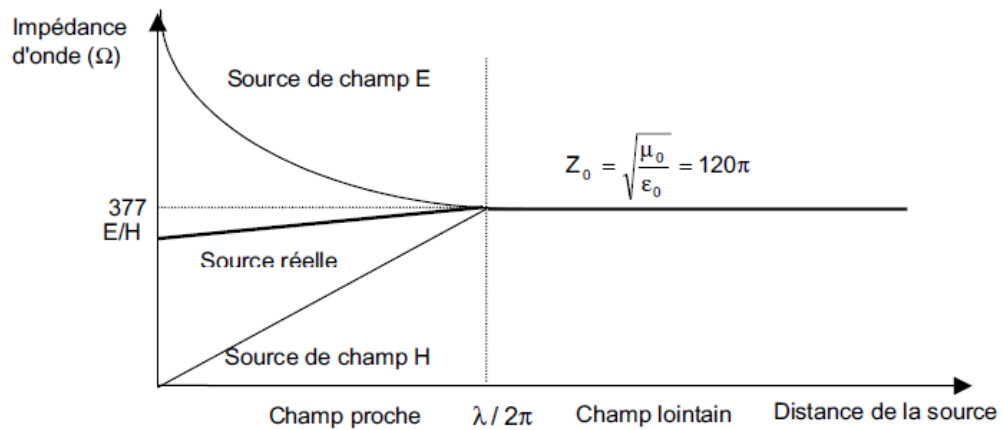


Figure 130 : Champ proche et lointain en fonction de la distance de la source (Cuvilier, 2000)

En général, un champ rayonné est constitué de deux composantes : un champ magnétique H et un champ électrique E. Dans l'espace, ces deux champs échangent de l'énergie en se régénérant l'un et l'autre dans leur propagation. Le champ est dit « proche » lorsque ces deux champs E et H sont faiblement liés, autrement dit un des deux champs est plus important que l'autre. Parallèlement, le champ est dit « lointain » lorsque ces deux champs E et H sont fortement liés impliquant ainsi la création d'une onde électromagnétique appelée onde plane.

1. Couplage en champ proche

Le couplage en champ proche est semblable aux couplages par diaphonie inductive et capacitive précédemment présentés.

- Dipôle électrique rayonnant

Le **champ proche** est dit **électrique** lorsqu'il est créé principalement par un dipôle électrique (Figure 131), ou par un circuit ouvert ou simplement un circuit comportant une impédance très élevée à proximité de la source de courant $\left(Z \geq \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} (= 120\pi \approx 377 \Omega) \right)$. Ce champ est semblable au couplage par diaphonie capacitive.

La Figure 131 montre l'exemple d'un champ créé par un dipôle électrique. En effet, un courant $I_c(z)$, circulant dans un conducteur de longueur L_0 entre le point A et le point B (avec $L_0 \ll \lambda$), génère une variation de charges ΔQ entre ces deux points, qui donne naissance à un champ électrique (suite à l'accumulation de charges Q en A et en B). Ce dipôle électrique peut alors être assimilé à une boucle antenne.

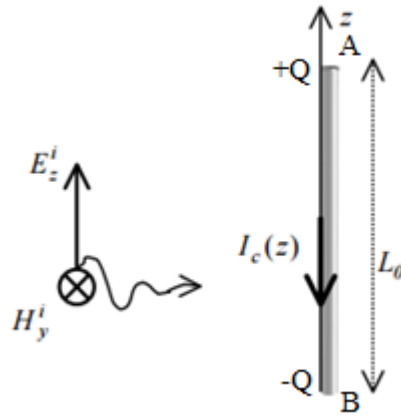


Figure 131 : Champ électrique rayonné par un dipôle électrique (Demoulin, 2004)

Dans le cas d'un dipôle de haute impédance, excité en champ proche par une tension élevée, le champ **électrique E** varie en $\frac{1}{r^3}$, le champ magnétique **H** en $\frac{1}{r^2}$ et l'impédance **Z** varie en $\frac{1}{r}$. En conséquence, à faible distance r , le dipôle électrique rayonne essentiellement en champ E.

- Petite boucle rayonnante

Le **champ proche** est dit **magnétique** lorsqu'il est créé principalement par une boucle fermée (Figure 132), ou par un circuit à basse impédance ($Z \leq \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} (= 120\pi \approx 377 \Omega)$) à proximité de la source. Ce couplage magnétique est semblable au couplage par diaphonie inductive.

La Figure 132, par exemple, montre que le champ, créé par une petite boucle de surface S où circule un courant sinusoïdal d'amplitude I et de pulsation ω (tout en s'assurant que les dimensions de la boucle sont très inférieures à r et λ), génère un champ magnétique B.

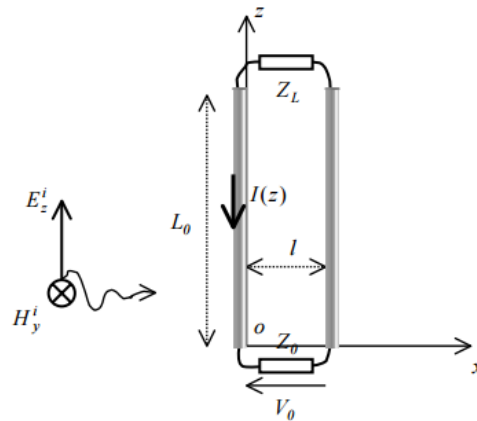


Figure 132 : Champ magnétique généré par une petite boucle rayonnante (Demoulin, 2004)

2. Couplage en champ lointain

On parle d'un couplage en champ lointain que lorsque le circuit perturbateur émet des champs de fréquence f à une distance suffisante pour percevoir un rayonnement électromagnétique. Ce phénomène est prépondérant aux distances qui sont supérieures à quelques longueurs d'onde λ de la source ($r \gg \lambda = \frac{c}{f}$) ou pour un rapport $\frac{E_p}{H_p} \gg \frac{\lambda}{2\pi}$ où les champs électriques E_p et magnétiques H_p se combinent afin de produire une onde électromagnétique plane. L'impédance du

champ décroît en $\frac{1}{r}$ jusqu'à une valeur d'impédance constante (Figure 130) appelée impédance caractéristique $Z = \frac{E}{H}$. Cette impédance caractéristique dépend des paramètres du milieu de propagation (ϵ_0 et μ_0 dans le vide) telle que l'impédance du vide est (équation (43)) :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \cong 377 \Omega \quad (43)$$

- Champ rayonné par un dipôle électrique

Un champ électrique E est émis en champ lointain par un dipôle électrique ou une antenne fouet à une distance $R \gg \lambda$ et de puissance d'émission P_e (Figure 133).

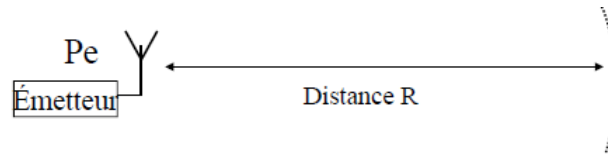


Figure 133 : Rayonnement par une antenne (Maurice, 2007b)

Ce champ électrique rayonné E a pour équation (44):

$$E(V/m) = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{30P_e \cdot G_e} \quad (44)$$

R : Distance à laquelle se trouve l'antenne émettrice (m) ;

P_e : Puissance réelle en sortie de l'émetteur ;

G_e : Gain numérique de l'antenne (comparé à une antenne théorique isotropique).

- Champ rayonné par une petite boucle

Des champs électromagnétiques (E et H) émis en champ lointain par une boucle de surface S et dont la plus grande dimension est très inférieure à la longueur d'onde, sont définis dans le vide par les relations (45) et (46) :

Si $\frac{\lambda}{2\pi d} \ll 1$:

$$E = 1,32 \cdot 10^{-14} \frac{f^2 SI}{\lambda^2} (V/m) \quad (45)$$

$$H = \frac{E}{\eta_0} (A/m) \quad (46)$$

Avec η_0 : impédance intrinsèque du vide $= \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega$

- Couplage champ à fil

Un champ électrique variable rayonné sur un conducteur induit un courant parasite I_p . Le condensateur, situé entre les extrémités de ce conducteur permet alors la circulation de ce courant électrique. Ce couplage par champ électrique est appelé couplage champ à fil (Figure 134).

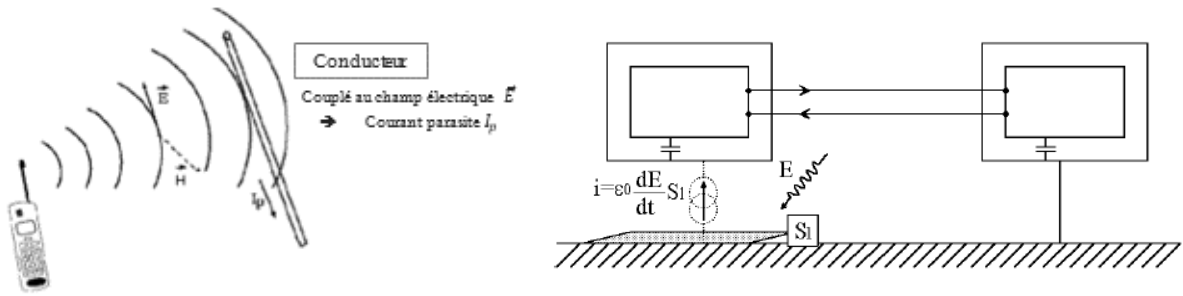


Figure 134 : Couplage champ électrique à câble (CRESITT Industrie, 2004; Magnon, 2006)

- Couplage champ à boucle

Un champ magnétique rayonné, issu d'une source perturbatrice, traverse la boucle victime et induit dans celle-ci une tension parasite. Ce couplage est appelé couplage champ à boucle (Figure 135). On rencontre ce type de couplage notamment lors d'un coup de foudre à proximité d'une boucle/circuit victime.



Figure 135 : Couplage champ à boucle (Magnon, 2006)

Le couplage du champ magnétique peut s'effectuer en mode commun (Figure 136) ou en mode différentiel (Figure 137).

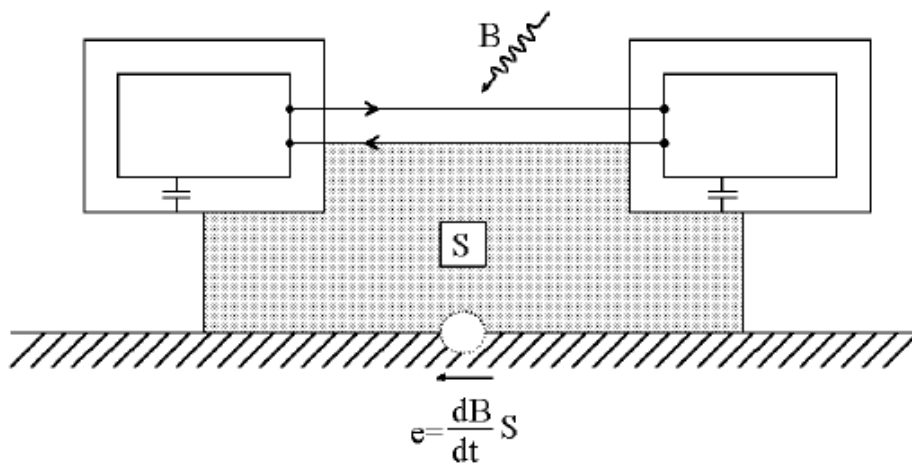


Figure 136 : Couplage champ magnétique à boucle en mode commun (Magnon, 2006)

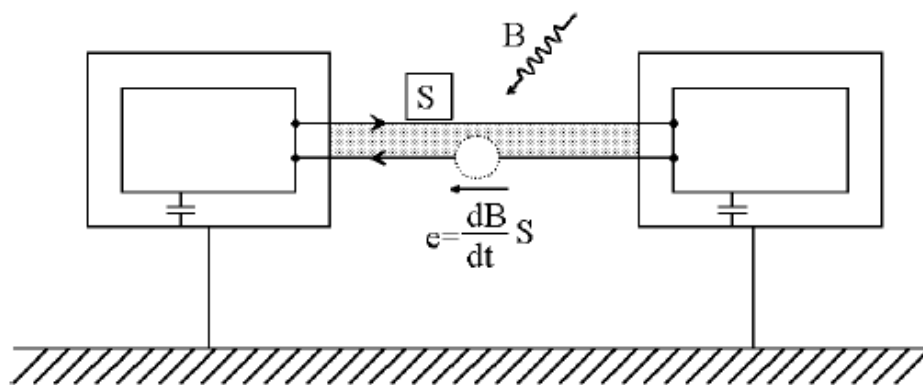


Figure 137 : Couplage du champ magnétique à boucle en mode différentiel (Magnon, 2006)

Annexe 2 : Equations de Maxwell

Les équations suivantes, généralisées par Maxwell en 1861, permettent de décrire les évolutions spatio-temporelles des composantes du champ électrique (E_x, E_y, E_z) et des composantes du champ magnétique (B_x, B_y, B_z) en les reliant à leurs sources (la densité de charge ρ et la densité de courant de conduction J).

Dans un milieu isotrope, la distribution de charges et de courant produit un champ électrique E et un champ d'excitation magnétique H qui satisfait les équations dites « équations de Maxwell » :

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{D} = \rho \\ \nabla \times \vec{B} = 0 \end{cases} \quad (47)$$

Comme le milieu est isotrope nous avons alors :

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} \end{cases} \quad (48)$$

Avec : $\vec{E}$: Champ électrique ;
 $\vec{H}$: Excitation magnétique ;
 $\vec{D}$: Induction électrique ;
 $\vec{B}$: Induction magnétique ;
 ϵ : Permittivité diélectrique ;
 μ : Perméabilité magnétique ;
 ρ : Densité volumique de charge électrique ;
 $\vec{J}$: Vecteur densité de courant.

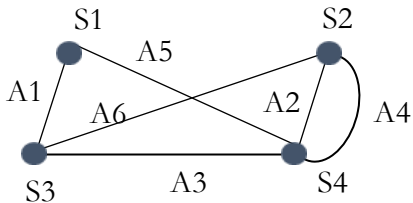
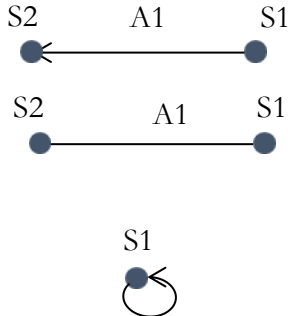
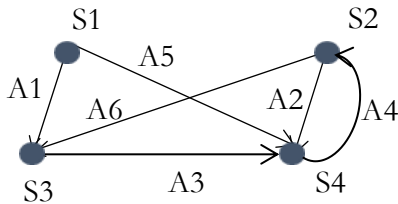
En passant du domaine temporel au domaine fréquentiel, toutes les différentielles $\frac{\partial}{\partial t}$ impliquent une multiplication par $j\omega$. Donc, à partir de l'équation (47) et (48), on obtient (49) :

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} & \text{Maxwell - Faraday} \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\epsilon\vec{E} & \text{Maxwell - Ampère} \\ \nabla \times \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} & \text{Maxwell - Gauss} \\ \nabla \times \vec{H} = 0 & \text{Maxwell Thomson} \end{cases} \quad (49)$$

Annexe 3 : Rappels sur la théorie des graphes

Les notations présentées dans le Tableau 14 seront utilisées dans tous les différents chapitres de thèse.

Tableau 14 : Rappel sur quelques terminologies de base dans la théorie des graphes

Terme	Signification	Graphe/Matrice associés
Graphe	Un graphe $G(S_i, A_j)$ est un ensemble de S_i sommets liés via des A_i arcs/arêtes.	
Sommet	Un sommet est une entité topologique qui est présenté par un point singulier. L'ensemble des sommets, représenté dans un graphe par une matrice uni-colonne $[S]$, permet non seulement de positionner le graphe dans l'espace mais aussi de lui attribuer une dimension.	
Arête/Self-Arête	- Une arête est le lien entre au minimum deux sommets. - Si le graphe est orienté, une arête est appelée un arc ; - Si le graphe est non orienté, une arête est appelée une arête. Dans un graphe topologique, l'ensemble des arêtes est représenté par une matrice uni-colonne $[A]$. - Une self-arête est un arc reliant un sommet à lui-même.	
Graphe orienté	- Un graphe orienté est un graphe dans lequel chaque arête qui relie les deux sommets est orientée (a un sens).	

Degré d'un sommet	- Dans un graphe non orienté, le degré d'un sommet est la somme des arêtes qui sont issues du sommet. - Dans un graphe orienté, le degré d'un sommet est la somme de ses degrés sortant et entrant : le degré sortant d'un sommet est le nombre de ses arcs sortants et le degré entrant, est le nombre de ses arcs entrants.	
Graphe simple (ou graphe non orienté)	Un graphe non orienté est dit simple s'il ne comporte pas de self-arête. Un graphe non orienté est un graphe qui n'ayant pas de sens d'orientation sur les arêtes reliant les sommets.	
Maille/Cycle	Dans un circuit électrique, on peut définir les termes suivants par : - Une maille M est un ensemble d'arêtes A liant les sommets S pour former une circulation fermée. Ensuite, les mailles formant un circuit sont représentées par une matrice uni-colonne [M]. - Un cycle est un sous graphe constitué par un ensemble d'arêtes qui partent d'un sommet et y reviennent.	Le nombre de mailles peut être calculé par l'équation suivante : $M = A - (S - 1)$
Matrice Connectivité	La matrice connectivité [C] est la matrice qui fait le lien entre la matrice des arêtes [A] et la matrice des mailles [M] via la relation suivante :	$[A] = [C][M]$
Matrice d'incidence (ou Matrice Sommet-Arc)	Une matrice d'incidence $M_{S_i A_j}$ d'un graphe G, de dimension $(n \times m)$, est dite également matrice d'incidence Sommet-Arc. Cette matrice décrit le graphe tout en indiquant les liens qui entrent et qui sortent des sommets dont les coefficients sont soit 0, +1 ou -1.	$M_{S_i A_j} = \begin{cases} +1 & \text{si } A_j \text{ entre dans le sommet } S_i \\ -1 & \text{si } A_j \text{ sort du sommet } S_i \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$
Matrice d'adjacence (ou Matrice Sommet-Sommet)	La matrice d'adjacence $M_{S_i S_j}$ d'un graphe G, dite également matrice d'adjacence Sommet-Sommet (ou matrice booléenne), est une matrice de dimension $(n \times n)$. - Les éléments non diagonaux S_{ij} de la matrice d'adjacence sont le nombre d'arêtes qui lient le sommet S_i au sommet S_j et qui peuvent avoir uniquement des coefficients booléens (soit 0 ou 1).	$M_{S_i S_j} = \begin{cases} 1, & \text{s'il existe un arc entre } S_i \text{ et } S_j \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$

	- Les éléments diagonaux S_{ii} de la matrice d'adjacence sont le nombre de self-arêtes liées au sommet S_i.	
Adjacence	- On parle d'adjacence entre deux arcs (arêtes) si et seulement s'ils ont une extrémité commune. - On parle de deux sommets adjacents s'il existe un arc (ou une arête) qui les relie.	
Chaîne/ Chemin	- Dans un graphe orienté, une chaîne est une séquence d'arcs/d'arêtes ayant une extrémité commune. - Un chemin est une suite d'arcs/d'arêtes connexes qui relie un sommet à un autre.	
Connexité	Un graphe est dit connexe s'il existe une chaîne (ou un chemin) entre deux sommets quelconques.	
Arbre/Arbre couvrant	- Un arbre est un graphe connexe sans cycle. - Un arbre couvrant d'un graphe G est un graphe partiel connexe de G sans cycle.	

Annexe 4 : Méthodes quantitatives existantes

I. La méthode des Moments (MoM)

La formulation de la MoM consiste à exprimer la solution de l'équation intégrale sous la forme d'une somme de fonctions de base connues où sont associés des coefficients inconnus. Or, le choix de la fonction de base est très important afin d'arriver à la solution la plus appropriée et la plus précise. Ceci exige non seulement une connaissance a priori de la solution, mais aussi de l'expertise de l'utilisateur étant donné que ces fonctions doivent forcément satisfaire les conditions aux limites associées. Les fonctions de Green, par exemple, aident à étudier la distribution du courant dans l'espace libre. Selon la taille, la forme et la complexité géométrique de l'objet considéré, une discrétisation appropriée des surfaces doit être effectuée en tenant compte des exigences géométriques (Bruns et al., 2007). Ensuite, après avoir sélectionné la fonction de base adaptée, l'étape suivante consiste à appliquer une procédure de minimisation de l'erreur résiduelle afin de générer un système matriciel pour déterminer les coefficients inconnus et les valeurs propres en utilisant un ensemble de fonctions appelées fonctions poids ou fonctions tests.

II. La méthode des éléments finis (FEM)

La méthode FEM comporte les étapes suivantes (Jithesh and Pande, 2003) :

- Discrétisation du problème en un certain nombre d'éléments, faisant appel à des fonctions d'éléments surfaciques de forme triangulaire (en deux dimensions) ou d'éléments volumiques de forme tétraédrique (en trois dimensions) permettant ainsi d'avoir une estimation efficace de la géométrie des structures ;
- Obtention des équations de champ à l'intérieur de chaque élément, exprimées en termes de polynômes et de coefficients inconnus qui sont définis sur les sommets, le long des bords, ou sur les surfaces de l'élément ;
- Assemblage de tous les éléments du domaine de la solution en une matrice d'équations ;
- Résolution du système d'équations ainsi obtenu.

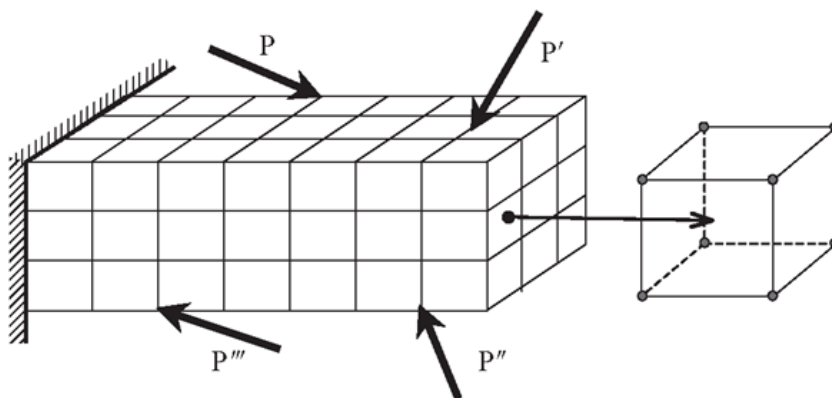


Figure 138 : Maillage d'un modèle par la méthode des éléments finis

III. La méthode TLM

La démarche de la méthode TLM consiste principalement à :

- Construire le réseau équivalent du problème de champs EM ;

- Etablir l'analogie entre les grandeurs du champ EM et les grandeurs électriques du réseau ;
- Résoudre le réseau équivalent par des méthodes itératives.

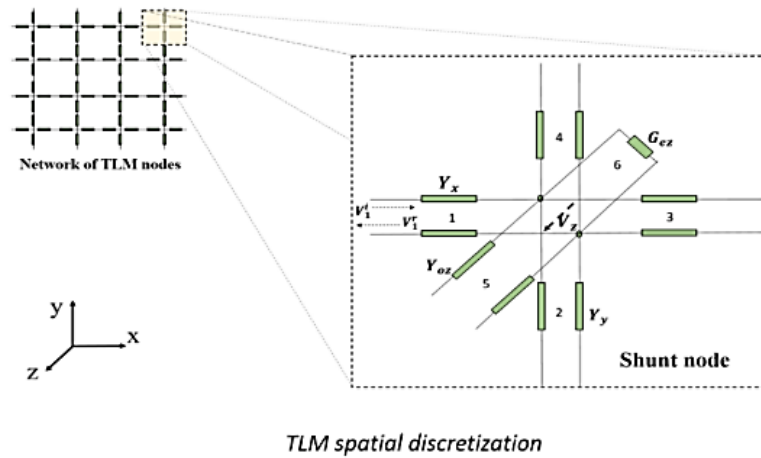


Figure 139 : Discrétisation d'un modèle en utilisant la méthode TLM (jojusimz, 2020)

IV. L'analyse tensorielle (pour méthode de Kron)

A. Définition et notions de base

Le calcul tensoriel est défini comme un outil mathématique utilisé dans plusieurs domaines de la physique (Leman, 2009). Ce formalisme permet d'exprimer les lois physiques sous une forme indépendante du système de référence choisi. Dans l'analyse tensorielle des réseaux, tout système complexe peut être vu comme un agencement de systèmes empilés dans un ordre hiérarchique croissant de complexité. Des processus de transformations et de changements d'échelles permettent de faire apparaître les phénomènes émergents (Maurice and Reineix, 2011) : les changements de coordonnées se font selon une base et la loi de transformation est fournie par une matrice de changement de base. En outre, pour définir un tenseur, sans faire référence aux systèmes de coordonnées, on peut utiliser la notion d'espace vectoriel dual. Le Tableau 15 récapitule quelques notions de base utilisées dans l'analyse tensorielle des réseaux.

Tableau 15 : Quelques notions de base pour l'analyse tensorielle

Notions de l'analyse tensorielle	Signification	Formalisation
Espace vectoriel dual	C'est l'ensemble de toutes les formes linéaires définies dans un espace vectoriel donné.	Soit E , un k -espace vectoriel de dimension finie n et soit $(e_1, \dots, e_n)$ une base de E . Si $e^{i*}(e_j) = \delta_{ij}$ (avec $i = 1, \dots, n$ et $j = 1, \dots, n$), alors la famille $(e^{1*}, \dots, e^{n*})$ est une base duale de la base $(e_1, \dots, e_n)$ dans l'espace dual E^* , où δ_{ij} représente le symbole de Kronecker ;
Variance	On appelle « covariante » la composante u_i qui est une propriété particulière définie lors d'un changement de base. On appelle « contravariante » u^i la composante qui obéit à la loi de changement de base inverse (multipliée par la matrice de passage inversée).	Soit u un vecteur de l'espace E , on définit une base (e_i) sur cet espace. Les composantes contravariantes u^i du vecteur u sont définies par : $\vec{u} = u^i \vec{e}_i$.

Changement de base	Le changement de base correspond à un changement de coordonnées des vecteurs sur une nouvelle base. Soit un espace vectoriel E muni de deux bases (e_i) et (E_i) , et soit E^* l'espace dual de E , muni également de deux bases (e^{k*}) et (E^{K*}) .	$\{\vec{E}_I = a_I^i \vec{e}_i \text{ et } \vec{E}^{*K} = b_K^k \vec{e}^{*k}\}$
Métrie	La notion de métrie est définie comme une distance entre les éléments de l'ensemble. Cette notion peut être appliquée à un tenseur, on parle ainsi d'un tenseur métrique , comme elle peut être également généralisée à des espaces abstraits : on parle ainsi d'un espace métrique . Cet espace est un cas particulier d'un espace topologique.	Un tenseur g de composantes g_{ij} , attaché à un espace vectoriel E_n dans la base (e_i) est appelé tenseur métrique de cet espace vectoriel si : $g_{ij} = \vec{e}_i \cdot \vec{e}_j$

B. Modélisation d'un circuit électrique avec un graphe topologique

Un circuit électrique est considéré comme un graphe orienté comportant un ensemble de sommets qui sont liés entre eux par des arêtes via des connexions physiques. On note par C le circuit électrique linéaire, qui est disposé de S sommets, A arêtes et M mailles. D'après la Figure 140, les sommets correspondent aux cercles (en lettres majuscules) et les arêtes correspondent aux liaisons entre les sommets (en lettres minuscules) et les mailles correspondent aux liaisons des arêtes formant une circulation fermée (par exemple ABDC est une maille du graphe topologique).

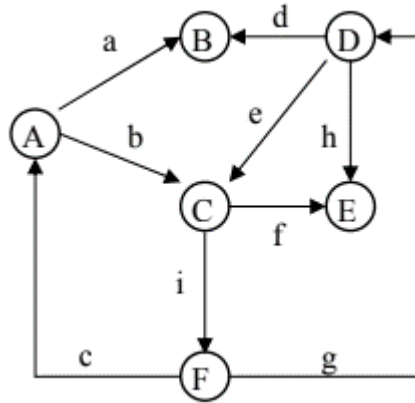


Figure 140 : Schéma de graphe orienté (El Fellous, 2010)

En appliquant la loi de Kirchhoff (relations en tension et courant), on peut définir un système d'équations sous la forme de $[V] = [Z][I]$ ou $[I] = [Y][V]$, où $[Z]$ et $[Y]$ sont respectivement les matrices impédance et admittance qui permettent le passage des courants aux tensions de chaque arêtes ou inversement en utilisant les relations suivantes :

$$Z_{ij} i^j = u_i \text{ avec } Z_{ij} = \langle \vec{e}_i | \vec{e}_j \rangle \quad (50)$$

$$\text{ou} \quad Y^{ji} u_i = i^j \text{ avec } Y^{ji} = Z_{ij}^{-1} \quad (51)$$

Avec : Z_{ij} et Y^{ji} correspondent respectivement aux impédances et admittances métriques ;

$\langle \vec{e}_i | \vec{e}_j \rangle$: est le générateur du tenseur métrique Z .

Dans un circuit électrique, le courant électrique est défini comme une grandeur algébrique qui dépend de l'orientation conventionnelle de l'arête. Ce vecteur courant est appelé courant de l'arête :

$$\begin{bmatrix} I^1 \\ I^2 \\ \vdots \\ I^A \end{bmatrix} \quad (52)$$

Pour chaque arête a , on associe un vecteur colinéaire $\vec{e}_b$. Selon la notation d'Einstein, le courant i des arêtes, défini sur la base des vecteurs des arêtes $\{\vec{e}_1, \vec{e}_k, \dots\}$, est donné par la formule suivante :

$$i = i^k \vec{e}_k \quad (53)$$

Où i^k définit le courant correspondant pour chaque arête k .

De la même manière, on définit le vecteur de tension par un vecteur axial. Ce vecteur tension est appelé tension de l'arête :

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_A \end{bmatrix} \quad (54)$$

Pour chaque arête a on associe le vecteur e^{b*} défini dans la base $\{e^{*1} \dots e^{*k}\}$, et représenté par la formule suivante :

$$u = u_k e^{*k} \quad (55)$$

Où u_k définit la tension pour chaque arête a .

Dans l'analyse tensorielle, les entités topologiques (Sommet, Arête, Maille) peuvent être connectées à l'aide d'un ensemble de matrices de connexion permettant ainsi des changements d'espace entre ces différentes entités (comme présentés dans le Tableau 16) :

Tableau 16 : Transformations d'espaces entre les entités topologiques

Terme	Signification	Matrices associées
Transformation de l'espace Arête $\rightarrow$ espace Sommet	Le passage Arête $\rightarrow$ Sommet est établi par la matrice d'incidence $[MI]_{AS}$ qui assure le lien entre l'espace des Arêtes et l'espace des Sommets. - Le vecteur des courants des Arêtes de dimension A, qui contient les intensités externes appliquées aux sommets, est défini par la relation suivante : - La transposée de la matrice incidence permet d'exprimer les tensions des Arêtes en fonction des potentiels électriques aux sommets comme suit :	$[i_{int}]_A \cdot [MI]_{AS} = [i_{ext}]_S$ $[v]_S \cdot {}^t[MI]_{AS} = [u]_A$

Transformation de l'espace Arêtes → espace Mailles	- Le passage Arête→Maille est assuré par la matrice de connectivité $[C]_{AM}$. Cette matrice représente le lien entre les courants de l'espace des arêtes et les courants de l'espace des mailles comme le montre l'équation suivante : - Cette matrice de connectivité permet aussi d'exprimer le vecteur des tensions des arêtes dans la famille des mailles et définir une matrice nulle traduisant ainsi la loi des mailles. - La transposée de la matrice connectivité est appelée matrice topologique (Maurice, 2016b), ainsi, en appliquant les lois de transformations, on peut déduire l'impédance des mailles $[Z]_{MM}$ dont chaque composante est égale à la somme des impédances des arêtes formant la maille. - On peut aussi définir la matrice des impédances de couplage $[MC]_{MM}$ qui répond à l'équation suivante : $[v]_A = [MC]_{AA}[I]_M$ en reliant les courants de mailles $[I]_M$ et les champs qu'ils engendrent (E et H) aux fems induites dans les arêtes $[v]_A$ engendrées par ces champs dans d'autres mailles.	$[i]_A[C]_{AM} = [I]_M$ $C_{A \rightarrow M} = \begin{matrix} & \begin{matrix} M_1 & M_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$ $[u]_A[C]_{AM} = [0]_M$ $[{}^tC]_{MA}[Z]_{AA}[C]_{AM} = [Z]_{MM}$ $[{}^tC]_{MA}[MB]_{AA}[C]_{AM} = [MC]_{MM}$
Transformation de l'Espace Sommets → Espace Mailles	A partir des relations de passage définies, la relation de passage entre l'espace des sommets et l'espace des mailles peut être directement déduite grâce à la matrice de connexion $[A]_{SM}$ définie entre l'espace des sommets et l'espace des mailles, comme suit :	$[A]_{SM} = [C]_{AS}[M]_{AM}$ $[v]_S \cdot [A]_{SM} = [0]_M$