
APPORT DE LA SIMULATION NUMERIQUE DANS LA CONCEPTION DE CARTES ELECTRONIQUES

IMPLEMENTATION D'ANSYS AEDT POUR L'ANALYSE
ELECTROMAGNETIQUE DANS UN ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL

Réalisation : Cédric BORDEAU

Encadrement : Directeur de Mémoire : Stéphane Mornay

Tuteur Entreprise : Nicolas Martinez : Responsable Développement Electronique

SONCEBOZ MECHATRONICS BONCOURT SA

RUE DES BOULAIES, 2926 BONCOURT

25 Juillet 2025

Année Universitaire 2024-2025

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier Sonceboz SA de m'avoir offert l'opportunité de réaliser mon stage de fin d'études au sein de son site de Boncourt. Intégrer cette entreprise m'a permis de découvrir un environnement stimulant, tourné vers l'innovation et l'excellence technique, et d'enrichir significativement mes compétences en électronique.

Je remercie particulièrement Mallory Dirand, de l'équipe Ressources Humaines, pour son accompagnement efficace et sa réactivité tout au long de mon intégration au sein de l'entreprise.

Mes remerciements les plus sincères vont à Nicolas Martinez, mon tuteur en entreprise, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce stage. Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à Sébastien Wasterlain, qui m'a accompagné au quotidien sur les aspects techniques du projet, répondant avec patience et clarté à chacune de mes questions, et jouant un rôle clé dans ma progression.

Je remercie également Jérémy Evangelisti, ainsi que toute l'équipe du Laboratoire Électronique Véhicule Commerciaux (LECV), pour leur accueil chaleureux, leur soutien, et la qualité des échanges que nous avons pu partager. Travailler au sein de cette équipe dynamique et experte a été pour moi une expérience des plus enrichissantes.

Enfin, je remercie M. Stéphane Mornay, mon encadrant académique, pour son appui et sa disponibilité dans le cadre de ce travail.

Avant-propos

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'aboutissement de mon **Master 2 en Management et Administration des Entreprises**, formation qui vient compléter mon cursus d'ingénieur en Génie Électrique. Cette double compétence, technique et managériale, me permet aujourd'hui d'aborder les projets industriels avec une vision globale, alliant compréhension des enjeux technologiques et maîtrise des dimensions organisationnelles et stratégiques.

Le stage que j'ai effectué au sein de **Sonceboz SA**, dans le **Laboratoire Électronique Véhicule Commerciaux (LECV)**, a représenté une opportunité unique de mettre en application ces acquis dans un environnement industriel de pointe. Intégré à une équipe d'experts en électronique, j'ai pu contribuer à des problématiques concrètes liées à la conception, à la simulation et à la validation de cartes électroniques. Ce travail m'a également permis de mieux comprendre les processus industriels, la gestion de projet technique, ainsi que les enjeux de performance, de qualité et d'innovation au sein d'une entreprise technologique.

Sur le plan académique, ce mémoire constitue une synthèse des compétences développées au cours de mon Master, à travers une démarche structurée de diagnostic, d'analyse et de proposition d'amélioration. Il témoigne de la richesse d'une approche pluridisciplinaire, qui articule les sciences de l'ingénieur avec les sciences de gestion.

Je remercie l'ensemble des personnes qui ont contribué à rendre cette expérience à la fois formatrice et motivante, et j'espère que les réflexions partagées dans ce document pourront nourrir d'autres démarches similaires, à l'interface entre technologie et management.

Liste des abréviations

PCB : **PCB** signifie **Printed Circuit Board**, ou **carte de circuit imprimé** en français.

EMI : L'**EMI** désigne **toute perturbation électromagnétique** qui affecte le bon fonctionnement d'un circuit, d'un appareil ou d'un système électronique. Elle peut **altérer, dégrader ou bloquer** la transmission de signaux électriques.

EMC ou CEM : La **compatibilité électromagnétique (EMC ou CEM)** est la **capacité d'un équipement électronique à fonctionner correctement** dans son environnement électromagnétique **sans causer ni subir de perturbations**.

AEDT : **Ansys Electronics Desktop (AEDT)** est l'environnement de travail unifié développé par **Ansys** pour la simulation **électromagnétique, électronique et de systèmes électrothermiques**.

Layout : En **électronique**, le **layout** désigne la **disposition physique des composants et des pistes** sur une **carte électronique** (PCB – *Printed Circuit Board*).

VBA : VBA est un **langage de programmation** développé par Microsoft. Il est intégré à la suite **Microsoft Office** (Excel, Word, Outlook, etc.) et permet d'**automatiser des tâches**, de **créer des macros**, ou encore de **développer des interfaces personnalisées**.

Backdrilling : Le **backdrilling** (ou **contre-perçage** en français technique, bien que le terme anglais soit souvent utilisé tel quel dans l'industrie) est une **technique utilisée dans la fabrication de circuits imprimés (PCB)** pour améliorer les performances électriques à haute fréquence

Crosstalk (ou **diaphonie** en français) : En électronique, la **diaphonie** désigne un **phénomène d'interférence électromagnétique** où un signal transmis sur une ligne (ou une piste) perturbe un signal sur une ligne voisine.

Tables des figures

Figure 1: Représentation des champs électromagnétiques générés par une piste de signal sur un circuit imprimé	7
Figure 2: Layout du prototype	20
Figure 3: vue 3D du prototype	21
Figure 4: Import du modèle du prototype sur SIwave	21
Figure 5: import du modèle dans Ansys HFSS	22
Figure 6: Simulation de Test de Conducted Emissions	22

Table des matières

Remerciements.....	2
Avant-propos	3
Liste des abréviations	4
1. Problématique	7
1.1 Introduction.....	7
1.2 L'utilisateur et l'environnement	7
1.3 Le besoin, l'objectif et les enjeux.....	8
1.4 Les problèmes rencontrés	8
1.5 Conclusion de la section	8
2. Revue de la littérature.....	9
2.1 Introduction.....	9
2.2 Méthode.....	9
2.3 Matériel	10
2.4 Présentation statistique des articles	11
2.5 Solutions proposées dans les articles.....	11
2.6 Conclusion	14
3. Évaluation	16
3.1 Introduction et récapitulatif des solutions envisagées.....	16
3.2 Critères d'évaluation et analyse des solutions.....	17
3.3 Décision finale et recommandations	18
3.4 Conclusion	19
4. Conclusion générale	20
Références.....	24
Résumé et mots-clés.....	25

1. Problématique

1.1 Introduction

Dans un contexte industriel de plus en plus exigeant, les entreprises spécialisées dans le développement de cartes électroniques font face à des contraintes multiples : réduction des délais de mise sur le marché, amélioration continue de la qualité produit, et conformité aux normes électromagnétiques (EMC/EMI). Ces enjeux rendent crucial le recours à des outils capables d'anticiper les performances d'une carte dès la phase de conception.

Ce mémoire s'intéresse à l'opportunité d'intégrer un logiciel de simulation électromagnétique, tel qu'Ansys AEDT, dans le processus de développement de cartes électroniques au sein du département Hardware de l'entreprise Sonceboz. Nous proposons ici d'analyser les apports potentiels d'un tel outil à travers une étude structurée selon la méthode hypothético-déductive. Le présent chapitre s'attache à exposer la problématique de départ, selon le modèle PREVA.

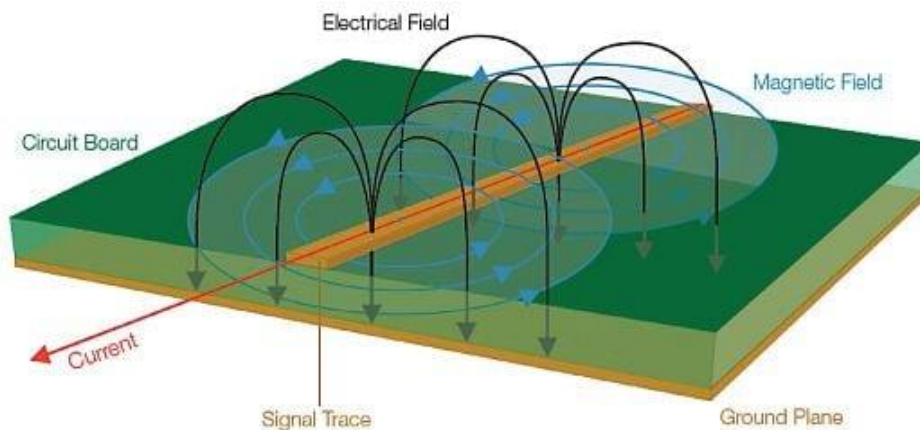


Figure 1: Représentation des champs électromagnétiques générés par une piste de signal sur un circuit imprimé

1.2 L'utilisateur et l'environnement

L'entreprise Sonceboz conçoit et développe des cartes électroniques à destination de l'industrie automobile et médicale. Le département Hardware, composé d'ingénieurs en électronique, assure le design, le routage et la validation des cartes, en s'appuyant sur des outils de CAO standards, en l'occurrence, LTspice et Altium Designer. L'environnement technique est marqué par des exigences croissantes en matière de performances électromagnétiques (réduction du rayonnement parasite, gestion de la diaphonie, respect des normes CEM), que les outils actuels ne permettent pas d'évaluer de manière fine en phase de conception. Les analyses sont réalisées, dans la plupart des cas, lors de tests physiques de prototypes, ce qui implique des risques de retours tardifs coûteux et chronophages.

1.3 Le besoin, l'objectif et les enjeux

- **Besoin** : Améliorer la capacité à anticiper les performances électromagnétiques des cartes électroniques dès les phases de design, afin de réduire les erreurs détectées tardivement et éviter les itérations physiques multiples.
- **Objectif** : Évaluer l'intérêt, la faisabilité et les limites de l'intégration d'un outil de simulation électromagnétique, en l'occurrence Ansys AEDT, dans le processus de conception électronique actuel de l'entreprise.
- **Enjeux** :
 - Réduction des délais de développement.
 - Amélioration de la qualité des cartes électroniques en matière de compatibilité électromagnétique.
 - Réduction des coûts liés aux prototypes et aux essais non concluants.
 - Montée en compétences techniques des ingénieurs du département.

1.4 Les problèmes rencontrés

Le processus actuel de développement ne permet pas de détecter efficacement certains problèmes liés à l'intégrité du signal, aux couplages entre pistes ou au rayonnement électromagnétique indésirable.

Les principales limites sont :

- Absence de simulation CEM systématique dans la chaîne de conception.
- Difficultés à valider des choix de routage ou de blindage sans prototypage.
- Coûts élevés liés aux reprises de conception et aux tests itératifs.
- Courbe d'apprentissage des outils spécialisés souvent perçue comme un frein à l'adoption.

1.5 Conclusion de la section

L'étude du contexte industriel, des besoins exprimés et des limitations actuelles révèle une problématique centrale pour le département Hardware de Sonceboz

Cette problématique conduit à la formulation de la question de recherche suivante :

Comment un jumeau numérique peut-il être intégré de manière efficace dans le processus de conception de cartes électroniques, afin d'accélérer le développement et de réduire les coûts associés ?

2. Revue de la littérature

2.1 Introduction

Les contraintes croissantes en matière de compatibilité électromagnétique (CEM) et de performances haute fréquence imposent aux entreprises de repenser leurs méthodes de conception des cartes électroniques. Dans ce contexte, de nombreux travaux académiques se sont penchés sur l'apport des outils de simulation électromagnétique pour anticiper les problèmes liés à la diaphonie, au rayonnement, ou aux interférences de type EMI/EMC.

Cette revue de littérature propose une synthèse structurée des principales contributions scientifiques et techniques dans ce domaine, en lien avec la problématique du mémoire.

2.2 Méthode

La recherche documentaire a été réalisée sur les bases suivantes :

- **ResearchGate**
- **Google Scholar**
- **Hal**

Critères de sélection :

- Mots-clés : “PCB simulation”, “EMI analysis”, “EMC compliance”, “Ansys AEDT”, “signal integrity”, “3D field simulation”, etc.
- Études de cas industriels ou recherches appliquées
- Publications en anglais ou français

Objectif : identifier les apports, limites et recommandations dans l'usage des outils de simulation numérique pour améliorer le processus de développement de circuits imprimés.

2.3 Matériel

Dans le cadre de ce mémoire portant sur l'intégration des outils de simulation dans le processus de développement de cartes électroniques, plusieurs publications techniques et études de cas industrielles ont été mobilisées pour illustrer les capacités actuelles du logiciel **ANSYS HFSS** dans des contextes variés. Ces travaux permettent de situer l'état de l'art en matière de modélisation thermique, de compatibilité électromagnétique (CEM) et d'intégrité du signal sur circuits imprimés.

Le travail de **Ben Hamed et al. [1]** présente un processus automatisé de génération de modèles thermiques équivalents à partir de la géométrie de circuits imprimés sous Altium. En combinant HFSS, Icepak et LTSpice, les auteurs parviennent à modéliser le comportement thermique transitoire de composants de puissance, en validant leurs résultats par des mesures expérimentales. Cette démarche démontre le potentiel d'un chaînage d'outils pour produire des modèles électrothermiques exploitables dans des outils de simulation de circuits.

Dans un registre différent, **Giannetti [2]** propose une interface entre MATLAB et HFSS permettant de piloter les simulations sans recourir à des scripts VBA. Grâce à une API simple et reproductible, l'auteur illustre comment l'automatisation de simulations électromagnétiques peut être intégrée à des routines d'optimisation, comme dans le cas de l'accord d'une antenne patch. Cette méthode est transposable à d'autres composants passifs intégrés dans des PCBs.

Sur le plan de la **compatibilité électromagnétique**, **Kerwien et Blair [3]** explorent la simulation de l'efficacité de blindage de joints EMI montés en surface. Ils valident la simulation HFSS en comparant les résultats obtenus avec ceux mesurés dans une chambre réverbérante, soulignant notamment l'impact de la géométrie des ouvertures sur les performances de blindage. Ce cas illustre l'utilisation pertinente de HFSS pour anticiper les performances CEM en phase de conception.

En ce qui concerne les problématiques d'**intégrité du signal à très haute fréquence**, **Siadat et Priest [4]** s'intéressent à l'optimisation du pinout d'un composant BGA pour un lien série à 10 Gbps. Leur méthodologie s'appuie sur l'extraction des structures depuis Allegro, leur simulation dans HFSS, et l'évaluation des effets de diaphonie via des modèles S-paramètres. Les auteurs montrent notamment que la réduction de la longueur des stubs via backdrilling améliore significativement le FEXT, ce qui est un paramètre critique dans le dimensionnement d'une ligne de transmission performante.

La **problématique CEM dans les circuits imprimés** est par ailleurs abordée de manière plus générale dans l'article de **Rahman et Nielsen [5]**, qui dresse un panorama des bonnes pratiques de conception pour limiter les interférences électromagnétiques. Il y est question de stack-up, de routage contrôlé, de plans de masse, et d'isolation entre domaines analogiques et numériques. Ce rappel des fondamentaux complète utilement les approches plus ciblées mentionnées ci-dessus.

Enfin, le **retour d'expérience d'Intel [6]** démontre l'intérêt d'une approche intégrée pour la simulation d'un système complet, en combinant HFSS, SIwave et EMA3D Cable. Ce projet a permis de simuler les effets EMI d'un serveur entier, intégrant des matériaux magnétiques complexes et une modélisation fine des câbles. L'étude souligne la capacité des outils ANSYS à traiter des géométries à grande échelle et à contribuer de manière proactive à la validation CEM dès la phase de conception.

2.4 Présentation statistique des articles

Réf.	Année	Domaine principal	Outils utilisés	Validation	Niveau système
[1]	2024	Simulation thermique	Altium, Ansys Icepak, LTSpice	Mesures expérimentales (Zth)	Carte PCB avec composants
[2]	2023	Optimisation électromagnétique	MATLAB, HFSS (sans VBA)	Résultats simulés validés par design	Antenne simple
[3]	2017	Compatibilité électromagnétique (CEM)	HFSS	Mesure en chambre réverbérante	Carte avec blindage EMI
[4]	2010	Intégrité du signal / Diaphonie	Cadence Allegro, HFSS, ADS	S-paramètres / simulation crosstalk	Liaison série (BGA-10Gbps)
[5]	2025	CEM & bonnes pratiques PCB	Aucune simulation spécifique (article de synthèse)	Revue documentaire	Général PCB
[6]	2022	EMI système complet	HFSS, SIwave, EMA3D Cable	Simulation de serveur complet	Système (6 cartes serveurs)

L'analyse des tendances révèle que le logiciel HFSS est utilisé dans 5 des 6 articles étudiés, confirmant ainsi sa position dominante en simulation électromagnétique. Trois articles s'appuient sur une validation expérimentale, intégrant des mesures physiques liées au blindage, à l'aspect thermique ou à des systèmes complets. En termes de niveau d'analyse, deux articles portent sur des systèmes complets comme des serveurs ou des architectures multi-composants, trois se concentrent sur des cartes électroniques ou des sous-ensembles de PCB, et un propose une synthèse de bonnes pratiques. Les domaines abordés sont variés : deux articles traitent de compatibilité électromagnétique (CEM), deux se penchent sur des problématiques de signal haute fréquence telles que l'intégrité et la diaphonie, un aborde la thématique thermique, et un dernier adopte une approche transversale.

2.5 Solutions proposées dans les articles

L'analyse croisée des articles retenus dans cette revue permet de dégager plusieurs approches concrètes et complémentaires pour améliorer les performances des circuits imprimés dans les domaines de la thermique, de la compatibilité électromagnétique (CEM) et de l'intégrité du signal. Chaque contribution apporte une solution ciblée à des problématiques spécifiques du développement de cartes électroniques, en lien direct avec les outils de simulation numérique.

a) Automatisation de la modélisation thermique

L'article de **Ben Hamed et al. [1]** propose une méthodologie automatisée pour générer des modèles thermiques équivalents (TECM) à partir d'un layout PCB, combinant Altium Designer, Ansys Icepak et LTSpice. La solution permet de :

- Convertir une géométrie réelle en modèle réduit RC (type Foster),
- Tenir compte des couplages thermiques entre composants,
- Simplifier les vias sans perte significative de précision.

Cette approche permet un **gain de temps significatif** dans l'estimation thermique des cartes de puissance et favorise l'itération rapide entre les versions de design.

b) Interface HFSS-MATLAB sans VBA

Giannetti [2] propose une API simple entre MATLAB et HFSS basée sur l'édition directe de fichiers .aedt au format ASCII. Cette solution contourne l'usage du langage VBA souvent jugé complexe par les concepteurs, et permet :

- Une automatisation complète des simulations,
- L'implémentation d'algorithmes d'optimisation (hiérarchique ou gradient),
- La simulation en mode non graphique (batch).

Elle démontre l'intérêt d'une **intégration fluide entre environnement de calcul et simulateur électromagnétique**.

c) Simulation du blindage EMI via HFSS

Dans leur étude expérimentale, **Kerwien et Blair [3]** montrent que les performances de blindage de gaskets montés en surface peuvent être anticipées par des simulations HFSS. Les solutions apportées sont :

- La modélisation réaliste des ouvertures et joints,
- L'analyse fréquentielle des pertes d'atténuation selon la géométrie,
- La validation par mesure en chambre réverbérante.

Cette méthode permet de **réduire les essais physiques coûteux** et d'évaluer des variantes géométriques non encore fabriquées.

d) Optimisation du pinout et réduction de la diaphonie

L'article de **Siadat et Priest [4]** propose un processus rigoureux pour évaluer les transitions BGA→PCB en haute fréquence (>10 Gbps). Les solutions avancées sont :

- L'analyse du FEXT/NEXT via HFSS et ADS,
- Le **backdrilling** pour réduire les longueurs de stubs de vias,
- La comparaison de patterns de pinout (checkerboard vs staggered),
- La prise en compte des effets de couplage différentiel.

Ces solutions permettent de **maximiser le rapport signal/bruit (SNR)** dans des contextes critiques d'interconnexion rapide.

e) Recommandations globales pour la CEM des PCBs

L'article de **Rahman et Nielsen [5]** offre une synthèse structurée des meilleures pratiques pour garantir la compatibilité électromagnétique dès la phase de layout :

- Routage contrôlé (impédance, longueur, différentiel),
- Plans de masse continus,
- Isolation analogique/digital,
- Filtres EMI et découplage capacitif.

Bien que non appuyée par des simulations, cette contribution est précieuse pour **encadrer les décisions de conception** dans une approche préventive.

f) Simulation EMI à l'échelle système

Enfin, la collaboration entre **Intel et Ansys [6]** aboutit à la simulation d'un serveur complet, intégrant jusqu'à six cartes en simultané via HFSS, SIwave et EMA3D. Les solutions clés sont :

- La **fusion de solveurs (voxel + ligne de transmission)** pour gérer les câbles,
- La simulation de matériaux magnétiques et absorbants,
- La gestion multi-échelle via des sous-grilles locales.

Ce cas montre qu'il est désormais possible d'**anticiper les problèmes EMI au niveau système**, avant la phase de prototypage.

2.6 Conclusion

L'analyse des contributions scientifiques et industrielles présentées dans cette revue met en évidence la **montée en maturité des outils de simulation** pour accompagner les processus de développement de cartes électroniques complexes. Si les problématiques traitées sont variées — allant de la dissipation thermique à la diaphonie haute fréquence, en passant par la compatibilité électromagnétique —, plusieurs **tendances convergentes** émergent :

1. **La simulation devient un maillon central du processus de conception**, non plus uniquement comme outil de validation a posteriori, mais comme un levier d'optimisation en amont. Cela se traduit par l'automatisation des flux (articles [1], [2]), la systématisation des analyses paramétriques et la capacité à intégrer les contraintes physiques dès la phase de layout.
2. **Les outils comme Ansys HFSS s'imposent comme des références incontournables**, grâce à leur capacité à modéliser précisément des phénomènes multi-physiques complexes (champs électromagnétiques, couplages thermiques, interférences radiofréquences). Couplés à d'autres environnements comme MATLAB, SIwave, ou ADS, ils permettent de couvrir un large spectre d'applications.
3. **L'importance de la validation expérimentale** reste centrale. Les études de Ben Hamed [1], Kerwien [3] ou Intel [6] montrent que les résultats simulés sont fiables lorsqu'ils sont comparés à des mesures physiques, à condition de soigner la modélisation des interfaces, des matériaux et des conditions aux limites.
4. **Des stratégies concrètes émergent pour améliorer la performance CEM et signal**, telles que :
 - La réduction des longueurs de vias par backdrilling ([4]),
 - L'optimisation du placement des gaskets de blindage ([3]),
 - La maîtrise du retour de courant par plans de masse continus et via stitching ([5]),
 - L'optimisation des transitions BGA-PCB en haute fréquence ([4]).

○

5. Enfin, **les problématiques ne sont plus isolées** : les phénomènes thermiques, électromagnétiques et d'intégrité du signal sont **interdépendants**. Cela pousse à une vision **système** de la simulation, illustrée notamment par le projet Intel [6], où plusieurs cartes et sous-composants sont simulés conjointement.

Ainsi, ces travaux démontrent que l'intégration d'outils de simulation dans la chaîne de développement produit constitue une réponse crédible et efficace aux défis croissants rencontrés par les concepteurs de systèmes embarqués. À condition d'être bien maîtrisées et adaptées au contexte, ces solutions permettent de **réduire les temps de développement, limiter les itérations physiques et améliorer la robustesse** des produits finaux, tout en assurant leur conformité aux normes en vigueur.

3. Évaluation

3.1 Introduction et récapitulatif des solutions envisagées

À l'issue de la revue de littérature présentée dans le chapitre précédent, plusieurs solutions techniques ont été identifiées comme particulièrement pertinentes pour renforcer la robustesse des circuits imprimés face aux contraintes thermiques, électromagnétiques et d'intégrité du signal. Ces solutions, issues à la fois de publications académiques et de retours d'expérience industriels, forment une base solide pour orienter les travaux présentés dans la suite de ce mémoire.

a) Enjeux identifiés

Dans un contexte industriel marqué par :

La miniaturisation des composants,

L'augmentation des fréquences de commutation,

La densification des architectures électroniques,

Les effets secondaires tels que les émissions électromagnétiques parasites, la diaphonie, la dissipation thermique et la perturbation du signal deviennent des facteurs limitants majeurs dans la conception de cartes électroniques performantes et conformes aux normes.

Face à cela, l'intégration d'un outil de simulation multifonctionnel dans la phase de développement permet d'anticiper et de corriger ces problèmes avant la réalisation de prototypes physiques.

b) Synthèse des solutions techniques envisagées

Sur la base des articles étudiés, les solutions suivantes ont été retenues comme pistes de travail dans le cadre de ce mémoire :

Problématique	Solution technique	Référence
Modélisation thermique	Génération automatique de modèles équivalents RC à partir de layouts Altium	Ben Hamed et al. [1]
Simulation EMI système complet	Intégration multi-solveurs (HFSS, SIwave, EMA3D) pour modéliser un serveur entier	Intel + Ansys [6]

Ces solutions seront confrontées à un **cas d'étude spécifique** dans la suite du mémoire, dans le but d'évaluer leur applicabilité, leurs limites et leur potentiel de transposition à un environnement industriel réel.

3.2 Critères d'évaluation et analyse des solutions

Critère	Élément d'analyse
Précision des résultats	Capacité d'Ansys AEDT à détecter des anomalies EMI/EMC avant prototypage, comparaison avec mesures ou expériences internes
Accessibilité et courbe d'apprentissage	Facilité de prise en main, besoin de formation spécifique pour les ingénieurs Hardware
Intégration au workflow actuel	Compatibilité avec les outils existants (Altium), possibilités d'import/export de fichiers
Temps de calcul et ressources requises	Durée moyenne des simulations, exigences matérielles (CPU, RAM), impacts sur les délais
Bénéfices observés ou anticipés	Réduction des tests physiques, optimisation du routage, gain de temps sur la phase de validation
Résistances internes	Freins organisationnels ou humains identifiés : manque de temps, complexité perçue, priorités différentes

3.3 Décision finale et recommandations

À l'issue de l'analyse comparative des solutions proposées dans la littérature et de leur confrontation avec les besoins réels du projet étudié, plusieurs enseignements ont pu être dégagés. L'objectif principal étant d'intégrer efficacement un outil de simulation au sein du processus de conception de cartes électroniques, tout en répondant aux exigences en matière de performance thermique, CEM et signal, une décision raisonnée a été prise quant aux méthodes à retenir.

a) Décision finale

La solution retenue repose sur une **approche hybride et modulaire** fondée sur :

- **L'utilisation d'ANSYS HFSS** comme outil central pour la modélisation électromagnétique, tant pour les phénomènes de rayonnement que pour l'analyse de la diaphonie et du comportement des transitions de vias ;
- **L'application de recommandations de layout** issues des travaux de Rahman & Nielsen [5], en particulier sur la gestion des plans de masse, la séparation des domaines analogiques et numériques, et le placement judicieux des condensateurs de découplage.

b) Recommandations générales

Sur la base des résultats obtenus, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour d'autres projets similaires ou pour une généralisation de la démarche :

1. **Favoriser une intégration précoce de la simulation** : plus les outils sont mobilisés en amont dans le processus de conception, plus les erreurs coûteuses sont évitées.
2. **Adopter une démarche d'optimisation paramétrique**
3. **Documenter rigoureusement les hypothèses de modélisation** : les écarts entre simulation et réalité sont souvent liés à des erreurs dans la définition des matériaux, des conditions aux limites ou des géométries simplifiées.
4. **Ne pas négliger la validation expérimentale** : même si les simulations sont puissantes, des mesures sur prototype restent nécessaires pour ajuster ou confirmer les modèles.
5. **Prévoir une veille technologique continue** : les outils de simulation évoluent rapidement, notamment avec l'arrivée de solveurs hybrides ou basés sur l'intelligence artificielle. Il est donc recommandé d'actualiser régulièrement ses méthodes.

3.4 Conclusion

Face aux exigences croissantes de performance, de fiabilité et de conformité dans la conception de cartes électroniques, l'intégration d'**outils de simulation numérique** s'impose aujourd'hui comme un levier stratégique dans les processus de développement. Ce mémoire a exploré cette problématique à travers une revue approfondie de la littérature technique, une analyse comparative de solutions concrètes, et une réflexion contextualisée sur leur applicabilité dans un environnement industriel.

Les différents articles étudiés ont permis de mettre en lumière la richesse des approches possibles : génération automatisée de modèles thermiques, simulation électromagnétique haute fréquence, optimisation du routage, gestion fine des plans de masse, ou encore simulation à l'échelle système. Chacune de ces contributions, validée par l'expérimentation ou le retour d'expérience, témoigne du potentiel de la simulation pour **réduire les cycles de développement, anticiper les non-conformités et améliorer la robustesse globale des systèmes**.

L'approche retenue dans le cadre de ce mémoire repose sur une combinaison de solutions adaptées, centrée autour de la suite ANSYS Electronics Desktop pour permettre l'optimisation paramétrique. Ce choix s'est appuyé sur des critères de pertinence technique, d'interopérabilité avec l'environnement de conception existant et de scalabilité vers d'autres projets.

En conclusion, les outils de simulation ne doivent plus être considérés comme des moyens de validation en fin de chaîne, mais comme des **instruments de décision intégrés au cœur même du processus de conception**. Leur efficacité repose toutefois sur plusieurs conditions : une bonne maîtrise de leur mise en œuvre, une modélisation rigoureuse, une validation expérimentale, et une intégration fluide dans le cycle de développement. En réunissant ces éléments, il devient possible de concevoir des systèmes électroniques à la fois performants, fiables et conformes aux normes les plus exigeantes.

4. Conclusion générale

À l'issue de cette phase approfondie de recherche bibliographique et d'analyse comparative des solutions existantes, il a été décidé d'initier une phase d'expérimentation concrète à l'aide de la suite logicielle ANSYS Electronics Desktop. Cette décision s'inscrit dans une volonté de valider, par la pratique, les apports théoriques identifiés dans les travaux précédemment étudiés, et d'évaluer si cette solution peut répondre aux besoins d'une entreprise, notamment en matière de précision de simulation et de capacité à anticiper les phénomènes électromagnétiques complexes.

Ce choix s'est également nourri de mon expérience personnelle. En effet, au cours de différents projets réalisés dans un cadre académique, j'ai été confronté à plusieurs reprises à des problèmes concrets de compatibilité électromagnétique (CEM), qui ont impacté le bon fonctionnement des circuits conçus. Ces difficultés, souvent coûteuses en temps et difficiles à résoudre a posteriori, ont renforcé ma conviction sur l'importance d'intégrer les outils de simulation dès les premières phases du développement.

Dans cette optique, et pour initier les premiers tests dans un environnement contrôlé, j'ai pris l'initiative de réutiliser un ancien projet scolaire dans lequel des dysfonctionnements électromagnétiques avaient été identifiés et partiellement documentés. Ce choix présente plusieurs avantages : le système est déjà connu, les erreurs sont avérées, et le contexte technique est maîtrisé, ce qui facilite la comparaison entre comportement observé et résultat simulé. L'objectif est de vérifier dans quelle mesure ANSYS peut reproduire fidèlement les phénomènes perturbateurs constatés dans la réalité, et ainsi en déduire son niveau de fiabilité et de pertinence pour un usage en entreprise.

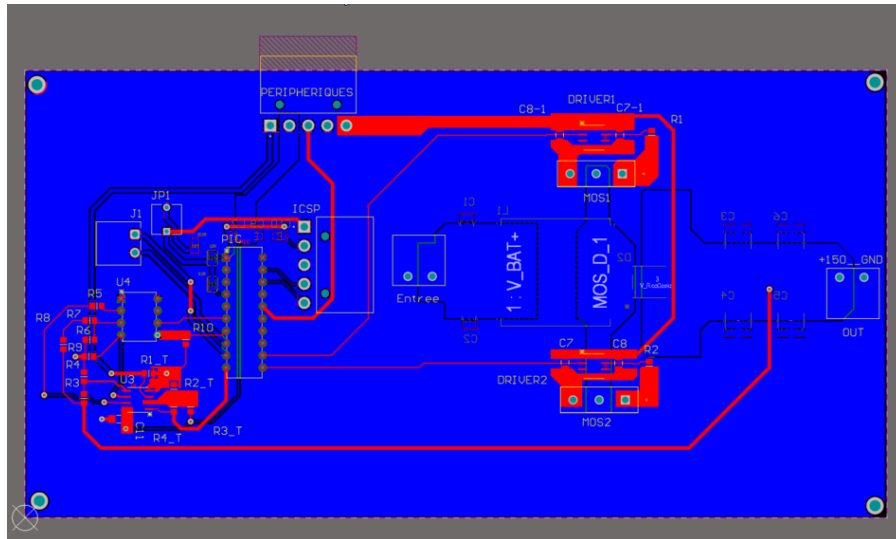


Figure 2: Layout du prototype

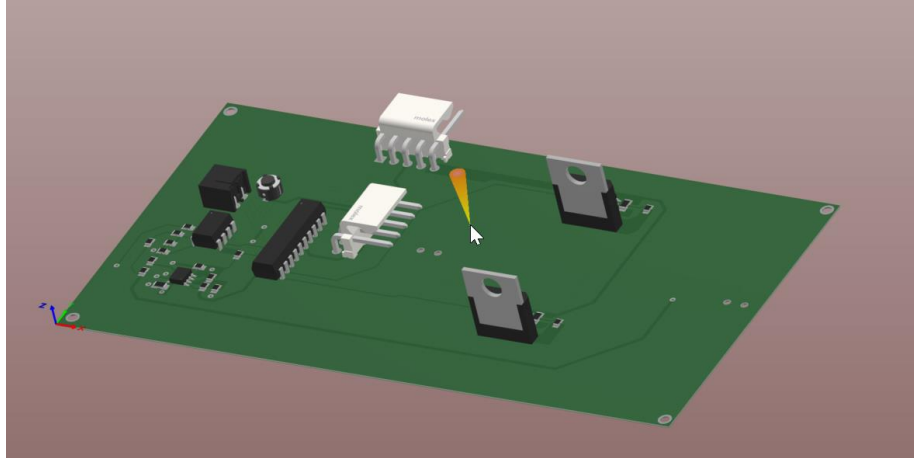


Figure 3: vue 3D du prototype

Après avoir finalisé la conception du prototype sur le logiciel de CAO, je l'ai exportée dans la suite ANSYS, en commençant par une première phase d'analyse dans ANSYS SIwave.

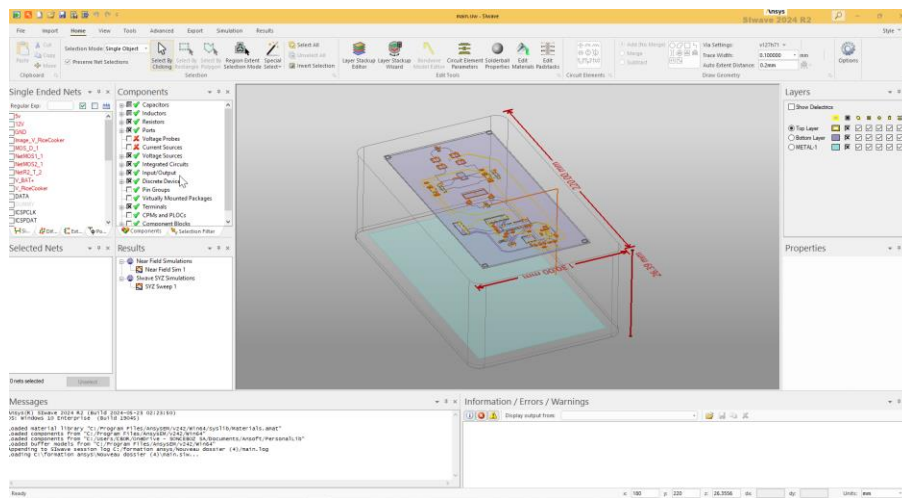


Figure 4: Import du modèle du prototype sur SIwave

Grâce à l'utilisation du module SIwave de la suite ANSYS, nous allons pouvoir générer un modèle numérique complet de la carte électronique étudiée. Ce modèle intègre de manière détaillée l'ensemble des éléments essentiels à une simulation réaliste et précise, à savoir :

- La géométrie du layout (traces de routage, plans de masse, vias, pads, etc.),
- Les propriétés des matériaux utilisés dans les différentes couches du PCB (permittivité, conductivité, pertes diélectriques),
- Le positionnement des composants actifs et passifs sur la carte,
- Ainsi que la structure mécanique environnante, autrement dit la carcasse, les boîtiers, ou tout élément métallique à proximité susceptible d'influencer les phénomènes électromagnétiques.

Ce modèle, une fois constitué dans SIwave, peut ensuite être exporté et importé directement dans HFSS. L'objectif est d'y réaliser des analyses plus fines, notamment en ce qui concerne la propagation des champs électromagnétiques, les effets de rayonnement, ou encore les interactions entre composants à haute fréquence. Ainsi, SIwave agit comme un point d'entrée pour la modélisation système, tandis que HFSS permet d'approfondir les calculs sur les zones critiques identifiées

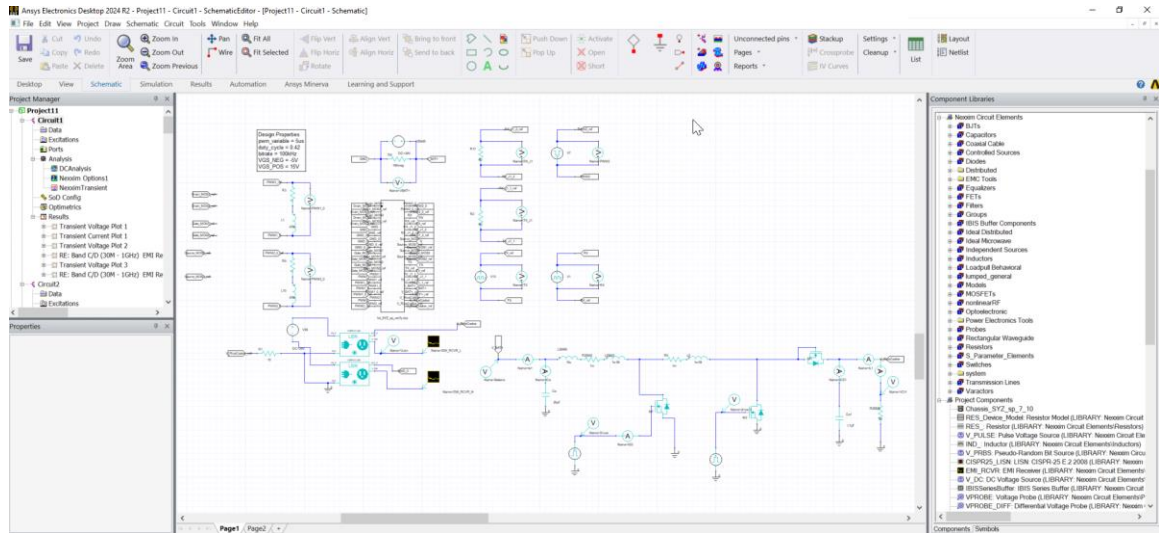


Figure 5: import du modèle dans Ansys HFSS

En réalisant une série de tests, notamment des simulations de Conducted Emissions, nous avons obtenu les résultats suivants.

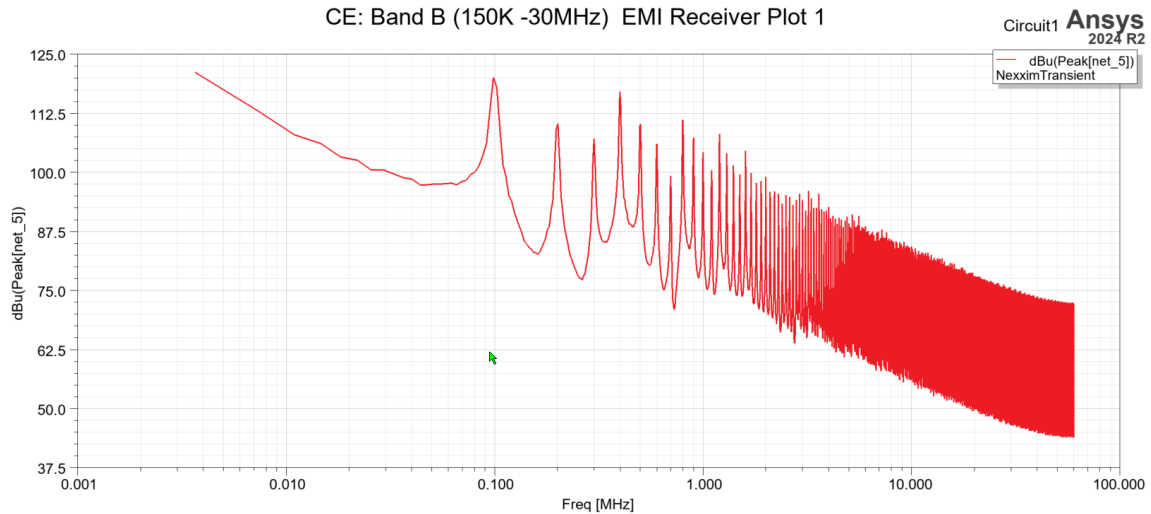


Figure 6: Simulation de Test de Conducted Emissions

À l'issue de nombreuses simulations réalisées avec la suite ANSYS, les résultats obtenus se sont révélés cohérents en termes d'ordre de grandeur, notamment en ce qui concerne les fréquences de fonctionnement et les niveaux d'émission électromagnétique simulés. Bien que ces valeurs soient nettement supérieures aux seuils habituellement considérés comme acceptables dans une optique de compatibilité électromagnétique, elles permettent néanmoins d'expliquer et de justifier les dysfonctionnements observés lors de mon ancien projet académique. Ces premiers résultats tendent ainsi à confirmer que la simulation numérique est en mesure de reproduire les anomalies constatées en conditions réelles, du moins de façon qualitative.

Cependant, pour valider la pertinence et la précision de la solution numérique proposée, une simple cohérence d'ordre de grandeur ne suffit pas. Il est impératif de corréler les résultats simulés à des mesures physiques effectuées sur un prototype réel. C'est pourquoi il a été décidé de concevoir un prototype physique rigoureusement identique au modèle numérique utilisé dans les simulations. Ce prototype sera soumis à une série de tests expérimentaux visant à reproduire au plus près les conditions des simulations, tant en matière de banc de test que de protocoles de mesure.

L'objectif de cette campagne de tests est clair : évaluer dans quelle mesure les résultats simulés peuvent être considérés comme fiables et représentatifs de la réalité. En fonction de cette comparaison, il sera alors possible de confirmer ou d'infirmer l'intérêt d'intégrer cette solution de simulation numérique dans le processus de développement de produits au sein de l'entreprise Sonceboz.

Malheureusement, au moment de la rédaction finale de ce mémoire, la phase de fabrication et de test du prototype physique vient tout juste de commencer. Il ne m'est donc pas possible, à ce stade, de tirer une conclusion définitive quant à la précision absolue du modèle simulé. Toutefois, les résultats obtenus jusqu'ici sont encourageants et laissent entrevoir un potentiel réel d'adoption industrielle, sous réserve de confirmation expérimentale.

"Déclaration concernant l'utilisation de l'IA générative

Lors de la préparation de ce mémoire, l'auteur a utilisé les outils d'IA générative suivants : ChatGPT pour les services suivants : formulation des nominations des sources et organisation de certaines idées. Après l'utilisation de ces services, l'auteur a soigneusement révisé le contenu et en assume l'entière responsabilité."

Références

- [1] B. Ben Hamed *et al.*, “Automatic Generation of Thermal Models for PCB-based Power Electronics,” *Conference on Integrated Power Systems (CIPS 2024)*, Düsseldorf, Germany, Mar. 2024. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-04534359>
- [2] G. Giannetti, “Improved and Easy-to-implement HFSS-MATLAB Interface without VBA Scripts: An Insightful Application to the Numerical Design of Patch Antennas,” *ACES Journal*, vol. 38, no. 6, pp. 377–381, 2023. doi:10.13052/2023.ACES.J.380601
- [3] C. M. Kerwien and C. Blair, “Shielding Effectiveness Simulation of SMT EMI Gaskets Utilizing ANSYS HFSS,” in *Proc. of IMAPS 2017 - 50th Int. Symp. on Microelectronics*, Raleigh, NC, USA, Oct. 2017.
- [4] D. Siadat and J. Priest, “Pinout Optimization for 10 Gbps+ Serial Link Routing,” in *Proc. of IMAPS 2010 - 43rd Int. Symp. on Microelectronics*, 2010.
- [5] A. Rahman and M. T. Nielsen, “Printed Circuit Board (PCB) Design and Electromagnetic Compatibility (EMC) Issues,” *ResearchGate*, May 2025. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/392200304>
- [6] Ansys, “Ansys and EMA Help Intel Achieve the Impossible: EMI Simulation of an Entire Server,” *Case Study*, 2022. [Online]. Available: <https://www.ansys.com>

Résumé et mots-clés

Résumé (FR) : Ce mémoire explore l'intégration des outils de simulation, notamment ANSYS HFSS, dans le processus de conception de cartes électroniques. Après une revue des approches thermiques, CEM et d'intégrité du signal issues de la littérature, une phase d'expérimentation a été menée sur un ancien projet comportant des défauts connus. Les simulations ont permis d'identifier des comportements cohérents avec les problèmes observés. Un prototype physique est en cours de réalisation pour valider ces résultats. La démarche vise à évaluer la pertinence d'une adoption industrielle de ces outils chez Sonceboz.

Mots-clés :

- Simulation numérique
- Compatibilité électromagnétique (CEM)
- Intégrité du signal
- Modélisation thermique
- Carte électronique (PCB)
- ANSYS HFSS
- SIwave
- Prototypage
- Diaphonie
- Rayonnement électromagnétique
- Blindage EMI
- Validation expérimentale
- Optimisation du routage
- Simulation 3

Abstract (EN) : This thesis explores the integration of simulation tools, particularly ANSYS HFSS, into the electronic PCB design process. Following a literature review on thermal, EMC, and signal integrity challenges, an experimental phase was conducted using a former academic project with known issues. Simulations revealed results consistent with the previously observed malfunctions. A physical prototype is currently

being built to validate the simulation data. The overall objective is to assess the industrial relevance of adopting such tools within Sonceboz.

Keywords :

- Numerical simulation
- Electromagnetic compatibility (EMC)
- Signal integrity
- Thermal modeling
- Printed circuit board (PCB)
- ANSYS HFSS
- SIwave
- Prototyping
- Crosstalk
- Electromagnetic radiation
- EMI shielding
- Experimental validation
- Routing optimization
- 3D simulation