

Conception préliminaire optimale des systèmes électriques. Une approche par synthèse

A. Hubert¹, P.-A. Yvars², Y. Meyer³ et L. Zimmer⁴

¹ Sorbonne Universités, Université de Technologie de Compiègne, EA 1006 Laboratoire Électromécanique, Centre de recherche Royallieu – CS 60319, 60203 Compiègne Cedex, France.

² Laboratoire QUARTZ, Institut Supérieur de Mécanique de Paris (SupMeca),

3 rue Fernand Hainaut, 93407 Saint-Ouen Cedex, France

³ IRTES - M3M research laboratory, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 90010 Belfort Cedex, France,

⁴ Dassault Aviation – Direction de la prospective, 78 quai Marcel Dassault, 92252, Saint-Cloud, France

RÉSUMÉ – Ce papier s'intéresse à la conception optimale des dispositifs électriques, électroniques ou électromagnétiques interconnectés, devant respecter les spécifications hétérogènes d'un cahier des charges complexes. Nous montrerons que dans les phases de conception préliminaire, les propositions de solutions à la fois innovantes, pertinentes et respectant toutes les contraintes du cahier des charges de la conception, passent plus par une approche de synthèse que par une approche d'analyse (simulation/évaluation/amélioration). Dans ce but, des outils s'appuyant sur la programmation par contraintes et le calcul par intervalles seront proposés. La méthodologie de conception correspondante est illustrée sur le benchmark d'un transformateur nécessitant la définition et l'instanciation de variables mixtes de conception. Les résultats obtenus, que ce soit en termes de respect du cahier des charges, d'optimalité de la solution ou de temps de calcul, montrent que la démarche de conception proposée est pertinente et très performante, notamment dans un contexte industriel.

Mots-clés – Conception optimale, méthodes ensemblistes, programmation par contraintes, variables mixtes, pré-conception, dispositifs électromagnétiques, spécifications hétérogènes.

1. INTRODUCTION

Les attentes industrielles en terme de machines électriques, d'électronique de puissance et d'entraînement électromécaniques sont de plus en plus exigeantes et, de ce fait, de plus en plus difficiles à satisfaire. Les dispositifs technologiques correspondant se doivent d'être toujours plus performants, que ce soit en terme d'intégration, de réduction des coûts, de consommation énergétique ou de dimensions. Pour atteindre ces objectifs, disposer d'outils efficaces d'aide à la conception devient nécessaire afin de proposer des solutions qui satisfassent toutes les contraintes de conception tout en ayant un caractère optimal ou quasi-optimal. Ce besoin se fait clairement sentir pour le développement de toutes les applications nouvelles liées aux énergies renouvelables et à la transition énergétique : piles à combustibles et véhicules électriques ou hybrides, systèmes embarqués, dispositifs éoliens ou de récupération de l'énergie [1, 2, 3].

Que ce soit dans le cadre de l'ingénierie électrique ou mécanique, la grande majorité des concepteurs ont à leur dispositions plusieurs types de modèles utilisables à différents niveaux du cycle en V de conception (figure 1). En ingénierie électrique par exemple, ces différents modèles peuvent être des modèles de *circuits équivalents* pour les phases de conception *préliminaire* (modèles dits *grossiers* ou à *gros grains*) ou des modèles de *calcul par éléments finis* pour les phases de conception *détaillée* (modèles dits *fins* ou à *grains fins*) [4]. L'utilisation de plusieurs modèles durant le processus de conception (généralement un

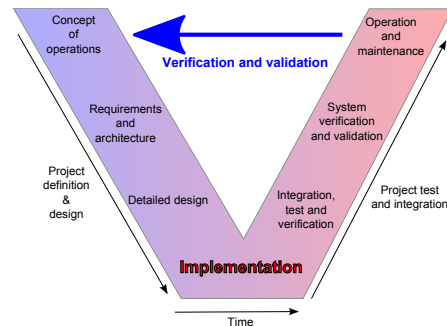


Fig. 1. Le cycle en V utilisé en ingénierie système pour décrire les étapes de conception d'un dispositif technologique.

modèle *grossier* et un modèle *fin*) est requis pour des contraintes liées aux temps de calcul. Les modèles numériques fins sont précis, mais plutôt non-intuitifs et gourmand en temps de calcul. De plus, ils nécessitent de disposer d'un *pré-design* initial (de même pour les modèles de type *surrogate*). Les modèles analytiques *gros grains* sont bien adaptés aux phases d'optimisation mais peuvent présenter des précisions limitées pour des géométries complexes ou des comportements fortement non-linéaires. Coupler ces deux types de modèles dans une approche multi-niveau/multi-échelle du cycle en V est un grand challenge pour les prochaines années. Certaines avancées particulièrement intéressantes ont d'ors et déjà été proposées dans cette direction (*space-mapping* [5, 6, 7] et *target cascading* [8, 9, 10]).

Le développement d'algorithmes de calcul efficaces pour la conception optimale à tous les niveaux du cycle en V est actuellement une activité de recherche très active dans la communauté du génie électrique. Bien que de nombreuses publications et résultats puissent être cités, la plupart de ces travaux adoptent majoritairement un point de vue d'analyse (simulation, évaluation, modification, cf. figure 2). Cette démarche est parfaitement adaptée pour la conception détaillée et l'amélioration d'une solution existante mais elle perd en grande partie sa pertinence lorsqu'il s'agit de générer des conceptions préliminaires originales. En effet, le processus itératif de conception décrit dans la figure 2 nécessite de partir d'un concept initial pré-défini pour initier le processus itératif d'amélioration. Si le concept initial n'existe pas, le processus d'amélioration ne peut pas démarrer. Ainsi, une approche complémentaire pour *générer* ce pré-concept est toujours nécessaire. Dans le monde industriel comme dans le monde académique, ces pré-concepts (ou phases d'*esquisses* pour reprendre la terminologie utilisée

dans [11], très utiles pour proposer rapidement des *devis*) sont le plus souvent générés de manière *ad-hoc* par le concepteur sur la base de son savoir-faire et de son expérience, sans outil d'aide à la conception vraiment disponible, si ce n'est des « tableurs » compilant les principales règles *métiers*.

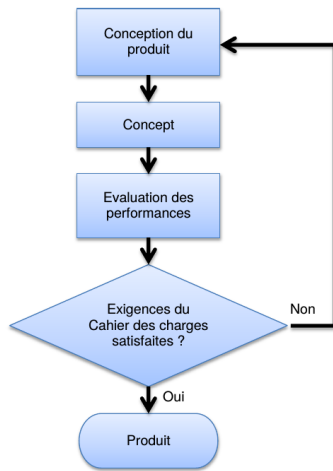


Fig. 2. Les différentes phases d'une activité de conception à partir d'une démarche *concept-évaluation-amélioration*.

Bien que très souvent négligées dans le monde académique, ces phases de pré-conception sont des étapes *clés* qu'il ne faut pas sous-estimer, puisque c'est à ce stade que les *choix stratégiques* de la conception sont effectués (types d'architecture, structures, technologies...), choix qui, pour la plupart, ne pourront pas être remis en cause par la suite, dans les phases suivantes de conception détaillée. L'importance des différentes phases de conception sur les coûts tout au long de la durée de vie d'un produit industriel est bien illustrée par la figure 3, tirée d'une étude dans le secteur de l'aéronautique [12].

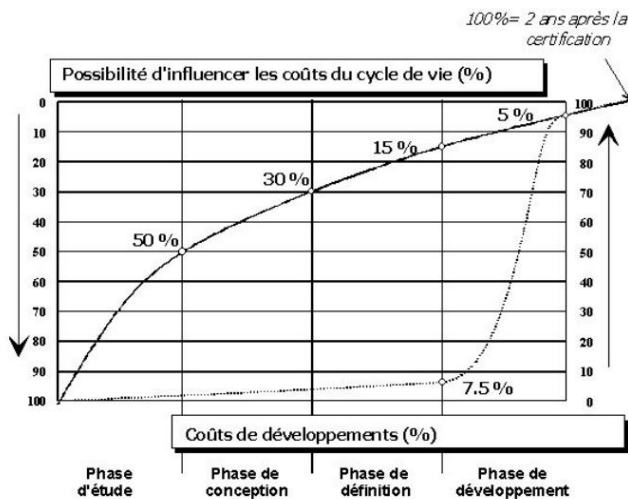


Fig. 3. Impact des phases de conception sur le coût d'un produit durant son cycle de vie [12].

Ce graphique montre sans conteste que les étapes de conception préliminaire (phase d'étude et début de la phase de conception) sont au final les *vraies* étapes stratégiques de la conception et de l'innovation car ce sont elles qui conditionnent de manière maximale les coûts et affectent fortement les choix d'architecture, de technologies et les grandes orientations de la conception [11]. Au contraire, les étapes de conception détaillée (fin de la phase de conception, lorsqu'on peut s'appuyer sur des modèles

fin) ne permettent d'améliorer le dispositif technologique qu'à la marge, par exemple par optimisation de forme d'une géométrie dont les grandes lignes ont déjà été largement pré-définies. Ces phases de conception détaillée se *bornent* alors à une optimisation *locale* et non *globale* du produit puisqu'il n'est plus permis de modifier de nombreuses variables de conception déjà imposées par la pré-conception.

Sans remettre en cause l'importance de la conception détaillée, l'objectif de ce papier est de souligner l'importance au moins égale de la conception préliminaire, étape essentielle de l'innovation, et par la suite de s'intéresser au développement d'outils et méthodes disponibles à ce stade préliminaire de la conception. En particulier, l'un des objectifs de cet article est de présenter dans ce cadre un paradigme récent de conception à base de programmation par contraintes et méthodes ensemblistes. Celui-ci sera illustré sur un exemple benchmark. La première section de l'article présentera quelques éléments de réflexion autour de la vision *analyse/synthèse* pour la conception préliminaire. La section suivante présentera les éléments clés des méthodes CSP ensemblistes. Enfin, l'article se poursuivra par la présentation de l'exemple de conception d'un transformateur. Les résultats obtenus par plusieurs méthodes seront comparés, ce qui permettra d'illustrer la pertinence de l'approche proposée dans ce papier. L'article se terminera par une conclusion et présentera quelques perspectives.

2. LA CONCEPTION : UNE ACTIVITÉ D'ANALYSE OU DE SYNTHÈSE ?

L'objectif de cette section est de rappeler les différentes approches utilisées pour résoudre un problème de conception. En particulier, nous tenterons de montrer qu'il est raisonnable d'adopter une approche de synthèse pour la conception préliminaire alors que l'approche d'analyse, complémentaire, se prête mieux aux phases ultérieures de conception, notamment la conception détaillée.

Clarifions dans un premier temps la distinction faite entre analyse et synthèse pour la conception. Cette distinction a été présentée dans de nombreux travaux [13, 14] et elle repose au final sur l'utilisation d'un modèle direct ou d'un modèle inverse. Une démarche d'analyse repose sur l'utilisation d'un modèle direct et d'un enchaînement de phase de simulations/évaluations/modifications (cf. figure 4 (a)) afin d'obtenir une conception qui satisfasse les exigences du cahier des charges (cette démarche est également celle de la figure 2). Les modifications de conception sont *suggérées* par un processus d'amélioration qui peut être manuel (intervention d'un expert) ou automatique (algorithme d'optimisation par méthodes stochastiques ou déterministes). C'est la démarche de conception *standard* telle que définie par la norme IEEE 1220 dont les grandes lignes sont présentées dans la figure 5.

La démarche de synthèse, au contraire, utilise plutôt une approche inverse, c'est-à-dire qu'elle tente directement de générer une solution à partir des exigences, sans avoir à *reboucler* pour améliorer une solution *pré-existante* (cf. figure 4 (b)). Cette démarche est évidemment la plus adaptée pour *générer* les premiers concepts (notamment le premier bloc concept de la figure 2) mais sa limite principale est qu'elle nécessite de disposer d'un modèle inverse, ce qui est loin d'être toujours possible... et qui nécessite donc souvent d'utiliser des modèles inverses très simplifiés. [15] définit dans ce cas la notion de « sizing model » pour qualifier ces modèles inverses *très* grossiers par opposition aux modèles directs plus précis, qualifiés de « optimization model ». Ces deux démarches présentent donc toutes deux des avantages et des inconvénients mais sont vraiment complémentaires. La question est alors : « pourquoi la majorité des travaux de la littérature sur la conception optimale adopte presque uniquement le point de vue de l'analyse plutôt que celui de la syn-

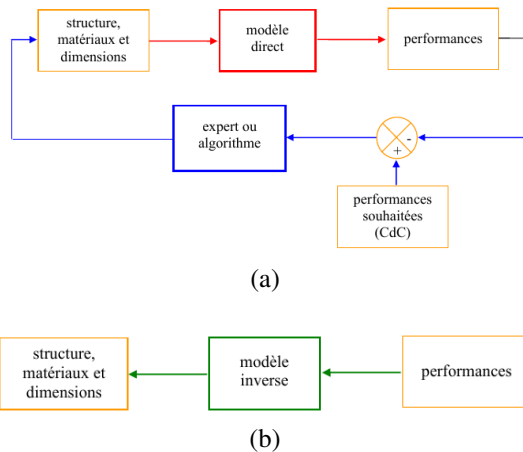


Fig. 4. Utilisation de modèles directs (a) ou inverses (b) pour résoudre un problème de conception [14].

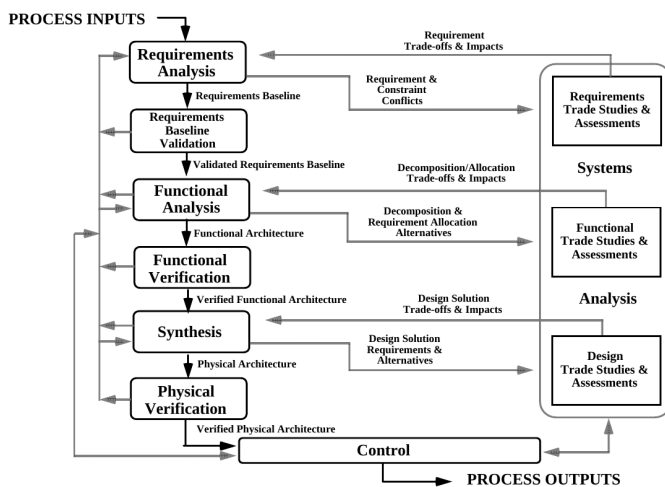


Fig. 5. Norme IEEE 1220 relative au processus de conception en ingénierie système (Standard for application and Management of the Systems Engineering Process, Jan. 1999).

thèse ? ». La réponse est simple et c'est en fait une conséquence de la manière dont sont construits les modèles de conception. En effet, un prototype réel n'étant pas disponible lors des premières phases de conception, tous les modèles doivent donc provenir de modèles *physiques*. Mais un modèle physique est naturellement écrit sous une forme *directe* et non sous la forme *inverse*. De plus, ces modèles physiques directs sont rarement inversibles, ce qui ne permet donc pas de les inverser de manière satisfaisante (sauf à se satisfaire de modèles inverses très grossiers, tels les « sizing model » dont parle [11]). En conséquence, le processus de conception optimal majoritairement utilisé dans la littérature adopte une démarche itérative d'*essai-erreur* afin de trouver une solution admissible, éventuellement optimale, en ce basant sur les seuls modèles disponibles, c'est-à-dire les modèles d'analyse. Les modèles sont ainsi utilisés comme des outils de simulation au sein d'une boucle d'itération pour évaluer la pertinence d'une solution vis-à-vis des critères de conception du cahier des charges et pour, après bouclage, trouver une solution *meilleure et admissible* par optimisations (ou amélioration) successives.

Malheureusement, cette méthode itérative n'est pas applicable pour la *génération de concept* où la démarche de synthèse est inévitable, surtout si on désire explorer des solutions nouvelles innovantes tout en conservant des temps de conception raisonnables. C'est particulièrement le cas lorsque le cahier des charges fait apparaître des spécifications hétérogènes, fonctionnelles ou non-fonctionnelles (coût, cycle de vie, dé-

marche d'éco-conception...). En effet, la conception doit partir des spécifications pour proposer des solutions d'abord admissibles, bien avant d'envisager la proposition d'une solution optimale. Dans ce cas, il ne semble pas raisonnable de vouloir partir d'une *pseudo-solution* pour vérifier, après coup, si celle-ci est admissible, c'est-à-dire si celle-ci respecte les nombreuses spécifications du cahier des charges. De notre point de vue, l'activité de conception doit dans ce cas être envisagée au travers de la définition suivante :

Définition 2.1 (Design problem) *Solving a design problem is completing a subdefined problem!*

Ainsi, en partant, *par définition*, d'un problème sous-défini, une conception admissible ne peut-être la solution d'un problème d'analyse puisque un problème sous-défini n'est tout simplement pas simulable (pas de solution unique et pas de convergence des algorithmes de simulation/optimisation). De plus, lors d'un problème de conception sous- (spécifications incomplètes du cahier des charges) ou sur-défini (exigences trop fortes), ce qui est souvent le cas dans un contexte industriel, il est en général extrêmement difficile d'adopter une démarche d'analyse car il n'existe pas de solution *initiale* sur laquelle démarrer le processus itératif d'amélioration de cette solution.

3. L'APPROCHE CSP POUR LA CONCEPTION

L'objectif essentiel de cet article est de montrer qu'il existe des méthodologies alternatives à la démarche courante d'analyse itérative pour aborder de manière plus *naturelle* et très *efficacement* le problème de la conception optimale, en particulier dans les phases préliminaires. Il sera montré qu'un point de vue plus adapté est celui de la synthèse en définissant les spécifications de la conception comme un problème de programmation par contraintes. La sous-définition du problème et la manipulation de variables mixtes (continues, entières, ou énumérées/discrètes) peut alors se faire dans le cadre des méthodes ensemblistes [16]. Les variables de conception réelles peuvent être définies par intervalles et les calculs numériques réalisés à l'aide de l'arithmétique des intervalles définie par Moore [17] et étendue à l'ensemble des opérateurs algébriques usuels.

À ce stade, quelques rappels sur les CSPs (*Constraints Satisfaction Problems*) sont nécessaires.

3.1. Les CSP

Un CSP est défini par un triplet (X, D, C) tel que [18] :

- $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ est un ensemble fini de variables dites *variables contraintes*. $n \in \mathbb{N}$ est le nombre entier de variables du problème à résoudre ;
- $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$ est un ensemble fini de domaines de ces variables : $\forall i \in \{1, \dots, n\}, x_i \in d_i$;
- $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_p\}$ est un ensemble fini de contraintes sur les variables X . $p \in \mathbb{N}$ est un entier quelconque, représentant le nombre de contraintes du problème.

Les domaines des variables peuvent être :

- discrets, sous la forme d'un ensemble de valeurs possibles $\{x^1, \dots, x^l\}$. $l \in \mathbb{N}$ est un entier fini et l'ensemble des possibilités est énumérable ;
- continus, sous la forme d'un intervalle de réels $[x^{\min}, x^{\max}]$. x^{\min} et x^{\max} sont deux réels finis et l'ensemble intervalle est borné.

Dans le cadre des CSP, on appelle contrainte n'importe quel type de relation mathématique égalité, différence, inégalité logique et/ou algébrique (linéaire, quadratique, non linéaire, booléenne, ...) portant sur les valeurs d'un ensemble de variables.

Résoudre un CSP revient ainsi à *instancier* chacune des variables de X tout en satisfaisant l'ensemble C des contraintes du problème.

3.2. Techniques de résolution

Les algorithmes de résolution de CSP dépendent du type de variable manipulé : entier dans les CSP discrets et nombre à virgule flottante dans le cadre des CSP continus.

3.2.1. Les CSP discrets

Les méthodes CSP sont des méthodes issues de la recherche opérationnelle et de l'intelligence artificielle dont les premiers travaux datent de plus de trente ans [19, 20, 21, 22]. Ces méthodes CSP discrètes, de complexité exponentielle, sont basées sur l'énumération et le filtrage. Ce filtrage, appelé aussi propagation des contraintes, permet de réduire les domaines de définition des variables au fur et à mesure de la résolution. Les CSP discrets ont été utilisés industriellement pour aider à la résolution de problèmes fortement combinatoires notamment NP difficiles ou NP complets en ordonnancement et logistique. L'approche permet de limiter au plus tôt l'explosion combinatoire dans l'arborescence de génération des solutions.

3.2.2. Les CSP continus

Pour dépasser la limitation de ces CSP à variables discrètes, des CSP avec des domaines à variables continues à valeur dans des intervalles réels ont été proposés. Cette technique de résolution par intervalles est une synthèse entre l'analyse par intervalles de Moore [17] et les CSP [23, 24, 25]. Plusieurs techniques ont été développées ; on en trouvera une présentation assez complète dans [26].

3.3. Optimisation et CSP

Dans le cas d'une utilisation des techniques de CSP pour une optimisation monocritère (ou monobjectif), le point clé est de résoudre par dichotomie une suite de CSP dans laquelle le jeu de contraintes augmente d'un élément de la suite au suivant. À chaque étape, une contrainte est ajoutée exprimant que le CSP suivant doit être meilleur que le précédent. Le processus s'arrête sur le CSP qui minimise la valeur de la variable de performance considérée, à un ε près ajustable [16]. La valeur de ε dépend non seulement de la précision recherchée (spécifiée dans le cahier des charges) mais également de la confiance dans la précision des modèles utilisés. On rappelle en effet que la méthode présentée ici s'adresse principalement au problème de conception préliminaire, c'est-à-dire à des stades où les modèles utilisés sont des modèles *grossiers*. Ce sera l'objet de la conception détaillée de raffiner par la suite cette conception préliminaire.

Plusieurs équipes de recherche françaises se sont intéressées à l'utilisation des CSPs et du calcul par intervalles pour la conception en génie électrique. À notre connaissance, les premiers travaux français furent réalisés à Toulouse [27, 13]. Les algorithmes proposés ne permettaient cependant pas de résoudre des problèmes à nombre de degrés de liberté de conception très élevés car ils n'utilisaient pas certaines techniques connues telles que la définition des alias (qui permet de réduire le nombre de variables de conception à son minimum) et les stratégies de résolution (des heuristics d'accélération de la résolution) [12]. Des évolutions de ces algorithmes ont été proposés plus récemment dans [28, 29] en ré-introduisant justement des notions similaires à celle des alias mais appelées variables d'entrées et de sorties. Ces algorithmes sont déjà plus performants que les précédents mais il ne semble pas qu'ils puissent encore gérer des problèmes à variables mixtes (entiers, continus ou énumérées) et ne sont donc pas encore totalement matures pour gérer des problèmes de conception industriels réalistes (qui génèrent justement massivement des problèmes à variables mixtes : choix de configuration dans des catalogues, problèmes d'allocation de ressources et génération d'architecture). Ce papier s'inspire et poursuit des travaux commencés en mécanique et en aéronautique [12, 30, 31, 32, 33] pour les étendre au génie électrique.

4. UN EXEMPLE DE CONCEPTION BENCHMARK

Dans cette section, les méthodes CSP ensemblistes sont utilisées pour la conception d'un benchmark proposé par le laboratoire L2EP de Lille, France.

4.1. Présentation du problème de conception

Le problème traité est celui de la conception d'un transformateur en utilisant un modèle analytique thermo-électrique faisant intervenir des variables mixtes (notamment énumérés car devant être choisis dans des catalogues constructeurs) [34]. Ce benchmark de conception, assez simple, a été choisi pour présenter les outils développés dans ce travail. Il est cependant important de noter que ces outils peuvent être appliqués pour la conception de dispositifs technologiques beaucoup plus complexes. Cependant, la conception des transformateurs électriques est un problème industriel encore largement ouvert si on regarde le nombre de publications assez récentes les concernant [35, 36, 37, 38].

La description complète de ce problème de conception (modélisation du transformateur et spécifications de conception) peut-être trouvée sur le site suivant :

<http://l2ep.univ-lille1.fr/come/benchmark-transformer.htm>

Le problème d'optimisation correspondant est celui de la conception d'un transformateur de sécurité 230V/24V, 200 VA, 50 Hz de facteur de puissance égal à 0,8. Comme représenté sur la figure 6 tirée de [39], ce problème contient sept variables de conception : quatre variables de dimensionnement de la géométrie du noyau (a , b , c et d), deux variables définissant la section des conducteurs en cuivre (S_1 et S_2) et une variable pour le nombre de spires n_1 du bobinage primaire. L'objectif de l'optimisation est de minimiser la masse de fer et de cuivre tout en respectant sept exigences de fonctionnement : les températures du cuivre (bobinage) et du fer (noyau), T_{copper} et T_{iron} , doivent être inférieures à 120°C et 100°C , respectivement. Le rendement η doit être supérieur à 80%. Le courant de magnétisation I_{10} et la chute de tension au secondaire ΔV_2 doivent être inférieurs à 10% du courant primaire I_1 et de la tension du secondaire V_2 . Enfin, les facteurs de remplissage f_1 et f_2 des deux bobinages dans le noyau doivent être inférieurs à 0,5. Contrairement au problème d'optimisation *continue* traité dans [40], le problème initial proposé et résolu dans [39] est un problème à variables mixtes car n_1 doit être un entier et les géométries du noyau et les sections des fils doivent être choisies parmi des dimensions disponibles dans un catalogue constructeur (62 configurations différentes sont possibles dans le benchmark original).

Plusieurs modèles de ce transformateur sont accessibles sur le site du L2EP mais puisque nous nous intéressons aux problèmes de conception préliminaire, nous avons retenu le modèle analytique. La description complète de ce modèle n'est pas reportée dans ce papier puisqu'elle est disponible sur le site. Cette modélisation est principalement constitué de deux modèles à paramètres localisés couplés (l'un influe sur l'autre et réciproquement) et fonctionnant en régime permanent. Nous disposons donc d'un modèle thermique et d'un modèle électrique représentés sur la figure 7.

L'utilisation d'un exemple benchmark va permettre de comparer les différentes méthodologies de conception puisque de nombreuses méthodes ont déjà été utilisées sur ce benchmark :

- Optimisation combinatoire (Exhaustive Enumeration, Branch & Bound, Genetic Algorithms),
- Optimisation continue (SQP),
- Optimisation multi-niveaux (Space- and Manifold-Mapping)
- Optimisation multi-objectifs (Weighted Sum SQP, NSGA II Genetic Algorithms).

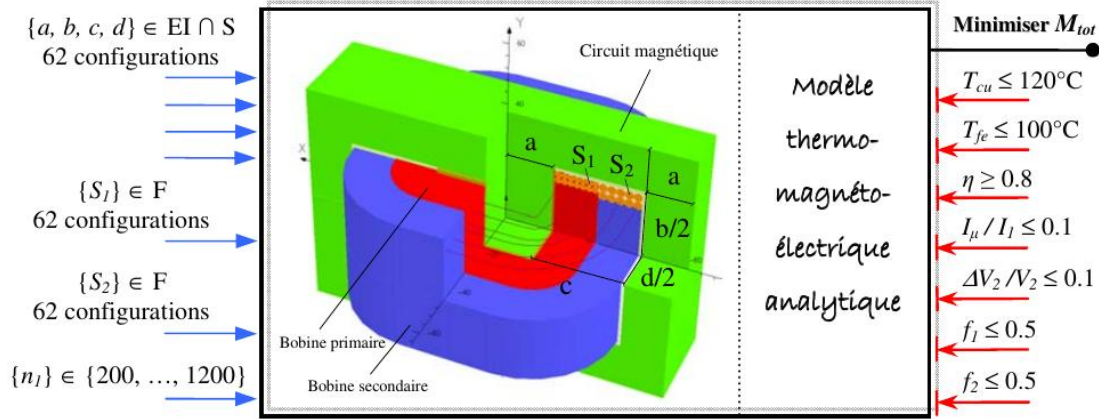


Fig. 6. Variables de conception du transformateur et spécification du problème de conception optimale [39].

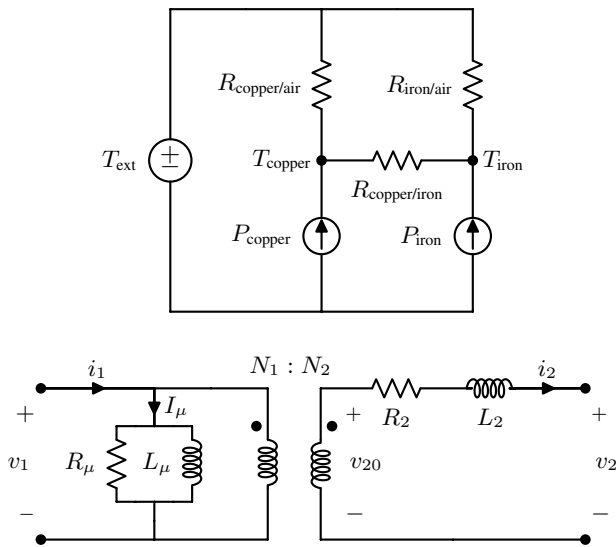


Fig. 7. Modèles thermiques et électriques du transformateur [39].

La particularité de ce problème de conception est la mixité des variables de conception : entiers (nombres de spires), réels (grandeurs électriques et thermiques) et énumérables (dimensions du noyau et des fils à choisir dans des catalogues). Comme souligné dans [40], la difficulté de la résolution de ce problème de conception vient du couplage entre les deux modèles, thermique et électrique, qui crée des *boucles algébriques* dans la résolution et nécessite donc l'utilisation de solveurs implicites si la résolution est conduite en adoptant une méthodologie d'analyse (simulation des modèles).

4.2. Optimisation à l'aide d'une approche CSP ensembliste

Dans un modèle CSP, nous avons besoin d'associer un domaine de définition à chaque variable de conception (dans notre cas, au nombre de sept). a, b, c, d, S_1 et S_2 sont des réels énumérés de dimensionnement des tôles du noyau et des sections des fils à choisir dans des catalogues constructeurs (un exemple de domaine D_a pour la dimension a est reporté dans l'annexe A). n_1 est le nombre de spires du primaire, entier à choisir dans l'intervalle [200, 1200]. En théorie, le nombre de spires du secondaire n_2 est également une variable de conception mais une analyse de causalité réalisable à l'aide de notre outil de résolution (le logiciel Constraint Explorer (CE) développé pendant le projet RNTL CO2 et maintenu en conditions opérationnelles par Laurent Zimmer de Dassault Aviation [41]) a permis de montrer que l'instanciation des variables a, b, c, d, S_1, S_2 et n_1

est suffisante pour définir complètement la conception du transformateur : a, b, c, d, S_1, S_2 et n_1 sont donc des variables de conception *indépendantes* (des vrais degrés de libertés, DDL) alors que n_2 ne l'est pas. En réalité, tous les autres variables et paramètres du transformateur ne sont pas des variables indépendantes et peuvent donc être considérées comme des variables *intermédiaires* fixés indirectement une fois les DDLs instanciés. Toutes les variables intermédiaires qui peuvent être définies explicitement à partir d'autres variables ou paramètres sont définissables à l'aide d'expressions symboliques appelées des *alias* dans la communauté des CSP. L'utilisation d'alias permet de réduire drastiquement la complexité du problèmes de CSP puisqu'il réduit fortement le nombre de DDL à instancier. Cette réduction de complexité est utilisée depuis assez longtemps dans les solveurs *industriels* de CSP (le logiciel CE, utilisé dans cette étude, dispose des fonctions d'alias et d'un *analyseur* de causalité).

Dans un CSP, toutes les équations et inéquations doivent être transformées littéralement en contraintes. Il existe cependant une exception concernant les grandeurs définissables *explicitement* à partir des autres, qui elles sont définies via des alias (des exemples d'alias pour la résistance r_2 et le champ magnétique B_m sont donnés dans l'annexe A). Pour des raisons d'accélération des algorithmes, il est également intéressant d'utiliser des tables de contraintes pour gérer les combinaisons admissibles entre plusieurs variables, c'est notamment le cas pour les dimensions a, b, c et d qui sont liées par les combinaisons de dimensions disponibles dans les catalogues constructeurs (on définit alors une nouvelle variable nommée *type* regroupant les contraintes couplées entre ces 4 variables). Cette structure permet d'accélérer fortement la résolution des CSP et de les rendre efficace même pour des problèmes de conception assez complexes.

Une fois, les variables, leurs intervalles et les contraintes de conception spécifiés, il est possible de lancer la résolution du problème de CSP associé à la conception de ce transformateur. Une première propagation des contraintes conduit à une première réduction des domaines (seconde colonne du tableau 1). En utilisant un algorithme de Branch & Prune [30], nous obtenons une première solution (troisième colonne du tableau 1). Finalement, nous réduisons la valeur de la masse M_{total} avec l'algorithme d'optimisation basé sur les CSP. Le transformateur de sécurité optimal est obtenu pour $M_{total} = 2.5946$ kg (dernière colonne du tableau 1).

Le tableau 2 reporte notre solution optimale, l'instanciation des variables de conception (DDL), la valeur de quelques grandeurs intermédiaires et la vérifications des exigences qui ont été spécifiées dans le cahier des charge de conception. Le temps de

Tableau 1. Resultats numériques trouvés par le solveur de CSP ensembliste (logiciel CE, Dassault Aviation)

| Variables | Initial | 1 st propagation | 1 st solution | Optimal solution |
|---|--|--|--------------------------|------------------|
| Design parameters | | | | |
| type (index of the set $\{a, b, c, d\}$) | [1, 62] | [1, 62] | [0.0155, 0.015583] | 27 |
| S_1 (m ²) | $\{0.05515e - 6, \dots, 19.635e - 6\}$ | $\{0.05515e - 6, \dots, 19.635e - 6\}$ | [0.0649, 0.0650] | $2.463e - 7$ |
| S_2 (m ²) | [2, ∞] | [3, ∞] | 3 | $2.54e - 6$ |
| n_1 (turns) | [200, 1200] | [0.005, 0.02] | 0.005 | 611 |
| Performance parameters | | | | |
| M_{total} (kg) | [0.00671, 2371.413] | [0.007, 499.46] | [9636.8, 9714.6] | 2.5946 |

Tableau 2. Détails de la solution optimale trouvée ($M_{\text{total}} = 2.5946$ kg)

| | | | | | | | |
|---|--------------------------|----------------------|--------------------|--|--|--------------------------|---------------|
| Design variables | | | | | | | |
| type (index of the set $\{a, b, c, d\}$) | a (mm) | b (mm) | c (mm) | d (mm) | S_1 (mm ²) | S_2 (mm ²) | n_1 (turns) |
| 27 | 18 | 54 | 18 | 33.5 | 0.2463 | 2.54 | 611 |
| Intermediate variables | | | | | | | |
| | R_1 (Ω) | I_1 (A) | R_2 (Ω) | I_2 (A) | n_2 (turns) | | |
| | 10.10599 | 0.97778 | 0.14778 | 8.0288 | 69 | | |
| Specifications | | | | | | | |
| Variables | $\frac{\Delta V_2}{V_2}$ | $\frac{I_{10}}{I_1}$ | η | T_{iron} ($^{\circ}\text{C}$) | T_{copper} ($^{\circ}\text{C}$) | f_1 | f_2 |
| Requirements | ≤ 0.1 | ≤ 0.1 | ≥ 0.8 | ≤ 100 | ≤ 120 | ≤ 0.5 | ≤ 0.5 |
| Values | 0.08224 | 0.09835 | 0.8758 | 99.783 | 109.4576 | 0.309648 | 0.361327 |

calcul dépend bien évidemment de la puissance de l'ordinateur utilisé mais sur un PC portable *standard*, ce calcul d'optimisation prend moins de 30 secondes.

Durant notre résolution à l'aide de la formulation CSP et de la fonctionnalité d'analyse causale du logiciel CE de Dassault Aviation, nous nous sommes aperçus que le problème tel que spécifié par le L2EP, était sur-contraint et ne présentait donc pas de solution. Ce résultat était en fait caché par le solveur du L2EP qui utilisait une approximation réelle du nombre de spire n_1 (approximation nécessaire pour pouvoir utiliser le solveur d'équation implicite de matlab). Afin de pouvoir résoudre le *vrai* problème mixte *non* sur-contraint, nous avons du relaxer une des contraintes liées aux exigences de fonctionnement. Le choix s'est naturellement fait sur la contrainte de courant efficace de sortie $I_2 = 8$ A que nous avons relaxé en $I_2 \geq 8$ A (cette inégalité est d'ailleurs plus conforme aux exigences telles que spécifiées par les constructeurs de matériel électrique). Ce changement dans les spécifications explique la valeur du courant de sortie I_2 dans le tableau 2.

Comme l'exemple choisi dans cet article est un benchmark, les performances de la solution optimale trouvée par notre méthode de conception peuvent être comparées aux solutions optimales trouvées par d'autres méthodes. En particulier, plusieurs résultats ont été proposés par l'équipe du L2EP de Lille, France (voir [34] et le site web du L2EP pour les détails de ces résultats). Toutes ces solutions sont reportés dans le tableau 3.

Comme expliqué précédemment, notre méthode de conception prend en compte le *vrai* problème à variables mixtes. Nos résultats doivent donc être comparés à ceux obtenus avec des méthodes comparables. Quatre méthodes d'optimisation combinatoire ont été testées par l'équipe du L2EP :

- utilisation du logiciel commercial Pro@DESIGN (<http://www.designprocessing.com/>);
- utilisation d'une *Énumération Exhaustive* (EE) résolue grâce à la toolbox de calcul distribué de Matlab (cette méthode trouve la solution globale d'un problème combi-

- natoire mais au prix d'un temps de calcul prohibitif);
- utilisation d'un algorithme génétique;
- utilisation d'une méthode de Branch-and-Bound.

Des méthodes d'optimisation continue ont également été testées par le L2EP en utilisant des algorithmes SQP (Cont. opt. dans le tableau 3) ainsi que des méthodes multi-niveaux utilisant du *Space Mapping* [40, 42] (à priori, le logiciel Pro@DESIGN semble également utiliser des algorithmes SQP en plus du calcul symbolique). Les résultats obtenus avec ces deux dernières méthodes (et apparemment ceux de Pro@DESIGN) ne sont donc pas comparables avec les autres puisqu'ils ne résolvent pas le même problème (une approximation des variables entières énumérées par des variables réels a été utilisée dans ces travaux), il s'en suit que plusieurs contraintes deviennent actives alors que ce n'est pas du tout le cas dans le problème à variables mixtes (voir par exemple les valeurs de T_{iron} , $\frac{I_{10}}{I_1}$, f_1 et f_2 dans le tableau 3).

Par comparaison avec les autres résultats disponibles sur ce benchmark, la méthode proposée est non seulement pertinente du point de vue du temps de calcul mais aussi du point de vue de l'optimalité de la solution obtenue. Sur ce benchmark, c'est en fait la seule méthode, hors Énumération Exhaustive (mais qui présente le défaut majeur d'une complexité algorithmique rédhibitoire), qui permette de trouver la solution optimale tout en respectant *toutes* les contraintes de la conception. L'adoption d'un formalisme de programmation à l'aide de contraintes permet en effet d'assurer, de manière déterministe, que toutes les contraintes de conception seront satisfaites par l'ensemble de solutions retournés par l'algorithme. De plus, les outils proposés permettent de déterminer les causalités *computationnelles* du modèle et de détecter si le problème n'est pas sur-contraint. Dans ce cas, la solution trouvée conduit à un ensemble vide pour les solutions satisfaisant toutes les contraintes de la conception.

Tableau 3. Resultats des optimisations conduites par l'équipe du L2EP (site web indiqué ci-dessous) et comparaison avec les résultats obtenus par la méthode proposée dans ce papier (CSP-BP + solveur CE, Dassault Aviation).
http://optimisation.l2ep.ec-lille.fr/benchmarks/safety_transformer/benchmark-transformer_fichiers/Combinatorial.htm

| Parameters | Cont. opt. | Pro@DESIGN | EE | GA | BB | CSP-BP (CE) |
|------------------------------|------------|------------|-----------------|----------------|--------|-------------|
| a (mm) | 12.92 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| b (mm) | 50.12 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 |
| c (mm) | 16.61 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| d (mm) | 43.26 | 33.5 | 33.5 | 33.5 | 33.5 | 33.5 |
| S_1 (mm ²) | 0.325 | 0.3318 | 0.2827 | 0.2376 | 0.2827 | 0.2463 |
| S_2 (mm ²) | 2.912 | 2.835 | 2.27 | 2.835 | 2.27 | 2.54 |
| n_1 (turns) | 640.77 | 722 | 610 | 614 | 611 | 611 |
| M_{total} (kg) | 2.311 | 2.840 | 2.594 | 2.633 | 2.594 | 2.5946 |
| Time, t (s) | 4 | 38 | $14 \cdot 10^6$ | $3 \cdot 10^3$ | 816 | ≤ 30 |
| T_{copper} (°C) | 108.80 | 103.60 | 109.20 | 106.25 | 109.20 | 109.45 |
| T_{iron} (°C) | 100.00 | 94.19 | 99.58 | 97.13 | 99.58 | 99.78 |
| η (%) | 89.55 | 88.54 | 87.60 | 88.04 | 87.60 | 87.58 |
| $\frac{I_{10}}{I_1}$ (%) | 10.00 | 4.90 | 9.98 | 9.58 | 9.98 | 9.83 |
| $\frac{\Delta V_2}{V_2}$ (%) | 6.91 | 8.20 | 8.20 | 7.86 | 8.20 | 8.22 |
| f_1 (%) | 50.00 | 49.29 | 35.50 | 30.20 | 35.50 | 30.96 |
| f_2 (%) | 50.00 | 47.56 | 32.20 | 37.98 | 32.20 | 36.13 |

5. CONCLUSIONS

Ce papier a présenté les principaux challenges liés à la conception préliminaire et détaillée en génie électrique. Il a permis de montrer qu'une approche de synthèse est conseillée pour les phases préliminaires de la conception et qu'une approche d'analyse peut être adoptée par la suite. Une méthodologie par méthode CSP ensembliste est proposée pour répondre au manque d'outils en conception préliminaire et est appliqué à un exemple benchmark de conception d'un transformateur. Par comparaison avec les résultats disponibles sur ce benchmark, la méthode proposée est non seulement pertinente du point de vue du temps de calcul et du point de vue de la solution optimale trouvée, mais également en terme de facilité de description d'un problème de conception. La méthode de description de la modélisation par contraintes est une description intrinsèquement a-causale (implicite) des équations, qui s'associe assez naturellement avec l'utilisation d'outils symboliques de ré-organisation des équations et de détermination des causalités *computationnelles*. Cela facilite grandement la description du problème de conception et la réutilisabilité des outils pour des problèmes différents. L'étape suivante de ces travaux concernera l'utilisation de cette méthodologie sur des problèmes de conception plus complexes et le développement d'une méthodologie de description de problème de conception encore plus générique.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé en partie par l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (BQR UTBM 2013), la Région Franche-Comté (projet FRANCHIR) et l'Agence Nationale de la Recherche (Projet NEMRO, ANR-14-CE17-0013-01).

A. DESCRIPTION DU MODÈLE SOUS FORME DE CSP

Cette annexe donnent quelques éléments concernant l'expression du problème de conception du transformateur dans le cadre des CSP. Les modèles et spécifications complètes du transformateur peuvent être trouvés sur le site du L2EP ou dans [39].

A.1. Exemple de définition des domaines admissibles

a est une variable de conception qui correspond à une dimension des tôles du transformateur (voir figure 6). Cette variable

est un réel énuméré pris dans un catalogue constructeur :

$$D_a = \{0.002, 0.0024, 0.0033, 0.0045, 0.005, 0.0064, 0.007, 0.008, 0.00875, 0.009, 0.011, 0.0125, 0.013, 0.014, 0.016, 0.0175, 0.018, 0.02, 0.021, 0.0225\}$$

b, c, d, S_1 et S_2 sont également des variables réelles énumérées mais avec des valeurs possibles différentes.

A.2. Exemple de contrainte de modélisation

Dans une formulation CSP, chaque équation de modélisation doit être ré-écrit sous forme de contrainte (de type $=, <, \leq, >, \geq, \neq$) entre deux expressions algébriques. Les équations de modélisation proviennent des lois physiques (équation de compatibilité, d'équilibre et lois constitutives) ou de la définition de variables intermédiaires. Si celles-ci sont exprimables par des équations *explicites*, elles sont avantageusement remplacées par des alias (variables dépendantes définies symboliquement). La plupart des équations de modélisation utilisent un mélange de lois physiques et d'alias. Exemples :

- définition de l'alias r_2 de résistance électrique du secondaire : $r_2 = \rho_{\text{copper}} \cdot (1 + \alpha_{\text{copper}} \cdot T_{\text{copper}}) \cdot n_2 \cdot \frac{l_2}{S_2}$. Les propriétés électriques du cuivre ρ_{copper} et α_{copper} sont des paramètres constants. n_2, l_2 et S_2 sont des alias pour le nombre de spires, la longueur et la section des fils du bobinage secondaire ;
- définition de l'alias B_m de champ magnétique dans le noyau : $B_m = \frac{1}{4} \frac{\sqrt{2} V_1}{n_1 a d \pi f}$ avec f la fréquence du réseau et V_1 sa tension qui sont des grandeurs fixes et n_1, a et d qui sont des variables la conception (DDL).

A.3. Exemple de contraintes d'exigences

Deux types d'exigences peuvent être spécifiées :

- des grandeurs fixées par les conditions de fonctionnement (contraintes d'égalité) peuvent être considérées comme des paramètres fixes du problème d'optimisation : par exemple la tension primaire $V_1 = 230$ V ;
- des contraintes d'inégalité qui spécifient les exigences de fonctionnement minimales. Par exemple, les limites admissibles sur la température des enroulements ($T_{\text{copper}} \leq$

120°C) permet de définir la contrainte suivante :

$$f_{T_{\text{copper}}} = \frac{T_{\text{copper}}}{120} - 1 \leq 0.$$

B. RÉFÉRENCES

- [1] Y. Duan and D. M. Ionel, "A review of recent developments in electrical machine design optimization methods with a permanent-magnet synchronous motor benchmark study," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 49, no. 3, pp. 1268–1275, May/June 2013.
- [2] X. D. Xue, K. W. E. Cheng, T. W. Ng, and N. C. Cheung, "Multi-objective optimization design of in-wheel switched reluctance motors in electric vehicles," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 9, pp. 2980–2987, September 2010.
- [3] A. F. Zobaa, "Optimal multiobjective design of hybrid active power filters considering a distorted environment," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 1, pp. 107–114, January 2014.
- [4] K. C. Kim, J. Lee, H. J. Kim, and D. H. Koo, "Multiobjective optimal design for interior permanent magnet synchronous motor," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 45, no. 3, pp. 1780–1783, March 2009.
- [5] H. S. Choi, D. H. Kim, I. H. Park, and S. Y. Hahn, "A new design technic of magnetic systems using space mapping algorithm," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 37, no. 5, pp. 3627–3630, September 2001.
- [6] S. Vivier, D. Lemoine, and G. Friedrich, "Improvements for multi-objectives optimizations using output space mapping techniques," *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (COMPEL)*, vol. 31, no. 3, pp. 827–841, 2012.
- [7] J. Hey, T. J. Teo, V. P. Bui, G. Yang, and R. Martines-Botas, "Electromagnetic actuator design analysis using a two-stage optimization method with coarse-fine modl output space mapping," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 10, pp. 5453–5464, October 2014.
- [8] H. M. Kim, D. G. Rideout, P. Y. Papalambros, and J. Stein, "Analytical target cascading in automotive vehicle design," *Journal of mechanical design*, vol. 125, no. 3, pp. 481–489, Septembre 2003.
- [9] H. M. Kim, N. F. Michelena, P. Y. Papalambros, and T. Jiang, "Target cascading in optimal system design," *Journal of mechanical design*, vol. 125, no. 3, pp. 474–480, September 2003.
- [10] J. Allison, D. Walsh, and M. Kokkolaras, "Analytical target cascading in aircraft design," in *44th AIAA Aerospace sciences meeting & Exhibit*, Reno, Nevada, USA, Januar, 9-12 2006, pp. 1–9.
- [11] F. Wurtz, "Les enjeux de la conception en phase d'esquisse pour les systèmes du génie électrique : illustration sur le cas des systèmes énergétiques pour les bâtiments," in *Symposium de génie électrique (SGE'14)*, Cachan, France, July 8-10 2014, pp. 1–7.
- [12] L. Zimmer and P. Zablitz, "Global aircraft predesign based on constraint propagation and interval analysis," in *CEAS Conference on Multidisciplinary Aircraft Design and Optimization*, Köln, Germany, 2001.
- [13] E. Fitan, F. Messine, and Nogarède, "The electromagnetic actuator design problem : A general and rational approach," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 40, no. 3, pp. 1579–1590, May 2004.
- [14] S. Brisset, "Démarches et outils pour la conception optimale des machines électriques," Habilitation à diriger des recherches, Université des sciences et techniques de Lille, Lille, France, 18 décembre 2007.
- [15] R. Carlson, F. Wurtz, and H. Voltolini, "Sizing and optimization models : design of a set of two permanent magnet generators," in *XXth Int. Conf. on Electric Machine (ICEM'2012)*, Marseille, France, Sept. 2-5 2012, pp. 1356–1361.
- [16] E. Hansen and G. Walster, *Global optimization using interval analysis*, 2nd ed. New York, USA : Marcel Dekker, 2004.
- [17] R. Moore, *Interval Analysis*. Prentice-Hall, 1966.
- [18] E. Tsang, *Foundations of Constraint Satisfaction*. London and San Diego : Academic Press, 1993.
- [19] D. Waltz, "Generating semantic descriptions from drawings of scenes with shadows," MIT, Cambridge, Massachusetts, Tech. Rep., 1972.
- [20] U. Montanari, "Networks of constraints : fundamental properties and applications to picture processing," *Information Science*, vol. 7, pp. 95–132, 1974.
- [21] J. L. Lauriere, "Un langage et un programme pour résoudre et énoncer des problèmes combinatoires : Alice," Ph.D. dissertation, Paris 6 University, Paris, France, 1976.
- [22] A. Mackworth, "Consistency in networks of relations," *Artificial Intelligence*, vol. 8, no. 1, pp. 99–118, 1977.
- [23] E. Davis, "Constraint propagation with interval labels," *Artificial Intelligence*, vol. 24, no. 3, 1987.
- [24] B. Falting, "Arc consistency for continuous variables," *Artificial Intelligence*, vol. 65, no. 2, 1994.
- [25] O. Lhomme, "Consistency techniques for numeric csp," in *13th International Conference on Artificial Intelligence*, Chambéry, France, 1993, pp. 232–238.
- [26] F. Benhamou and L. Granvilliers, *Handbook of Constraint Programming*. Elsevier, 2006, ch. 16, Continuous and Interval Constraints, pp. 571–604.
- [27] F. Messine, B. Nogarède, and J.-L. Lagouanelle, "Optimal design of electromechanical actuators : A new method based on global optimization," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 34, no. 1, pp. 299–308, January 1998.
- [28] I. Mazhoud, K. Hadj-Hamou, J. Bigeon, and G. Remy, "The electromagnetic actuator design problem : An adapted interval global optimization algorithm," *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 48, no. 2, pp. 387–390, February 2012.
- [29] —, "Interval-based global optimization in engineering using model reformulation and constraint propagation," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, pp. 404–417, 2012.
- [30] Y. Meyer and P. A. Yvars, "Optimization of a passive structure for active vibration isolation : an interval-computation- and constraint-propagation-based approach," *Engineering Optimization*, pp. 1–27, 2012.
- [31] N. Tchertchian, P. A. Yvars, and D. Millet, "Benefits and limits of a constraint satisfaction problem/life cycle assessment approach for the eco-design of complex systems : a case applied to a hybrid passenger ferry," *Journal of Cleaner Production*, 2012.
- [32] P. A. Yvars, "A csp approach for the network of product lifecycle constraints consistency in a collaborative design context," *Engineering Application of Artificial Intelligence (EAoAI)*, vol. 22, no. 6, September 2009.
- [33] H. Trabelsi, P.-A. Yvars, J. ALouati, and M. Haddar, "Application of the csp approach and the interval computation for the optimal sizing of a compression spring," in *Design and Modeling of Mechanical Systems*, M. e. a. Haddar, Ed. Springer-Verlag, 2013, pp. 613–625.
- [34] T. V. Tran, S. Brisset, and P. Brochet, "Combinatorial and multi-level optimization of a safety isolating transformer," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics (IJAEM)*, vol. 3, no. 26, pp. –, 2007.
- [35] H. Nguyen-Huu, F. Retière, F. Wurtz, X. Roboam, B. Sareni, and D. Aléjo, "Optimal sizing of an embedded electrical system with an approach for limiting the search space," *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (COMPEL)*, vol. 28, no. 5, pp. 1141–1154, 2009.
- [36] I. A. Eleftherios, P. S. Georilakis, M. A. Tsili, and A. G. Kladas, "Global transformer method using evolutionary design and numerical field computation," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 45, no. 3, pp. 1720–1723, March 2009.
- [37] I. A. Eleftherios, M. A. Tsili, D. G. Pappas, and A. G. Kladas, "Global transformer design optimization using deterministic and nondeterministic algorithms," *IEEE Trans. on Industry applications*, vol. 50, no. 1, pp. 383–394, January/February 2014.
- [38] V. Debusschere, H. Ben Ahmed, and B. Multon, "Eco-design of electromagnetic energy converters : The case of the electric transformer," in *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC'2007)*, Antalya, Turkey, May, 3-5 2007, pp. 1599–1604.
- [39] T. V. Tran, "Problèmes combinatoires et modèles multi-niveaux pour la conception optimale des machines électriques," Ph.D. dissertation, École Centrale de Lille, June 2009.
- [40] R. Ben Ayed and S. Brisset, "Multidisciplinary optimization formulations benefits on space mapping techniques," *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (COMPEL)*, vol. 31, no. 3, pp. 945–957, 2012.
- [41] L. Zimmer, *Guide du langage de modélisation de CE V4.2*, Dassault Aviation, Saint-Cloud, France.
- [42] S. Brisset, F. Gillon, and P. Brochet, *Integrated Design by Optimization of Electrical Energy Systems*. Wiley-ISTE, 2012, ch. Multi-Level Design Approaches for Electro-Mechanical Systems Optimization, pp. 155–192.