



HAL
open science

Contribution à l'amélioration de la conception préliminaire d'un produit : Approche basée sur l'implémentation des techniques d'optimisation

Brahim Mahiddini

► **To cite this version:**

Brahim Mahiddini. Contribution à l'amélioration de la conception préliminaire d'un produit : Approche basée sur l'implémentation des techniques d'optimisation. Autre [cond-mat.other]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM; École Militaire Polytechnique (Alger), 2019. Français. NNT : 2019ENAM0069 . tel-02733232

HAL Id: tel-02733232

<https://pastel.hal.science/tel-02733232v1>

Submitted on 2 Jun 2020

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.

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'ingénieur

Doctorat

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Génie Industriel "

présentée et soutenue publiquement par

Brahim MAHIDDINI

16 Décembre 2019

**Contribution à l'amélioration de la conception préliminaire d'un produit :
Approche basée sur l'implémentation des techniques d'optimisation**

Directeurs de thèse : **Taha CHETTIBI & Améziane AOUSSAT**

Co-encadrement de la thèse : **Khaled BENFRIHA**

Jury

M. Saïd RECHAK , Professeur, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger	Président
M. Abdelkader HOCINE , Professeur, Université Hassiba Benbouali de Chlef	Rapporteur
M. Salah AGUIB , Maître de Conférences 'HDR', Université M'Hamed Bougara de Boumerdès	Rapporteur
M. Farid BAKIR , Professeur des Universités, LMF, Arts et Métiers ParisTech	Examineur
M. Nasreddine ZEROUDI , Maître de Conférences 'HDR', Ecole Militaire Polytechnique d'Alger	Examineur
M. Taha CHETTIBI , Professeur, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger	Examineur
M. Améziane AOUSSAT , Professeur des Universités, LCPI, Arts et Métiers ParisTech	Examineur
M. Khaled BENFRIHA , Maître de Conférences, LCPI, Arts et Métiers ParisTech	Examineur

**T
H
È
S
E**

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier professeur Ablelkader HOCINE, de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, et M. Salah AGUIB, maître de conférences 'A' à l'Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse ainsi que pour la qualité et la quantité des remarques qu'ils ont apportés à notre travail.

J'adresse mes remerciements également au professeur Saïd RECHAK, de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, président du jury, ainsi que le professeur Farid BAKIR de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech, et M. Nasreddine ZEROUDI maître de conférences 'A' à l'Ecole Militaire Polytechnique, pour avoir accepté de juger et examiner notre travail.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes directeurs de thèse. Le professeur Taha CHETTIBI, de l'Ecole Militaire Polytechnique, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Le professeur Améziane AOUSSAT de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech pour son rôle et ses conseils et de m'avoir accueilli au sein du Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI) en tant que directeur du laboratoire.

Je remercie également mon Co-encadrant Khaled BENFRIHA, maître de conférences à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech, pour son esprit critique et ouvert, ses conseils, son aide et contribution pendant et après les séjours que j'ai passés au sein du LCPI.

Je tiens ensuite à remercier les personnes qui ont contribué à cette thèse : le chef et tout le personnel de l'UER-CFM pour leurs contributions dans la réussite des travaux de thèse. Le chef et les membres du Laboratoire des Techniques Avancées de Fabrication et Contrôle, Nasreddine, Yasser, Karim et Sif Eddine pour leurs patiences.

Merci également à tous mes collègues et amis du laboratoire Système Mécanique, Yacine, Cherif, Oussama, Oussama et Abdelkader. Mes remerciements pour les anciens collègues de travail.

Je remercie toute l'équipe du laboratoire LCPI, les permanents et les doctorants pour le soutien et l'aide durant mes séjours, sans oublié la contribution des personnels de secrétariat du laboratoire.

Je remercie ma petite famille : ma femme Hasna et ma fille Ansam pour leur compréhension et leur soutien moral pendant mes déplacements à l'étranger et la disponibilité dans les situations critiques. Je remercie aussi ma grande famille, ma mère, mes frères et mes sœurs pour la compréhension.

Sommaire

Remerciements	1
Sommaire	3
Introduction	7
Objectif et problématique de recherche.....	7
Originalité et apports	9
Structure du document	9
Chapitre 1 : Contexte, verrous et positionnement scientifiques.....	9
Chapitre 2 : Etat de l'art : Ingénierie de la conception.....	10
Chapitre 3 : Etat de l'art : Optimisation en conception.....	10
Chapitre 4 : Problématique et hypothèses de modélisation.....	10
Chapitre 5 : Approche proposée.....	10
Chapitre 6 : Validation de l'approche proposée.....	11
Conclusion générale et perspectives.....	11
1. Contexte, positionnement et enjeux	12
1.1 Contexte	12
1.1.1 Génie mécanique	12
1.1.2 Génie industriel	12
1.1.3 Science de la conception	13
1.2 Enjeux de la conception préliminaire.....	14
1.3 Optimisation : un enjeu de compétitive.....	15
1.4 Utilisation de l'optimisation en pratique.....	16
1.5 Amélioration de la conception préliminaire.....	17
1.6 Positionnement scientifique	18
1.6.1 Le laboratoire LTAFC/EMP	19
1.6.2 Le laboratoire LCPI/ENSAM.....	19
1.7 Enjeux de cette recherche.....	20
1.7.1 Enjeux économiques	20
1.7.2 Enjeux scientifiques	22
1.8 Conclusion.....	22
2. Etat de l'art : Ingénierie de conception	25

2.1	Introduction	25
2.2	Activité de conception de produit	26
2.3	Typologies de la conception.....	26
2.3.1	Conception routinière.....	26
2.3.2	Conception innovante.....	27
2.3.3	Conception créative.....	27
2.4	Processus de conception.....	27
2.5	Les méthodes associées à la phase de conception préliminaire	30
2.5.1	Méthodes qualitatives.....	31
2.5.1.1	L'Analyse Fonctionnelle (AF)	31
2.5.1.2	La méthode TRIZ	32
2.5.1.3	La méthode AMDEC	33
2.5.1.4	La méthode QFD.....	34
2.5.1.5	Design for X.....	36
2.5.2	Méthodes quantitatives.....	37
2.5.2.1	Simulation numérique	37
2.5.2.2	Optimisation.....	37
2.6	Pratique et difficultés de la conception préliminaire.....	38
2.6.1	Les itérations	38
2.6.2	Les décisions	39
2.6.3	Incertitude.....	40
2.6.4	Connaissances	41
2.7	Le produit	42
2.7.1	Performances de produit.....	43
2.8	Cycle de vie d'un produit	44
2.9	Modèles de produit.....	45
2.9.1	Les modèles descriptifs	45
2.9.1.1	Le modèle Caractéristiques - Propriétés.....	45
2.9.1.2	Le modèle Fonction-Comportement-Structure	47
2.9.2	Les modèles prédictifs.....	48
2.9.2.1	Le modèle analytique	50
2.9.2.2	Le modèle numérique.....	51
2.9.2.3	La construction des modèles de substitution.....	52
2.9.3	La technique de Space Mapping	57

2.10	Conclusion.....	59
3.	Etat de l'art : Optimisation en Conception.....	61
3.1	Introduction	61
3.2	Optimisation en conception.....	61
3.3	Formalisation de problème d'optimisation en conception	63
3.4	Classification des problèmes d'optimisation.....	64
3.5	Les méthodes d'optimisation monoobjectif	66
3.5.1	Méthodes déterministes.....	67
3.5.1.1	Méthodes à descente de gradient.....	68
3.5.1.2	Méthodes de Newton.....	69
3.5.2	Les méthodes stochastiques (méta-heuristiques)	70
3.5.2.1	Les méta-heuristiques à solution unique	70
3.5.2.2	Les méta-heuristiques à base de population	71
3.6	L'optimisation multi-objectif	76
3.6.1	Dominance de Pareto et optimalité	77
3.6.2	Classification des méthodes d'optimisation multi-objectif.....	77
3.6.2.1	Méthodes agrégées	78
3.6.2.2	Méthodes basées sur l'équilibre de Pareto	79
3.6.3	Traitement des contraintes	81
3.7	L'optimisation en conception multidisciplinaire.....	82
3.7.1	Formulation mathématique d'un problème OMD.....	83
3.7.2	Satisfaction de couplage multidisciplinaire.....	86
3.7.2.1	Approches couplées (Coupled approaches)	86
3.7.2.2	Approches découplées (Decoupled approaches).....	87
3.7.3	Formulation d'un problème OMD	87
3.7.3.1	MDF (Multidisciplinary Feasible)	89
3.8	Conclusion.....	90
4.	Problématique et hypothèses.....	91
4.1	Introduction	91
4.2	Définition de la problématique.....	91
4.3	Proposition d'une approche et des hypothèses.....	93
4.4	Hypothèses de modélisation.....	95
4.4.1	Hypothèse 1.....	95

4.4.2	Hypothèse 2.....	95
5.	Approche proposée.....	97
5.1	Introduction.....	97
5.2	Approche de conception et d'optimisation proposée.....	98
5.2.1	Rôle et responsabilité des acteurs de conception.....	99
5.2.2	Premier niveau : conception et optimisation basées sur le modèle analytique	100
5.2.3	Etape intermédiaire : génération et validation des modèles numériques.....	105
5.2.4	Deuxième niveau : conception et optimisation basées sur le modèle numérique	109
5.3	Conclusion.....	114
6.	Validation de l'approche proposée.....	115
6.1	Introduction.....	115
6.2	Définition du cahier des charges fonctionnel.....	116
6.3	Description générale du problème de conception.....	117
6.4	Cas test 1.....	118
6.5	Cas test 2.....	131
6.5.1	Premier niveau de conception et d'optimisation.....	131
6.5.2	Etape intermédiaire.....	134
6.5.3	Deuxième niveau de conception et d'optimisation.....	137
6.6	Conclusion.....	141
	Conclusion générale et perspectives.....	143
	Apports de recherche.....	143
	Perspectives.....	144
	Perspectives de développement.....	144
	Perspectives de recherche.....	145
	Production scientifique.....	147
	Conférences internationales.....	147
	Revue scientifique internationale.....	147
	Annexes.....	148
	Bibliographie.....	155
	Liste des figures.....	169

Liste des tableaux	175
Liste des abréviations et des acronymes.....	175

Introduction générale

Introduction

Objectif et problématique de recherche

La conception de produit est une activité pivotale pour les entreprises afin de rester compétitives et survivre dans un marché concurrentiel et dynamique. Aujourd'hui, devant de nombreuses contraintes telles que : les exigences croissantes des clients, la réduction du cycle de développement et l'intégration de nouvelles technologies, les produits et leurs processus de conception sont devenus plus complexes. Dans ce contexte, les académiciens et les praticiens se sont intéressés au développement de modèles, méthodologies, outils et techniques afin de supporter le processus de conception et améliorer la qualité des produits.

Cette complexité peut être expliquée par l'incertitude dans la réalisation des objectifs de conception et des performances désirées du produit définies par le Cahier des Charges Fonctionnel CdCF (Suh, 2001). Du point de vue du client, une mauvaise réalisation de performances est considérée comme une source d'insatisfaction. Du point de vue du fabricant, une mauvaise réalisation de performances engendre des surcoûts, des réclamations de client qui sont suivies en général par un retour du produit (particulièrement dans la phase de garantie), ainsi on a une réduction des revenus due à la perte de clients (Osteras et al., 2006).

Les recherches actuelles montrent que les premières phases de conception sont cruciales et déterminantes pour sélectionner une solution idéale du produit qui respecte les exigences du CdCF. Ces phases concernent la sélection du concept et la conception architecturale, elles sont généralement regroupées dans une phase nommée *la conception préliminaire* du produit (Cavaillès, 1995; Scaravetti, 2004). Durant cette phase, les concepteurs doivent effectuer un choix de solution pour le produit en question parmi plusieurs alternatives potentielles et doivent pouvoir les justifier de manière rigoureuse. En effet, ils doivent aboutir à une solution de conception qui décrit les caractéristiques du produit, telles que les dimensions géométriques, les matériaux, le choix de ses composants, avant de passer à la phase de conception détaillée.

Cependant, durant la phase de conception préliminaire, les concepteurs ne disposent pas de méthodes et d'outils suffisants pour les assister à effectuer des choix raisonnés et justifiés menant à des produits de qualité. En effet, ces choix s'effectuent souvent en se basant sur le savoir-faire des concepteurs, leur capacité à établir des modèles simplifiés (analytiques) du produit, voir même l'exploitation des outils informatiques de conception CAD (Computer-

Aided Design) et de simulation CAE (Computer-Aided Engineering). Actuellement, dans la pratique du processus de conception, les outils CAD-CAE sont principalement exploités durant des phases plus avancées telles que : la phase de conception détaillée, la phase d'industrialisation où pratiquement la définition du produit est plus complète.

Aussi, durant la phase de conception préliminaire, des questions se posent concernant les décisions prises par les concepteurs qui peuvent déterminer jusqu'à 70% du coût du cycle de vie du produit: doivent-ils être contraints de sorte que les décisions prises doivent vérifier les exigences du problème de conception, ou doivent-ils être moins contraints afin d'être plus créatifs (Matthews et al., 2002).

Aujourd'hui, les méthodes utilisées par les concepteurs dans le processus de conception, particulièrement durant les premières phases, sont devenues insuffisantes pour faire face aux défis du futur (ElMaraghy et al., 2012). En effet, les outils d'analyse conventionnels ne sont pas vraiment adaptés dans certains cas de conception, lorsque les paramètres de conception sont interdépendants ou la solution est incomplète (Sawada, 2001). Les concepteurs recourent souvent à une démarche classique de conception du type « essai-simulation-erreur » pour déterminer les paramètres de conception et les caractéristiques du produit. De plus, la démarche utilisée pour déterminer l'architecture organique du produit se fait de manière séquentielle et itérative, qui oblige de fixer certaines valeurs de paramètres afin de pouvoir en déterminer les autres. Dans ces situations, les décisions prises par les concepteurs aboutissent généralement à une solution de conception sous-optimale (Scaravetti, 2004). L'avènement de l'informatique a révolutionné la conception et a permis d'introduire de nouvelles approches et techniques qui peuvent assister les concepteurs dans la recherche d'une solution optimale, notamment pour la conception des produits complexes (grand nombre de paramètres de conceptions et d'objectifs). Ces techniques peuvent être distinguées en trois grandes catégories (Lavaud, 2007) :

- Les techniques d'optimisation pour la recherche du jeu de paramètres qui satisfait au mieux les nombreuses contraintes et prestations du cahier des charges,
- Les techniques d'évaluation de la robustesse pour estimer la qualité d'une solution,
- Les techniques de modélisation statistique (plans d'expériences et surfaces de réponses) pour extraire l'information juste nécessaire d'une fonction inconnue et compliquée.

Les travaux de la présente thèse portent sur l'amélioration de la conception préliminaire d'un

produit par l'implémentation des techniques mathématiques d'optimisation et l'utilisation précoce des outils informatiques de simulation et calcul (CAD-CAE). Cela afin de combler les insuffisances constatées dans les autres méthodes classiques de conception et de fournir une aide à la décision pour les concepteurs lors du choix d'une solution de conception performante, en répandant d'une façon optimale aux objectifs et aux contraintes du CdCF. En général, ces travaux de recherche ont pour but d'outiller l'équipe de conception durant la phase de conception préliminaire par une approche afin de trouver une solution optimale de conception, tout en réduisant la sollicitation intensive d'experts et les itérations de conception dues à la démarche essai-erreur.

Originalité et apports

L'apport principal de cette thèse est l'introduction d'une approche méthodologique pour la conception préliminaire de produit à travers l'implémentation judicieuse des techniques mathématiques d'optimisation et des modèles prédictifs des performances du produit. Cette approche consiste à diviser les activités de conception et d'optimisation de cette phase en deux niveaux :

- Le premier niveau repose sur l'utilisation de modèles analytiques pour évaluer les performances du produit. Il permet aux concepteurs d'explorer l'espace de conception dans un temps raisonnable et d'aboutir à des solutions de conception acceptables.
- Le deuxième niveau repose sur l'utilisation d'un modèle numérique fin, à travers un modèle de substitution ou métamodèle. Il permet de raffiner la conception du premier niveau, tout en améliorant les performances du produit.

L'objectif est donc de tirer profit des modèles potentiels du produit (analytiques et numériques) afin de trouver une solution de conception optimale, à l'aide de techniques d'optimisation appropriées, dans un temps de calcul réduit, sans faire appel aux experts d'une façon excessive.

Structure du document

Ce manuscrit de thèse s'articule autour de six chapitres s'ajoutant à la présente introduction.

Chapitre 1 : Contexte, verrous et positionnement scientifiques

Ce chapitre est consacré à la présentation du positionnement de ce travail de thèse vis-à-vis des communautés scientifiques du génie mécanique et du génie industriel, ainsi que dans les

sciences de la conception. On s'intéressera à la clarification des enjeux de la phase de conception préliminaire et l'intérêt d'utilisation des techniques mathématiques d'optimisation dans cette phase.

Dans ce contexte nous identifierons ainsi les verrous scientifiques de nos travaux ainsi que leur positionnement dans les domaines d'expertise de deux laboratoires qui ont participé à la réalisation de cette thèse.

Chapitre 2 : Etat de l'art : Ingénierie de la conception

Dans ce chapitre, nous présenterons un état de l'art sur le produit et l'activité de conception associée, en clarifiant certains aspects et notions de base. Ainsi, à travers cet état de l'art, nous identifierons après observation des pratiques de conception un certain nombre de difficultés rencontrées pendant la conception et plus particulièrement la conception préliminaire. Ces difficultés nous ont permis de repositionner nos travaux de recherche et de contribuer à l'amélioration de la conception préliminaire d'un produit.

À l'issue de cet état de l'art, nous nous concentrerons plus particulièrement sur l'étude des méthodes de conception et des modèles descriptifs et prédictifs du produit. Cette étude nous permettra de séparer les activités de conception et d'optimisation en deux niveaux.

Chapitre 3 : Etat de l'art : Optimisation en conception

Ce chapitre est consacré à un état de l'art sur les méthodes et les problèmes d'optimisation les plus rencontrés en ingénierie de conception des produits. Nous aborderons quelques définitions et de brèves présentations des méthodes déterministes et stochastiques. Ainsi, nous présenterons les problèmes d'optimisation multi-objectifs et multidisciplinaires, les méthodes et les approches utilisées pour leur résolution.

Chapitre 4 : Problématique et hypothèses de modélisation

Dans ce chapitre, nous établirons la problématique de ce travail de thèse : « **Comment les techniques mathématiques d'optimisation peuvent-elles servir à améliorer la conception préliminaire d'un produit ?** ». Une approche de conception est donc proposée et deux hypothèses sont formulées, ce qui conduira à la mise en œuvre des expérimentations dont l'objectif est d'en valider et préciser les limites de l'approche proposée.

Chapitre 5 : Approche proposée

Dans ce chapitre, nous présenterons l'approche de conception et d'optimisation interactive proposée.

Chapitre 6 : Validation de l'approche proposée

Dans ce chapitre, nous présenterons les deux cas test réalisés sur un produit mécanique (réducteur de vitesse) afin de valider les deux niveaux de conception et d'optimisation et l'étape intermédiaire de l'approche proposée.

Conclusion générale et perspectives

Dans ce dernier chapitre, nous présenterons les apports de ce travail de thèse, autrement dit nous dresserons la synthèse des résultats scientifiques de ce travail. Les perspectives de ce travail seront également dégagées.

Chapitre 1: Contexte, positionnement et enjeux

1. Contexte, positionnement et enjeux

L'objectif de ce chapitre est de positionner nos travaux de recherche par rapport à la communauté scientifique du génie industriel en général, plus particulièrement de l'ingénierie de conception et par rapport aux axes de recherche de deux laboratoires qui encadrent cette thèse (LTAFC et LCPI) et des laboratoires nationaux et internationaux. Nous nous concentrerons sur l'identification des verrous scientifiques de notre travail tout au long de ce chapitre.

1.1 Contexte

1.1.1 Génie mécanique

La mécanique constitue une discipline de base du domaine des sciences physiques et couvre plusieurs aspects scientifiques, technologiques et industriels qui concernent de près ou de loin les systèmes mécaniques. En effet, on peut mettre la mécanique fondamentale comme un noyau central autour duquel des aspects théoriques (mécanique analytique, mécanique numérique) et expérimentaux sont regroupés. En outre, ce noyau est entouré par deux grands domaines, à savoir la mécanique des solides et la mécanique des fluides, qui réunissent de nombreux champs du savoir : matériaux, structures, mécanismes, acoustique, thermique, écoulements (Devalan, 2009).

Ce travail de thèse relève du génie mécanique dans la mesure où nous nous intéresserons à la conception des systèmes mécaniques tout en améliorant leurs performances mécaniques.

1.1.2 Génie industriel

La définition communément admise du «génie industriel» (Industrial Engineering) est proposée par l'Institute of Industrial Engineers (IIE) comme étant *«la conception, l'amélioration et l'installation de systèmes intégrés mettant en jeu des hommes, des matériaux, des équipements et de l'énergie. Il s'appuie tant sur les connaissances spécialisées et les aptitudes dans le domaine des mathématiques, de la physique et des sciences sociales que sur les principes et méthodes des sciences de l'ingénieur, ceci pour spécifier, prédire et évaluer les résultats de ce type de système.»*

Cette définition montre la pluridisciplinarité de ce domaine et le considère comme le carrefour

des sciences humaines, économiques et sociales et les sciences exactes et naturelles. Sa préoccupation est de les implémenter dans les systèmes afin d'en extraire des améliorations. Le génie industriel s'intéresse ainsi à trois disciplines : conception de système ; amélioration de système ; installation de système (Lahonde, 2010).

Ce travail de thèse touche le domaine du génie industriel dans la mesure où nous nous intéresserons au champ de la conception. Plus précisément, nous visons l'amélioration de la conception préliminaire d'un produit.

1.1.3 Science de la conception

La conception est une activité cognitive par laquelle une solution à un problème peut être établie (Ullman, 2010). Depuis longtemps, on tente de solutionner des problèmes par la conception sans même connaître ou penser que cela puisse être une science, comme un comportement naturel (Audoux, 2019). Cette activité n'a été jamais considérée comme une science qu'après les années 1960. Selon l'axe chronologique, son évolution connaissait deux étapes majeures (Cross, 2001):

- Dans les années 1920, l'arrivée d'artistes voulant réaliser des produits plus scientifiques.
- Dans les années 1960, l'émergence de ce qu'on connaît aujourd'hui le processus de conception.

Cette évolution est marquée par l'apparition de différents processus de conception. Selon Tomiyama *et al.* (Tomiyama *et al.*, 2009), ces processus sont intégrés dans les programmes académiques et enseignés. L'éducation des sciences de conception contribue à leur popularisation, mais aussi à leur acceptation en tant qu'une science. En ce qui concerne les sciences de conception, la conception est définie par plusieurs chercheurs comme étant un recueil de connaissances théoriques et empiriques autour du processus de conception (Le Moigne and Simon, 1991).

L'ingénierie de la conception est considérée comme une branche du génie industriel. Les auteurs Hubka et Eder (Hubka and Eder, 1996) donnent les contours et proposent un découpage de l'ingénierie de conception, en quatre thématiques :

- La théorie des systèmes techniques ;
- La théorie de la conception et la théorie du processus de conception ;
- La connaissance appliquée issue des sciences humaines et sociales ;
- Les méthodologies de conception.

L'objectif de la présente thèse est d'apporter une approche de conception et d'optimisation pour l'amélioration de la conception préliminaire d'un produit. En ce sens, notre travail de thèse se positionne à l'intersection des méthodologies de conception (approche de conception) et des méthodes de conception (méthodes d'optimisation, les outils de simulation et de calcul) comme l'indique le point noir sur la Figure 1.1. Ce positionnement est justifié par les apports attendus par ce travail et le positionnement des laboratoires encadrant cette thèse.

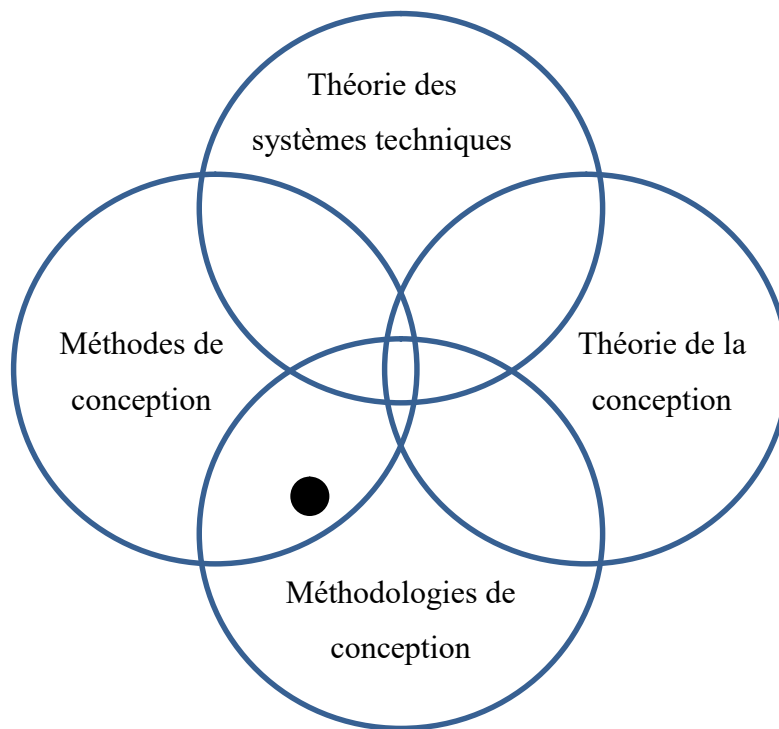


Figure 1.1: Position de la thèse dans les sciences de la conception

1.2 Enjeux de la conception préliminaire

Dans le processus de conception d'un produit, la phase regroupant les étapes de recherche de concepts et de conception architecturale est dite *conception préliminaire* (Figure 1.2). Durant cette phase, un choix d'un principe de solution ou d'un concept de principe (Yannou, 2001) est effectué suivant les exigences du CdCF, suivi par la détermination des choix structuraux et technologiques (composants, matériaux, pré-dimensionnement du produit) de ce concept. A ce stade, les concepteurs manipulent des données et des connaissances hétérogènes provenant de différentes disciplines, de domaines divers dont les relations sont souvent imprécises ou connues de façon partielle (Travé-Massuyès et al., 1997).

Dans la plupart des cas, ces connaissances sont incomplètes ou mal définies et les contraintes liées à la conception optimale du produit sont encore mal déterminées ; ce qui rend le

processus de décision difficile et complexe, comportant des risques qui peuvent impacter les phases de conception subséquentes.

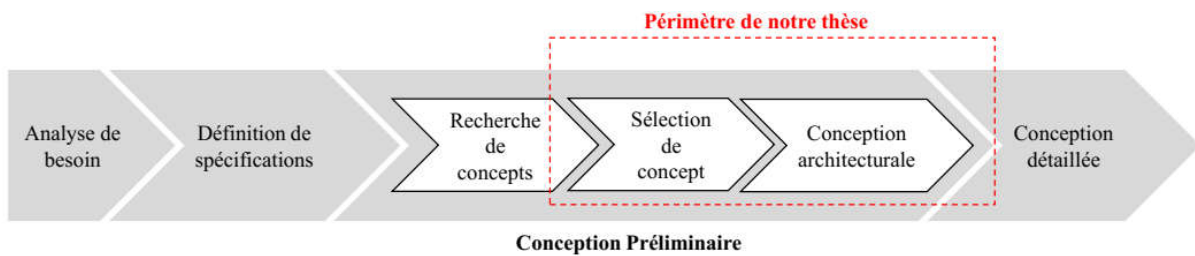


Figure 1.2 : Les phases du processus de conception

Donc, la phase de conception est une phase cruciale du processus de conception durant laquelle la prise de décision impacte évidemment le coût d'un projet industriel. La Figure 1.3 issue des travaux de Berliner et Brimson (Berliner et Brimson, 1988) illustre que la phase de conception préliminaire représente moins de 5% des dépenses de développement, alors qu'elle conditionne à hauteur de 80 % les coûts du cycle de vie.

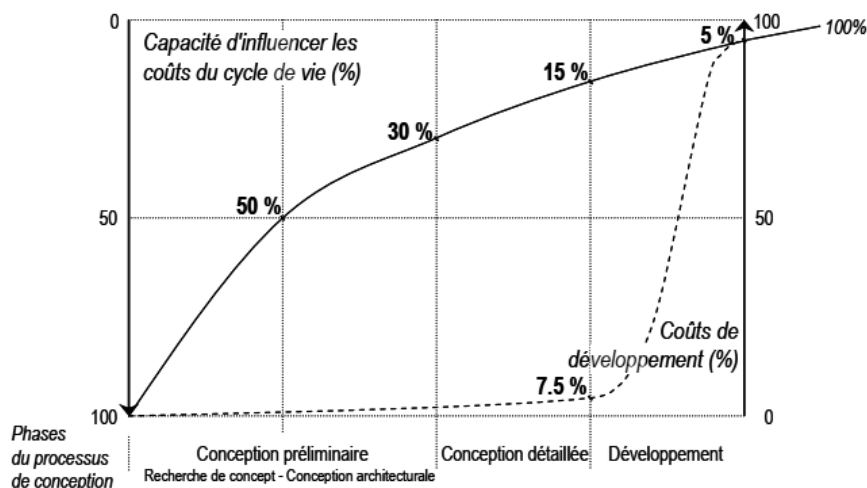


Figure 1.3 : Influence stratégique de la conception préliminaire sur les coûts de développement d'un produit (Zimmer and Zablit, 2001)

1.3 Optimisation : un enjeu de compétitive

Durant la conception, la tâche d'optimisation s'effectue généralement par le biais d'un processus itératif à travers lequel le concepteur compare plusieurs solutions alternatives de conception, en se basant sur un certain nombre de critères afin de choisir la meilleure solution (Roy et al., 2008). La Figure 1.4 présente les différentes approches d'optimisation existantes en ingénierie de conception.

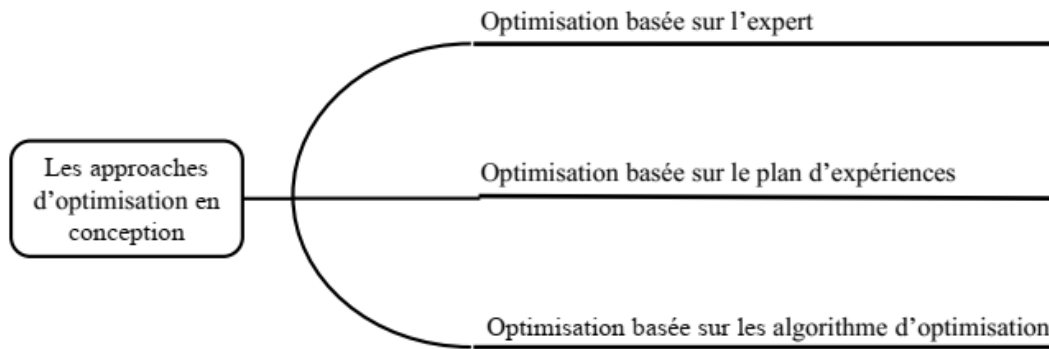


Figure 1.4 : Différentes approches d'optimisation en conception (Roy et al., 2008)

- **Optimisation basée sur l'expert** : en utilisant le jugement de l'expert qui se base sur ses connaissances ou les résultats de simulation obtenus par des outils CAD - CAE. Le principal avantage de cette approche réside dans le fait que les concepteurs ne requièrent aucune compétence supplémentaire, la procédure prend moins de temps pour aboutir à une solution optimale en apportant une amélioration progressive. Les principaux problèmes sont liés à l'interdépendance d'experts pour évaluer les alternatives de conceptions et trouver une meilleure solution.
- **Optimisation basée sur les plans d'expériences** : c'est une méthode structurée et organisée qui permet de déterminer les relations entre les facteurs affectant les performances de produit.
- **Optimisation basée sur les algorithmes d'optimisation** : ils sont devenus matures et populaires et permettent d'automatiser le processus de recherche des solutions optimales. En effet, ils sont capables d'explorer efficacement l'espace de conception en présence de multiples contraintes. Maintenant, on peut dire qu'ils sont bien adaptés par rapport aux deux approches présentées auparavant car dans les cas réels, les problèmes d'optimisation en conception sont souvent non linéaires, contraints, multi-objectifs et souvent multidisciplinaires. Ces algorithmes d'optimisation sont considérés comme un moyen de compétitivité pour les entreprises, non seulement pour réduire le temps de développement et améliorer la qualité du produit à concevoir mais aussi pour mettre l'accent sur la conservation des ressources naturelles et la réduction de la consommation d'énergie (Vanderplaats, 2002).

1.4 Utilisation de l'optimisation en pratique

Un sondage effectué par Tiwari et al. (Tiwari et al., 2015) sur l'utilisation de l'optimisation dans le secteur industriel, pour lequel, 51 documents ont été analysés pour neuf entreprises

dans différents domaines industriels au Royaume-Uni. Ce sondage a montré que 60% des entreprises utilisent l'optimisation depuis plus de 10 ans (Figure 1.5a). Cependant, 40% n'utilisent l'optimisation que dans moins de 50% dans leurs départements. En outre, 17% des entreprises utilisent l'optimisation en conception au niveau composant (Figure 1.5b), 33% au niveau composant et sous-système et 50% au niveau produit, sous-système et composant. Ce sondage relève qu'il y a des limitations entravant cette utilisation. Certaines d'entre elles sont : le recours souvent au processus manuel (itératif), le manque de formation et de support d'utilisation, ainsi d'autres problèmes qui sont liés à la culture des entreprises, à la certification et au processus de conception lui-même.

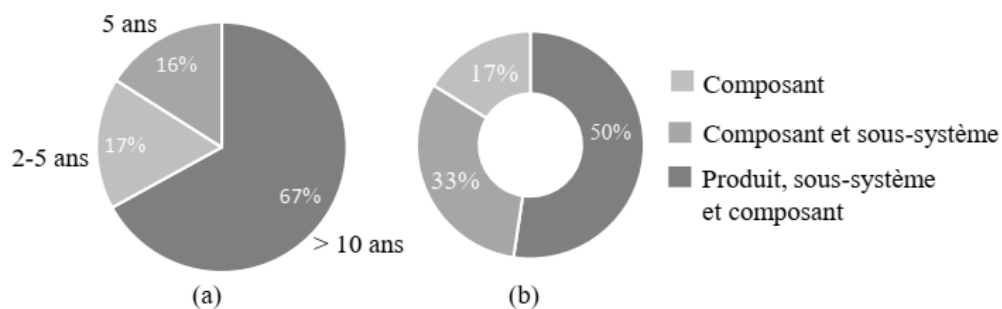


Figure 1.5 : situation de l'optimisation dans l'industrie : (a) Expérience d'utilisation, (b) : différents niveaux d'utilisation (Tiwari et al., 2015)

1.5 Amélioration de la conception préliminaire

La littérature indique que la phase de conception préliminaire est un facteur clé de la réussite et du succès de l'entreprise. De nombreux auteurs ont contribué à l'amélioration de cette phase. Dans ce qui suit, nous présentons quelques travaux sur lesquels nous sommes basés pour mener à bien nos travaux de recherche.

Scaravetti (Scaravetti, 2004) a par exemple proposé dans sa thèse un système d'aide à la décision en conception préliminaire. Ce système permet de parvenir à une architecture du produit validée et pré-dimensionnée à partir de plusieurs concepts de solution pertinents, avec objectivation des choix de conception pour chaque étape de prise de décision. La démarche de sélection d'une architecture de solution est constituée de trois principales étapes qui sont :

- La formulation du problème de conception préliminaire sous forme d'un Problème par Satisfaction de Contraintes (PSC),
- La recherche exhaustive des architectures candidates,
- La réduction de l'espace des solutions pour aider à la prise de décision.

Doufene (Doufene, 2013) a proposé une approche de conception qui se repose sur un cadre d'architecture de systèmes complexes, combiné avec des modèles d'optimisation multi-objectifs et d'équilibre (théorie des jeux). Il a montré l'importance d'utilisation du cadre d'architecture pour organiser et structurer tous les points de vue (organisationnelle, fonctionnelle et architecturale) permettant l'étude et la conception d'un système industriel complexe. De même, l'importance de prendre en considération l'ensemble du cycle de vie du système et son environnement dans la modélisation des problèmes d'optimisation.

Par ailleurs, dans ses travaux sur la conception des produits complexes particulièrement en phase de conception conceptuelle, Safari (Safavi, 2016), a développé une méthodologie nommée CMDO (Collaborative Multidisciplinary Design Optimisation) dans laquelle il a défini un ensemble de rôles et de tâches pour différents acteurs permettant la collaboration efficace entre eux durant la conception. Cette méthodologie fait appel à l'implémentation des métamodèles à haute-fidélité et l'optimisation multidisciplinaire. L'idée défendue dans ses travaux est l'intégration des connaissances des experts métiers dans la phase de conception conceptuelle.

Ríos-Zapata (Zapata, 2018) a proposé une méthodologie de conception interactive en conception préliminaire qui permet d'obtenir un compromis entre la désirabilité des objectifs de conception. Le processus de compromis a pour objectif de traiter les problèmes de conception convexes et non convexes, dans un environnement de conception multidisciplinaire. Ce processus de compromis est basé sur deux concepts :

- L'élaboration d'un modèle de traçabilité, qui permet de gérer les informations à partir des exigences d'entrée (domaine des variables linguistiques) jusqu'à la définition des variables de conception (dans le domaine des nombres réels).
- Un cadre d'amélioration de la conception, fondé sur la définition des fonctions de désirabilité des objectifs de conception ; la propagation de ces fonctions jusqu'à ce que les variables de conception permettent de calculer les combinaisons des valeurs qui maximisent l'index global de désirabilité de la solution.

1.6 Positionnement scientifique

Dans cette section, on présente les laboratoires qui encadrent ce travail de thèse à savoir le LTAFC et le LCPI. Après cela, on présentera les autres structures scientifiques travaillant sur la même problématique et relevant du génie industriel.

1.6.1 Le laboratoire LTAFC/EMP

Ces travaux de thèse sont réalisés au sein du Laboratoire des Techniques Avancées de Fabrication et Contrôle (LTAFC). Ce laboratoire est une entité de recherche et de développement de l'Ecole Militaire Polytechnique. Les activités du laboratoire s'orientent principalement vers le développement et la maîtrise des nouvelles techniques avancées de fabrication afin de mieux couvrir tous les besoins industriels, et d'optimiser les processus de conception et de réalisation des systèmes techniques.

Ainsi, ce laboratoire intègre un ensemble de méthodes et d'outils tels que le Reverse Engineering (RE), la Conception et la Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO), les méthodes d'optimisation et les moyens de contrôle pour concevoir des produits de qualité et améliorer leurs performances et leurs processus. La particularité de la mission du laboratoire, en plus de sa mission pédagogique principale, apporte une plus-value technique de haut niveau en termes d'expertises et de solutions technologiques innovantes.

1.6.2 Le laboratoire LCPI/ENSAM

Ces travaux de thèse sont réalisés au Laboratoire de Conception de Produits et Innovation, il se situe au sein de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech. Actuellement, il est sous la direction du Professeur Améziane AOUSSAT qui dirige cette thèse. Depuis, sa création en 1978 il conduit une recherche en génie industriel sur l'optimisation du processus de conception et d'innovation. Cette recherche s'oriente principalement sur l'amélioration de la phase de **conception amont** du produit.

Selon Segonds et al. (Segonds et al., 2009), la phase de **conception amont** regroupe des « phases de définition et planification du projet, de recherche et de validation du concept » ainsi que « des premières étapes de la conception architecturale, jusqu'à la génération d'un tracé préliminaire », c'est-à-dire le passage d'un état immatériel (idée, besoin) à un état matériel (maquette, prototype). La Figure 1.6 illustre l'intersection entre la phase de conception amont et la phase de conception préliminaire à laquelle nous nous sommes intéressés :

Afin d'atteindre cet objectif, le laboratoire LCPI a identifié deux champs d'investigation complémentaires qui sont en forte interaction :

- Le pôle **métier** : vise à enrichir le processus de conception par l'intégration de nouvelles connaissances, règles et outils métiers (design, ergonomie, ingénierie...);
- Le pôle **processus** : ambitionne la formalisation globale du processus de conception pour mieux le comprendre et l'optimiser.

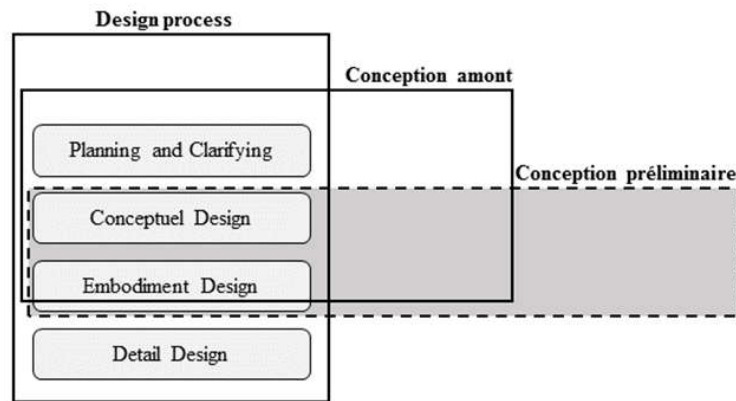


Figure 1.6 : Position de la conception préliminaire et la conception amont dans le processus de conception

Dans le **pôle métier**, les recherches ont pour but d’extraire, de formaliser et de modéliser les spécificités des différents métiers. Elles ont pour vocation de développer des méthodes et outils à l’usage des concepteurs de métiers divers. Dans le **pôle processus**, les recherches ont pour but de formaliser les divers processus individuels et collectifs qui interagissent au sein des projets de conception. Elles ont pour vocation de développer des méthodologie et méthodes à destination des chefs d’équipe de conception (Lahonde, 2010).

Dans cette thèse, nous défendons l’idée de pouvoir améliorer la phase de conception préliminaire par l’implémentation des approches et techniques d’optimisation en aidant les concepteurs à choisir une (ou des) solution(s) optimale(s) de leur produit. Ainsi, ce travail de recherche s’ancre dans le pôle processus, parce que l’optimisation est considérée dans nos travaux de thèse comme un vecteur de communication et collaboration entre les concepteurs et également les échanges des connaissances et les pratiques métiers.

Cette collaboration entre les deux laboratoires permet de mutualiser les connaissances dans divers domaines. Le laboratoire LTAFC apporte des connaissances de divers métiers à savoir l’optimisation en conception, les procédés de fabrication et le reverse engineering. Le laboratoire LCPI apporte des connaissances sur le processus de conception et d’innovation, et les méthodes et les méthodologies de conception notamment dans la phase de conception amont. Dans cette thèse, les deux connaissances peuvent être réunies afin d’améliorer la phase de conception préliminaire d’un produit.

1.7 Enjeux de cette recherche

1.7.1 Enjeux économiques

La conception préliminaire est une phase cruciale et déterminante pour le succès d'un projet de conception. Dans ce sens, Louis Schweitzer, alors PDG de Renault a énoncé dans une interview parue dans « les Echos » du 13 février 2002 (Ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie, 2003), qu'il y a un lien direct entre le temps de développement, le temps de mise sur le marché et le chiffre d'affaires du constructeur automobile (Lahonde, 2010). La réduction du temps dans la conception, agit directement sur le chiffre d'affaires de l'entreprise. En effet, proposer une approche de conception basée sur l'optimisation, dans la phase de conception préliminaire permettra aux concepteurs d'explorer au mieux l'espace de conception dans un temps réduit afin d'aboutir à une solution optimale et performante du produit.

Dans le même sens, Corbel (Aidi, 2007) a étudié les résultats de l'étude des dysfonctionnements dans un projet de développement véhicule chez RENAULT (Figure 1.7). Il affirme que *"la cause principale des erreurs est le manque de savoir-faire des acteurs spécificateurs, bien que l'entreprise dans sa globalité maîtrise ces savoir-faire. En effet, suite à chaque problème avéré, il suffit de quelques semaines pour résoudre les difficultés grâce à des réunions d'experts. [...] La mise en œuvre d'une expertise a un coût variable en fonction de la phase du projet. Pour un coût préventif unitaire en amont, il faudra multiplier ce coût par 10 s'il faut refaire des dessins, par 100 s'il faut modifier les outillages, par 300 si les problèmes à résoudre nécessitent de retarder le projet d'un mois. Les actions curatives coûtent 30 fois plus que les actions préventives"*.

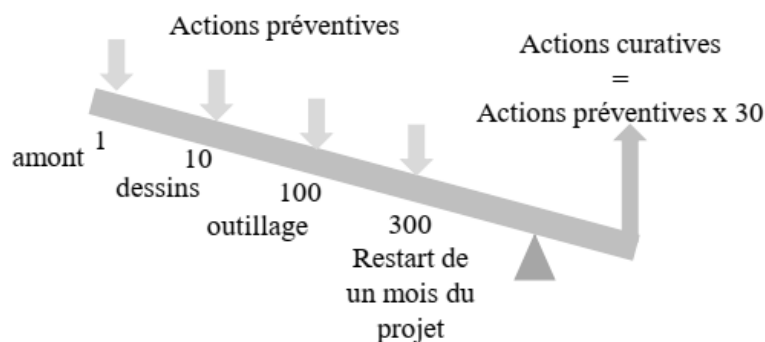


Figure 1.7 : La prévention est moins coûteuse que la correction (Aidi, 2007)

C'est dans ce cadre que l'intégration du métier de la simulation numérique au sein des phases de conception devient indispensable pour améliorer les processus de développement des véhicules. En outre, proposer une approche de conception et d'optimisation s'appuyant sur l'utilisation de modèles analytiques et/ou modèles numériques du produit, permet davantage

d'optimiser les itérations dues à la démarche classique « essai-erreur », et d'améliorer la conception d'un produit et ses performances.

1.7.2 Enjeux scientifiques

La recherche en conception est relativement récente, ce n'est qu'à partir des années 1990, qu'elle est devenue un domaine de recherche à part entière. D'une façon générale, l'objectif de la recherche en conception est d'améliorer le processus de conception au sens large du mot. En effet, selon les références (Blessing et al., 1998) et (Bylund et al., 2003), l'objectif de la recherche en ingénierie de la conception est de doter l'industrie par de nouvelles : connaissances, méthodologies et méthodes pour augmenter les chances de succès d'un produit. Ainsi, l'enjeu scientifique de nos travaux de recherche qui visent à améliorer la phase de conception préliminaire par l'introduction judicieuse des techniques d'optimisation, concerne l'enrichissement du champ disciplinaire des sciences de la conception.

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté du contexte de nos travaux de thèse. Après avoir cerné les périmètres industriel et académique, nous avons défini le cadre de nos travaux de recherche afin de contribuer effectivement à l'amélioration de la conception préliminaire. Ce cadre couvre trois champs à savoir : les méthodologies et méthodes de conception ; les techniques mathématiques d'optimisation ; la modélisation et simulation des performances de produit.

Enfin, l'idée éloquente derrière ce travail est la suivante : L'aide à la sélection d'une solution optimale de produit en phase de conception préliminaire par l'implémentation de techniques mathématiques d'optimisation, de modèles analytique et numérique de produit. Cela se traduit par proposition d'une approche permettant aux entreprises de trouver un compromis entre les exigences techniques, en termes de paramètres de conception, et la viabilité économique en termes de performances (temps, qualité de produit). Cette approche trouve son intérêt particulièrement au niveau des entreprises qui développent des systèmes techniques.

Chapitre 2 - Etat de l'art : Ingénierie de conception

2. Etat de l'art : Ingénierie de conception

"The science of design is possible and some day we will be able to talk in terms of well established theories and practices" Herbert Simon, 1969

2.1 Introduction

L'activité de conception est un élément clé du cycle de vie d'un produit et constitue une phase décisive et déterminante. Durant cette phase, toutes les spécifications du produit vont être définies de façon à répondre à toutes les fonctionnalités et les performances du produit exprimées dans le cahier des charges par le client. Généralement, la première étape du processus de conception consiste à générer un ensemble de solutions de conception à partir d'un cahier des charges, ces solutions sont représentées par des schémas de principe (Pahl and Beitz, 1996). Les concepteurs évaluent chaque solution en se basant sur plusieurs critères techniques et économiques, les solutions pertinentes seront développées dans la phase de conception détaillée.

L'objectif de ce chapitre est de présenter quelques notions relatives à l'activité de conception et d'en extraire les éléments clés de cette activité qui nous permettront, par la suite, de repositionner nos travaux de recherche et de contribuer à l'amélioration de la phase de conception préliminaire d'un produit.

2.2 Activité de conception de produit

Derrière le mot *conception*, les pensées sont différentes. Dans la littérature, nous pouvons compter plus de 400 textes fournissant des définitions variées de ce mot (Fayemi, 2016). Cette différenciation est due entre autres aux écoles de pensées et aux domaines d'activités (mécanique, informatique, psychologie, etc.).

Selon Chandrasekaran (Chandrasekaran, 1990), un problème de conception est spécifié par : *i*) un ensemble de fonctions que le produit doit remplir (sont exigées par le client ou définies implicitement par le domaine), et un ensemble de contraintes à satisfaire par le produit ; *ii*) un ensemble de composants prédéfinis ou doivent être définis ; *iii*) un ensemble de relations entre ces composants qui doit être déterminé. Les contraintes portent sur les paramètres de conception, sur le processus de conception ou de réalisation (contraintes métiers). Cette activité résulte d'une solution finale du problème de conception, qui est définie par une spécification complète des composants et leurs relations. Cette spécification permet au produit de remplir les fonctions et de respecter les contraintes préalablement définies. Cette solution est déterminée de telle sorte qu'un ensemble de critères soit optimisé.

Ainsi, on peut dire que la conception est un processus où il y a un enchaînement de plusieurs activités nécessaires pour fournir un dossier de définition du produit (Reymen, 2001). Son objectif est de formaliser et synthétiser un ensemble de systèmes qui permettent de réaliser les fonctions et les performances désirées (Wood and al, 2001).

2.3 Typologies de la conception

L'activité de conception diffère selon la nature des entreprises, le domaine d'activité et les habitudes des concepteurs. Selon la disponibilité de connaissances relatives au produit à concevoir ou à son processus de conception (Chandrasekaran, 1990; Dieter, 2000), on peut trouver deux types de conception qui sont: la conception prédéfinie (routinière) et la conception nouvelle (innovante et créative).

2.3.1 Conception routinière

Dans cette démarche, les connaissances sont disponibles préalablement, il n'y a pas de grand changements dans le cahier des charges sauf d'une manière quantitative. Les concepteurs cherchent à adopter une solution au problème en justifiant leur choix sur la base des

connaissances disponibles ; si cela n'est pas permis, ils essayent de modifier ou améliorer les solutions existantes (Dieter and Schmidt, 2007). En effet, la conception routinière permet de modifier des caractéristiques ou propriétés du produit, cela représente environ 80 % des activités d'ingénierie mécanique (Vargas, 1995).

2.3.2 Conception innovante

La conception innovante nécessite des connaissances nouvelles. Généralement, elle porte sur un produit existant dont l'expression du besoin est définie, même les technologies à utiliser sont aussi parfaitement connues. Cependant, ce sont les stratégies de conception qui sont inconnues, les concepteurs s'engagent à les identifier avec certaine autonomie. Selon Gero (Gero, 2001), le produit issu d'un projet d'innovation possède de nouvelles valeurs d'attributs.

2.3.3 Conception créative

Dans ce type de conception, ni les connaissances relatives au produit, ni les stratégies de résolution sont identifiées. Les concepteurs prennent en charge l'élaboration du cahier des charges et la définition des nouvelles fonctions et les caractéristiques du produit à concevoir. Elle est caractérisée par l'émergence de nouvelles idées, de technologies innovantes et de matériaux originaux (Dieter, 2000). La Figure 2.1 représente l'espace des solutions potentielles des trois types de conception.

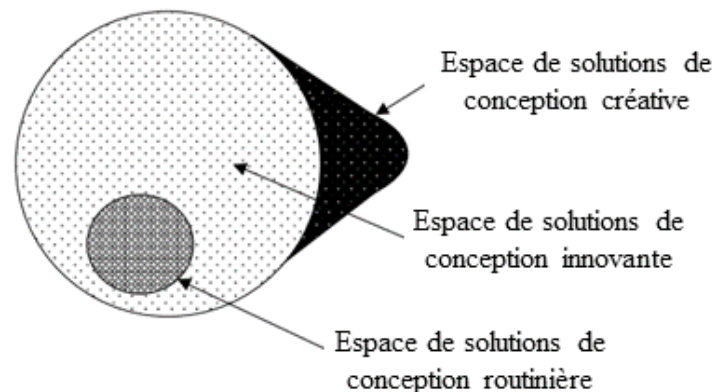


Figure 2.1 : Espaces des solutions des trois types de conception (Dieter, 2000)

2.4 Processus de conception

Le processus de conception est défini par le Conseil d'Accréditation pour l'Ingénierie et la Technologie comme étant « un processus permettant de concevoir un système, un composant ou un processus répondant aux besoins souhaités. Il s'agit d'un processus décisionnel (souvent itératif) dans lequel les sciences fondamentales, les mathématiques et les sciences de

l'ingénieur sont appliquées pour convertir de manière optimale les ressources en vue d'atteindre un objectif tracé » (Haik and Shahin, 2011).

Quelle que soit la manière d'exécution de l'activité de conception (séquentielle ou collaborative), cette activité est considérée comme un processus séquencé en phases. A travers lesquelles, les concepteurs transforment progressivement les besoins du client et les exigences exprimées par le cahier des charges en un produit industriellement réalisable et qui répond, en même temps, aux attentes en termes de fonctions et de performances attendues. Ces phases sont fortement interconnectées entre elles par des jalons, des contraintes et des décisions. Vue la complexité et la pluridisciplinarité de la conception, plusieurs travaux d'académiciens et de praticiens s'intéressent à la modélisation du processus de conception (Aoussat, 1990, Aoussat, 1996; Gericke and Blessing, 2012; Howard et al., 2008; Jonassen, 1997). Cette modélisation consiste à expliciter le processus de conception ou ses éléments dérivés, selon un ou plusieurs aspects spécifiques (Goldschmidt, 2014) afin de l'optimiser, de gérer l'activité de conception et de développer les outils d'aide à la décision. Un processus de conception maîtrisé améliore significativement la qualité du produit et assure la compétitivité de l'entreprise.

Dans ce qui suit, nous présentons un modèle du processus de conception issu de la société des ingénieurs allemands (VDI). C'est un modèle prescriptif est décrit par Pahl et Beitz (Pahl et al., 2007) en représentant l'approche systématique de conception "*systematic engineering design*" (cf. Figure 2.2) suivie dans la conception et le développement des machines complexes. Ils ont décomposé le processus de conception en quatre phases qui sont hiérarchiques et interdépendantes. Cette décomposition est la plus adoptée par les deux communautés académicienne et industrielle.

Elaboration du cahier des charges : c'est la phase initiale du processus de conception d'un produit. Durant cette phase, les concepteurs sont confiés à identifier et analyser les besoins du client ou du marché. Cela en y répondant en même temps par une identification : des caractéristiques du produit en termes de fonctions à remplir et des performances attendues, des objectifs alloués tels que le coût final et les délais de mise sur le marché et des capacités de l'entreprise à déployer. Le résultat final de cette phase est un document qui représente les spécifications initiales du produit sur lequel les concepteurs vont s'appuyer dans la phase suivante.

Spécification des principes : "Conceptual Design" durant cette phase, les concepteurs peuvent corriger et apporter des modifications sur le document obtenu dans la phase

précédente, cela en se basant généralement sur une démarche itérative pour affiner les fonctions du produit à concevoir, qui doivent être bien structurées et hiérarchisées. La matérialisation de ces fonctions commence par des recherches des voies de solutions techniques envisageables. En effet, une évaluation d'un ensemble de principes physiques est établie et qui se termine souvent par un développement de croquis et de concepts techniques (*working principles*). Dans cette phase, on assiste à l'apparition des premières représentations graphiques et maquettes du produit. Les concepteurs peuvent proposer ou adopter une solution existante au problème. Dans le cas contraire, ils recourent à l'innovation pour développer de nouvelles solutions.

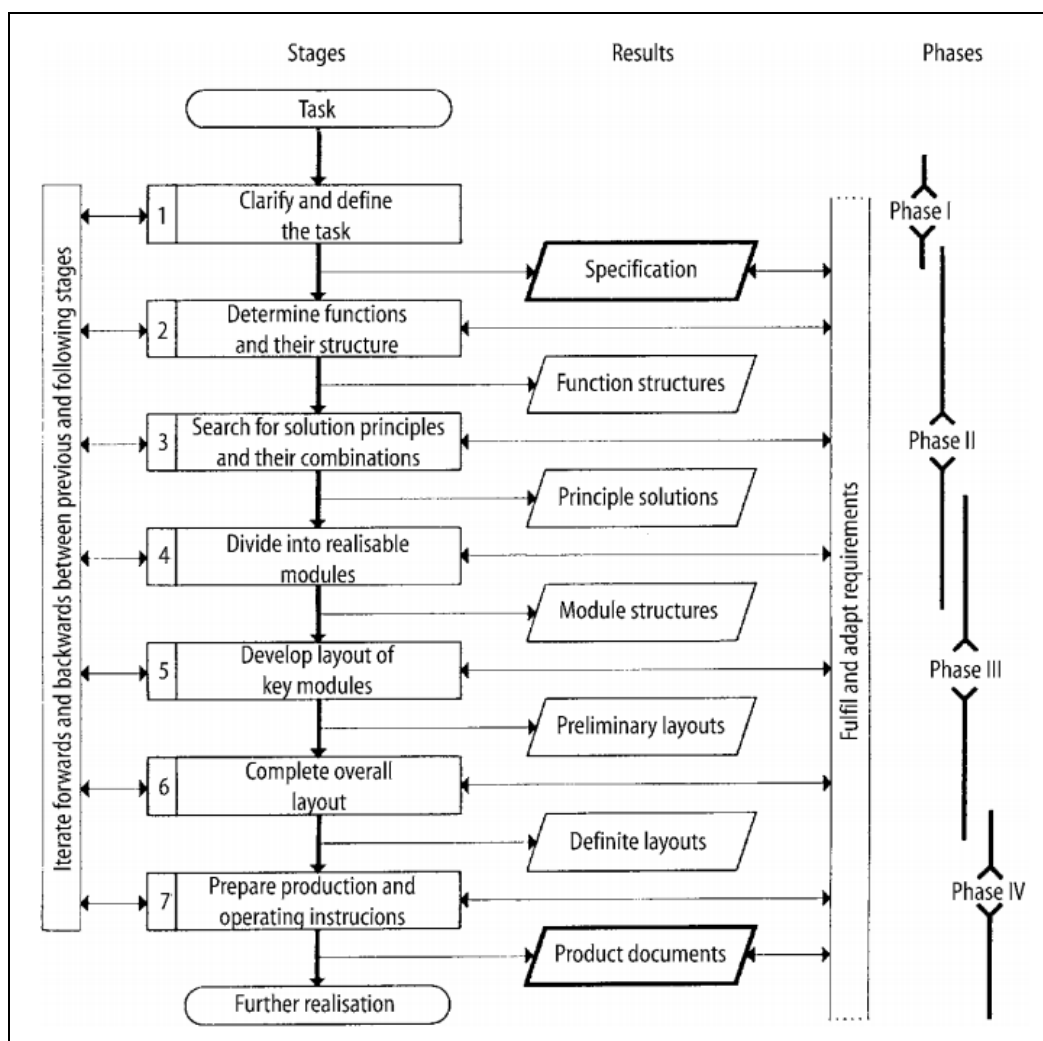


Figure 2.2: Processus de conception systématique de Pahl et Beitz (Pahl et al., 2007)

Conception d'ensemble : la conception architecturale ou "Embodiment Design" est une phase durant laquelle les concepteurs développent les concepts techniques retenus auparavant. La structure fonctionnelle et physique du produit est complètement établie, après une étape de décomposition en plusieurs sous-systèmes et composants en vue de satisfaire l'ensemble des

fonctionnalités. En tenant compte des moyens de production disponibles et des contraintes technologiques et économiques imposées, les concepteurs élaborent un ensemble de solutions d’architecture du produit par le choix et le pré-dimensionnement de différents composants (formes et matériaux), suivies par une détermination de leur arrangement spatial. La solution finale choisie doit être optimisée en respectant plusieurs critères (Pahl et al., 2007), elle sera détaillée par une préparation des modèles géométriques associés, des dessins d’ensemble et de définition et une nomenclature de composants. Le résultat de cette phase fera l’objet d’une phase d’étude détaillée.

Conception détaillée : « Detailed Design » durant cette phase, tous les composants sélectionnés dans la phase précédente sont parfaitement détaillés, testés et validés, en déterminant leurs : dimensions, états de surface, matériaux et plans des composants et des pièces. Toutes les informations relatives au produit sont complètement définies et considérées exploitables par tous les acteurs dans les phases ultérieures telles que la fabrication, l’assemblage, la distribution et la maintenance. Elles sont regroupées dans un document de définition du produit qui contient les dessins d’ensemble, les dessins de définition de chaque pièce, la nomenclature, les moyens de production, les gammes d’usinage et de contrôle, l’outillage et le coût. A l’heure actuelle, la plupart de ces informations sont gérées, accédées et modifiées à l’aide des outils et des logiciels du PLM (Product Life Management) tels que : CAD, CAE, CAM, SGDT.

2.5 Les méthodes associées à la phase de conception préliminaire

Il existe de nombreux outils et méthodes de conception et de développement des produits qui sont utilisées par les concepteurs dans les bureaux d’études. Ils permettent de prendre en considération, dès les étapes amont de la conception, l’ensemble des contraintes relatives au cycle de vie du produit, et en même temps d’intégrer les connaissances des métiers aval. La mise en œuvre de ces méthodes et outils permet donc de définir le produit et d’optimiser à la fois sa conception et ses performances. Les méthodes utilisées durant la conception préliminaire peuvent être divisées en deux catégories : qualitatives et quantitatives.

2.5.1 Méthodes qualitatives

2.5.1.1 L'Analyse Fonctionnelle (AF)

L'AF a été introduite à partir des années 1960 dans le domaine industriel. C'est une méthode fonctionnelle qui permet la description de manière exhaustive et synthétique des fonctions et leurs relations. Elle est utilisée principalement durant la phase initiale de la conception des produits et a comme objectif de rechercher et caractériser les fonctions attendues du produit afin de satisfaire les besoins de son utilisateur (Girard, 2001; Yannou, 1998).

L'évolution des normes a fait introduire de nouveaux concepts dans les méthodes d'analyse fonctionnelle, qui sont : l'AF externe et interne et le cycle de vie du produit (Girard, 2001).

- L'AF externe, appelée également l'AF du besoin, permet la description du besoin de l'utilisateur par rapport à un produit en termes de fonctions à garantir. Les résultats de l'AF externe participent à l'élaboration du premier cahier des charges fonctionnel.
- L'AF interne permet de décrire, d'un côté, les choix technologiques du concepteur envisagés, de l'autre côté, de définir le produit en termes de fonctions de service ou d'usage pour satisfaire le besoin et de fonctions de contraintes (solutions techniques retenues pour répondre aux contraintes). L'étape de l'optimisation du besoin sur le plan économique et technique est bien envisagée par cette méthode (Figure 2.3).
- Le cycle de vie est l'ensemble des situations de vie dans lesquelles se trouve le produit. L'intérêt de ce concept est de prendre en compte au plutôt les différents métiers du cycle de vie du produit et de définir les contraintes qui doivent être prises en considération dans la recherche des exigences du produit.

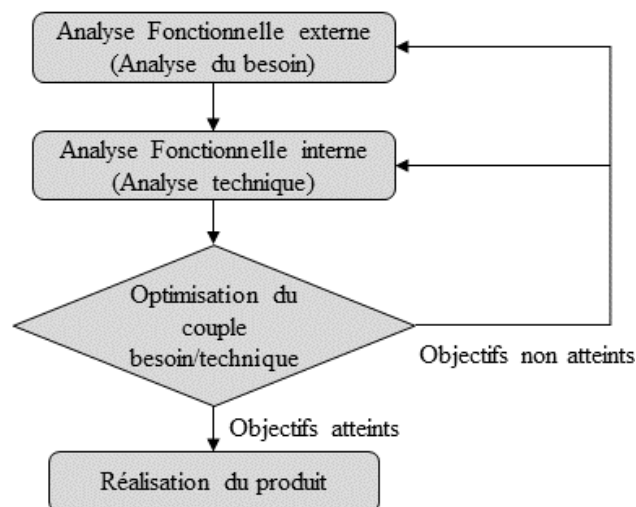


Figure 2.3 : Démarche générale de l'analyse fonctionnelle

2.5.1.2 La méthode TRIZ

TRIZ est l'acronyme russe de « théorie de résolution des problèmes inventifs », qui a été développée par Altshuller (Altshuller, 1984) dans l'ex URSS en 1946. Cette méthode est définie comme un outil de génération d'idées dans la résolution des problèmes inventifs. Elle explore systématiquement l'espace des solutions possibles à un problème de conception donné, y compris les solutions similaires appliquées dans d'autres domaines. TRIZ est fondée sur un ensemble d'outils de modélisation des problèmes, des bases de concepts de solutions (Choulier and Drăghici, 2000), ainsi que sur des méthodes de déblocage de l'inertie psychologique de concepteurs.

Les concepts de base de cette théorie sont celles (Dubois, 2004):

- D'idéalité : permettant la définition d'une solution optimale, souvent utopique, mais fournissant en même temps une voie d'évolution et un critère d'évaluation des solutions formulées à l'aune de cet idéal ;
- D'inertie psychologique : Pour résoudre un problème de conception nouveau, chaque concepteur se base sur une certaine expertise acquise pendant sa formation et ses expériences antérieures. Dans le cas d'une conception inventive, celle-ci est insuffisante et entrave le concepteur d'inspirer ou de formuler des solutions issues d'autres domaines ;
- Des lois d'évolution : l'évolution des systèmes techniques au cours du temps, peut être décrite selon un certain nombre de lois, qui se basent sur le cycle de vie, sur l'analyse de leur potentialité du point de vue brevets et d'économie. Leur connaissance permettant d'anticiper les futurs produits ;
- De contradiction (technique et physique) : les problèmes sont formulés à partir d'une contradiction entre une tendance d'évolution, liée à une condition spécifique de l'environnement du système, et une loi objective empêchant de réaliser cette évolution. L'identification de ces conditions spécifiques et des lois objectives est essentielle afin de pouvoir contourner au mieux ces problèmes.

La méthode TRIZ traite la conception avec une perspective de résolution de problème. Cette méthode repose sur les méthodes de reformulation des problèmes de conception et de résolution par analogie (Figure 2.4). Afin de permettre un tel raisonnement par analogie, Caplat (Caplat, G, 2002) postule qu'il est nécessaire d'avoir un modèle de formulation des problèmes afin de les classer et les comparer aux solutions génériques. Dans TRIZ, les méthodes de formulation des problèmes s'attachent à identifier systématiquement une contradiction inhérente à toute situation.

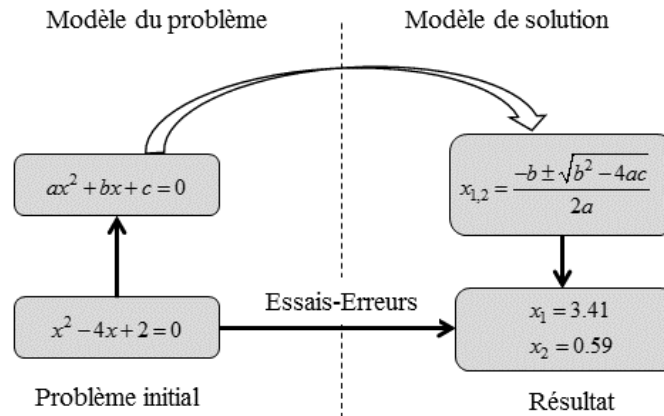


Figure 2.4 : Analogie Mathématique tirée de (Khomenko and Kucharavy, 2002)

2.5.1.3 La méthode AMDEC

L’Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) est une approche inventée dans l’industrie aéronautique américaine dans les années 1960. Elle est une méthode préventive et inductive, qui consiste à déterminer les sources potentielles de défaillance et leurs impacts sur les performances de produit (Jun and Huibin, 2012) afin d’engager des actions préventives. Cette méthode s’utilise durant la conception et l’industrialisation des produits, elle s’appuie sur d’autres méthodes comme l’analyse fonctionnelle et l’arbre de défaillance. Selon le domaine d’application, on peut trouver trois types principaux de l’AMDEC :

- AMDEC produit : consiste à déterminer des modes de défaillance éventuelles du produit issues de sa conception.
- AMDEC processus : consiste à déterminer des modes de défaillance du produit dues à son processus de fabrication.
- AMDEC moyens de production (ressources) : consiste à déterminer des modes de défaillances des moyens de production et de leurs composants.

L’AMDEC s’appuie sur l’analyse exhaustive du produit permettant l’identification des modes de défaillances, des causes de défaillances et leurs effets. C’est une méthode qui consiste à améliorer la qualité du produit en commençant par une analyse qualitative de fonctionnement du produit. La particularité de cette approche est de permettre aux concepteurs, la capacité de quantification du degré d’importance du risque relatif à chaque effet. Pour ce faire, un tableau doit être rempli par les concepteurs en attribuant un facteur (généralement entre 1 et 10) à la fréquence d’apparition de la défaillance (F), à sa gravité (G) et à sa probabilité de non détection (D). Enfin, une criticité C (*RPN : Risk Priority Number*) est déterminée par le

multiplication de ces trois paramètres (C=F.G. D). Cette criticité permet de classer les défaillances et de définir les actions amélioratrices nécessaires pour diminuer les défaillances les plus critiques. Le Tableau 2.1 est un exemple d’analyse AMDEC effectuée sur une pompe à huile.

Tableau 2.1 : Exemple d’un tableau FMEA produit (Hassan, 2010)

Produit	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	F	G	D	C
Pompe	Assurer le débit d’huile	Baisse du débit	L’usure abrasive des engrenages	Diminution de la durée de vie du système	2	2	4	16
		Irrégularité du débit	Cavitation	Détérioration des parties frottantes	1	2	4	8
		Arrêt du débit	Détérioration du joint à lèvres	Grippage des coussinets	3	4	1	12
			La rupture de la clavette	Grippage des engrenages	1	4	1	4

2.5.1.4 La méthode QFD

La méthode QFD (Quality Function Deployment), ou déploiement de la fonction qualité, est un concept global permettant de traduire les besoins du client en exigences techniques appropriées pour chaque phase du processus de développement et de la production de produit (marketing, conception, ingénierie, production, prototype, ventes) (Sullivan, 1986). Le fondement de cette méthode remonte à la fin des années 1960 au Japon et a été formalisée en 1966 par Yoji Akao (Prasad, 1998). Elle détermine la qualité globale de conception du produit fini et déploie systématiquement cette qualité jusqu’au niveau des composants, des processus et de leurs interrelations. La méthode QFD permet davantage la réduction des délais de développement en se concentrant sur les priorités suivantes :

- Exigences du client,
- Qualité, coûts et délais,
- Performances techniques.

La QFD repose sur l’utilisation de quatre matrices (Figure 2.5), qui permettent de décomposer les fonctions du produit et les solutions techniques associées et de représenter les relations entre ces fonctions et leurs solutions techniques. Dans la première matrice (La maison de la

qualité), les données d’entrées sont les attentes des clients (Quoi) à partir desquelles les caractéristiques du produit sont définies en termes quantifiables (Comment). Ensuite, des coefficients de corrélation sont affectés à chaque intersection entre Quoi et Comment de la matrice. La maison de la qualité s’appuie également sur une analyse concurrentielle pour satisfaire le client et améliorer la qualité totale du produit.

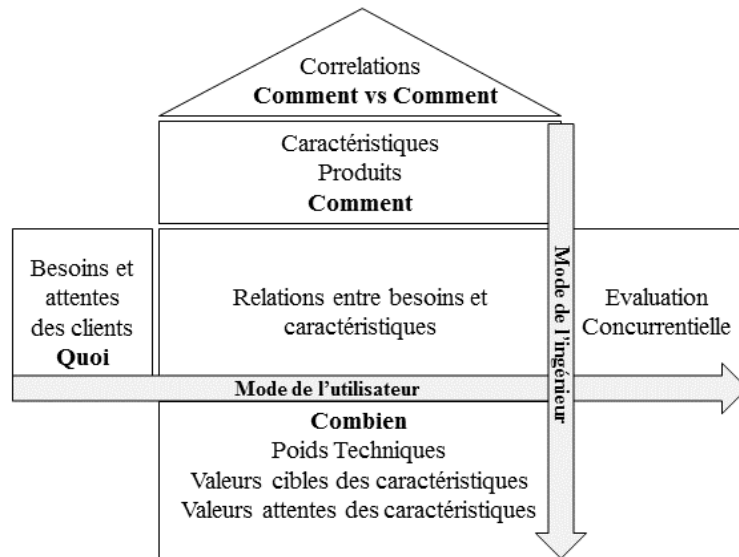


Figure 2.5 : La maison de la qualité

Dans la Figure 2.6, les sorties de chaque matrice correspondent aux entrées de la matrice suivante, ce qui permet d’assurer la continuité de l’information et la prise en considération des attentes du client au cours du processus de développement.

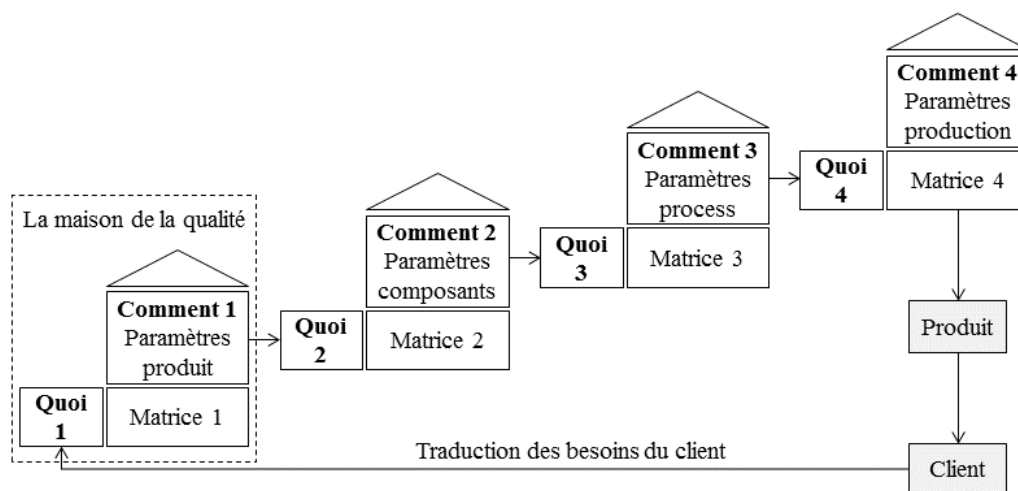


Figure 2.6 : Déploiement de la maison de la qualité

La première matrice représente la *maison de la qualité*, qui lie les attentes du client aux paramètres du produit à concevoir. La deuxième matrice, nommée *de déploiement des composants*, permettant de lier les paramètres produit (caractéristiques techniques) aux

paramètres de composants du produit. Ensuite, la matrice *de planification des processus* permettant de lier ces composants à leur processus de production. Enfin, la quatrième matrice, dite *de planification de la production*, qui lie les processus de production et les exigences de la production.

2.5.1.5 Design for X

Le concept Design for X (DFX) est apparu à la fin des années 1950, son objectif principal est d'intégrer les métiers situés en aval du processus de conception dans les phases en amont afin de mieux prendre des décisions. Ce concept regroupe un ensemble de méthodologies qui ont pour but d'améliorer la conception du produit en sensibilisant les concepteurs de prendre en considération des objectifs et des préoccupations variés (Huang, 1996; Kuo et al., 2001). De ce fait, le DFX est une approche efficace qui permet de mettre en pratique directe une logique d'ingénierie concurrente.

Chaque approche DFX est spécifiée par l'utilisation d'un ensemble d'informations, de connaissances, de techniques, d'analyses, de recommandations afin de mieux orienter la conception d'un produit selon le métier X. Ainsi, les concepteurs peuvent concevoir leur futur produit tout en ayant conscience de son impact selon le métier X.

Selon Holt et Barnes (Holt and Barnes, 2010), la tendance actuelle pour les approches DFX consiste à :

- Accroître les objectifs à intégrer au sein du processus de développement des produits, car la dynamique des marchés exige de prendre en compte de nouvelles contraintes telles que les chaînes d'approvisionnement, les propriétés affectives du produit ;
- Exploiter les différentes approches de manière collective. En effet, des conflits en conception peuvent apparaître suivant l'orientation des objectifs, il y a donc une nécessité de manager les compromis en conception (Huang, 2002; Huang et al., 2000). Dans ce cadre, Boothroyd *et al.* (Boothroyd, 1994) ont proposé une approche de conception hybride nommée DFMA (Design for Manufacture and Assembly) ;
- Intégrer des approches DFX dès les phases amont du processus de développement. Cette intégration se limite actuellement plutôt en phase de conception détaillée du produit, une fois les caractéristiques géométriques du produit sont définies.

2.5.2 Méthodes quantitatives

2.5.2.1 Simulation numérique

Actuellement, en ingénierie de conception, la simulation numérique occupe une place prépondérante dans le processus de conception grâce au développement des outils informatiques et des méthodes de calcul numérique. Selon Devalan (Devalan, 2009), la simulation numérique se présente dans trois étapes du processus de conception :

- En amont, pour choisir une architecture finale ;
- En phase intermédiaire pour optimiser l'architecture choisie ;
- En phase finale, pour valider le prototype.

Les modèles numériques utilisés dans le processus de conception permettent de simuler et de prédire les performances de produit dans la phase de conception et de développement. Ensuite, ils sont utilisés pour valider le produit dans les phases d'essais et de tests virtuels, avec un gain considérable en termes de temps et de coût.

Aujourd'hui, chez les grands industriels comme PSA (Peugeot - Citroën), Schneider Electric, Renault, Ford, Fiat, ..., la simulation numérique est largement adoptée et utilisée dans les bureaux d'études. Elle apporte des réponses en termes de qualité sur les performances (mécanique, thermique, magnétique etc.) des produits en cours de conception. Enfin, la simulation numérique permet aux concepteurs de capitaliser et d'enrichir le modèle produit utilisé durant le processus de conception par des nouvelles informations et connaissances (Aidi, 2007).

2.5.2.2 Optimisation

En conception préliminaire, quand on parle de l'optimisation il faut distinguer entre deux aspects (Doufene, 2013): *i*) l'optimisation de la démarche de conception du produit et *ii*) l'optimisation du produit lui-même. Le premier consiste généralement à chercher le chemin optimal (coût et délais) qui permet aux concepteurs d'obtenir les solutions de conception admissibles en répondant au cahier des charges. Le deuxième consiste à trouver les paramètres de conception d'un produit par rapport à certains critères de performance à optimiser. L'enjeu de l'optimisation dans le processus de conception des produits est étroitement attaché à l'interaction entre les outils de modélisation et de simulation et le processus de conception. L'application de l'optimisation dans la phase de conception

préliminaire, soit au niveau produit ou au niveau composant, peut se faire à trois niveaux (Papalambros, 2002):

- *Fonctionnel* : configuration pour le produit ou topologique pour les composants ;
- *Architectural* : paramétrique et/ ou géométrique pour le produit et ses composants ;
- *Configuration* : pour chaque configuration on trouve les deux types précédents.

2.6 Pratique et difficultés de la conception préliminaire

Pendant la phase de conception préliminaire, les concepteurs doivent sélectionner un concept, un concept de solution, une architecture du produit et enfin, définir les composants afin de passer à la phase suivante (Ullman, 1997). Cette phase est caractérisée par :

2.6.1 Les itérations

Anghel (Anghel, 2007) s'est focalisé sur l'étude des itérations en conception et il les a considéré comme un indicateur de performance en ingénierie de conception (Figure 2.7). Dans un projet de conception, il y a beaucoup d'informations qui sont échangées et partagées entre les acteurs aux différents niveaux de la conception (phases et activités). En outre, afin de mieux conduire la conception, les concepteurs doivent mettre en place des itérations volontaires pour converger vers une solution (Ulrich and Eppinger, 1995). Ces itérations s'effectuent généralement pour respecter les objectifs fixés (de chaque acteur ou de chaque chef du projet). Actuellement, elles occupent entre 13 à 70% du temps total de développement (Osborne, 1993). En conception du produit, il existe quatre grand types d'itérations (Boudouh et al., 2006):

- La répétition d'une tâche,
- Les interactions entre les activités de conception,
- La résolution d'un problème par étapes d'affinage et de convergence,
- Les négociations entre spécialistes.

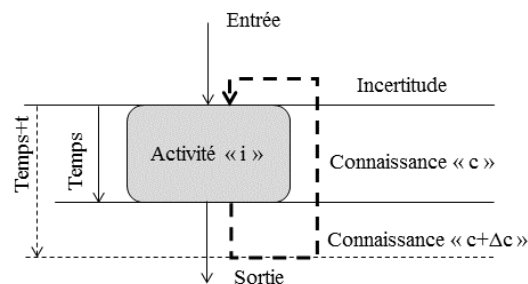


Figure 2.7 : Itération et construction de connaissances (Anghel, 2007)

Ces itérations peuvent être courtes ou longues, volontaires ou involontaires, constructives ou exploratoires, rapides ou lentes (Anghel, 2007). Leur typologie peut varier selon les projets à réaliser, les ressources/moyens utilisés et les concepteurs impliqués. Selon le concepteur, l'amélioration de la performance en conception est fortement liée à l'étude de ces itérations, qui sont présentées au cours du processus de développement.

2.6.2 Les décisions

La décision est un processus purement itératif qui est composé de quatre étapes principales comme indiqué sur la Figure 2.8 (Simon, 1960) : la définition du problème, la génération d'alternatives, le choix de la meilleure alternative, et l'implémentation de l'alternative sélectionnée. Dans ce cadre, plusieurs chercheurs voient que le problème principal en conception n'est pas la génération d'alternatives de conception mais comment choisir la meilleure parmi elles (Okudan and Tauhid, 2008; Tomiyama et al., 2009). Généralement, ce choix est difficile due à la nature contradictoire des objectifs de conception et aux incertitudes inhérentes au processus de conception (Pahl and Beitz, 1996). En conception, les décisions sont classées en deux catégories (Benabid, 2014):

- Les décisions technologiques correspondant à des choix, des sélections d'alternatives de conception. Ces décisions sont faites de manière procédurale et il existe plusieurs méthodes et outils pour les supporter.
- Les décisions de conduite sont liées à la planification des activités de conception et à la gestion des connaissances tout au long du processus de conception. Ces décisions issues d'une activité humaine qui est basée sur le compromis (divergence des objectifs des acteurs) et l'expérience (savoir-faire des acteurs).

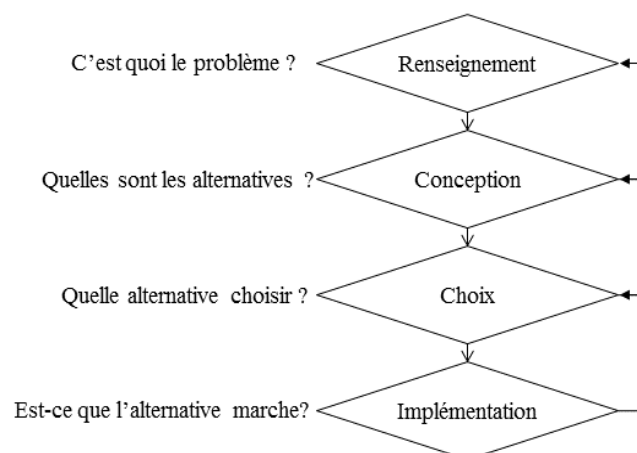


Figure 2.8 : Le processus de conception proposé par Simon (Simon, 60)

Dans le cadre de la conception préliminaire, un ensemble de choix nécessite la validation, pour passer aux phases subséquentes : sélection de concept, choix de concept de solution, détermination de composants et choix d'architecture (Scaravetti, 2004). A chaque décision prise, l'état de la conception change (Ullman, 2010) et la définition du produit se précise. L'espace des solutions de conception s'élargit de manière pyramidale et s'explore pour chaque concept, jusqu'à ce qu'une solution de conception soit trouvée. Pendant l'étape d'exploration des alternatives de conception, le concepteur prend des décisions qui amènent à la détermination des valeurs de paramètres de conception. Enfin, pour obtenir une solution optimale, il est nécessaire d'explorer et de comparer toutes les alternatives de conception produites par les différentes options de décision (Sawada, 2001).

2.6.3 Incertitude

Plusieurs définitions et classifications de l'incertitude ont été proposées par les chercheurs de différents domaines et disciplines. Dans cette section, nous allons présenter les incertitudes du point de vue conception. La Figure 2.9 illustre les catégories de l'incertitude que nous pouvons rencontrer en conception. En fait, sur la base d'incertitude aléatoire et épistémique, Thunnissen (Thunnissen, 2005) a ajouté deux autres catégories qui sont : l'ambiguïté et l'interaction.

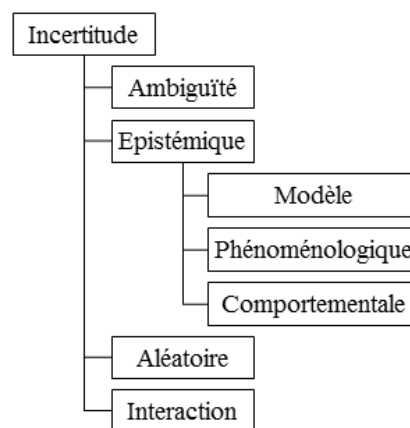


Figure 2.9 : Taxonomie de l'incertitude selon Thunnissen (Thunnissen, 2005)

L'ambiguïté est appelée aussi imprécision, imprécision de conception ou imprécision linguistique. Bien qu'elle puisse être réduite par des conventions linguistiques et des définitions soigneuses, l'ambiguïté reste un aspect inévitable du discours humain. Dans le contexte du tolérancement, l'incertitude liée à la spécification géométrique est un exemple typique de l'ambiguïté.

L'incertitude épistémique est due au manque de connaissances. Elle est réductible et se manifeste à cause d'une information incomplète ou d'une connaissance incomplète de certaines caractéristiques ou paramètres du produit ou son environnement. Thunnissen (Thunnissen, 2005) a classé ce type d'incertitude en trois types telle que l'incertitude du modèle, l'incertitude phénoménologique et l'incertitude de comportement.

- *L'incertitude du modèle* : réside dans la précision du modèle du produit utilisé pour représenter la réalité. En d'autres termes, c'est la différence entre le modèle mathématique et le comportement réel du produit. Dans les approches ou les techniques de modélisation d'un produit, il est nécessaire de gérer et contrôler ce type d'incertitude. L'incertitude du modèle peut également être due à des erreurs d'approximation, des erreurs de programmation ou des erreurs numériques.
- *L'incertitude phénoménologique* : est liée au comportement (performances prédites) de produit sous des conditions variées (simulation, test ou utilisation). Elle peut être également due à la mauvaise compréhension de certains paramètres clés du phénomène physique ou de leurs interactions. Ce type d'incertitude est principalement de nature qualitative et liée aux fonctionnalités du produit. Dans la conception, il est important de la prendre en considération dans les étapes de modélisation, simulation et réalisation.
- *L'incertitude de comportement* : est liée beaucoup plus aux décisions prises pendant le processus de conception, au comportement humain (concepteur, utilisateur, organisme).

L'incertitude aléatoire porte plusieurs noms : la variabilité, l'incertitude irréductible, due au caractère aléatoire de certaines propriétés du produit (physiques, mécaniques, etc.) ou de l'environnement extérieur (efforts, température, etc.).

L'incertitude des interactions due à l'interaction imprévue entre les disciplines (sous-systèmes). Les techniques permettant de traiter de ce type d'incertitude sont la simulation et l'optimisation en conception multidisciplinaire (OMD).

2.6.4 Connaissances

La démarche de conception implique un processus décisionnel, néanmoins dans les phases amont. Dans cette optique, il s'avère nécessaire pour les entreprises de structurer une base de données permettant de capitaliser et de réutiliser les connaissances. Dans le cadre de la simulation numérique, Baizt (Baizet, 2004) suggère une typologie des connaissances à

capitaliser, à savoir les connaissances théoriques, les connaissances liées aux processus (méthodes et méthodologies), les connaissances relatives aux métiers de la modélisation, la simulation et l'optimisation et les connaissances de référence (personnes, organismes extérieurs). Les connaissances peuvent être de type tacite ou explicite.

- Les connaissances tacites : ce type de connaissances appartenant au monde des représentations mentales. Ces connaissances englobent les compétences acquises, le savoir-faire et l'expérience. Elles sont généralement difficiles à formaliser, contrairement aux connaissances explicites.
- Les connaissances explicites : ce type de connaissances peut être consulté et trouvé à partir des documents papiers ou informatiques. Ces connaissances sont transférables physiquement, car elles se retrouvent sous forme de choses tangibles (dossier papier ou électronique).

2.7 Le produit

Dans la littérature, il existe une multitude de définitions de ce mot, certains auteurs insistent sur l'aspect matériel dans leur définition. Par exemple : Pahl et Beitz (Pahl and Beitz, 1996) et Vadcard (Vadcard, 1996) considèrent qu'un produit est *« un élément matériel, c'est-à-dire un objet qui permet à l'entreprise de satisfaire les besoins et les attentes de ses clients »* (Vadcard, 1996). Cette définition a été reprise et complétée par d'autres auteurs et associations comme Suh (Suh, 1990) qui ajoute l'aspect immatériel et informationnel (par exemple : service ou logiciel informatique).

Dans le cadre de notre contribution et le long de ce manuscrit, nous adoptons la définition suivante du produit : *« c'est un objet matériel (physique), élaboré par une succession de transformations, permettant de satisfaire un ensemble de spécifications et de performances »*. Ainsi, l'objet peut correspondre à un produit, un système, un sous-système ou à un composant d'un système. Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés en particulier aux produits matériels. Ainsi, dans la suite de ce document, lorsque nous utilisons le mot produit, ça sera pour se référer à un objet physique.

Les interfaces représentent les relations physiques entre les composants du produit. Plus précisément, elles définissent les frontières physiques ou théoriques à travers lesquelles deux ou plusieurs composants du système s'interagissent et nécessitent l'application des règles et

des conventions d'un domaine particulier pour définir leurs interactions et proposer les solutions associées (Vosgien, 2015).

Les interactions représentent les phénomènes physiques qui se produisent aux interfaces entre les composants connectés. Leur définition spécifie les caractéristiques fonctionnelles, physiques, comportementales et sémantiques à un domaine spécifique qui déterminent les règles et les conventions à appliquer. Ces règles et conventions concernent les caractéristiques physiques propres au domaine (mécanique, électrique, thermique, etc.), les caractéristiques sémantiques ou fonctionnelles, voir même l'échange potentiel d'information (Vosgien, 2015).

L'architecture du produit est représentée en général par un schéma indiquant l'affectation des blocs (modules) ou des composants physiques de base aux fonctions élémentaires du produit et leurs interfaces (Ulrich and Eppinger, 2003). L'*Architecture fonctionnelle*, issue de l'activité de spécification, constitue une description des solutions potentielles afin de répondre aux besoins. Elle exprime l'ensemble des fonctionnalités du produit. L'*Architecture organique (physique)* définit l'ensemble des modules ou des organes (blocs, capteurs, actionneurs, ...) nécessaires afin de réaliser les fonctions décrites par l'architecture fonctionnelle. Pour chaque module ou organe, leurs caractéristiques sont connues.

La définition et le choix de l'architecture du produit sont essentiels dans la phase de conception préliminaire car, ils permettent d'organiser les activités du processus de conception et de développement de produit et de déterminer la partie prenante (Adjoul, 2019), aussi bien pour manager et pour réduire la complexité du produit, à travers le concept de conception modulaire (Sosa et al., 2004; Yassine et al., 2003).

2.7.1 Performances de produit

On peut rencontrer dans la littérature, de nombreuses définitions du mot performance. Selon Ullman (Ullman, 1997), la performance : « *est la mesure de la fonction et du comportement du produit – Dans quelle mesure le produit fait ce pour quoi il est conçu* ». Les auteurs comme Ulrich et Eppinger (Ulrich and Eppinger, 1995), donnent la définition suivante: « *Dans quelle mesure un produit exécute ses fonctions attendues – Les performances typiques du produit sont caractérisées par la vitesse, le rendement, la durée de vie, la précision et le bruit* ». Enfin, selon Zeng et Gu. (Zeng and Gu, 1999): « *La performance d'un produit est décrite comme la réponse d'un produit à des actions externes dans son environnement de travail. La performance d'un produit est réalisée à travers les performances de ses composants* ».

Cette définition est celle que nous allons retenir dans la suite de nos travaux, car elle met en évidence la relation entre les performances du produit et celles de ses composants. Le long du cycle de vie d’un produit, nous pouvons distinguer trois types de performances qui sont indiquées dans la Figure 2.10.

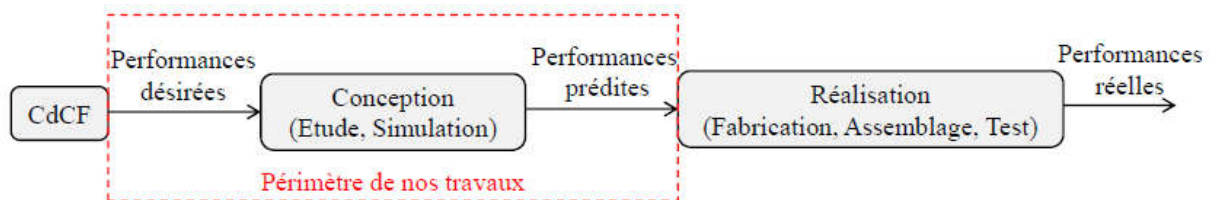


Figure 2.10 : Différentes performances d’un produit durant son cycle de vie(Osteras et al., 2006)

- Performances désirées (PD) : sont définies comme étant « une déclaration indiquant les performances de produit que l’on souhaite obtenir, c’est-à-dire indiquant les performances qu’un produit devrait avoir ». Du point de vue client, les performances désirées définissent ses attentes sur lesquelles les décisions d'achat seront basées. Les performances désirées peuvent être trouvées dans le cahier des charges comme une marge, une valeur minimale ou maximale ou une valeur absolue (Osteras et al., 2006).
- Performances prédites (PP) : sont définies comme « une estimation de performances du produit obtenues par l’ensemble d’opérations telles que : l’analyse, la simulation et les tests ». Le fabricant utilise les performances prédites du produit tout au long du processus de développement et de la production afin d’évaluer si le produit répond aux performances désirées ou non, elles constituent donc la base des décisions au cours de différentes phases du cycle de vie (Osteras et al., 2006).
- Performances réelles (PR) : elles sont « les performances observées du produit au cours du développement de son prototype physique ou dans la phase d’utilisation ». Ces performances pourraient s’écarter des performances désirées. Si cet écart est grand, la probabilité de non satisfaction des clients s’augmente (Osteras et al., 2006).

2.8 Cycle de vie d’un produit

La gestion intégrée de toutes les informations relatives au produit durant la conception et la réalisation est une préoccupation majeure de l’industrie (Terzi, 2005). En général, le cycle de vie du produit peut être décomposé en trois grandes parties :

- Le *début de vie* couvrant la conception et la production,

- Le *milieu de vie* couvrant la logistique (distribution), l'utilisation, le service après-vente et la maintenance,
- Et la *fin de vie* couvrant la logistique inverse (collecte de produit), la reconstruction (désassemblage, rénovation, réassemblage, etc.), la réutilisation, le recyclage et la destruction (Jun et al., 2007).

La Figure 2.11, illustre les différentes situations du cycle de vie du produit. Au début, les situations de vie paraissent importantes et peuvent être listées et hiérarchisées par le client. Elles sont appelées situations de vie de référence et sont exprimées par le CdCF mais, dans la plupart des cas, elles ne sont pas parfaitement mentionnées (Scaravetti, 2004).

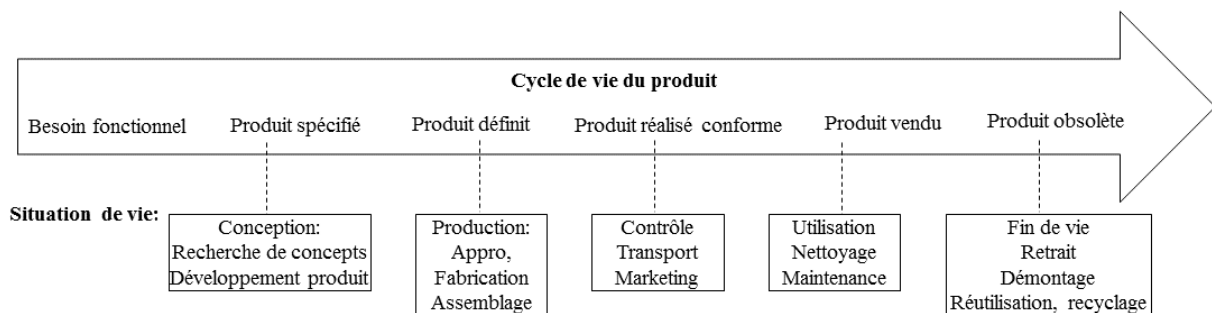


Figure 2.11 : Cycle de vie du produit et situations de vie correspondantes (Scaravetti, 2004)

D'autres situations de vie peuvent ensuite émerger en raison de l'évolution normative, politique, économique et industrielle. Face à ces évolutions, il est important de prendre en considération toutes les contraintes relatives au cycle de vie afin de déterminer et hiérarchisées toutes les fonctions attendues du futur produit.

2.9 Modèles de produit

L'activité de modélisation de produit joue un rôle essentiel dans le processus de développement du produit considéré. Un modèle produit bien défini et structuré, sert à organiser, partager et échanger les différentes données relatives au produit, les informations de production et les connaissances métiers. Ainsi, il doit être capable de supporter le changement des exigences pendant le processus de développement.

2.9.1 Les modèles descriptifs

2.9.1.1 Le modèle Caractéristiques - Propriétés

Weber *et al.* (Weber et al., 2003) proposent un modèle produit (CPM : Characteristics - Properties - Modelling) afin de décrire le processus de conception et de développement d'un produit. Ce modèle est basé sur la distinction entre les caractéristiques (variables de

conception) et les propriétés (objectifs) pour définir le produit et leur comportement. Cette modélisation est conçue pour comprendre les liens entre les caractéristiques et les propriétés, elle joue un rôle essentiel dans la conception préliminaire.

- Les caractéristiques (C_j) sont les paramètres qui peuvent être modifiés directement par le concepteur. Par exemple : la forme, la structure, les dimensions, le matériau et la surface.
- Les propriétés (P_j) caractérisant le comportement du produit. Elles sont représentées par les paramètres que le concepteur ne peut pas modifier directement, mais il peut les modifier via les caractéristiques. Par exemple : les fonctions, le poids, les propriétés esthétiques, la fiabilité, le coût et la fabricabilité.
- Les propriétés requises (RP_j) sont les propriétés (objectifs) que le concepteur/client souhaite d'atteindre.
- Les relations (R_j) représentent l'interrelation entre les caractéristiques et les propriétés.
- Les conditions externes (EC_k) sont définies par l'environnement externe lequel le concepteur ne peut pas contrôler.
- Les conditions de modélisation (MC_n) sont l'ensemble des hypothèses, des contraintes, conditions aux limites ou simplifications, utilisées au cours de développement, et qui doivent être prises en considération pour définir les relations entre les caractéristiques et les propriétés (Dantan et al., 2013).

Les relations (R_j) sont réalisées par deux activités principales (Weber et al., 2003):

- *Analyse* : Selon les caractéristiques connues (données) d'un produit, les propriétés sont déterminées ou, si le produit n'existe pas encore, sont prédites.
- *Synthèse* : Selon les propriétés données (requises), les caractéristiques du produit sont déterminées. Le processus de conception commence par une liste des propriétés requises. La tâche du concepteur consiste à trouver des solutions appropriées et à déterminer (affecter) les caractéristiques, de sorte que les propriétés requises remplissent les exigences du cahier des charges

Le processus de développement présenté par la Figure 2.12 est un processus centré propriété (Property-Driven Development) ; Il est basé sur l'analyse, la synthèse et l'évaluation. A partir d'une liste des exigences (RP_j) exprimées par le cahier des charges, les caractéristiques C_j

du produit sont déterminées via une étape initiale de synthèse. Ensuite, une étape d'analyse prend en charge de traduire les caractéristiques trouvées en propriétés P_j . Enfin, une étape d'évaluation a pour but de déterminer la variation ΔP entre RP_j et P_j . Ce processus s'itère jusqu'à toutes les caractéristiques sont attribuées et toutes les propriétés sont déterminées (i.e. : $\Delta P \rightarrow 0$).

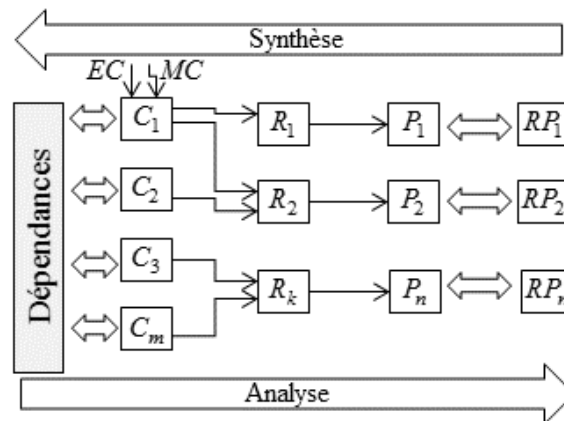


Figure 2.12 : Modèle Caractéristiques-Propriétés (Weber et al., 2003)

2.9.1.2 Le modèle Fonction-Comportement-Structure

Le modèle FBS (cf. Figure 2.13) décrit le processus de conception d'un produit par un ensemble d'activités de conception entre trois domaines liés entre eux qui sont : la fonction, le comportement et la structure. Suivant ce modèle, la définition complète du produit passe par huit étapes communes, qui sont décrites ci-après :

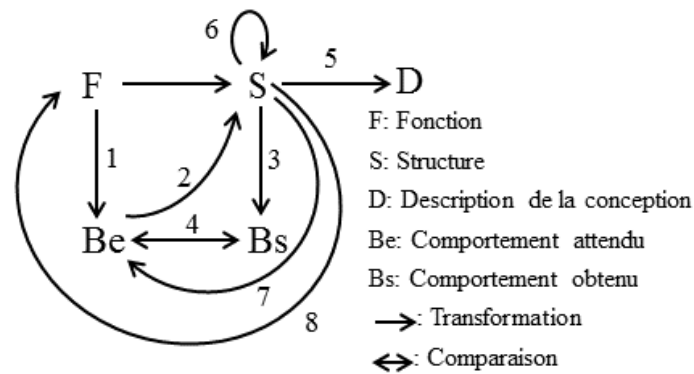


Figure 2.13 : Modèle FBS de Gero (Gero, 2001)

- La première étape (1), nommée aussi étape de formulation, qui transforme les exigences de conception sous forme de fonctions (F), puis en un comportement attendu du produit (Be) qui est censé répondre à ces fonctions ;

- La deuxième étape (2) a pour but de réaliser le comportement attendu (Be) en le transformant en une structure de solution (S) par une étape de synthèse ;
- La troisième étape (3) est une étape d'analyse afin de déterminer le comportement (Bs) de la structure (S) obtenue dans l'étape précédente ;
- La quatrième étape (4) consiste à évaluer et à comparer le comportement obtenu (Bs) avec le comportement désiré (Be) ;
- La cinquième étape (5), si cette évaluation est satisfaisante, la conception (D) est décrite et documentée afin de préparer la phase de fabrication du produit. Sinon, les concepteurs doivent revenir au processus itératif ;
- Les étapes (6, 7 et 8) sont des étapes de reformulation permettant de changer les valeurs de variables de conception en termes de structure (S'), de comportement (Be') et de fonction (F').

2.9.2 Les modèles prédictifs

En conception préliminaire, les concepteurs font appel à différents modèles pour aussi étudier le comportement d'un produit ou prendre des décisions concernant sa conception (Collignan, 2011). Un modèle de comportement est défini par Gass et Harris (Gass and Saaty, 1955) comme étant: « *une représentation idéalisée – une description abstraite et simplifiée - d'une situation du monde réel à étudier ou à analyser* ». La Figure 2.14 illustre de manière générale la formalisation du modèle de comportement d'un produit. Les variables d'entrée ou les paramètres de conception (dans nos travaux) permettent la description du produit (assemblage ou composant) à modéliser ; elles peuvent varier dans l'espace de recherche afin de décrire plusieurs solutions potentielles du produit. Les paramètres de contrôle sont fixés relativement au milieu extérieur et permettent de définir le cadre du modèle ; ils sont liés aux hypothèses pour lesquelles le modèle est valide. Les variables de sortie (performances de produit) permettent de répondre à la motivation du modèle en satisfaisant les besoins fixés préalablement.

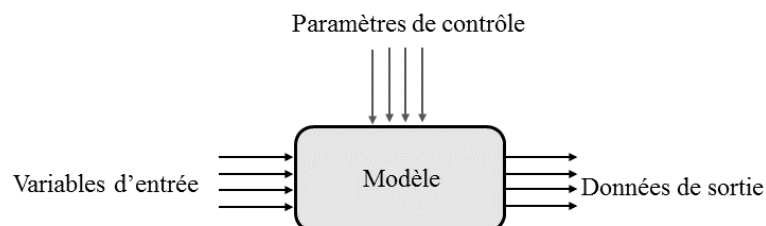


Figure 2.14 : Modèle, variables, paramètres et données

Le modèle permet de comprendre et de décrire le phénomène étudié. En conception, un modèle doit contenir les quatre caractéristiques intrinsèques suivantes (Vernat, 2004):

- Son objet d'étude que le modèle est destiné à représenter (comportement physique, écologique, processus économique, etc.) ;
- Sa représentation, qui couvre le moyen de mise en œuvre du modèle (langage de programmation, graphes, relations mathématiques, etc.) ;
- Son abstraction, qui le distingue de l'objet réel modélisé et inclus une notion de schématisation et de perte d'information (postulats simplificateurs, conditions aux limites, paramètres, etc.) ;
- Sa motivation, soit la raison d'être du modèle (simulation numérique, optimisation, etc.).

Vernat (Vernat, 2004) a défini trois étapes essentielles pour créer un modèle : 1) la formulation des hypothèses, 2) la réalisation du modèle, 3) sa qualification. Les hypothèses dépendent du cadre d'intérêt (par exemple : simulation numérique pour évaluer les performances de produit), ainsi que des connaissances métiers. En conception préliminaire, il est nécessaire de construire un modèle de comportements pertinent et représentatif tel que les données de sortie (performances) soient fidèles et le temps de simulation numérique soit réduit.

En conception, on distingue deux catégories de modélisation du comportement : boîte blanche et boîte noire. Le contenu des modèles de type boîte blanche est connu de l'utilisateur, il en existe deux types :

- Les *modèles numériques* : sont liés étroitement au développement de l'outil informatique et sont de plus en plus utilisés dans le processus de conception. Ces modèles regroupent plusieurs techniques telles que la modélisation géométrique (CAO), le maillage (surfaccique ou volumique) et le calcul numérique (méthodes d'éléments finis ou volumes finis, etc.). Certaines tâches peuvent être automatisées (Aifaoui, 2003; Ben Amara, 1998; Charles, 2005; Deneux, 2002).
- Les *modèles analytiques* : sont basés sur une utilisation des formulations mathématiques en traduisant et représentant des phénomènes physiques. En effet, ces formulations mathématiques permettent de lier notamment les fonctions du produit à sa structure en passant par son comportement attendu (Vermaas, 2009)

Les modèles de type boîte noire permettent de prédire un comportement sans nécessairement comprendre le mécanisme de fonctionnement interne, mais en analysant des réponses de produit à modéliser (base de données), issues de différents jeux de paramètres de conception. Plusieurs techniques existantes actuellement, qui exploitent ces données (réponses) afin de construire un modèle adéquat (métamodèles) (Chamekh, 2008; Farmer et al., 1986; Goupy, 1999; Jacques, 2017; Ledoux, 2005), à savoir le plan d’expériences pour surfaces de réponse, la méthode de Krigeage et les Fonctions à Base Radiale (RBF) qui sont détaillées dans la suite de ce chapitre.

2.9.2.1 Le modèle analytique

Le modèle analytique (Figure 2.15) représente également les performances et les caractéristiques du produit (sous-système ou composant) sous forme des formulations mathématiques (bilans d’efforts, bilans d’énergies, équations d’équilibre, équations de conservation, etc.). Ce modèle traduit les phénomènes (physiques, écologique, etc.) qui doivent être pris en considération dans la phase de conception et pré-dimensionnement du produit ou ses composants (Jaluria, 2007).

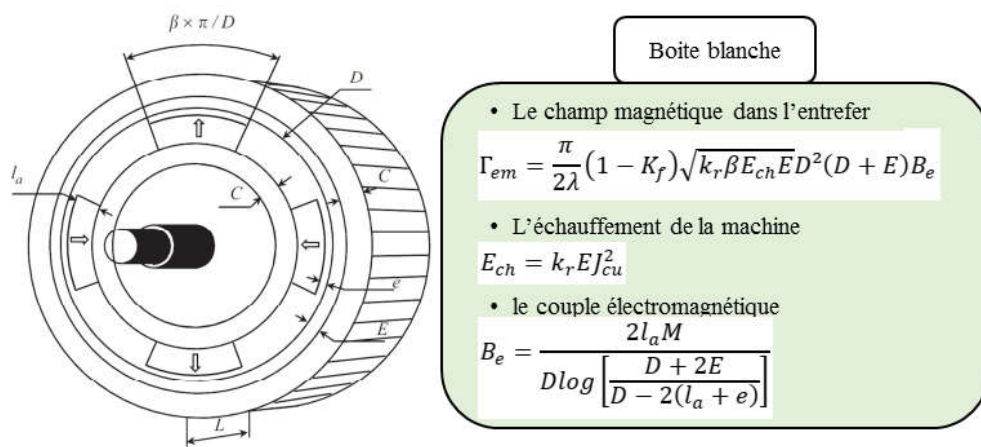


Figure 2.15 : Un produit (Machine électrique) et son modèle analytique (Mazhoud, 2014)

Ce modèle est le plus utilisé dans la phase de conception préliminaire, car il offre une grande souplesse afin d’obtenir des solutions optimales significatives, tout en explorant efficacement et rapidement l’espace de conception. De plus, on peut y apporter des simplifications (hypothèses) ou des approximations en laissant seulement les variables ou les paramètres dominants. Mais ce modèle présente certaines limitations, il se heurte souvent à la complexité de géométries des produits à modéliser et aux limites de validité des lois physiques. Par exemple, dans le cas où la géométrie du produit est complexe, l’évaluation de la contrainte

(flexion, torsion) dans des zones où il existe le phénomène de concentration de contrainte soit pratiquement impossible par ce modèle.

2.9.2.2 Le modèle numérique

Actuellement, le modèle numérique est largement utilisé dans la phase de conception préliminaire afin d’améliorer la conception et de concevoir des produits à haute qualité. Mais parmi ses inconvénients, il est souvent coûteux en termes de temps de calcul. Afin d’intégrer ce modèle dans un processus d’optimisation, il y a deux solutions qui peuvent être envisagées. Une première consiste à simplifier le modèle de comportement du produit. En effet, des approximations peuvent être apportées au modèle pour atténuer la complexité du problème à étudier, tout en gardant toujours la même tendance des phénomènes physiques (Durantin, 2018). Le calcul numérique repose généralement sur la discrétisation (spatiale et temporelle) du domaine, la taille de cette discrétisation donnant souvent de diverses fidélités du comportement d’un même produit. Enfin, cette solution reste toujours inadaptée néanmoins pour la conception des produits complexes, car l’implémentation directe de ce modèle (Figure 2.16a) dans un processus d’optimisation engendre toujours un temps de calcul élevé.

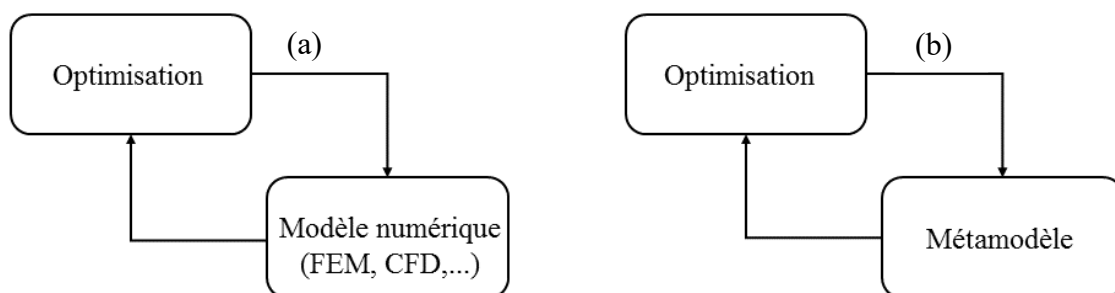


Figure 2.16 : Modes d’intégration de la simulation dans le processus d’optimisation.

(a) Intégration directe, (b) Intégration via le métamodèle

Une deuxième solution (Figure 2.16b) consiste à remplacer la simulation numérique par des modèles de substitution (métamodèles ou surface de réponse). Le métamodèle peut simuler la relation statistique existante entre les variables d’entrée de la simulation et les données de sortie, on peut le construire à partir d’une base de données issue de plusieurs évaluations du modèle numérique en cherchant à estimer des paramètres d’un modèle mathématique. Le métamodèle obtenu peut ensuite faire la prédiction de données de sortie du modèle numérique pour un nouveau jeu de variables d’entrées.

2.9.2.3 La construction des modèles de substitution

Le modèle numérique M présenté par l’Equation (2.1) est défini comme une observation de données de simulation en sortie qui dépendent de variables d’entrée (modélisation boîte noire). Dans le contexte d’utilisation de logiciels commerciaux (CAD-CAE) ou d’autres codes de calcul spécifiques, les méthodes numériques dédiées à la résolution des formulations mathématiques mises en jeu ne sont pas visibles par l’utilisateur. En outre, la partie physique de la simulation est restée totalement opaque.

$$M : \begin{cases} X \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m \\ x \mapsto y = M(x) \end{cases} \quad (2.1)$$

où, n définit le nombre de variables d’entrée, et m définit le nombre de données de sortie fournies par la simulation. Si $m > 1$, ces données sont approximées une par une. Les données d’apprentissage sont constituées d’un ensemble de scénarios $X = \{x^{(1)}, \dots, x^{(N)}\}$, et de valeurs observées associées $Y = \{y^{(1)}, \dots, y^{(N)}\}$. Le couple $D = \{X, Y\}$ est appelé *plan d’expériences*, il permet de construire le modèle de substitution \hat{M} . Une nouvelle valeur de sortie peut être estimée comme suit :

$$\hat{y} = \hat{M}(x) \quad (2.2)$$

Lorsqu’un modèle numérique du comportement du produit est disponible, il y a plusieurs types de métamodèles qui peuvent le substituer. Le travail de Wang et Shan (Wang and Shan, 2007) présente bien les différentes métamodèles disponibles et utilisées en ingénierie de conception.

a. Plan d’expériences

Pour construire un modèle de substitution (métamodèle), il est indispensable de disposer d’un plan d’expériences adéquat qui permet bien d’extraire les informations partielles sur le modèle de l’objet étudié. Dans la littérature, il existe plusieurs types de plans d’expériences qui sont adaptés à différents domaines d’ingénierie. Le but est de remplir au mieux l’espace des variables d’entrée (espace de recherche) pour récolter au mieux les informations sur le modèle numérique à substituer. De plus, le temps d’évaluation de la simulation est souvent élevé, il est nécessaire d’atténuer autant que possible le nombre de points (scénarios) dans le plan d’expériences. La stratégie d’échantillonnage et de remplissage forme un véritable

domaine de recherche et développement. Les travaux de Franco (Franco, 2008) présentent un éclaircissement sur ce sujet. Généralement, le terme DoE (Design of Experiments) pour faire référence au plan d’expériences. Dans notre contribution, nous adaptons un plan d’expériences de type latin hypercube sampling optimisé (LHSO) présenté ci-dessous.

b. Plan hypercube latin simpling

Les plans latins hypercubes (LHS : Latin Hypercube Sampling) sont souvent adaptés pour construire des métamodèles (Viana, 2013) On peut les représenter facilement en deux dimensions, en formant une grille de $N \times N$ cases, pour chaque colonne et chaque ligne, on nécessite pas autant d’évaluations. Le nombre d’échantillonnages possibles du LHS est alors de $(N!)^{p-1}$ (p , est le nombre de paramètres de conception). Cependant, la couverture de l’espace de recherche n’est pas forcément assurée avec ce type de plan, ce qui permet simplement d’obtenir d’une bonne distribution des valeurs prises par chaque paramètre de conception (voir par exemple la Figure 2.17).

Les plans latins hypercubes consistent à échantillonner l’espace de recherche sous forme d’une grille de N niveaux pour chaque variable de conception. Ce type de plan d’expérience permet l’évaluation d’un grand nombre de niveaux pour chacun des paramètres, tout en réduisant le nombre d’expériences N .

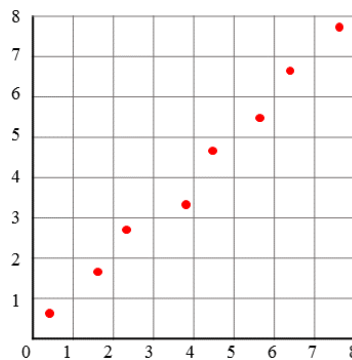


Figure 2.17 : LHS avec une mauvaise couverture de paramètres de conception

Afin d’éviter ce type de problème, il est préférable d’utiliser des plans latins hypercubes optimisés (LHSO), Dans ce cadre-là, il existe différentes techniques qui peuvent être utilisées, parmi elles on cite celle qui est basée sur un critère de la maximisation de la distance minimale entre les points du plan (Morris and Mitchell, 1995). Un exemple de ce type de plan est illustré par la Figure 2.18. Il correspond au type de DoE privilégié dans notre étude.

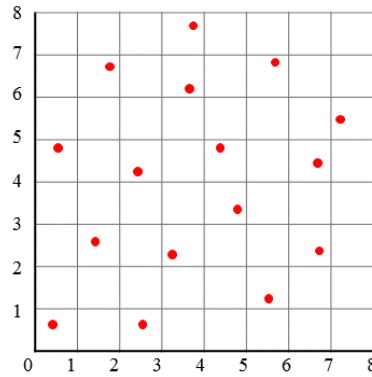


Figure 2.18 : Exemple d'OLHS de 16 points dans l'espace de recherche

c. Krigage

Le krigage est une méthode statistique qui est utilisée pour construire un métamodèle à partir des résultats numériques déterministes. Le krigage se base sur des méthodes de processus stochastique gaussien (Sacks et al., 1989), ses origines remontent aux travaux de D.G. Krige dans les années 1950. Une des idées clés du krigage est que les valeurs de fonction aux points d'apprentissages sont purement déterministes et non susceptibles à des erreurs. Par conséquent, l'incertitude dérivée de résidus au sens des moindres carrés n'a aucune raison évidente d'existence. En fait, il est préférable que les données observées (c.-à-d., l'ensemble de points d'apprentissage) soient parfaitement appariées (c.-à-d., $\tilde{f}(\bar{x}) = \bar{f}(\bar{x})$). Pour cette raison, certains statisticiens (Koehler and Owen, 1996; Sacks et al., 1989) ont proposé d'approcher une relation du type $p = f_i(\bar{x})$ qui est composante de $\bar{f}(\bar{x})$ par une combinaison d'une partie déterministe $R_i(\bar{x})$ et d'une partie stochastique $Z_i(\bar{x})$:

$$\tilde{f}_i(\bar{x}) = R_i(\bar{x}) + Z_i(\bar{x}) \text{ avec } i \in \{1, \dots, N\} \quad (2.3)$$

où $R_i(\bar{x})$ est une fonction polynomiale connue et $Z_i(\bar{x})$ est la réalisation d'un processus stochastique gaussien dont la moyenne est nulle. Le but de $R(\bar{x})$ est d'approximer globalement la tendance principale de $f_i(\bar{x})$. Ce polynôme pourrait être un résultat d'une approche RSM, mais de nombreux auteurs (Jeong et al., 2005; Keane and Nair, 2005) préfèrent l'utilisation d'une constante. Alors $Z_i(\bar{x})$ est censé créer des déviations localisées qui permet au modèle de s'ajuster aux données de points d'échantillonnage. Les principales hypothèses sont basées sur la covariance de $Z_i(\bar{x})$ qui s'écrit comme suit:

$$\text{cov}\left(Z(\bar{x}), Z(\bar{x}')\right) = \sigma_Z^2 S\left(Z_i(\bar{x}), Z_i(\bar{x}')\right) \quad (2.4)$$

où σ_Z^2 est la variance de processus gaussien et $S\left(Z_i(\bar{x}), Z_i(\bar{x}')\right)$ est une fonction de corrélation paramétrée. Cette fonction est spécifiée par l'utilisateur en tenant compte de certaines hypothèses spécifiques (Keane and Nair, 2005). Sacks et al. (Sacks et al., 1989) et Koehler et Owen (Koehler and Owen, 1996) ont présenté plusieurs fonctions de corrélation possibles, bien qu'une fonction gaussienne soit souvent utilisée. Pour cette fonction, la covariance de $Z_i(\bar{x})$ dépend d'un ensemble d'hyperparamètres θ_k :

$$S\left(Z_i(\bar{x}), Z_i(\bar{x}')\right) = \prod_{k=1}^Q \exp\left(-\theta_k \left|\bar{x}_k - \bar{x}'_k\right|^2\right) \quad (2.5)$$

où Q est le nombre d'échantillonnage dans l'ensemble d'apprentissage.

Les hyperparamètres θ_k sont déterminés à partir de l'ensemble d'apprentissage et contrôlent la non-linéarité du modèle. Ils sont généralement déterminés en minimisant l'erreur quadratique moyenne :

$$E\left[\left(\bar{f}(\bar{x}) - f(\bar{x})\right)^2\right] \quad (2.6)$$

Avec une forte contrainte de non-biais indiquant que l'erreur moyenne de l'approximation doit être égale à zéro (Equation (2.7)) :

$$E\left[\bar{f}(\bar{x}) - f(\bar{x})\right] = 0 \quad (2.7)$$

Le krigeage offre deux avantages. Premièrement, il n'y a pas d'erreur dans la prédiction des points d'échantillonnage (Keane and Nair, 2005). Deuxièmement, le modèle fournit une prédiction et une estimation de son erreur.

d. Fonctions à base radiale (RBF)

Les réseaux à fonctions de base radiales (RBF) (Jeong et al., 2005; Keane and Nair, 2005; Maillard and Gueriot, 1997) appartiennent à la même classe de modèles linéaires généralisés comme les ANNs, mais la différence réside dans la composition des neurones. Les réseaux à RBF peuvent approximer n'importe quelle fonction avec un degré d'exactitude arbitraire. Il existe des preuves théoriques montrant que les réseaux à RBF sont capables de fournir une extrapolation efficace (Keane and Nair, 2005). Cependant, il convient de prendre les précautions habituelles lors de l'extrapolation des données. Ils sont parfois préférés aux ANNs

car ils sont plus faciles à comprendre, à interpréter et à mettre en œuvre. La différence principale réside dans le fait que l’entrée de neurone dans la couche cachée (voir la Figure. 2.19) est une fonction à base radiale non linéaire $g:\mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ de la distance Euclidienne $\|\bar{x}-\bar{c}_j\|$ entre le vecteur d’entrée x et le neurone j dans la même couche. Donc, la sortie unidimensionnelle de ces neurones est donnée comme suit :

$$g_j\left(\|\bar{x}-\bar{c}_j\|\right) \quad (2.8)$$

Il existe plusieurs types de la fonction à base radiale telles que : splines linéaire, splines cubique, multiquadratique et gaussienne (Keane and Nair, 2005). Par exemple, la fonction gaussienne est donnée comme suit :

$$G\left(\|\bar{x}-\bar{c}_j\|\right)=\exp\left(-\frac{\|\bar{x}-\bar{c}_j\|^2}{\sigma_j^2}\right) \quad (2.9)$$

où σ_j est un paramètre de forme utilisé pour contrôler le domaine d’influence de la fonction G , qui est centrée autour de c_j . La sortie de neurone de la couche cachée dépend directement des centres les plus proches, elle est déterminée par la somme pondérée de toutes les réponses de neurones de la couche cachée (voir la Figure 2.19), par une fonction de transfert définie comme suit :

$$\bar{f}(x)=\sum_{i=1}^m w_i \exp\left(\frac{\|\bar{x}-\bar{c}_i\|^2}{\sigma_i^2}\right) \quad (2.10)$$

Les paramètres des réseaux à base radiale tels que les centres, les paramètres de forme, les biais et les poids sont déterminés comme l’ANNs.

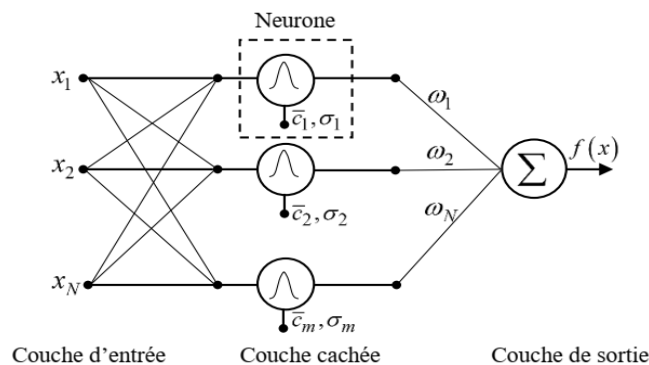


Figure 2.19 : Réseau de neurones de fonctions à base radiale

2.9.3 La technique de Space Mapping

La technique de Space Mapping a été développée par Bandler en 1995 (Bandler et al., 1994), c'est une méthode d'optimisation qui permet de résoudre un problème d'optimisation dans un temps réduit, en utilisant deux modèles du problème (un modèle grossier et un modèle fin). L'implémentation de la technique de Space Mapping dans un processus d'optimisation classique nécessite quatre éléments :

- Un modèle grossier : généralement, c'est un modèle multi-physique qui représente le comportement du produit ou ses composants. Il est utilisé d'une manière récursive par le processus d'optimisation et se caractérise par la rapidité du calcul, mais sa précision n'est pas très bonne.
- Un modèle fin : ce modèle est caractérisé par la précision et la qualité des résultats fournies mais, le temps du calcul est (trop) élevé. Il est considéré comme un modèle de référence et fournit des résultats précis par rapport auxquels le modèle grossier est recalé et affiné. Généralement, ce modèle est construit à partir du calcul numérique, en utilisant les méthodes telles que la méthode d'EF, de CFD, ..., etc.
- Une fonction de Space Mapping (SM) : c'est une transformation mathématique qui permet d'introduire le modèle grossier dans le processus d'optimisation. Elle est utilisée afin de recaler et corriger les sorties du modèle grossier par rapport au modèle fin, cette correction permet d'avoir un modèle de substitution (métamodèle) locale et précis.
- Une méthode d'optimisation : il s'agit d'un algorithme d'optimisation utilisé pour résoudre le problème d'optimisation (formé par le modèle grossier et la fonction SM).

La Figure 2.20 illustre l'implémentation de la technique de Space Mapping dans un processus d'optimisation classique. Le modèle grossier doit avoir deux propriétés essentielles : le temps d'évaluation court et avoir la même tendance de variation que celle du modèle fin. Les deux modèles peuvent être de la même nature (mathématique, éléments finis...) mais pas toujours le cas. Dans certain cas, on peut obtenir le modèle grossier en dégradant le modèle fin, tout en gardant sa représentation physique et sa tendance de variation.

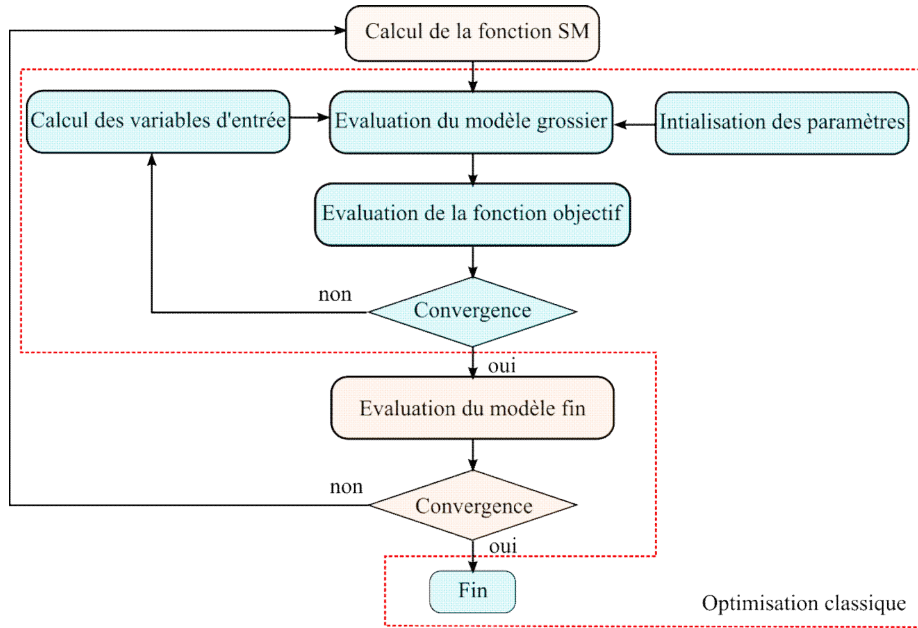


Figure 2.20 : Boucle d’optimisation classique et le Space Mapping

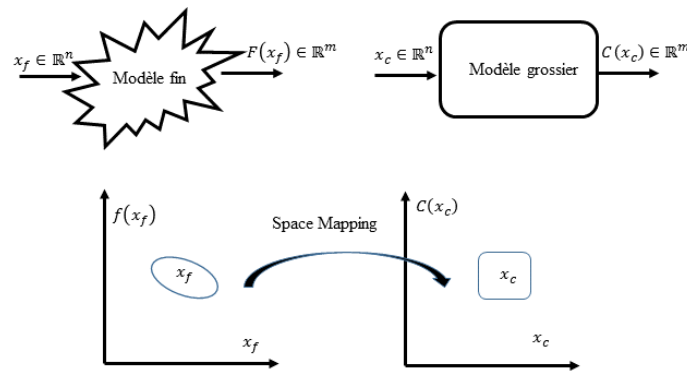


Figure 2.21 : Définition du modèle fin et grossier

Les modèles fin et grossier peuvent être écrits comme suit: $F : x_f \subset \mathbb{R}^n \mapsto y_f \subset \mathbb{R}^m$
 $C : x_c \subset \mathbb{R}^n \mapsto y_c \subset \mathbb{R}^m$ respectivement, où n est le nombre de variables de conception et m est le nombre de fonctions objectifs.

$$x_c = \begin{pmatrix} x_{c1} \\ x_{c2} \\ \dots \\ x_{cn} \end{pmatrix}; x_f = \begin{pmatrix} x_{f1} \\ x_{f2} \\ \dots \\ x_{fn} \end{pmatrix}; y_c = C(x_c) = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_m \end{pmatrix} \text{ et } y_f = F(x_f) = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_m \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Du point de vue de Space Mapping, Le problème d’optimisation général peut être écrit de la façon suivante :

$$\hat{x} = \arg_{x \in \mathbb{R}^n} \min \left(\left\| S \left(F(x_f), C(x_c), x_f, x_c \right) - \bar{y} \right\| \right) \quad (2.12)$$

où $k : \mathbb{R}^m \mapsto \mathbb{R}^m$ S est la fonction de Space Mapping qui lie les deux modèles fin et grossier (Figure 2.21). Il faut noter que l'Equation (2.12) est utilisée uniquement dans le cas de minimisation d'une distance. Elle est aussi applicable à un problème de minimisation en considérant plutôt $\bar{y} = 0$, (\bar{y} est un vecteur représentant les objectifs définis par le cahier des charges).

2.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé différents points concernant le produit et l'activité de conception, en mettant l'accent sur les principaux travaux qui s'intéressent à la phase de conception préliminaire. Ceci nous a amené premièrement à délimiter le contexte de notre étude et, deuxièmement, à proposer une démarche complémentaire aux travaux existants. Cette démarche est une contribution à **l'amélioration de la phase de conception préliminaire par l'implémentation des techniques d'optimisation**. A travers l'étude bibliographique discutée dans ce chapitre, et dans le cadre des objectifs de notre étude, nous avons pu identifier les éléments clés suivants :

- A la fin de la phase de conception préliminaire, une solution de conception finale doit vérifier les objectifs et les performances désirés exprimés dans le cahier des charges. Ses performances sont considérées comme un facteur déterminant de succès. Il est clair que l'utilisation des techniques de l'optimisation dans cette phase permet aux concepteurs d'explorer efficacement les performances potentielles de plusieurs concepts, afin d'en sélectionner un (des) concepts pertinent(s) (Yannou, 2001). Dans la phase de conception architecturale, ces techniques d'optimisation permettent aussi de rechercher la meilleure combinaison des variables d'architecture menant aux performances optimales du produit et qui répond aux différentes contraintes du cahier des charges.
- La plupart des démarches de conception reposent souvent sur une approche de conception itérative de type « Essai-Erreur » pour rechercher et choisir une architecture finale du produit (Le coq, 1992), ce qui est coûteux en termes de temps. Bien que les techniques d'optimisation puissent remplacer cette approche itérative, il y a peu de processus de conception qui en préconise dans la démarche de conception.

- Les méthodes de conception qui sont utilisées dans la phase de conception préliminaire ont éprouvés certaines limites, particulièrement dans la conception des produits complexes. La synergie de ces méthodes avec les techniques d’optimisation dans la phase de conception préliminaire pourrait être nécessaires afin de confronter, entre autres, cette complexité et difficulté de la pratique de conception liée à l’incertitude, le caractère itératif et décisionnel et le manque de connaissances.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder les questions de base relatives à l’application des techniques et méthodes d’optimisation dans le processus de conception.

Chapitre 3 - Etat de l'art : Optimisation en Conception

3. Etat de l’art : Optimisation en Conception

“Le mathématicien ne communique pas ses résultats sous la forme où il les a trouvés ; il les réorganise, il leur donne une forme aussi générale que possible ; il fait de la “didactique pratique” qui consiste à mettre le savoir sous une forme communicable, décontextualisée, dépersonnalisée, détemporalisée.”

Guy Brousseau, 1933

3.1 Introduction

De nos jours, les techniques d’optimisation sont devenues indispensables dans plusieurs domaines de l’ingénierie, de l’économie et de l’industrie. Dans la littérature, on peut noter une croissance spectaculaire des travaux de recherche relatifs aux techniques d’optimisation et leurs applications. Dans le domaine industriel et plus particulièrement en ingénierie de conception, l’optimisation joue un rôle primordial, dans la mesure où l’objectif de son application n’est pas resté focaliser sur la minimisation du coût ou l’amélioration de certaines performances, mais il s’inscrit dans une logique de développement durable en essayant d’apporter des réponses aux questions de préservation des ressources disponibles en agissant sur tout le cycle de vie du produit.

3.2 Optimisation en conception

L’optimisation est un processus qui cherche les meilleures solutions possibles d’un problème donné, dans un domaine de recherche délimité par un ensemble de contraintes. En ingénierie de conception, ce processus est souvent pratiqué manuellement. Il implique une démarche itérative pour identifier les meilleurs paramètres de conception du produit (Roy et al., 2008), en s’appuyant toujours sur les connaissances d’experts (*expert based optimization*) ou l’adoption de plan d’expériences précis, ce qui nécessite en général un temps d’exécution relativement élevé. Devant la complexité croissante de l’activité de conception causée par la globalisation et des besoins des utilisateurs, le manque de connaissances durant les phases amont de conception, ce processus classique éprouvait certaines limites, surtout dans l’exploration complète de l’espace de recherche. Ainsi, l’optimisation algorithmique

contemporaine cherche à combler ces limites par une automatisation de ce processus traditionnel.

En conception, l’optimisation peut être introduite dès que le cahier des charges fonctionnel CdCF est défini. Son utilisation conjointement avec les outils CAX (Computer-Aided Design et Computer-Aided Engineering) donne beaucoup d’avantages aux concepteurs, pour améliorer le processus de conception d’un produit, de la phase conceptuelle jusqu’à la phase de conception détaillée (Rao, 2009).

Dans le cas de conception des produits mécaniques, on peut distinguer deux types de stratégies d’optimisation couramment utilisées (Allaire and Schoenauer, 2007; Laurent, 2013) : l’optimisation de forme et l’optimisation paramétrique.

○ **Optimisation de forme** : ce type d’optimisation consiste à trouver la forme d’une structure soumise à différents types de chargements (mécanique, aérodynamique ou thermique). Dans ce type, les variables d’optimisation sont la forme de la structure elle-même. L’optimisation de forme est essentielle dans de nombreuses applications, mais reste plus compliquée relativement à l’optimisation traditionnelle, où les variables d’optimisation sont les propriétés mécaniques de matériaux. Parmi les problèmes d’optimisation de forme, on peut distinguer trois grandes catégories, du plus “facile” au plus “difficile” (cf. Figure 3.1), optimisation de : (a) forme paramétrique, (b) de forme géométrique. (c) topologique.

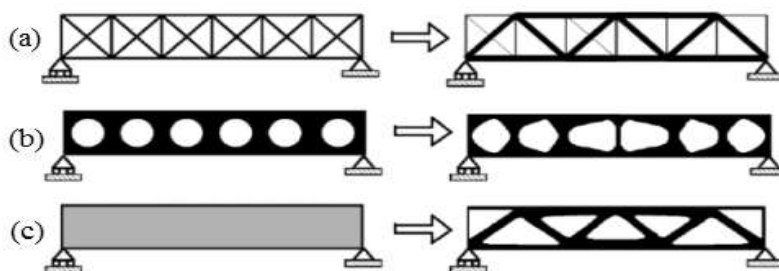


Figure 3.1 : Différents types d’optimisation de forme. (a) Optimisation de forme paramétrique, (b) Optimisation de forme géométrique. (c) Optimisation topologique (Bendsøe and Sigmund, 2013)

- a. **L’optimisation de forme paramétrique** : où les formes sont paramétrées par un nombre réduit de variables (par exemple, une épaisseur, un diamètre, des dimensions), ce qui limite considérablement la variété de formes possibles.
- b. **L’optimisation de forme géométrique** : à partir d’une forme initiale, on s’autorise des variations de la position des frontières de la forme (sans toutefois changer la topologie de la forme).

c. **L’optimisation de forme topologique** : où l’on cherche, sans aucune restriction explicite ou implicite, la meilleure forme possible quitte à changer de topologie.

o **Optimisation paramétrique** : l’optimisation paramétrique s’utilise dans un cadre beaucoup plus général. L’objectif est de chercher les meilleurs paramètres de conception au sens de certains critères (le coût, le poids, etc.). Dans le cas de conception mécanique, ce type d’optimisation ne se limite pas à l’optimisation de forme, mais il peut s’étendre aux autres facteurs (propriétés mécaniques de matériau).

3.3 Formalisation de problème d’optimisation en conception

Dans la conception du produit, dès que le cahier des charges fonctionnel est défini les concepteurs peuvent faire appel aux techniques d’optimisation. Ce cahier des charges est formulé globalement par différents objectifs (économiques, performances, ..., etc.) et contraintes (physiques, industrielles, normatives). En effet, l’optimisation joue un rôle primordial dans le processus de conception, elle sert à explorer d’une façon automatique l’espace de conception, afin d’aboutir à une solution optimale satisfaisant les besoins et les exigences exprimés dans le cahier des charges. Les ingénieurs traduisent généralement le problème de conception en un problème mathématique significatif bien que, dans la plupart des cas, cette formulation n’est pas unique.

Généralement, le processus d’optimisation en conception se déroule en quatre étapes (Figure 3.2), qui sont : 1) l’analyse du cahier des charges, 2) la modélisation du problème d’optimisation, 3) la sélection ou le développement d’une méthode (nouvelle) d’optimisation adéquate, 4) l’exploitation et l’analyse des solutions obtenues (Lei et al., 2016). L’étape de modélisation consiste à déterminer de façon précise les objectifs, les contraintes et les variables de conception appropriées au problème d’optimisation, c’est une étape cruciale et difficile et dépend de la complexité du produit et des connaissances des concepteurs.

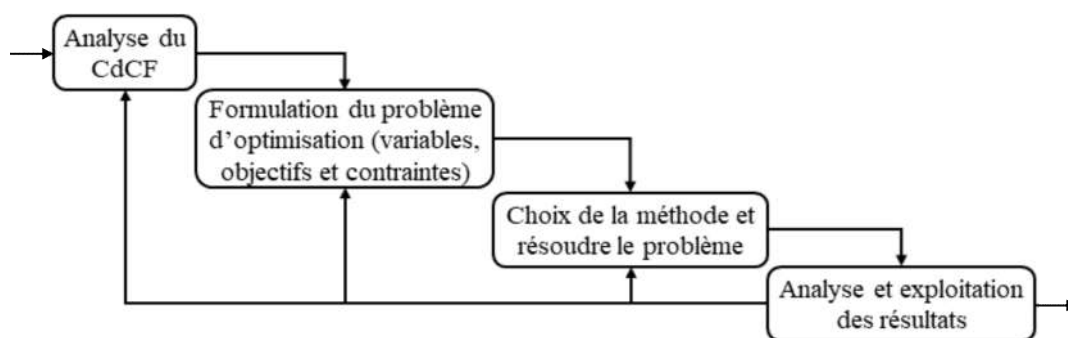


Figure 3.2 : Formulation et résolution d’un problème d’optimisation en conception

Un problème de conception optimale mono-objectif peut être formulé mathématiquement comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{x \in \Omega} f(x) \\ \text{s.c.} \\ g_j(x) \leq 0; j = 1, \dots, l \\ h_k(x) = 0; k = 1, \dots, p \\ x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}; i = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (3.1)$$

où, n est la dimension de l’espace de recherche ; $g_j(x)$ est la $j^{\text{ème}}$ contrainte d’inégalité, $h_k(x)$ est la $k^{\text{ème}}$ contrainte d’égalité et $f(x)$ est la fonction objectif (coût).

Pour les problèmes multi-objectifs plusieurs critères sont optimisés simultanément. Dans ce cas, on cherche à optimiser un vecteur de m fonctions objectifs et la formulation devient comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{x \in \Omega} f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))^T \\ \text{s.c.} \\ g_j(x) \leq 0; j = 1, \dots, l \\ h_k(x) = 0; k = 1, \dots, p \\ x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}; i = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (3.2)$$

3.4 Classification des problèmes d’optimisation

Avant d’aborder le traitement d’un problème d’optimisation, il est important d’identifier sa nature afin de choisir la (les) technique(s) de résolution les plus appropriées. Dans cette section, nous allons présenter une classification actualisée de celle développée par Roy et al. (Roy et al., 2008). La classification se fera selon plusieurs éléments expliqués ci-dessous.

Variables de conception : La majorité des problèmes d’optimisation en conception sont multidimensionnels et leur formulation est une activité complexe qui nécessite des connaissances d’experts dans le domaine. Le choix de la méthode de résolution adéquate et la qualité de solution(s) optimale(s) sont généralement très affectés par la nature et le nombre de variables de conception considérées. Ces variables peuvent être indépendantes du temps, c’est le cas de l’optimisation statique et prennent dans ce cas des valeurs entières, discrètes, réelles

ou mixtes. Ces variables peuvent être aussi dépendantes du temps, c’est le cas dans le contexte de l’optimisation dynamique (calcul des variations).

Existence de contraintes : Dans le contexte de la conception, les contraintes définissent les limites fonctionnelles du système ou des lois régissant les phénomènes physiques. Elles peuvent se présenter sous formes linéaires ou non-linéaires, de type égalité ou inégalité. Leur présence rend le problème d’optimisation difficile, affecte la phase de traitement et influence significativement le temps de résolution.

Fonctions objectifs : représentent la forme explicite des performances du système à optimiser (minimiser ou maximiser). Elles sont utilisées pour évaluer les solutions tirées de l’espace de conception. Leur nature et nombre sont des facteurs déterminants de la complexité du problème d’optimisation considéré. En outre, ces fonctions peuvent être classifiées comme des fonctions séparables, non séparables, linéaires, non linéaires, dérivables, non dérivables, convexes, non convexes, monomodales ou multimodales.

Le problème d’optimisation devient très complexe quand le nombre des fonctions objectifs dépasse dix (Corne and Knowles, 2007). Les fonctions objectifs peuvent prendre des formes quantitatives ou qualitatives. Les fonctions quantitatives sont basées généralement sur des modèles analytiques, empiriques (expérimentales) ou simulations numériques (FEM, CFD). Les fonctions qualitatives sont généralement invoquées dans les domaines de la fabrication, l’ergonomie et l’esthétique (des critères non quantifiables).

Domaine d’étude : la majorité des problèmes abordés en conception optimale sont de nature multi-physiques, ce qui nécessite réellement des approches d’optimisation multidisciplinaire (Tomiyama et al., 2007). Le couplage entre les domaines physiques et le déroulement du processus d’optimisation est souvent effectué en parallèle, et parfois en mode distribué, comme c’est le cas dans le domaine de la conception aéronautique, le processus d’optimisation devient ainsi plus complexe et nécessite beaucoup d’efforts.

Environnement d’optimisation : l’environnement de conception est caractérisé par la présence d’incertitudes (Yang et al., 2007) qui parviennent généralement de différentes sources (section 2.6), elles traduisent le manque de connaissances sur l’espace de conception et l’optimum recherché. En effet, les variables de conception sont affectées par les imperfections des procédés de fabrication, des moyens de mesure, des modèles de comportement adoptés et des approximations apportées. Par conséquent, il est important d’impliquer les concepteurs et les

experts dans le processus de conception et d’optimisation d’un système afin d’augmenter la fiabilité du processus d’optimisation.

Tableau 3.1 : Classification des problèmes d’optimisation

Caractéristique		Propriété	Classification du problème d’optimisation
Nombre de variables		=1	monovariante, recherche linéaire
		>1	à plusieurs variables, multidimensionnelle
Type des valeurs admissibles pour les variables d’optimisation		Nombres réels continus	continue
		Nombres réels continus + entiers	mixte
		Entiers en permutation	Combinatoire, discrète ou en nombres entiers
Nature des Fonctions du problème	objectif	linéaire/ X	Linéaire
	contraintes	linéaire/ X	
	objectif	quadratique/X	quadratique
	contraintes	linéaire/ X	
	objectif	non linéaire/ X	Non linéaire (il suffit qu’une seule condition soit vérifiée)
	contraintes	non linéaire/ X	
	objectif	continue / x (ou pas)	différentiable / non différentiable
	contraintes	crée un ensemble convexe	Programmation convexe
objectif	convexe		
Nature physique du problème		Fonctionnelles (X(t), u(t)), problème à plusieurs phases	Commande optimale, Calcul des variations,...
		Autre	Autre
Nature des variables d’optimisation		Variables stochastiques	Programmation stochastique
		Variables déterministes	Programmation déterministe
Nombre de fonctions objectifs		1	Mono-objectif
		>1	Multi-objectif
Formulation du problème		Avec contraintes	Sous contraintes (pb contraint)
		Sans contraintes	Sans contraintes (pb non contraint)

3.5 Les méthodes d’optimisation monoobjectif

Les problèmes d’optimisation qui se posent en conception sont de natures très variées et le choix de la méthode d’optimisation appropriée dépend fortement de la formulation du problème considéré. En Effet, la nature des variables de conception (continues, discrètes ou

mixtes) ainsi que celle de la fonction coût (linéaire, quadratique ou non-linéaire), la présence ou non des contraintes, l’existence ou non de plusieurs objectifs, sont tous des facteurs affectant le choix de la technique d’optimisation. La Figure 3.3 présente une classification des principales méthodes d’optimisation mono-objectif. Deux grandes familles de méthodes se partagent la solution de ces problèmes : les méthodes combinatoires et les méthodes continues. Sous ces deux intitulés, plusieurs techniques ont été développées dans la littérature. En fait, les méthodes d’optimisation de problèmes continus ne peuvent pas résoudre efficacement les problèmes combinatoires. De même, les méthodes dédiées aux problèmes sans contraintes ne sont pas directement applicables à ceux avec contraintes. En outre, il n’existe pas d’algorithme efficace pour tous les problèmes ; quand un algorithme progresse sur une classe de problèmes, il régresse sur une autre. Dans la suite, nous allons présenter brièvement les méthodes d’optimisation les plus utilisées pour trouver l’optimum global d’un problème d’optimisation de conception. En particulier on parlera des méthodes déterministes (locales) et des méthodes stochastiques ou métaheuristiques (globales).

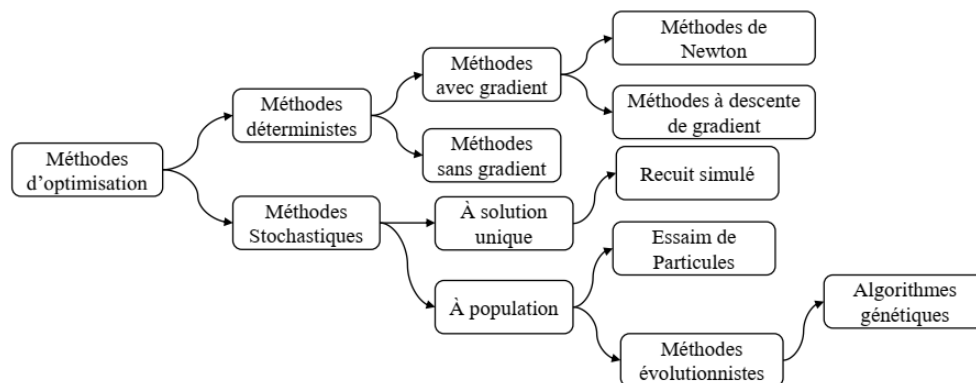


Figure 3.3 : Classification des méthodes d’optimisation

3.5.1 Méthodes déterministes

Les méthodes déterministes (locales) se caractérisent par une exploration méthodique de l’espace de recherche selon un processus déterministe prédéfini. Elles reproduisent la même solution pour le même jeu de paramètres d’entrée. Une première classe qui peut être introduite dans ce cadre-là est celle des méthodes analytiques (appelées également indirectes) qui cherchent l’optimum en résolvant un système d’équations (généralement non-linéaires) issus de conditions dites d’optimalité (nullité du gradient, conditions de KKT, ...). L’utilisation de telles méthodes est généralement réservée aux cas des problèmes relativement simples. Une deuxième classe de méthodes qui appartient à cette catégorie est des méthodes dites du gradient (méthodes numériques directes). Ces méthodes génèrent un ensemble d’itérations sur la base de directions de recherche synthétisées sur la base de gradients et de Hessiens des

fonctions objectif et contraintes. Malheureusement ces méthodes ont le plus souvent un comportement local, c.-à-d. qu'elles convergent vers l'optimum le plus proche de la solution initiale. Les méthodes déterministes peuvent être très efficaces pour des problèmes de grande taille, souvent multi-modaux. Dans, ce cas, la probabilité de trouver l'optimum global dépend essentiellement d'une bonne connaissance du problème.

Par ailleurs, les méthodes déterministes peuvent être classées selon l'ordre qui caractérise les informations utilisées pour mettre en œuvre la stratégie de recherche. Ainsi, on distinguera les méthodes du zéro ordre, premier ordre et du second ordre.

Les algorithmes d'optimisation d'ordre zéro sont ceux qui ne requièrent que l'évaluation de la fonction objectif pour explorer l'espace de recherche. De ce fait, ce genre de techniques est particulièrement intéressant pour l'optimisation des fonctions non dérivables ou nécessitant un effort calculatoire important pour l'obtention des dérivées. A titre d'exemple, nous pouvons citer :

- Les méthodes de Powell et de Nelder-Mead.
- Les méthodes énumératives intelligentes comme celle de séparation et d'évaluation (Branche and bound)

Par ailleurs, les méthodes d'optimisation du premier ordre utilisent le gradient ou une approximation du gradient pour définir les directions de recherche. C'est le cas notamment des méthodes de la plus grande pente et des gradients conjugués. Enfin, les méthodes d'optimisation du second ordre utilisent, en plus du gradient, le Hessien de la fonction objectif (ou une approximation) pour construire les éléments de recherche. Parmi les méthodes du 2^{ème} ordre, nous citons la méthode de Newton et les méthodes quasi-Newtoniennes.

3.5.1.1 Méthodes à descente de gradient

Les méthodes à descente de gradient sont les plus anciennes parmi les méthodes d'optimisation, elles nécessitent que la fonction objectif est définie analytiquement et différentiable dans l'espace de recherche, leur processus de recherche est itératif. Pour chaque itération il détermine la direction du gradient $\nabla f(x)$ et fait un déplacement à la prochaine itération dans la direction opposée en décroissant la fonction objectif (dans le cas de minimisation). Ces méthodes présentent deux inconvénients : 1) converger facilement vers des minima locaux si la fonction objectif est multimodale, donc le choix de la position initiale est important, 2) diverger rapidement si la fonction objectif est bruitée (car le déplacement

dépend du gradient). L’Algorithme 3.1 illustre le principe de base de fonctionnement d’une méthode à descente de gradient.

Algorithme 3.1 : Algorithme de la plus grande descente

Initialize: $x_1 \in \mathbb{R}^n, i \leftarrow 1$

1 While stopping criterion not verified **do**

2 $\alpha_i = \arg \min_{\alpha \in \mathbb{R}^+} f(x_i, \alpha \nabla f(x_i))$

3 $x_{i+1} \leftarrow x_i - \alpha_i \nabla f(x_i)$

4 $i \leftarrow i + 1$

α_i , définit le pas de l’algorithme à chaque itération, selon lequel on peut distinguer plusieurs variantes dans la littérature, comme l’algorithme de gradient à pas constant, l’algorithme de gradient à pas optimal (plus grande pente) (Cauchy, 1847) et l’algorithme de gradients conjugués (Hestenes and Stiefel, 1952).

3.5.1.2 Méthodes de Newton

Les méthodes de Newton consistent à annuler le gradient de la fonction objectif ($\nabla f(x) = 0$), nous présentons brièvement deux méthodes. La première est la méthode de Newton, son principe est que à chaque itération k , une approximation quadratique de la fonction objectif f au voisinage du point x_k est construite et minimisée. Elle requière certaines hypothèses telles que : la fonction objectif soit continue et de classe C^2 , et le Hessien $\nabla^2 f(x)$ soit inversible. Cette méthode cherche à résoudre itérativement la relation suivante :

$$x_{k+1} = x_k - \left[\nabla^2 f(x_k) \right]^{-1} \nabla f(x_k) \quad (3.3)$$

L’inconvénient de cette méthode est que, à chaque itération du calcul, l’inversion de la matrice hessienne est nécessaire, ce qui engendre un temps d’exécution trop élevé. La deuxième est la méthode Quasi-Newton, qui exploite le gradient de la fonction objectif uniquement, l’inversion de la matrice hessienne est calculé par les méthodes DFP (Davidon, 1991; Fletcher and Powell, 1963) ou BFGS (Broyden, 1970; Fletcher, 1970; Goldfarb, 1970; Shanno, 1970).

3.5.2 Les méthodes stochastiques (méta-heuristiques)

Une méthode stochastique est une méthode basée entièrement ou en partie sur un processus aléatoire. Elle utilise uniquement les valeurs de la fonction coût (méthode d'ordre zéro) pour trouver une solution approchée de l'optimum global. Elle est particulièrement recommandée dans le cas de problèmes discontinus ou fortement multimodaux pour éviter le piégeage dans les minima-locaux. La convergence de l'algorithme est assurée soit par une heuristique (méthode de Monte-Carlo) soit par une méta-heuristique (algorithmes évolutionnaires, recuit simulé, recherche tabou, colonies de fourmis, etc.). Les techniques stochastiques d'optimisation peuvent être classées globalement en deux catégories, des méthodes stochastiques à population et des méthodes stochastiques à parcours.

Les méta-heuristiques les plus classiques sont celles fondées sur la notion de parcours. Dans cette optique, l'algorithme fait évoluer une seule solution sur l'espace de recherche à chaque itération, elle est plutôt axée sur l'exploitation de l'espace de recherche. La notion de voisinage est alors primordiale. Les plus connues dans cette classe sont le recuit simulé, la recherche avec tabous, la recherche à voisinage variable, la méthode GRASP ou encore les méthodes de bruitage. Par contre, dans les méthodes à population, à chaque itération, la méta-heuristique manipule un ensemble de solutions en parallèle. Elle est plutôt exploratoire et permet une meilleure diversification de l'espace de recherche. On peut citer les algorithmes génétiques, l'optimisation par essais particuliers et les algorithmes de colonies de fourmis.

3.5.2.1 Les méta-heuristiques à solution unique

Cette catégorie, commence à partir d'une solution initiale choisie aléatoirement dans l'espace de recherche et converge progressivement vers une solution optimale en formant une trajectoire dans l'espace de recherche (Boussaïd et al., 2013), cette catégorie englobe essentiellement les méthodes suivantes : la méthode de recuit simulé, la méthode de recherche tabou, la méthode de descente et la méthode GRASP.

a. La méthode du recuit simulé

La méthode du recuit simulé (*Simulated annealing*) a été proposée par Kirkpatrick (Kirkpatrick et al., 1983) en 1983 et indépendamment par Černý (Černý, 1985) en 1985. Le principe de cette méthode est inspiré d'un processus utilisé en métallurgie, qui est le recuit physique en s'appuyant essentiellement sur les lois énoncées par Boltzmann en thermodynamiques. Le recuit en métallurgie est un processus qui consiste à réorganiser la structure cristallographique des matériaux par des cycles alternés de refroidissement lent et de réchauffage du matériau, tout en conduisant à minimiser son énergie. A chaque cycle, le

matériau est chauffé et maintenu à haute température jusqu'à l'équilibre thermodynamique s'atteint, puis d'abaisser cette température lentement afin d'obtenir une structure à l'état solide bien ordonnée et d'énergie minimale, tout en évitant les états métastables (caractéristiques des minima locaux de l'énergie).

Ce processus est transposé en optimisation pour résoudre des problèmes d'optimisation, dans lesquels la fonction objectif est assimilée à l'énergie d'un matériau, est alors minimisée à l'aide d'une température effective introduite à l'algorithme, est considérée comme son paramètre contrôlable.

L'algorithme démarre à partir d'une solution initiale générée de manière aléatoire. A chaque itération, une autre solution s' se génère aléatoirement dans le voisinage de la solution actuelle s . La solution s' est acceptée si sa performance est meilleure à celle de la solution courante s (i.e., $f(s') \leq f(s)$). Sinon, la solution s' est acceptée avec une probabilité $\exp(\Delta f/T)$ qui dépend de deux facteurs : 1) l'importance de la dégradation de la fonction objectif ($\Delta f = f(s') - f(s)$) – des dégradations faibles sont plus favorables à l'acceptation ; 2) la température T – une température élevée signifie que la probabilité d'accepter des dégradations est plus grande.

Dans la méthode SA, la température contrôle les deux mécanismes d'*intensification* et de *diversification*. Elle décroît durant le processus de recherche, de manière qu'à la fin de l'algorithme cette recherche s'intensifie. L'idée est de diminuer progressivement et lentement la chance d'acceptation des solutions dégradant la fonction objectif.

3.5.2.2 Les méta-heuristiques à base de population

Les méta-heuristiques à population de solutions consistent à améliorer une population d'individus, au fur et à mesure des itérations, contrairement aux méta-heuristiques de trajectoire (cités ci-dessus), nous allons présenter dans cette section deux catégories qui sont largement utilisées en l'ingénierie de conception. Il s'agit des algorithmes évolutionnaires, qui sont une catégorie d'algorithmes basée sur la théorie d'évolution par la sélection naturelle de Darwin (Darwin, 1956), et les algorithmes d'intelligence en essaim qui sont inspirés des phénomènes naturels.

a. Les algorithmes évolutionnaires

Les algorithmes évolutionnaires AEs (EC : Evolutionary Computation en anglais), qui regroupent une famille d'algorithmes sont inspirées de la théorie de l'évolution darwinienne

afin de résoudre des problèmes complexes divers (Boussaïd et al., 2013). Selon la théorie du naturaliste Charles Darwin, énoncée en 1859 (Darwin, 1956)), l’évolution des espèces est la conséquence de la conjonction de deux phénomènes qui sont : 1) la sélection naturelle, favorisant les individus les plus adaptés à leur milieu à survivre et à se reproduire, laissant une descendance qui transmettra leurs gènes, 2) la présence de variations non dirigées parmi les traits génétiques des espèces (mutations).

ECs regroupent un ensemble de méthodes méta-heuristiques telles que les algorithmes génétiques (Holland, 1975), les stratégies d’évolution (Rechenberg, 1965), la programmation évolutive (Fogel, 1991), et la programmation génétique (Koza and Koza, 1992). La Figure 3.4 montre le principe général du fonctionnement d’algorithmes évolutionnaires.

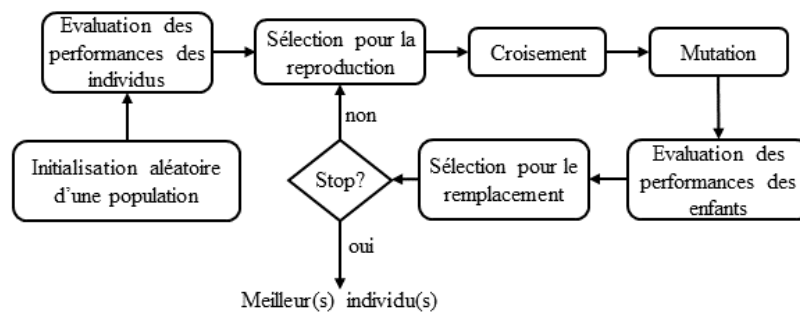


Figure 3.4 : Principe d’algorithmes évolutionnaires (EA) (Dréo et al., 2003)

ECs commencent à partir d’une population initiale générée aléatoirement dans l’espace de recherche. Ensuite, à chaque itération (génération) de l’algorithme une autre population est générée et constituée de plusieurs individus, qui représentent des solutions potentielles du problème d’optimisation, est capable de se reproduire pour les prochaines itérations. Cette population est susceptible à des variations génétiques et à la contrainte de l’environnement étant simulée à l’aide de la fonction d’adaptation, cette contrainte provoque la sélection naturelle des individus, c.à.d. la survie du plus fort individu. Les opérateurs de variation (croisement et mutation) sont appliqués avec une probabilité définie aux individus sélectionnés (parents), ils génèrent de nouveaux descendants (enfants ou offsprings), la mutation et le croisement désignent les opérateurs unaires et binaires (ou n-aires) respectivement. Les individus obtenus par ces opérateurs forment alors une nouvelle population (parents). Le processus d’évolution est itératif, et se termine lorsque les conditions d’arrêt soient vérifiées.

a.1 Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (GA : Genetic Algorithms en anglais) sont la méthode la plus populaire et largement utilisée des EAs. Leurs origines remontent au début des années 1970, avec les travaux de John Holland et ses élèves à l’Université du Michigan en étudiant les systèmes adaptatifs (Holland, 1975). Par la suite, en 1989 D. E. Goldberg (Goldberg and Deb, 1991) a publié un ouvrage de référence sur ces algorithmes qui a fortement participé à leur essor. Ces algorithmes se détachent en grande partie par la représentation des données du génotype, initialement sous forme d’un vecteur binaire et plus généralement sous forme d’une chaîne de caractères.

Pour chaque étape de GA, il y a un opérateur associé qui décrit la façon de manipuler les individus :

- Opérateur de sélection : Pour sélectionner les individus qui sont plus favorables à se reproduire. Il existe plusieurs techniques de sélection, les plus utilisées sont la sélection par tirage à la roulette (roulette-wheel selection), la sélection par tournoi (tournament selection) et la sélection par rang (ranking selection), etc (Blickle and Thiele, 1995; Goldberg and Deb, 1991).
- Opérateur de croisement : consiste à combiner les caractéristiques d’un ensemble d’individus parents (généralement deux), qui sont préalablement sélectionnés en générant de nouveaux individus enfants. Il existe plusieurs types d’opérateur de croisement, par exemple le croisement en un point, le croisement en n-points ($n \geq 2$) et le croisement uniforme (cf. Figure 3.5).
- Opérateur de mutation : consiste à modifier aléatoirement une partie du génotype des individus enfants (descendants).
- Opérateur de remplacement : consiste à sélectionner les survivants. Autrement dit, il remplace certains des parents par certains des enfants. Le cas plus général est de choisir les individus de la population, suivant leurs performances, pour former une nouvelle population de même taille que celle à l’itération précédente.

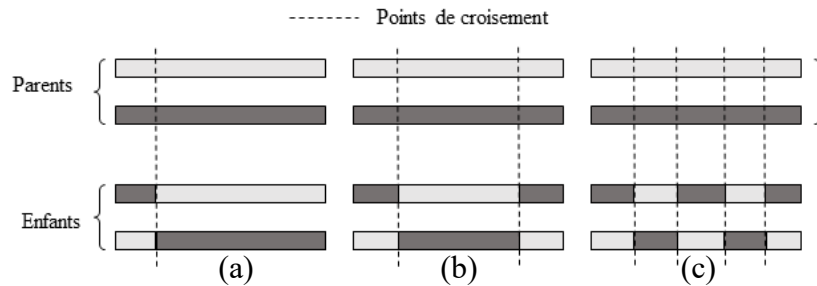


Figure 3.5 : Exemples de croisement : (a) croisement simple en un point, (b) croisement en deux points, (c) croisement uniforme

b. L’intelligence en essaim

L’intelligence en essaim (SI : Swarm Intelligence en anglais) a été développée dans le cadre de la modélisation mathématique et informatique des phénomènes biologiques rencontrés en éthologie (Bonabeau et al., 1999). Elle englobe un ensemble de méthodes à base de population, chaque individu dans la population représente un agent simple (entité capable d’exécuter certaines opérations), qui peut interagir localement avec les autres agents et avec son environnement. Ces agents, dont la capacité individuelle est très restreinte, qui peuvent conjointement effectuer de nombreuses tâches complexes pour assurer leur survie. Bien qu’il n’existe pas de structure de contrôle centralisée qui indique la manière dont les agents individuels devraient se comporter, les interactions locales entre ces agents amènent souvent à l’émergence d’un comportement collectif global et auto-organisé.

b.1 L’optimisation par Essaim particulière

L’optimisation par essaim particulière (PSO : Particle Swarm Optimization en anglais) a été développée en 1995 par Russel Eberhart et James Kennedy (Kennedy and Eberhart, 1995), mais ses origines remontent aux travaux de C. Reynolds (Reynolds, 1987) et de Heppner et Grenander (Heppner and Grenander, 1990) qui ont développé des modèles mathématiques permettent de simuler un vol de groupe d’oiseaux et bancs de poissons. Cette méthode est inspirée des déplacements collectifs remarqués chez certains animaux sociaux comme les poissons et les oiseaux migrateurs ayant aptitude à imiter les comportements réussis qu’ils observent dans leur entourage, tout en y apportant leurs modifications personnelles.

L’essaim particulière représente une population d’agents appelés « particules ». Chaque particule est modélisée comme une solution potentielle du problème d’optimisation, elle parcourt l’espace de recherche, en cherchant de l’optimum global du problème.

Son déplacement dans l’espace de recherche, est influencé généralement par trois composantes (cf. Figure 3.6) : 1) une composante physique : la particule tend à suivre sa

direction actuelle de déplacement ; 2) une composante cognitive : la particule tend à s'orienter vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ; 3) une composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

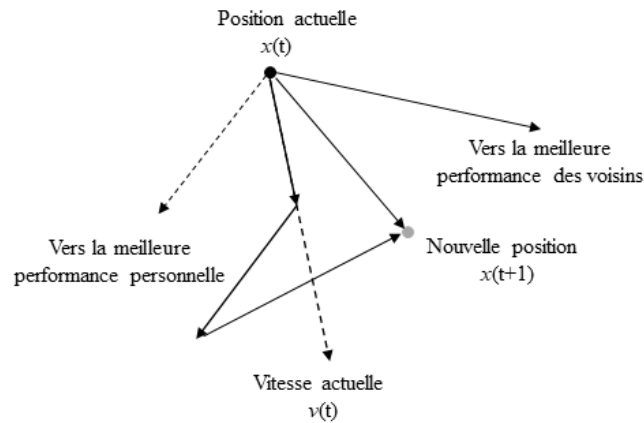


Figure 3.6 : PSO-Déplacement d'une particule dans l'espace de recherche

Le voisinage est défini spatialement par la détermination de la distance euclidienne entre les positions de deux particules, et qui permet de déterminer la position de l'individu dans l'essaim (Kennedy and Martins, 2014). Chaque particule i de l'essaim est caractérisée dans l'espace par vecteur de position x_i et par un vecteur de changement de position v_i (vitesse). Chaque particule dispose d'une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure solution découverte par le passé, noté p_i (personal best) et de la meilleure position connue de son voisinage, notée p_g (global best). À chaque itération, chaque particule se déplace dans l'espace de recherche en suivant un vecteur, calculé comme somme pondérée des vecteurs représentant sa vitesse courante $v_i(t)$, ainsi que sa p_i et sa p_g (cf. Equation (3.4) et Figure 3.6). Sa nouvelle vitesse $v_i(t+1)$ est déterminée de la façon suivante :

$$\vec{v}_i(t+1) = \omega \vec{v}_i(t) + c_1 \varphi_1 (\vec{p}_i(t) - \vec{x}_i(t)) + c_2 \varphi_2 (\vec{p}_g(t) - \vec{x}_i(t)) \quad (3.4)$$

où $i = 1, \dots, n$, et n est la taille de la population (taille de l'essaim) ; ω est le coefficient d'inertie permet de contrôler l'influence de la vitesse obtenue au pas précédent (Shi and Eberhart, 1998). Un grand coefficient d'inertie provoque une grande amplitude de mouvement tandis qu'un petit coefficient d'inertie concentre la recherche sur un petit espace ; φ_1 et φ_2 sont deux paramètres aléatoires formés uniformément dans l'intervalle $[0,1]$, c_1 et c_2 sont deux constantes représentant une accélération positive. Elles correspondent respectivement à

la composante cognitive et sociale du déplacement. La position de chaque particule dans l’espace est mise à jour à chaque itération par l’équation suivante :

$$\bar{x}_i(t+1) = \bar{x}_i(t) + \bar{v}_i(t) \quad (3.5)$$

Les particules peuvent passer éventuellement à côté de l’optimum sans le détecter, à cause de leur déplacement rapide dans l’espace de recherche. Afin de remédier ce problème, une vitesse maximale doit être fixer, noté v_{\max} , de telle sorte que chaque composante de \bar{v}_i appartient toujours dans l’intervalle $[-v_{\max}, +v_{\max}]$ (Eberhart et al., 1996). Le choix de v_{\max} est une tâche délicate car ce paramètre influence énormément sur la balance *exploration/exploitation*. Un coefficient de constriction χ peut être utilisé en permettant de s’affranchir de la définition de la vitesse maximale v_{\max} (Clerc and Kennedy, 2002).

3.6 L’optimisation multi-objectif

Les problèmes d’optimisation mono-objectif ne cherchent à optimiser qu’une seule fonction objectif à la fois. Cependant, la plupart des cas réels en conception des produits, sont en fait des problèmes multi-objectifs, dans lequel plusieurs critères sont optimisés simultanément. Ces critères, dans la majorité des cas sont antagonistes (par exemple, on cherche à maximiser la fiabilité d’un produit tout en minimisant le coût de développement). Ainsi, il n’existe pas une solution unique au problème, mais un ensemble de solutions, qui représentent finalement des compromis entre les différentes fonctions objectifs, L’optimisation multi-objectif (dites aussi multicritères ou vectorielle) trouve ses racines au cours du XIXème siècle dans les travaux en économie d’Edgeworth (Edgeworth, 1885) et de Pareto (Pareto, 1896).

Dans la Figure 3.7, Y est l’espace des objectifs (ensemble des objectifs réalisables), qui représente l’image de l’espace de décision X (ensemble des points réalisables) par la fonction objectif.

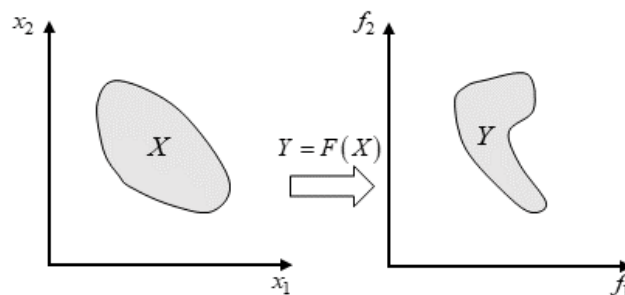


Figure 3.7 : Correspondance entre l’espace de décision et l’espace des objectifs

3.6.1 Dominance de Pareto et optimalité

L’optimisation multi-objectifs a pour objectif principal de trouver une solution optimale au problème décrit en Equation (3.2). Pour résoudre ce problème, la plupart des algorithmes d’optimisation multi-objectifs modernes utilisent le concept de dominance de Pareto. Le principe de dominance consiste à comparer deux solutions afin de déterminer si l’une d’elles domine l’autre ou non. La dominance de Pareto est définie comme suit :

Définition 3.1 (*Pareto dominance*)

Soit x_a et x_b sont deux solutions réalisables différentes du problème d’optimisation multi-objectif. Alors x_a domine x_b (notée $x_a \leq x_b$) si et seulement si:

$$f_i(x_a) \leq f_i(x_b) \quad \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (3.6)$$

et

$$\exists k \in \{1, \dots, m\} \quad f_k(x_a) < f_k(x_b) \quad (3.7)$$

Définition 3.2 (*solution Pareto-optimal*)

Une solution x^* est dite Pareto-optimal s’il n’existe pas une solution qui la domine:

$$\nexists x \in \Omega : x \leq x^* \quad (3.8)$$

Définition 3.3 (*ensemble Pareto-optimal*)

Pour un problème d’optimisation multi-objectif donné, l’ensemble X^* de toutes les solutions de Pareto-optimal, est dites l’ensemble de Pareto-optimal et définies comme suit :

$$X^* = \left\{ \exists x^* \in \Omega / \nexists x \in \Omega, f(x) \prec f(x^*) \right\}$$

Définition 3.4 (*front de Pareto-optimal*)

Le front de Pareto-optimal est l’ensemble F^* des solutions réalisables qui correspondent aux solutions :

$$F^* = \left\{ f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \text{ tels que: } x^* \in X^* \right\} \quad (3.9)$$

3.6.2 Classification des méthodes d’optimisation multi-objectif

Dans la littérature, nous pouvons rencontrer deux types de classification des méthodes de résolution des problèmes d’optimisation multi-objectif. La première classification adopte un point de vue décideur. La deuxième classification adopte un point de vue du concepteur, que nous détaillons dans la suite de cette section.

Décideur : les méthodes d’optimisation sont classées en trois familles suivant la coopération entre la méthode et le décideur :

- Les méthodes *a priori* : Le décideur intervient en amont de la méthode d’optimisation. Il définit ses préférences en pondérant par exemple les objectifs selon leurs importances.

- Les méthodes *progressives* ou *interactives* : Le décideur affine son choix, en écartant ou en favorisant des solutions, au fur et à mesure du déroulement du processus de résolution.
- Les méthodes *a posteriori* : Le décideur intervient en aval de l’optimisation. Il choisit la solution qui lui semble la plus intéressante parmi l’ensemble des solutions fournies par la méthode d’optimisation.

Concepteur : Les méthodes d’optimisation sont classées en trois familles en fonctions de la manière dont elles traitent la préférence de plusieurs objectifs :

- Les méthodes agrégées,
- Les méthodes basées sur l’équilibre de Pareto
- Les méthodes non agrégées et non Pareto.

3.6.2.1 Méthodes agrégées

En général, les méthodes agrégées consistent à rendre un problème d’optimisation multi-objectif en un problème mono-objectif, en regroupant les fonctions objectifs à optimiser dans une seule fonction objectif. Dans ce cadre, une fonction de mise à l’échelle de chaque fonction objectif peut être utilisée afin de permettre les additionner (modèle additif) ou bien les multiplier (modèle multiplicatif), Dans cette catégorie nous présentons la méthode la plus populaire, qui est la méthode de moyenne pondérée (Weighting Method).

La méthode de la moyenne pondérée est la plus connue dans le cadre de l’optimisation multi-objectif (Gass and Saaty, 1955; Zadeh, 1963), et la plus utilisée pour générer les solutions Pareto optimales. Elle consiste à transformer un problème d’optimisation multi-objectif en un problème mono-objectif en additionnant toutes les critères après avoir affecter un poids à chacun. Le problème d’optimisation obtenu conserve sa linéarité si toutes les fonctions objectifs et les contraintes sont linéaires, et peut être résolu facilement en sélectionnant une méthode d’optimisation adéquate :

$$\min_x \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad (3.10)$$

où les poids vérifient : $w_i > 0$ et $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

Cette méthode peut être utilisée comme *a posteriori* ou *a priori* (Sengupta et al., 2016). Bien qu’elle soit largement utilisée, elle présente toutefois quelques problèmes. D’une part, le poids de chaque critère doit être déterminé a priori par le décideur, ce que requière certaines

connaissances sur le problème. D'une autre part, l'interaction entre les différents critères doit être exprimée, pour certain problème cette tâche parfois est devenue plus difficile (Marichal, 2002). En outre, cette méthode ne peut pas accéder à certaines solutions (cf. Figure 3.8b) dans le cas où le front de Pareto est non convexe (Marler and Arora, 2004). Enfin, cette méthode pourrait trouver des solutions qui ne reflètent pas vraiment les préférences du décideur.

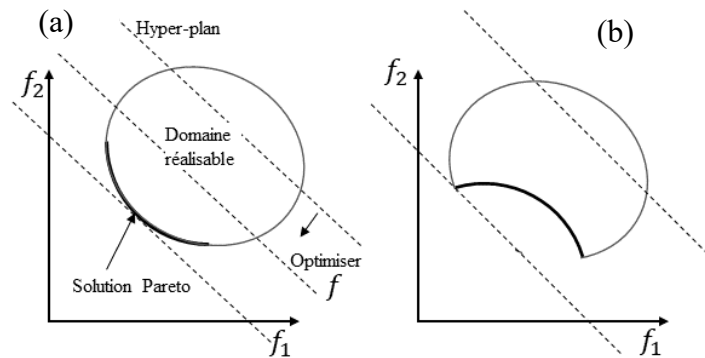


Figure 3.8 : Méthode d'agrégation : (a) Front de Pareto convexe, (b) Front de Pareto non convexe

3.6.2.2 Méthodes basées sur l'équilibre de Pareto

Le principe de ces méthodes s'appuie sur le postulat de V. Pareto (Pareto, 1896) : « *Il existe un équilibre tel que l'on ne peut pas améliorer un critère sans détériorer au moins un des autres critères* ». Les méthodes d'optimisation qui transforment un problème d'optimisation multi-objectif en mono-objectif sont dépassées au profit de la notion d'ensemble de solutions Pareto optimales, suivant le critère de dominance au sens de Pareto. En effet, l'ensemble des meilleurs compromis réalisables entre les objectifs contradictoires forme ce qu'on appelle le front de Pareto. Dans lequel, il n'existe aucune solution étant strictement meilleur que les autres. L'objectif de méthodes basées sur l'équilibre de Pareto, est d'identifier cet ensemble de compromis optimaux entre les critères. La Figure 3.9 présente un exemple de front de Pareto. Les solutions appartenant à ce front ne peuvent pas être comparées, car aucune solution n'est systématiquement meilleure que les autres sur tous les critères. Donc, le rôle du décideur est de choisir la ou les solutions à retenir. Notez que dans certains cas de conception, le front de Pareto ne prend pas toujours une forme régulière, peut être concave, discontinu, etc.

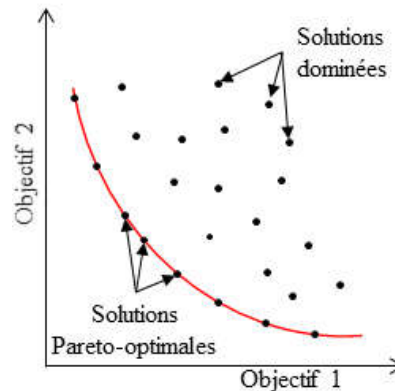


Figure 3.9 : Front de Pareto pour un problème d'optimisation bi-objectif

Dans ce cadre, on trouve plusieurs algorithmes génétiques qui ont été développées afin de résoudre les problèmes d'optimisation multi-objectif. Parmi ces algorithmes les plus significatifs sont : l'algorithme Multi Objective Genetic Algorithm (MOGA) (Fonseca and Fleming, 1993), l'algorithme Niche Pareto Genetic Algorithm (NPGA) (Horn et al., 1994), qui utilise une sélection par tournoi, basée principalement sur la dominance de Pareto, l'algorithme Non Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) (Srinivas and Deb, 1994) et enfin l'algorithme NSGA-II (Deb, 2000) qui est l'algorithme le plus populaire et le plus utilisé.

a. Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)

L'algorithme NSGA-II « Nondominated Sorting Genetic Algorithm II », (Deb et al., 2002), est l'un des algorithmes génétiques les plus populaires et les plus utilisés pour résoudre une large palette de problèmes d'optimisation multi-objectif dans différents domaines d'ingénierie.

Le principe de fonctionnement de cet algorithme est présenté ci-dessous.

Le principe de NSGA-II, réside dans l'étape de classement des individus. Ce dernier est effectué en deux temps : La première étape du classement repose sur le concept de dominance de Pareto. Dans la population courante R_g , tous les individus non dominés formant un front de Pareto prennent le rang 1. Ensuite, ces individus sont retirés et on répète la même procédure pour déterminer les individus de rang 2 et ainsi de suite jusqu'au rang k (exemple de la Figure 3.10, $k = 5$). Le processus se termine lorsque tous les individus de la population courante prennent un rang unique.

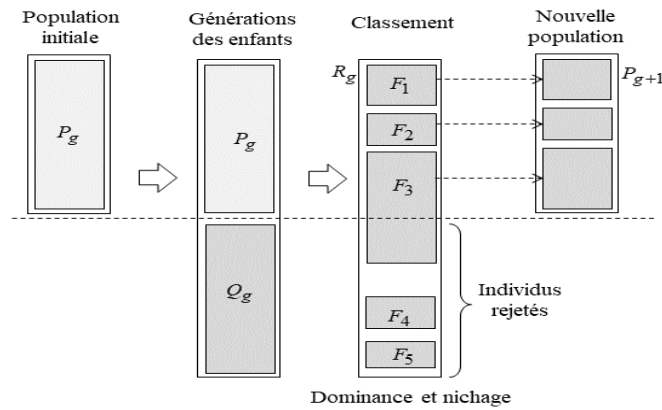


Figure 3.10 : Obtention de la nouvelle population par croisement et mutation, puis classement par dominance et nichage (Deb et al., 2002).

La deuxième étape du classement s’appuie sur une technique de nichage. La nouvelle population P_{g+1} est formée par les individus des premiers rangs (cf. Figure 3.10). Cependant, la taille de cette population doit être égale à celle de la population initiale P_g , et il est possible que les individus du dernier rang n’aient pas une place dans la formulation de la nouvelle population (le rang F_3 dans cet exemple). Dans ce cas, une technique de nichage est utilisée afin de sélectionner les individus de même rang qui peuvent participer à la création de la nouvelle population. Cette technique permet de sélectionner des individus qui ne sont pas trop proches les uns des autres après avoir déterminé leurs distances d’encombrement (crowding) afin que les solutions optimales de front de Pareto soient suffisamment diversifiées et bien réparties. Le pseudo-code qui décrit le déroulement de l’algorithme NSGA-II est présenté en Annexe.

3.6.3 Traitement des contraintes

En raison de la présence des contraintes, l’espace de recherche est divisé en régions réalisables et non réalisables. De nombreuses méthodes de traitement des contraintes ont été proposées pour résoudre le problème d’optimisation multi-objectif sous contraintes (Coello, 2002; Michalewicz and Schoenauer, 1996). Dans cette thèse, deux méthodes différentes de gestion de contraintes, à savoir la méthode de pénalité et la méthode de dominance de contrainte, ont été utilisées.

a. Méthode de pénalité

L’idée de méthode de pénalité a été introduite pour la première fois dans (Aguirre et al., 2004). Cette méthode consiste à remplacer les problèmes d’optimisation sous contraintes par

un problème d'optimisation sans contraintes, en introduisant de nouvelles fonctions objectifs à optimiser :

$$\phi_k(x) = f_k(x) + r\varphi_q(x) \quad (3.11)$$

où la fonction de pénalité choisie ici est :

$$\varphi_q(x) = \sum_{j=1}^l \max\{0, g_j(x)\}^q + \sum_{k=1}^p |h_k(x)|^q \quad (3.12)$$

où q est l'exposant de la pénalité et r est un paramètre positif de pénalité. Le problème est alors résolu directement pour une valeur de r suffisamment grande pour que les contraintes soient satisfaites.

b. La méthode de domination sous contraintes

Cette méthode est proposée par Deb (Deb et al., 2002), pour la résolution des problèmes d'optimisation multi-objectif sous contraintes, elle est basée sur le concept de domination sous contraintes, et également connue sous le nom de supériorité de la solution réalisable. En présence de contraintes, chaque solution peut être réalisable ou non réalisable. Une solution x_a est dite domine sous contrainte une solution x_b si l'une des conditions suivantes est vraie:

1. x_a est réalisable et x_b est non réalisables.
2. x_a et x_b sont irréalisables et x_a a une valeur de violation de contrainte plus petite.
3. x_a et x_b sont réalisables et x_a domine x_b avec le principe de domination usuel.

3.7 L'optimisation en conception multidisciplinaire

L'optimisation en conception multidisciplinaire (OMD ou MDO : Multidisciplinary Design Optimisation en anglais) est un domaine d'ingénierie relativement nouveau, elle a été lancée à la fin des années 1980 dans le domaine de l'aéronautique. Elle avait pour objectif de réduire le coût et le délai d'une nouvelle étude de conception dans la phase de conception préliminaire (conceptuelle). Cette méthodologie a été adaptée à la conception des systèmes complexes, en impliquant deux ou plusieurs disciplines couplées. Son utilisation a enregistré un grand succès dans différents secteurs comme l'automobile, la marine, etc., mais son succès majeur a été enregistré dans les applications aérospatiales (Anselmi et al., 2019).

Un système est dit couplé, lorsque plusieurs disciplines (plus de deux) partagent les mêmes variables de conception entre elles, ou lorsque la sortie d'une discipline correspond à l'entrée d'une autre discipline.

Pour la conception de ce type du système, les approches d’optimisation traditionnelles ne sont pas efficaces, car elles cherchent à répondre aux exigences de cahier des charges plutôt qu’à trouver des solutions optimales du problème d’optimisation, cela se fait par une série des simulations disciplinaires et plusieurs optimisations individuelles. En revanche, la méthodologie d’OMD est bien adaptée, toutes les disciplines ayant le plus grand impact sur la conception sont identifiées et considérées simultanément. Pour chaque discipline, on détermine un ensemble de variables de conception représentatives et on identifie des variables de couplage afin de bien gérer les interactions entre les sous-systèmes (disciplines) (Alexandrov, 2000).

3.7.1 Formulation mathématique d’un problème OMD

Dans un problème OMD, une discipline i peut être modélisée par une fonction $c_i(\cdot)$, des variables de conception et des variables de couplage. Les deux types de variables sont considérées comme des entrées et en calculant à la sortie des variables de couplage disciplinaire. Une discipline i est présentée en Figure 3.11 :

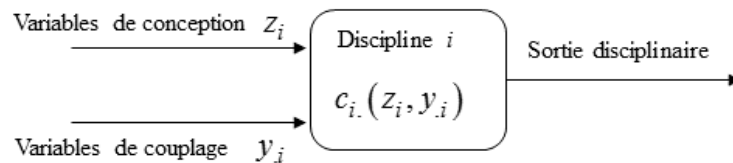


Figure 3.11 : Modélisation d’une discipline

Un problème ODM peut être formulé mathématiquement comme suit (Balesdent et al., 2012):

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{z,y,x} f(z,y,x) \\ \text{s.c.} \\ \mathbf{g}(z,y,x) \leq 0 \\ \mathbf{h}(z,y,x) = 0 \\ \forall (i,j) \in \{1,\dots,n\}^2, i \neq j, y_{ij} = c_{ij}(z_i, y_i, x_i) \\ \forall i \in \{1,\dots,n\}, r_i(z_i, y_i, x_i) = 0 \\ z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \end{array} \right. \quad (3.13)$$

Toutes les variables et les fonctions sont expliquées ci-après. Dans un problème OMD, on distingue trois types de variables qui sont :

- \mathbf{z} est le vecteur de variables de conception. Ces variables peuvent être partagées entre plusieurs disciplines (nommées \mathbf{z}_{sh}) ou spécifiques à une discipline i (nommées $\bar{\mathbf{z}}_i$).

Donc, $\mathbf{z}_i = \{\bar{\mathbf{z}}_{sh}, \bar{\mathbf{z}}_i\}$ est le vecteur de variables de conception d'entrée de la discipline $i \in \{1, \dots, n\}$ avec n est le nombre de disciplines.

- \mathbf{x} est le vecteur de variables d'état. Contrairement à $\mathbf{z} = \{\mathbf{z}_{sh}, \bar{\mathbf{z}}\}$, les variables d'état dépendent de variables de conception \mathbf{z} , de variables de couplage \mathbf{y} et d'équations d'état caractérisées par les résidus \mathbf{r} . Ces variables sont souvent définies par des relations implicites nécessitant à leur résolution des méthodes numériques spécifiques.
- Dans un environnement multidisciplinaire, les disciplines s'échangent des variables de couplage \mathbf{y} (Figure 3.12). Ces dernières relient les différentes disciplines pour modéliser leurs interactions. $\mathbf{c}_{ij}(\mathbf{z}_i, \mathbf{y}_{ji}, \mathbf{x}_i)$ est une fonction de couplage utilisée pour calculer le vecteur de variables de couplage de sortie de la discipline i et d'entrée de la discipline j . \mathbf{y}_{ji} réfère au vecteur de toutes les variables de couplage d'entrée de la discipline i et \mathbf{y}_{ij} est le vecteur de variables de couplage d'entrée de la discipline j et de sortie de la discipline i .

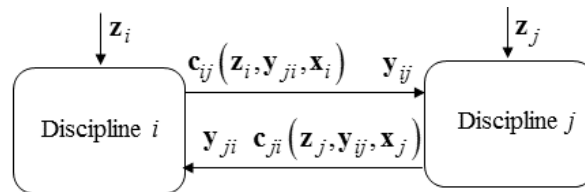


Figure 3.12 : Couplage entre la discipline i et la discipline j

La Figure 3.13 illustre un exemple d'analyse classique de l'aéro-structure d'un lanceur (Filomeno Coelho et al., 2009; Kennedy and Martins, 2014). Dans cet exemple, l'analyse aéro-structure implique une analyse couplée entre la discipline aérodynamique (la géométrie du lanceur et la déformation sont nécessaires) et la discipline structure (efforts aérodynamiques sur la structure du lanceur sont nécessaires). Il est clair que dans la conception des systèmes couplés, les objectifs sont souvent antagonistes, par exemple, la réduction du poids peut entraîner des contraintes structurelles élevées.

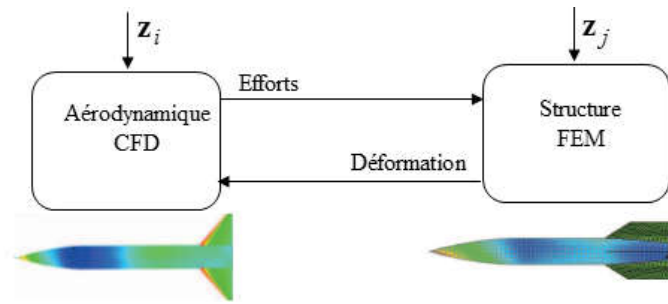


Figure 3.13 : Couplage entre deux disciplines : Structure et Aérodynamique

- Contraintes d'égalité et d'inégalité : la solution d'un problème OMD doit satisfaire les contraintes d'inégalités $\mathbf{g}(\cdot)$ et les contraintes d'égalités. $\mathbf{h}(\cdot)$ Ces contraintes traduisent les exigences d'un système en termes de performances cibles.
- Réalisation disciplinaire (Individual Disciplinary Feasible) : La solution de problème OMD doit assurer la satisfaction disciplinaire à travers les contraintes d'égalité sur le résidu $\mathbf{r}_i(\cdot)$. le résidu quantifie la satisfaction de l'équation d'état dans la discipline i . Le vecteur de variable d'état \mathbf{x} est la solution des équations d'état de la discipline i .
- Réalisation multidisciplinaire (Multidisciplinary feasibility) : La solution de problème OMD doit satisfaire la contrainte d'égalité interdisciplinaire entre le vecteur des variables de couplage d'entrée \mathbf{y} et le vecteur des variables de couplage de sortie $\mathbf{c}_i(\cdot)$. Le couplage entre les disciplines i et j est cohérent lorsque le système d'équations interdisciplinaire suivant est vérifié :

$$\begin{cases} \mathbf{y}_{ij} = \mathbf{c}_{ij}(\mathbf{z}_i, \mathbf{y}_i) \\ \mathbf{y}_{ji} = \mathbf{c}_{ji}(\mathbf{z}_j, \mathbf{y}_j) \end{cases} \quad (3.14)$$

D'après le système (Equation (3.14)), lorsque tous les couplages sont cohérents (satisfaits), le système est dit *Multidisciplinary feasible*. La satisfaction des couplages interdisciplinaires est essentielle car c'est une condition nécessaire pourvu que le système étudié soit physiquement réalisable, sera détaillée dans la section 3.7.2.

- Solution optimale de problème OMD : f est la fonction objectif (performance) à optimiser. Le problème OMD peut contenir plusieurs fonctions objectifs (performances).

3.7.2 Satisfaction de couplage multidisciplinaire

Dans l'optimisation multidisciplinaire, on peut distinguer deux catégories de méthodes afin de satisfaire les couplages interdisciplinaires (Balling and Sobieszczanski-Sobieski, 1996): les approches couplées et les approches découplées.

3.7.2.1 Approches couplées (Coupled approaches)

Les approches couplées (Figure 3.14) effectuent une analyse multidisciplinaire (MDA) afin d'assurer les couplages interdisciplinaires à chaque itération de l'optimisation au niveau système global. La MDA est une analyse auxiliaire qui cherche à trouver un équilibre entre les disciplines en résolvant le système d'équations interdisciplinaires (équations d'état) (Filomeno Coelho et al., 2009). Autrement dit, MDA consiste à trouver la valeur des variables de couplage d'entrée y qui satisfont le système d'équations interdisciplinaires. Un processus itératif est nécessaire pour résoudre le système d'équations en raison du couplage des disciplines. On peut distinguer deux méthodes classiques de MDA : 1) Méthode du point fixe (Fixed Point Iteration), 2) Méthode basée sur la minimisation des résidus d'équations interdisciplinaires (Breitkopf and Coelho, 2013; Filomeno Coelho et al., 2009).

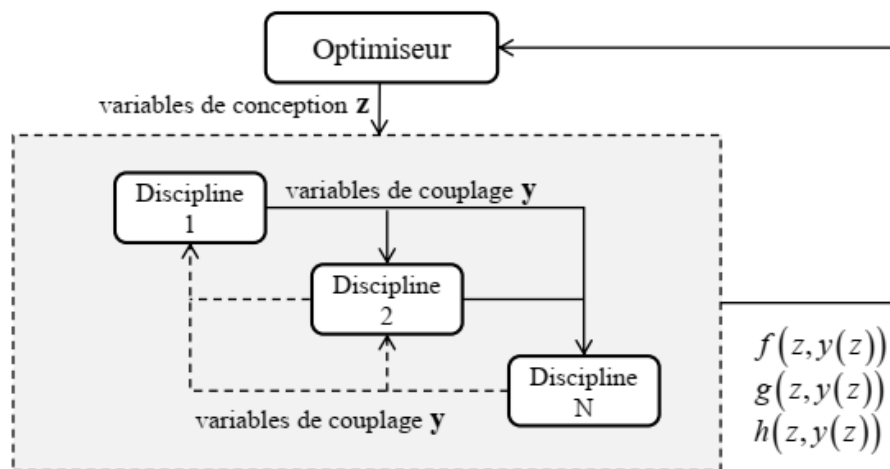


Figure 3.14 : Approche couplée

- **Méthode de point fixe** : est une procédure itérative impliquant des boucles entre les disciplines sans aucun contrôle sur les variables de couplage (exception de l'initialisation), ces dernières sont des résultats des simulations disciplinaires. Cette méthode peut considérer comme une extension de l'algorithme de Gauss-Seidel (la résolution d'équations algébriques). Dans cette méthode, un seul vecteur de couplage est initialisé (y_j dans la Figure 3.15). Généralement, elle n'assure pas toujours la propriété de convergence, il y a des conditions théoriques (Ortega, 1973) montrent que

la convergence pourrait être garantie si l'ensemble d'équations interdisciplinaire doivent être contractantes.

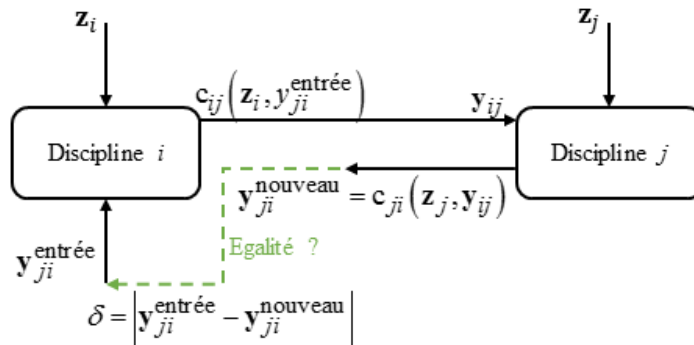


Figure 3.15 : FPI entre la discipline i et la discipline j

3.7.2.2 Approches découplées (Decoupled approaches)

Les approches découplées (Figure 3.16) n'utilisent pas l'analyse multidisciplinaire (MDA), mais introduisant des contraintes d'égalité sur les variables de couplage dans la formulation au niveau système (Equation (3.13)) afin d'assurer la cohérence interdisciplinaire. L'idée est de définir les variables de couplage y comme des variables d'optimisation, en les ajoutant aux variables de conception z . En effet, dans les approches découplées, l'optimiseur au niveau système gère à la fois les variables de conception et les variables de couplage d'entrée. Les contraintes d'égalité sur les variables de couplage ne peuvent pas être satisfaites à chaque itération mais orientent la recherche vers la solution optimale.

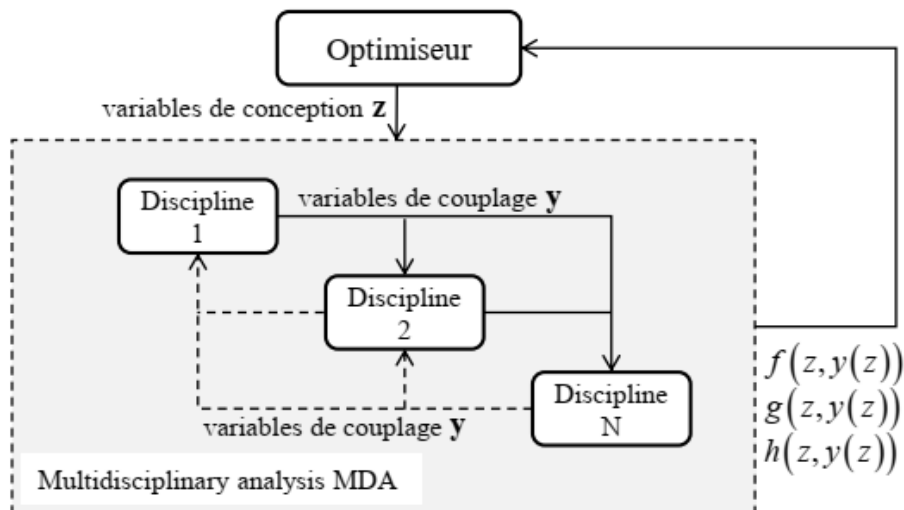


Figure 3.16 : Approche découplée

3.7.3 Formulation d'un problème OMD

De nombreuses approches d'OMD ont été proposées dans la littérature afin de résoudre efficacement un problème d'optimisation multidisciplinaire en ingénierie. Certains travaux (Balesdent, 2011; Balling and Sobieszczanski-Sobieski, 1996; Breitkopf and Coelho, 2013)

présentent un état de l’art de différentes approches d’OMD avec des études de comparaison quantitative et qualitative sur des benchmarks dédiés à l’OMD (Tedford and Martins, 2010; Yi et al., 2008).

Les approches d'OMD peuvent être classées en quatre catégories (Figure 3.17) selon la décomposition, disciplinaire (couplée ou découplée) ou système (mono-niveau ou multi-niveaux) :

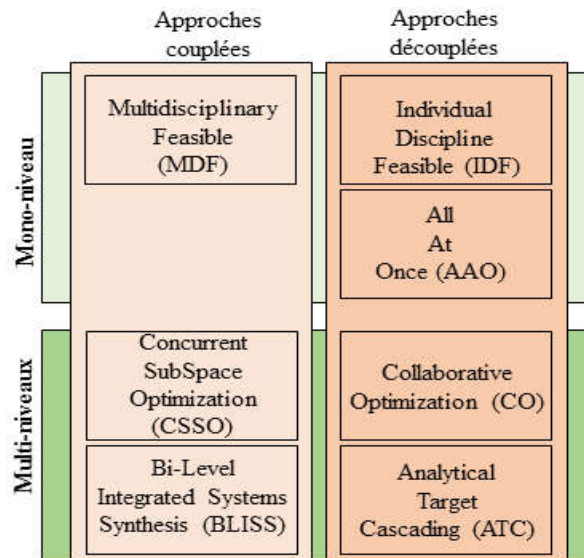


Figure 3.17: Classification des approches d’OMD

- Les approches mono-niveau utilisent la MDA : i.e. Multidisciplinary Feasible (MDF) (Balling and Sobieszczanski-Sobieski, 1996)
- Les approches multi-niveaux utilisent la MDA: i.e. Concurrent SubSpace Optimization (CSSO) (Sobieszczanski-Sobieski, 1988), Bi-level Integrated System Synthesis (BLISS) (Sobieszczanski-Sobieski et al., 1998)
- Les approches mono-niveau avec des contraintes d’égalité sur les variables de couplage : i.e. Individual Discipline Feasible (IDF) (Balling and Sobieszczanski-Sobieski, 1996), All At Once (AAO) (Balling and Sobieszczanski-Sobieski, 1996).
- Les approches multi-niveaux avec des contraintes d’égalité sur les variables de couplage : i.e. Collaborative Optimization (CO) (Braun, 1996), Analytical Target Cascading (ATC) (Allison et al., 2005)

Les approches mono-niveau et multi-niveaux sont distinguées par le nombre d'optimiseurs. Les approches mono-niveau nécessitent un seul optimiseur au niveau système pour résoudre le problème ODM, tandis que les approches multi-niveaux nécessitent plusieurs optimiseurs, l’un est placé au niveau système et les autres sont répartis à chaque discipline afin de gérer la

complexité du problème d’optimisation. Parmi les approches reposent sur la MDA, on trouve le MDF qui est une approche la plus utilisée (Balesdent, 2011). MDF est une formulation mon-niveau dans laquelle les performances du système (produit) sont évaluées à l’aide d’un processus itératif. Les approches CSSO et BLISS utilisent la MDA pour assurer l’équilibre interdisciplinaire, tout en permettant l’optimisation des disciplines découplées. Les approches IDF, CO, ATC et AAO sont des formulations entièrement découplées.

3.7.3.1 MDF (Multidisciplinary Feasible)

MDF est une approche d’OMD la plus répandue dans la conception et le domaine industriel, elle est décrite dans (Balling and Sobieszczanski-Sobieski, 1996; Cramer et al., 1994), c’est une formulation mono-niveau (Figure 3.18). Dans laquelle l’optimisation est gérée par un seul optimiseur au niveau système couplé avec la MDA. Pour chaque itération, l’optimiseur envoie les variables de conception z à la MDA, celle-ci assure l’équilibre interdisciplinaire du système. Une fois cet équilibre est réalisé, les variables de conception et de couplages sont utilisées pour calculer les fonctions objectifs et les contraintes. Les disciplines sont chargées de résoudre les équations d’état et déterminer les variables de couplage ; en utilisant la méthode itérative de Gauss-Seidel.

Le problème d’optimisation est présenté de la façon suivante :

$$\begin{cases} \min_z & f(z, y(z)) \\ \text{s.c.} & g(z, y(z)) \leq 0 \\ & h(z, y(z)) = 0 \\ & z^{\min} \leq z \leq z^{\max} \end{cases} \quad (3.15)$$

Dans l’approche MDF, les solutions trouvées pour chaque itération sont acceptables car elles ont satisfait l’équilibre interdisciplinaire du système. L’avantage major de MDF réside dans le fait qu’elle est facile à implémenter, à modifier et s’adapter aux différents problèmes de conception. Cependant, elle a un inconvénient majeur qui est le temps de calcul élevé à cause de la sollicitation répétée de la MDA, et les boucles itératives entre les disciplines.

Dans le cas de conception des produits complexes, chaque sous-système requière des experts et d’équipes pluridisciplinaires distribuées géographiquement. Ce qu’il pourrait rendre la tâche de réalisation de la MDA plus difficile car elle nécessite (Balesdent, 2011):

- Une collaboration d’acteurs de conception de chaque sous-système soit pour résoudre un problème ou apporter des modifications.

- Une gestion de l’échange des informations et le flux des données entre les différents sous-systèmes.

De plus, les analyses de sous-systèmes sont effectuées de manière séquentielle et chaque équipe doit attendre celle qui précède pour continuer ses tâches.

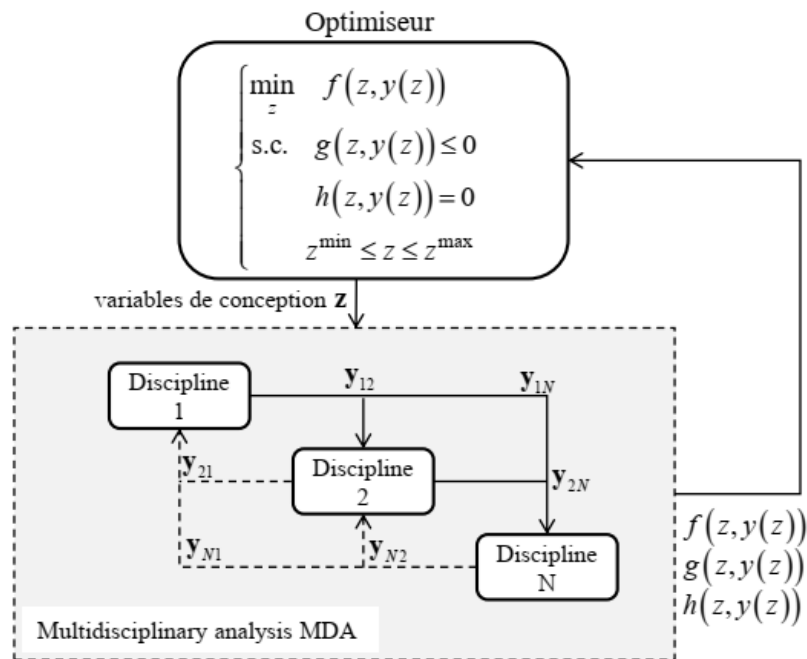


Figure 3.18: Approche MDF

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dressé un état de l’art des problèmes d’optimisation multi-objectif et multidisciplinaire. Nous avons présenté aussi les différentes techniques et approches de résolution qui peuvent être utilisées pour la conception d’un produit, plus particulièrement dans la phase de conception préliminaire. Nous avons constaté que la plupart des problèmes d’optimisation relatifs à la conception des produits sont des problèmes multi-objectifs et multidisciplinaires, leurs formulations dépendent de plusieurs facteurs tels que : la stratégie de l’entreprise, les connaissances des concepteurs, les experts métiers présents et les outils de modélisation et simulation disponibles. Quant au choix de la méthode de résolution, il dépend fortement de la nature du problème d’optimisation formulé et l’expérience des concepteurs.

Chapitre 4 - Problématique et hypothèses

4. Problématique et hypothèses

4.1 Introduction

Dans les chapitres précédents nous avons vu l'importance de l'optimisation pour améliorer la conception et les performances d'un produit. Par rapport à la problématique d'amélioration de la conception préliminaire d'un produit par l'implémentation de l'optimisation, nous proposons dans le cadre de cette thèse deux hypothèses de modélisation. La première se focalise sur l'aspect organisationnel des activités de conception et d'optimisation au sein d'une équipe de conception. La deuxième se focalise sur la procédure d'implémentation de l'optimisation dans la phase de conception préliminaire d'un produit.

L'énoncé de la problématique et des hypothèses de modélisation nous permet alors de proposer une approche de conception et d'optimisation interactive afin d'améliorer la conception préliminaire.

4.2 Définition de la problématique

Notre constat, à l'issue de l'état de l'art, peut être synthétisé en trois points suivants :

Premièrement : à la fin de la phase de conception préliminaire, les concepteurs doivent sélectionner une solution de produit optimale et performante qui répond aux objectifs et les contraintes de conception, avant d'entamer la phase de conception détaillée. Durant laquelle, cette solution est raffinée puis le premier prototype est réalisé et testé. Les fonctions et les performances réelles de ce prototype pourraient se décaler par rapport aux spécifications de conception définies par le CdCF, comme le montre la Figure 4.1. Selon les références (Suh, 2005a; Suh, 2005b), ce décalage provient de la complexité de la conception, qui est due principalement aux différents problèmes rencontrés pendant le processus de conception, et plus particulièrement, dans la phase de conception préliminaire tels que : le manque de connaissances, les incertitudes (épistémiques et aléatoires) et les décisions prises par les concepteurs. Actuellement, les méthodes de conception classiques utilisées par les concepteurs comme les approches de l'AF, la méthode QFD et la méthode TRIZ ont prouvé certaines limites dans la gestion de cette complexité.

Dans la phase de conception préliminaire, les concepteurs peuvent gérer mieux cette complexité par l'utilisation conjointe de modèles analytiques et numériques du produit en

question, ainsi que les techniques mathématiques d'optimisation. Cette utilisation peut permettre d'enrichir la base de connaissances relatives au produit et de lever l'ambiguïté, l'incertitude épistémique (modèle) et l'incertitude d'interaction.

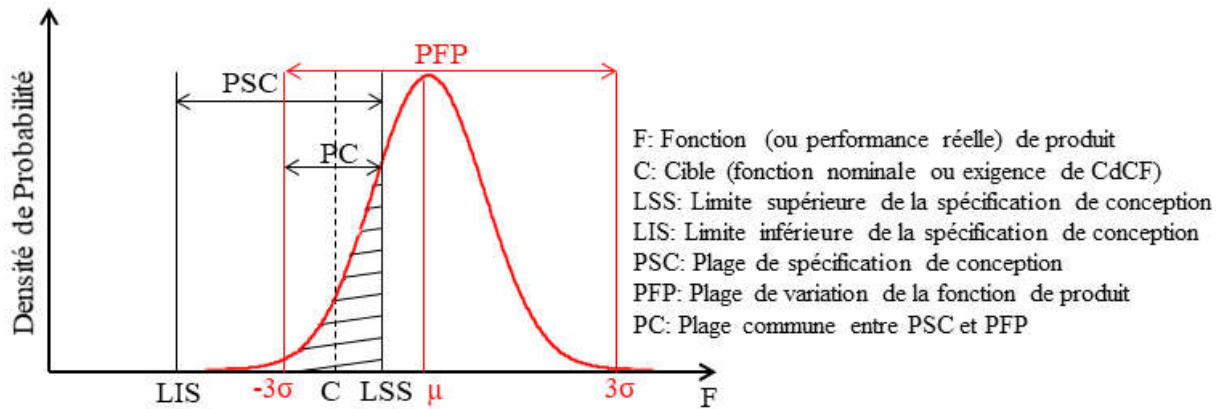


Figure 4.1 : Décalage entre les fonctions de produit et les spécifications de conception

Deuxièmement : de nos jours, l'informatique a évolué rapidement et impulse des enjeux importants tels que : 1) le recours à la simulation et au calcul est de plus en plus courant au niveau industriel afin de garantir l'efficacité et la fiabilité de la conception ; 2) la simulation numérique avance à grands pas, au même rythme d'évolution que la puissance des ordinateurs. De plus, de nombreuses méthodes et algorithmes d'optimisation sont implémentés dans plusieurs logiciels commerciaux (CAD-CAE) et plateformes. Ces outils informatiques sont souvent adaptés et utilisés dans les phases de conception plus avancées où le produit est pratiquement défini. Donc, il est intéressant de tirer profit de ces outils dans la phase de conception préliminaire, afin d'aider les concepteurs à sélectionner une solution optimale et performantes, sans le recours au processus classique « essai-erreur ».

Troisièmement : il y a un manque d'utilisation des techniques mathématiques d'optimisation dans certains domaines industriels. Aussi, dans les processus de conception utilisés et les méthodologies développées, les techniques mathématiques d'optimisation n'occupent pas une place assez importante dans leur mise en œuvre. Afin de combler ces lacunes, il est intéressant de doter la phase de conception préliminaire par une approche qui favorise l'utilisation et l'adaptation des techniques et méthodes d'optimisation.

Les points cités précédemment nous amènent désormais à reformuler notre problématique de recherche de la manière suivante : « **Comment les techniques mathématiques d'optimisation peuvent-elles aider les concepteurs à sélectionner une solution optimale et**

performante de produit, et améliorer sa conception, sans recourir excessivement aux experts ? »

Comment les techniques mathématiques d'optimisation peuvent-elles aider les concepteurs à sélectionner une solution optimale et performante de produit, et améliorer sa conception, sans recourir excessivement aux experts ?

Figure 4.2 : Enoncé de la problématique

Cette problématique favorise l'utilisation des techniques mathématiques d'optimisation dans la phase de conception préliminaire d'un produit, ainsi que les autres méthodes de conception telles que les approches de l'AF, la méthode QFD, la méthode TRIZ, et les approches de Design for X.

Nous avons préféré ici d'utiliser le verbe « **aider** », afin de faire référence au développement d'une « aide à la décision », d'une « aide au choix », d'une « aide à la sélection ». Cette aide est désignée aux concepteurs pour choisir une solution optimale et performante du produit.

Le verbe « **améliorer** » signifie la rapidité et la fiabilité de la conception, c.-à-d., les concepteurs pourraient parvenir à cette solution qui répond aux objectifs et les contraires de conception dans un temps de développement réduit, avec un minimum du nombre d'itérations.

L'expression « **recourir excessivement** » signifie ici le besoin juste nécessaire aux experts, autrement dit, les concepteurs pourraient gérer leurs activités de conception sans la sollicitation permanente des experts.

Afin de répondre à cette problématique, nous allons proposer les hypothèses de modélisation qui nous amènent par la suite à la formalisation des expérimentations.

4.3 Proposition d'une approche et des hypothèses

Afin de répondre à la problématique considérée, nous proposons une approche de conception et d'optimisation interactive dédiée spécialement à la conception préliminaire. Cette proposition (Figure 4.3) consiste à diviser les activités de conception et d'optimisation de la

phase de conception préliminaire en deux niveaux afin d'atténuer la complexité de l'activité de conception.

Le premier niveau sert à l'exploration rapide de l'espace de conception, afin d'aboutir à des solutions de conception acceptables. **Le second niveau** consiste à raffiner la conception et à améliorer les solutions du premier niveau.

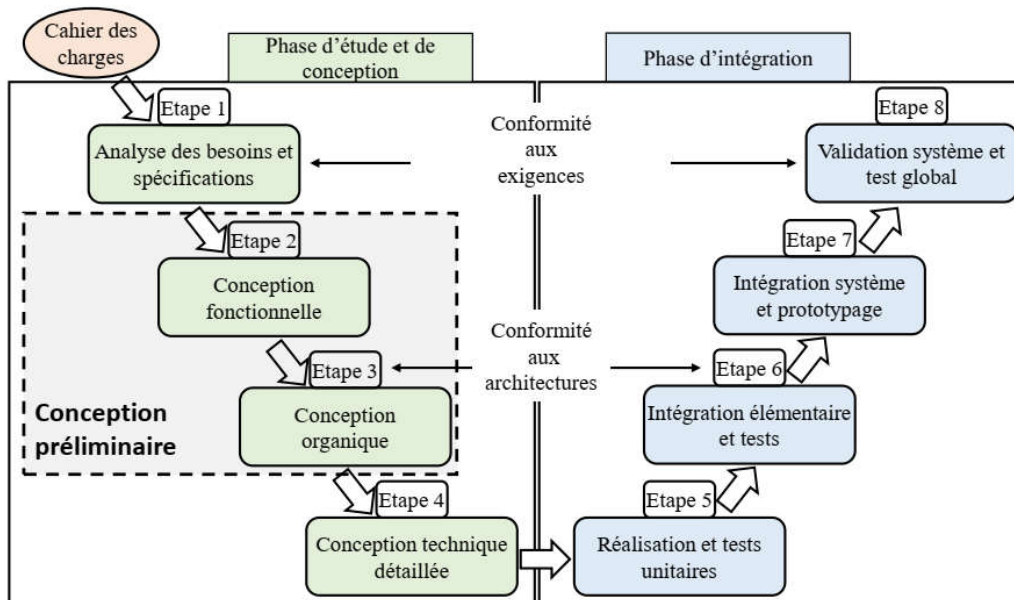


Figure 4.3 : Position de l'approche proposée

Pour chaque niveau de l'approche, il y a un processus associé de conception et d'optimisation. Cette décomposition peut permettre aux concepteurs de gérer les activités de conception préliminaire sans la sollicitation intensive des experts (Figure 4.4). Autrement dit, ils ont besoin d'eux dans des étapes bien définies dans le processus de conception.

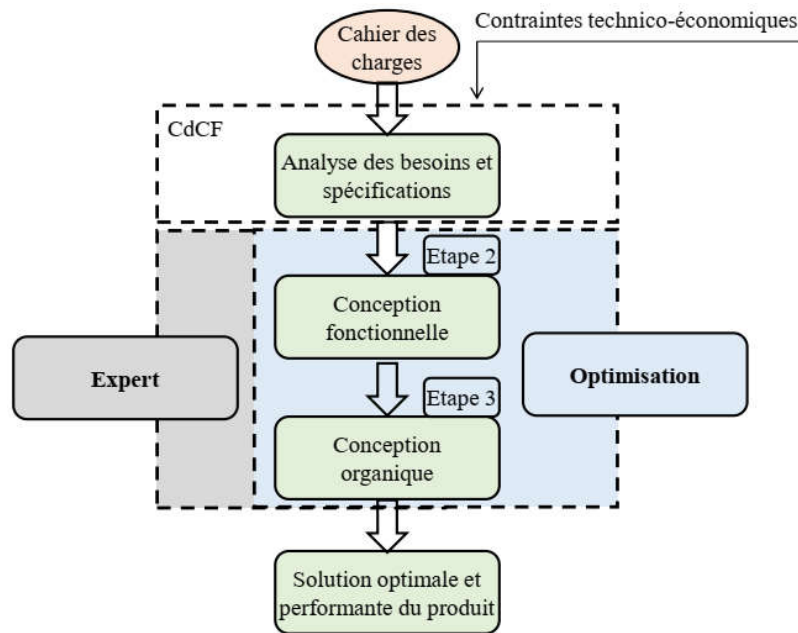


Figure 4.4 : Intérêt de l'approche proposée

4.4 Hypothèses de modélisation

4.4.1 Hypothèse 1

La structuration et l'organisation de la démarche de conception préliminaire, avec la bonne mise en œuvre de certaines méthodes de conception, permettent notamment de bien gérer les activités entre les acteurs de conception et de développer des modèles du produit qui sont adaptés à la conception et à l'optimisation. Ainsi, une approche de conception et d'optimisation interactive est proposée afin de minimiser la sollicitation des experts.

4.4.2 Hypothèse 2

L'état de l'art montre l'existence de plusieurs approches utilisées par les concepteurs afin de choisir une solution de conception optimale du produit. Mais, souvent cette solution n'est pas optimale (sous-optimale). A l'aide de l'utilisation conjointe de l'optimisation, du modèle analytique et du modèle numérique dans la phase de conception préliminaire, les solutions optimales trouvées sont toujours meilleures et performantes.

Cette approche sera expliquée et développée dans le chapitre 6 afin de répondre à la problématique énoncée précédemment. Ainsi, différents cas test seront réalisés pour démontrer la validité des hypothèses énoncées. Ces cas test traitent le problème de conception et d'optimisation d'un produit mécanique connu dans la littérature, il s'agit d'un réducteur de vitesse à engrenages. Dans chaque cas test, nous traiterons le problème de conception et

d'optimisation de ce produit de manière différente, afin de valider une partie de l'approche proposée.

Chapitre 5 - Approche proposée

5. Approche proposée

5.1 Introduction

Dans le présent chapitre, nous allons présenter une approche de conception et d'optimisation interactive pour améliorer la phase de conception préliminaire d'un produit. Cette approche consiste à scinder cette phase en deux niveaux. Pour chaque niveau, la conception de produit s'articule sur les méthodes et les outils de conception présentés dans le 1^{er} chapitre et sur l'implémentation des techniques d'optimisation discutées dans le 2^{ème} chapitre. En effet, le premier niveau de conception et d'optimisation repose sur l'utilisation du modèle analytique du produit (ou de l'un de ses composants), tandis que le deuxième niveau utilise des métamodèles construits grâce à des modèles numériques fins du produit (ou de l'un de ses composants). Enfin, différents cas test seront présentés afin de valider les différentes étapes de l'approche proposée.

Les objectifs escomptés de cette approche sont :

- Aboutir à un (ou des) concept(s) de solution optimale(s) ;
- Obtenir une architecture optimale de produit ;
- Améliorer les performances de produit, tout en minimisant l'écart entre les performances désirées et celles prédites ;
- Minimiser les itérations en conception ;
- Meilleure intégration des contraintes de cycle de vie du produit dans la phase de conception et d'optimisation, à travers une formulation adéquate du problème d'optimisation.

Chaque cas test réalisé aura pour objectif de valider une étape de cette approche et les hypothèses formulées au chapitre 4 :

- Cas test 1 : validation du premier niveau de l'approche proposée dans le cas de conception pluridisciplinaire.
- Cas test 2 : validation du deuxième niveau et de l'étape intermédiaire entre les deux niveaux de conception et d'optimisation.

L'objectif, les critères de validation ainsi que les résultats et conclusions seront discutés en détails pour chacun de ces cas test.

5.2 Approche de conception et d'optimisation proposée

La Figure 5.1 présente globalement l'approche de conception et d'optimisation proposée dans le cadre de notre thèse. L'idée principale derrière de cette contribution est d'aider les concepteurs, d'un côté, à prendre des décisions durant le processus de conception, et d'un autre côté, à parvenir à une solution de produit optimale et performante dans un temps raisonnable. Cela en satisfaisant les objectifs et les contraintes du cahier des charges fonctionnel (CdCF), tout en atténuant la sollicitation intensive des experts. Le déroulement de cette approche au sein d'une équipe de conception se fait en deux temps. Premièrement, après avoir défini le cahier des charges fonctionnel, une bonne structuration du problème de conception est nécessaire pour une meilleure sélection et mise en œuvre des méthodes de conception classiques, tout en prenant en compte les contraintes du cycle de vie du produit et l'environnement extérieur. Pour cela, il faut formuler (ou adopter) un modèle analytique (ou un ensemble de modèles) du produit permettant d'évaluer rapidement son comportement et ses performances qui sont en relation avec le CdCF. Cela doit se faire tout en identifiant les éventuels paramètres de conception sur lesquels on peut agir (*variables*), les critères de performances à optimiser (*fonctions objectifs*), les limites à ne pas dépasser (*contraintes d'égalité et d'inégalité*). Grâce à des méthodes mathématiques d'optimisation multi-objectif et multidisciplinaire, les meilleures valeurs de pré-dimensionnement pour les variables de conception sont trouvées.

Par la suite, autour des solutions optimales trouvées dans ce premier niveau, des métamodèles sont générés et validés en utilisant des modèles numériques fins. En effet, à l'aide de la méthode de plan d'expériences (DoE) et l'utilisation conjointe des outils informatiques de simulation et de calcul (CAD-CAE), on peut construire des métamodèles (modèles de substitution) à haute-fidélité. L'utilisation de ces dernières dans la phase de conception préliminaire peut fournir plusieurs avantages, à savoir l'enrichissement de la base de connaissances et l'abaissement du niveau d'abstraction de conception (Loch et al., 2011). Comme pour le premier niveau, des méthodes mathématiques d'optimisation multi-objectif et multidisciplinaire peuvent être appliquées, afin de trouver une ou plusieurs solutions de conception optimales qui seront, sans doute, meilleures comparativement à celles trouvées dans l'étape précédente.

5.2.1 Rôle et responsabilité des acteurs de conception

Dans cette section, nous discutons le rôle et la responsabilité des différents acteurs qui peuvent intervenir pendant la mise en œuvre de l'approche de conception et d'optimisation proposée.

Concepteur : souvent est un ingénieur, étant capable de choisir les caractéristiques d'un nouveau concept afin de répondre aux besoins et préférences du client. Il peut également proposer des méthodes appropriées pour évaluer les concepts en termes de qualité ou de performances. Le concepteur peut définir les objectifs préliminaires et les contraintes du produit à concevoir, et doit alors avoir un bon aperçu des exigences en termes de complexité et de préférences. Il est censé suivre l'évolution de ces exigences le long du processus de conception ainsi que leur exécution et validation.

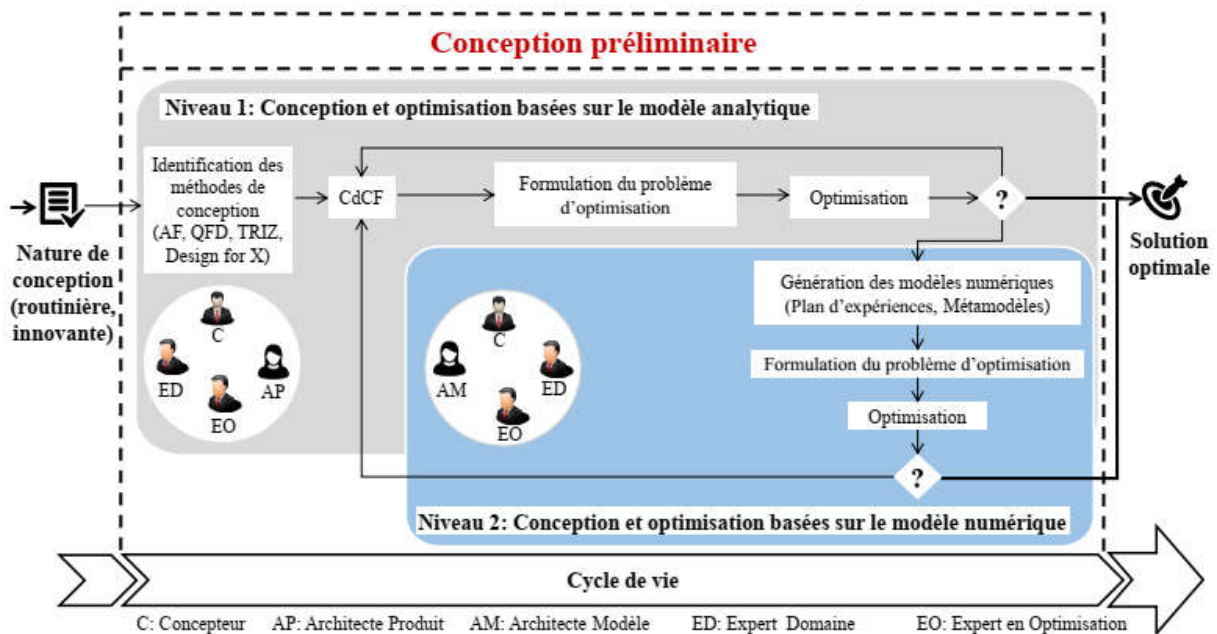


Figure 5.1 : Approche de conception et optimisation interactive proposée

Architecte produit : c'est le sponsor de l'activité de développement des modèles de simulation associés, son rôle est considéré comme un facteur clé de l'organisation de la conception. Il définit les contraintes du temps, du coût et de paramètres décisionnels du projet de conception. L'architecte produit ayant une vision fonctionnelle sur le produit à concevoir. Il établit les spécifications du produit et décrit l'architecture (composants, sous-systèmes et leurs interfaces), qui permettent de répondre à ces spécifications. Il définit aussi le protocole opérationnel et fournit une version préliminaire de l'architecture du modèle produit à l'architecte modèle.

Architecte Modèle : son rôle permet d'exprimer au mieux les attentes de l'architecte produit en termes de spécifications de conception, et de négocier et dialoguer efficacement avec l'expert domaine (fournisseur modèle) afin d'obtenir les modèles de simulation adaptés à l'évaluation de performances désirées.

Expert domaine : c'est un ingénieur qualifié et spécialiste de son domaine ou de sa discipline. Il lui est confié la mission de construire les modèles de simulation en s'appuyant sur ses connaissances. L'expert domaine, ayant une vue physique sur le produit à concevoir, doit connaître le domaine dans lequel le nouveau concept sera développé. Il doit également être conscient des limitations et des contraintes auxquelles il peut être confrontés lors du développement du nouveau concept, par exemple les limitations des logiciels de conception et de calcul ainsi des outils matériels existants.

Expert en optimisation : c'est un ingénieur capable de formuler le problème d'optimisation, de choisir la technique d'optimisation adéquate, d'exécuter le processus d'optimisation, d'analyser les résultats obtenus et d'en sélectionner les plus pertinentes, d'interpréter et de présenter ces résultats au concepteur afin de l'aider à la prise de décision.

5.2.2 Premier niveau : conception et optimisation basées sur le modèle analytique

Dans ce niveau de conception et d'optimisation, nous proposons une amélioration de la démarche structurée et systématique de conception préliminaire, en se basant sur les travaux de thèse de Scaravetti (Scaravetti, 2004). Cette amélioration (Figure 5.2) s'établit par l'utilisation conjointe de certaines méthodes de conception (QFD, TRIZ, Design for X, FBS et CPM), qui sont considérées dans ce niveau comme des outils supports pour extraire les lois de comportements du produit nécessaires, formuler le modèle analytique associé qui va être utilisé dans l'étape de l'optimisation, et préparer aussi les premiers modèles géométriques et numériques du produit. Selon l'auteur l'activité de conception préliminaire s'appuie sur l'utilisation de certains outils et méthodes de conception qui peuvent aider les concepteurs à gérer cette activité et à prendre des décisions dans le processus de conception. Ainsi, la bonne mise en œuvre de ces méthodes sélectionnées dans la conception préliminaire permet aux concepteurs de travailler sur un modèle analytique simplifié au lieu d'un modèle plus complexe.

Cette démarche proposée permet ainsi de structurer l'activité de conception préliminaire depuis l'émergence du concept jusqu'au choix d'une solution du produit à concevoir. Son

déroulement se fait en quatre phases interconnectées, chacune correspondant à un niveau d'analyse différent : analyse du besoin, analyse fonctionnelle, analyse organique et physique. Dans ce qui suit, nous allons discuter les étapes de cette démarche et le rôle de chaque méthode de conception sélectionnée.

- **Analyse du besoin :** Dans la première étape de la conception, les concepteurs réalisent plusieurs tâches afin de traduire les informations linguistiques issues du cahier des charges marketing en exigences techniques. La méthode QFD est souvent utilisée pour exécuter cette activité, en reliant les besoins de l'utilisateur présentés sous forme de variables linguistiques, aux spécifications du produit sous forme d'objectifs et de performances. Dans ce niveau, cette méthode permet de présenter les corrélations entre les paramètres de conception. Ces corrélations peuvent permettre aux concepteurs d'extraire les paramètres de conception juste nécessaire pour effectuer l'étape de l'optimisation. Bien que cette méthode puisse couvrir plusieurs phases du processus de conception, elle présente quelques problèmes de subjectivité et de mise en œuvre dans certains types de conception (produits complexes).
- **Approche fonctionnelle :** Les approches Design for X consistent à concevoir le produit en vue d'optimiser la propriété X, cette dernière peut désigner un attribut du produit (son coût, son impacts environnementaux), ou une phase de son cycle de vie, ces approches peuvent améliorer les fonctions ou les performances du produit, et comme peuvent également servir à la définition des contraintes métiers qui doivent être prises en considération. Ainsi, elles peuvent aider les concepteurs dans l'étape de la formulation du problème d'optimisation, de plus dans la sélection des solutions optimales dans le front de Pareto.
- **Approche organique :** Dans cette étape, les concepteurs se concentrent sur la génération de concepts qui répondent aux spécifications du cahier des charges fonctionnel. À cet effet, l'approche FBS (Fonction-Comportement-Structure) permet aux concepteurs de transformer les fonctions en relations définissant le comportement du produit. Ce comportement est lié à la structure choisie comme solution technique. Cette approche peut être considérée comme un outil opérant pour formuler le modèle analytique du produit ou ses composants en suivant une décomposition hiérarchique.
- **Approche physique :** La méthode CPM (Characteristics-Properties-Modeling) s'appuie sur la distinction entre les caractéristiques du produit qui sont l'ensemble des informations de structure, forme, dimensions, de matériau, de géométrie que les

concepteurs peuvent modifier directement, et les propriétés qui sont l'ensemble d'objectifs et de performances sur lesquelles les concepteurs ont une action par l'intermédiaire de choix de caractéristiques. Les deux concepts sont reliés par des relations qui permettent de déduire le comportement du produit. Cette méthode peut aider les concepteurs à définir l'espace de conception en se basant sur les deux approches analyse et synthèse.

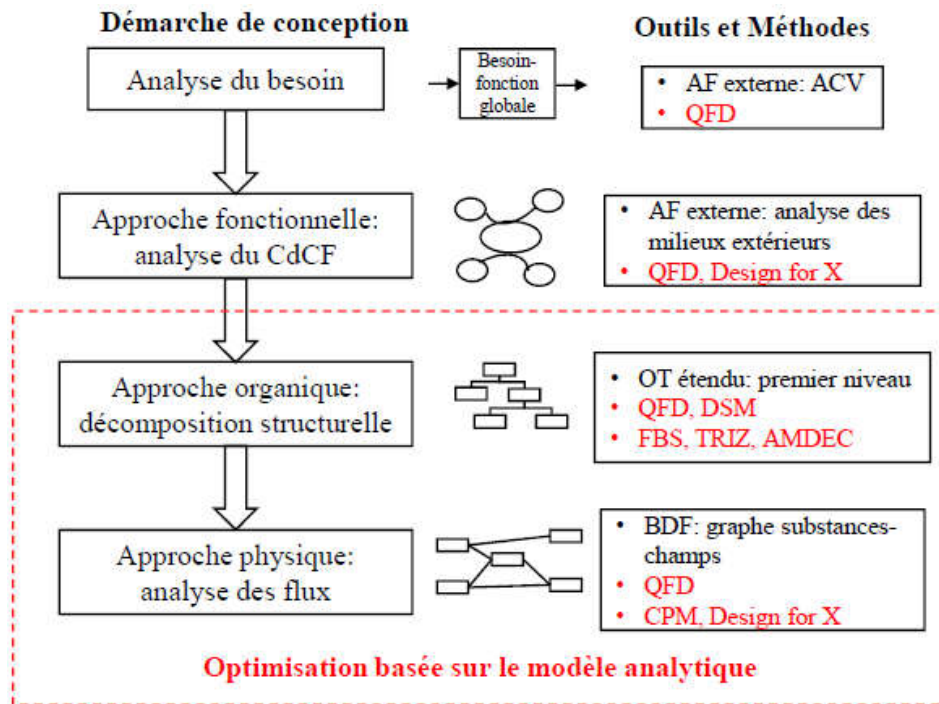


Figure 5.2 : Démarche de conception proposée

Ainsi, au fur et à mesure que l'on avance dans l'activité de conception, les concepteurs formulent le modèle analytique du produit à l'aide des méthodes de conception propres aux approches organique et physique de la Figure 5.2. A l'aide de ce modèle analytique, le comportement du produit est évalué dans le processus d'optimisation afin de quantifier ses performances et vérifier la satisfaction des différentes contraintes. Selon de Weck *et al.* (Weck et al., 2007.), ce modèle est souvent adapté dans la phase de conception préliminaire afin de sélectionner un (ou des) concept(s) de solution (s) pertinent(s) ou optimiser une architecture du produit, car il apporte plusieurs avantages tels que :

- **Dans la phase de conception**

1. Il est facile à manipuler grâce à sa représentation mathématique ;
2. Faire apparaître les caractéristiques et les propriétés principales du produit étudié, nécessaires au pré-dimensionnement ;

3. Il est facile à implémenter dans les logiciels de simulations multi-physiques (Matlab Simulink, Modilica, ... etc.), grâce à leur expression analytique ;
4. Permettre d'introduire des approximations et des simplifications sur la formulation mathématique, en gardant seulement les variables et les paramètres gouvernant les phénomènes physiques du problème à étudier.

- **Dans la phase d'optimisation**

1. Il est facile à implémenter dans le processus d'optimisation ;
2. Explore efficacement l'espace de recherche ;
3. Fournir une (ou des) solution (s) de conception optimale(s) dans un temps de calcul réduit ;

Cependant, il présente certaines limites telles que :

1. Les domaines de validité, certaines lois physiques sont valides dans un domaine ou une plage bien spécifiques (élasticité, plasticité) ;
2. Les solutions optimales obtenues via ce modèle sont toujours sujettes à l'amélioration.

La Figure 5.3 ci-dessous, illustre de manière générale l'étape de l'extraction du modèle analytique à partir d'un cahier des charges fonctionnel, et son intégration dans le processus de conception et d'optimisation.

La Figure 5.4 montre le processus d'optimisation adopté dans le premier niveau. Après la formulation du problème d'optimisation et la détermination de sa nature (mono-objectif, multi-objectif ou multidisciplinaire), les concepteurs (expert en optimisation) peuvent adopter une technique appropriée pour résoudre leur problème. Une fois la résolution est terminée, les solutions optimales trouvées (représentées par exemple sous forme de fronts de Pareto, Figure 5.5) doivent être analysées et interprétées par l'expert en optimisation avant de les présenter devant le concepteur. Ce dernier, en collaboration avec certains experts qu'on cherche à ne pas trop solliciter pendant la conception, doit prendre des décisions. En effet, selon le CdCF initial, la qualité des solutions trouvées dans ce premier niveau, et en tenant compte des contraintes technico-économiques, le concepteur peut décider d'arrêter la recherche à ce stade ou orienter l'équipe de conception vers le deuxième niveau (sortie 1 dans l'organigramme de la Figure 5.4), si les solutions trouvées ne sont pas satisfaisantes. Dans ce cas-là, l'architecte modèle reçoit les spécifications du concepteur par le biais de l'architecte produit et débute à générer les modèles géométriques et numériques nécessaires comme expliqué dans la suite.

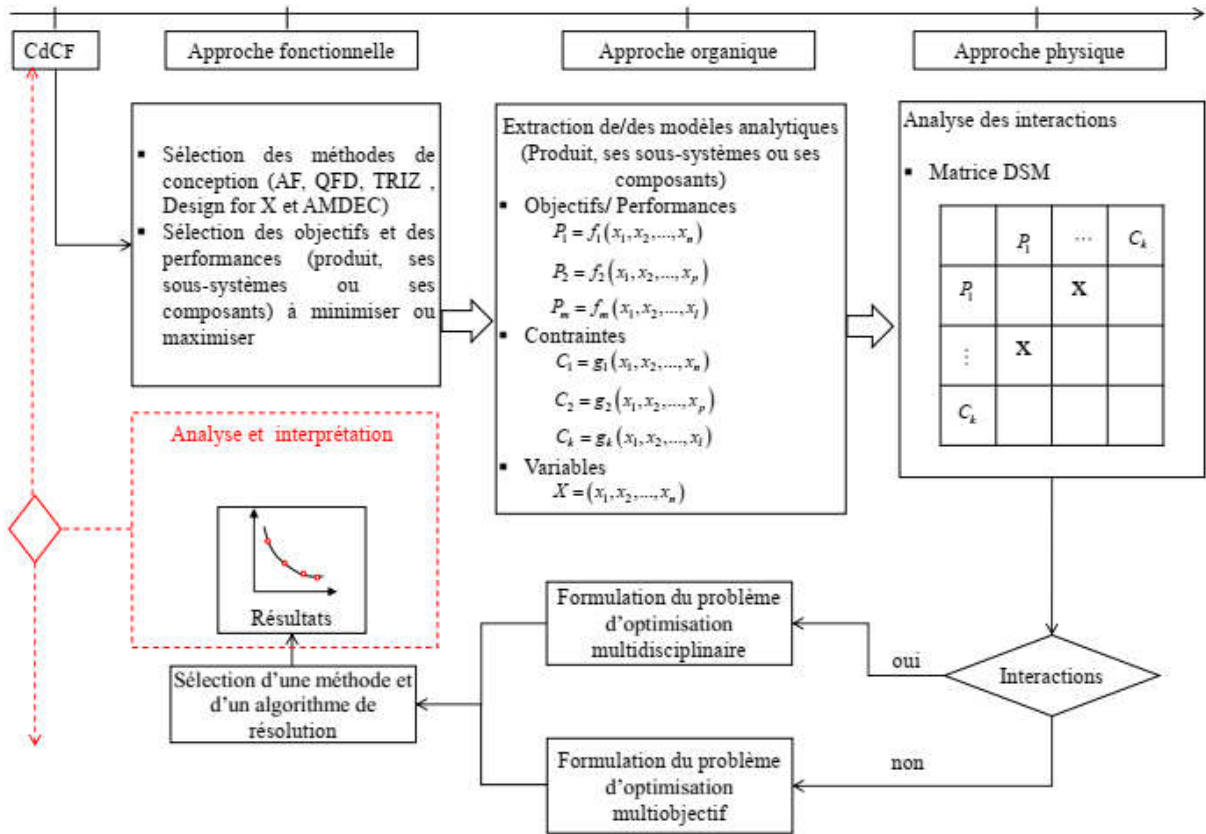


Figure 5.3 : Extraction et intégration du modèle analytique dans le processus d'optimisation

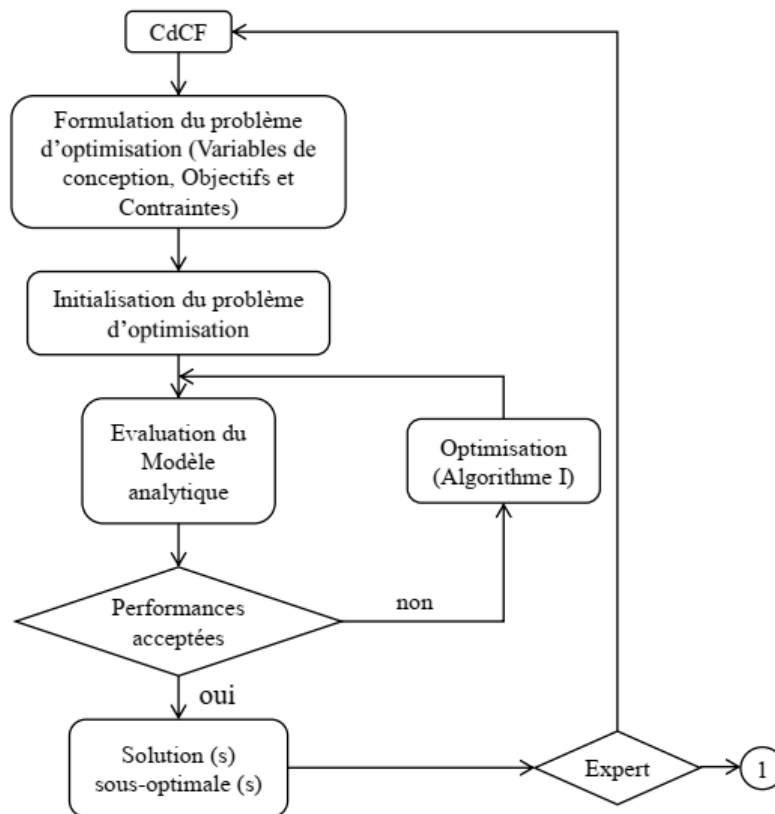


Figure 5.4 : Processus d'optimisation du premier niveau

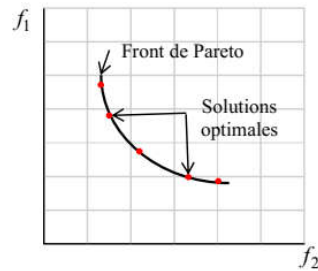


Figure 5.5 : Résultats du premier niveau

5.2.3 Etape intermédiaire : génération et validation des modèles numériques

Dans l'approche proposée, cette étape représente le passage entre le premier niveau et le deuxième niveau de conception et d'optimisation. Elle regroupe toutes les activités de modélisation géométrique et de simulation numérique. Elle est cruciale et importante car l'exactitude et la précision des résultats de simulation dépendent de la qualité des modèles numériques fournis. Au début de cette étape, l'architecte modèle reçoit les attentes de l'architecte produit, celui-ci est censé exprimer au mieux ces attentes en termes de spécification de conception. Son rôle permet en fait de dialoguer et négocier avec l'expert domaine (fournisseur modèle) afin de développer et valider les modèles numériques adaptés pour la simulation et le calcul. La Figure 5.6 illustre de manière générale le passage entre les deux niveaux ainsi que le processus de génération et de validation des modèles numériques.

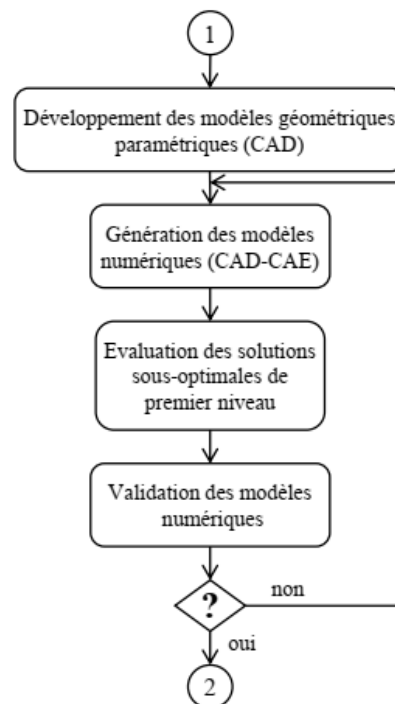


Figure 5.6 : Génération et validation des modèles numériques

Durant le processus de conception et de développement, la phase de génération du modèle de comportement du produit ou de ses composants est une activité difficile et itérative. Différents acteurs peuvent être impliqués (architecte modèle, expert ou fournisseur modèle) afin d’aboutir à un modèle adapté pour la simulation numérique. Généralement, les premières étapes du processus de modélisation consistent à développer un modèle nommé « primitif », ce modèle est plus proche de la réalité du produit étudié, mais malheureusement plus complexe. En effet, ce modèle tente d’introduire tous les détails et les choses pertinentes au produit, ce qui le rend en général inadapté pour l’activité de simulation. Par conséquent, un processus de simplification doit être mis en place, afin d’aboutir au modèle de simulation approprié en ne gardant que les caractéristiques et les phénomènes les plus pertinents pour la mise en œuvre d’une bonne simulation.

Dans ce contexte, nous avons adopté la démarche proposée par Vernat (Vernat, 2004; Vernat et al., 2010) pour formuler et valider les modèles de simulation dans la phase de conception préliminaire. Dans ces travaux, quatre critères sont proposés pour qualifier les modèles de simulation notamment : Parcimonie, Exactitude, Précision et Spécialisation, ils sont connus sous l’acronyme PEPS. Cette démarche est destinée plus particulièrement pour les modèles physiques de simulation. Dans notre approche, les critères d’exactitude et de précision sont directement retenus car ils ciblent les résultats de simulation (performances), tandis que les autres critères seront adaptés. Ces critères sont discutés brièvement par la suite.

La **parcimonie** est une caractéristique intrinsèque d’un modèle, qui se définit comme l’inverse de la complexité du modèle. Dans le cadre de modèle numérique, cette caractéristique peut être interprétée au travers de la taille mémoire occupée ou du temps de calcul sur un ordinateur. En effet, c’est un paramètre reste difficile à quantifier. D’après Vernat (Vernat, 2004), cette parcimonie pa peut être définie en fonction du nombre de relations n_{rel} et du nombre de variables impliquées dans le modèle n_v , comme suit

$$pa = \frac{1}{n_{rel} + n_v} \quad (5.1)$$

D’après cette relation, un modèle est dit parcimonieux lorsque le nombre de variables impliquées et le nombre de relation entre elles sont plus faibles. Dans notre contribution, nous adaptons l’Equation (5.1) pour définir la parcimonie d’un modèle numérique. Elle est définie

en fonction du temps de calcul t_c sur un ordinateur et le résultat de simulation fourni par le modèle numérique r_s comme suit :

$$pa = \frac{r_s}{1+t_c} \quad (5.2)$$

D’après l’Equation (5.2), pour chaque comportement (performance) étudié, on adopte un modèle numérique ayant une parcimonie plus grande.

L’**exactitude** d’un modèle numérique peut être définie par la distance entre ses résultats de simulation et les valeurs obtenues à travers un modèle de référence correspondant, qui doit refléter le comportement réel de produit (El Amine, 2015; Vernat, 2004). Dans notre approche, les valeurs du modèle de référence peuvent être récoltées à partir de résultats théoriques (relations physiques), de résultats de cas similaires dans la littérature, de résultats obtenus à l’issue d’essais expérimentaux ou de résultats fournis par les standards ou les normes.

Selon Meckesheimer (El Amine, 2015), l’exactitude d’un modèle numérique peut être estimée à travers deux types de mesures à savoir les mesures locales et les mesures globales. Le premier type consiste à fournir des informations locales sur l’exactitude du modèle, tandis que le deuxième type s’intéresse à des informations globales sur cette exactitude. Le Tableau 5.1 présente les différentes relations de mesure d’exactitude d’un modèle, proposées par Meckesheimer. Avec, n est le nombre de points de comparaison, \tilde{P}_i^j et P_i^j sont les variables de performance fournies respectivement par le modèle de référence et le modèle numérique, j représente l’alternative de conception étudiée et i est la valeur que l’on veut mesurer.

Tableau 5.1 : Mesures d’exactitude proposées par Meckesheimer (El Amine, 2015)

Mesure d’exactitude	Type	Description
$Max_i = \max_{j \in \{1, \dots, n\}} \left \tilde{P}_i^j - P_i^j \right $ $Min_i = \min_{j \in \{1, \dots, n\}} \left \tilde{P}_i^j - P_i^j \right $	Mesures locales	Ces mesures fournissent des informations sur les performances extrêmes en calculant la plus grande valeur des erreurs absolues. Elles fournissent une évaluation locale sur la région d’intérêt.

$MAE_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \tilde{P}_i^j - P_i^j $	Mesure globale	Cette mesure fournit une mesure de la tendance centrale, mais elle est facilement biaisée par les valeurs extrêmes.
$MED_i = med_{j \in \{1, \dots, n\}} \{ \tilde{P}_i^j - P_i^j \}$	Mesure globale	Cette mesure est similaire au <i>MAE</i> , elle fournit une mesure de la tendance centrale, mais elle est moins sensible aux valeurs extrêmes.
$MSE_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\tilde{P}_i^j - P_i^j)^2$	Mesure globale	Cette mesure donne plus de poids aux grands écarts que l'erreur absolue moyenne (<i>MAE</i>).
$RMSE_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\tilde{P}_i^j - P_i^j)^2}$	Mesure globale	Cette mesure d'erreur est la plus utilisée. Pour des fins de communication de résultats, elle peut être préférable à <i>MSE</i> parce qu'on mesure l'erreur dans les mêmes unités que les données, plutôt que dans les unités carrées.
$MAPE_i = \max_{j \in \{1, \dots, n\}} \left \frac{\tilde{P}_i^j - P_i^j}{P_i^j} \right 100\%$	Mesure locale	Cette mesure fournit un calcul d'erreur pratique car elle mesure le pourcentage de points se trouvant au-dessus de l'écart moyen.

Concernant la **Précision**, un modèle numérique peut être affecté par deux sources d'imprécision (Vernat, 2004). La première est due aux paramètres incontrôlables, qui sont les paramètres d'entrée du modèle sur lesquelles les concepteurs ne peuvent pas contrôler. Et la deuxième représente les relations incertaines constituant le modèle. Dans ce cadre, l'auteur propose une méthode pour évaluer la précision d'un modèle. Cette méthode consiste à fixer les paramètres contrôlables du modèle. Ensuite, pour chaque paramètre incontrôlable une variation de la valeur est effectuée sur l'intervalle d'imprécision associé. Enfin, pour chaque variable de sortie on peut calculer la précision induite et la comparer à une valeur seuil ou objectif de la précision.

La **spécialisation** caractérise l'ensemble des hypothèses qui limitent le champ d'application d'un modèle numérique. Dans la phase de conception préliminaire, un modèle moins spécialisé est souhaitable afin qu'il puisse être exploitable à un maximum de cas d'alternatives de conception. Selon Vernat (Vernat, 2004), la spécialisation d'un modèle numérique est estimée au travers de deux types de connaissances relatives à ce modèle : 1) les principales hypothèses limitant son domaine d'application, 2) le bas niveau de décomposition systémique utilisé pour sa formalisation. Cependant, cette estimation reste à la fois qualitative et subjective ; et peut conduire à échanger des modèles numériques possédant les mêmes niveaux de parcimonie, d'exactitude et de précision.

5.2.4 Deuxième niveau : conception et optimisation basées sur le modèle numérique

Si les solutions optimales du premier niveau ne sont pas acceptables ou certains objectifs de la conception ne répondent pas au CdFC, le passage à ce deuxième niveau de l'approche proposée est nécessaire. En fait, ce passage est tributaire de la décision du concepteur en accord avec les avis des experts. En effet, si les solutions obtenues dans le premier niveau à l'aide du modèle analytique sont suffisantes et acceptables et satisfont les exigences du CdFC, le deuxième niveau devient inutile. Dans le cas contraire, il est nécessaire d'entreprendre ce deuxième niveau afin d'améliorer la conception et les performances du produit. Dans ce 2^{ème} niveau, des modèles numériques fins (CAD-CAE) sont utilisés pour construire les modèles de substitution (métamodèles). Ces derniers sont adoptés pour évaluer les différents critères de performance et les contraintes dans le processus d'optimisation.

On peut dire que cette façon pour passer du 1^{er} niveau au second dans l'approche proposée peut être considérée, comme étant une solution pertinente pour contourner les inconvénients présentés par la technique de Space Mapping (section 2.9.3). La démarche suivie dans ce niveau peut être résumée en trois phases principales, comme indiqué sur la Figure 5.7.

Phase 1 : Après avoir validé les modèles numériques, la démarche commence par la sélection de N points dans l'espace de conception autour de la solution optimale trouvée dans le premier niveau. Le choix du nombre N est un défi pour les concepteurs, il nécessite une collaboration entre les acteurs du deuxième niveau (concepteur, expert de domaine et expert en optimisation), comme le montre la Figure 5.8. En ingénierie de conception, ce choix doit être effectué en respectant certains critères tels que les objectifs de conception, le temps et les ressources informatiques. Du point de vue métier, le choix de N dépend du nombre p de

variables de conception qui participent dans la construction du modèle numérique. Par exemple, pour construire un métamodèle de type RBF, à partir d'un modèle numérique contenant p variables de conception, le choix du nombre N doit vérifier la relation $N \geq 2p + 1$ (Park and Dang, 2010). Dans notre étude, les N points sélectionnés doivent vérifier à la fois cette relation et le critère du plan Latin Hypercube Sampling Optimisé LHSO (Figure 5.9)

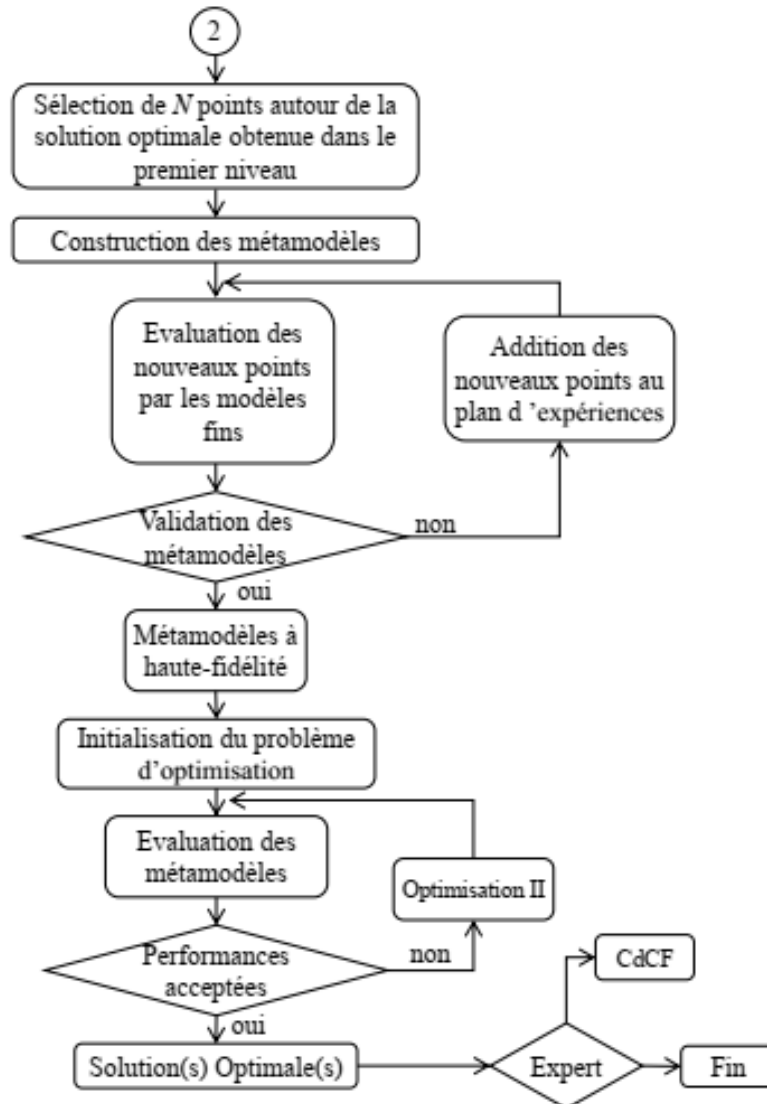


Figure 5.7 : Démarche suivie dans le deuxième niveau

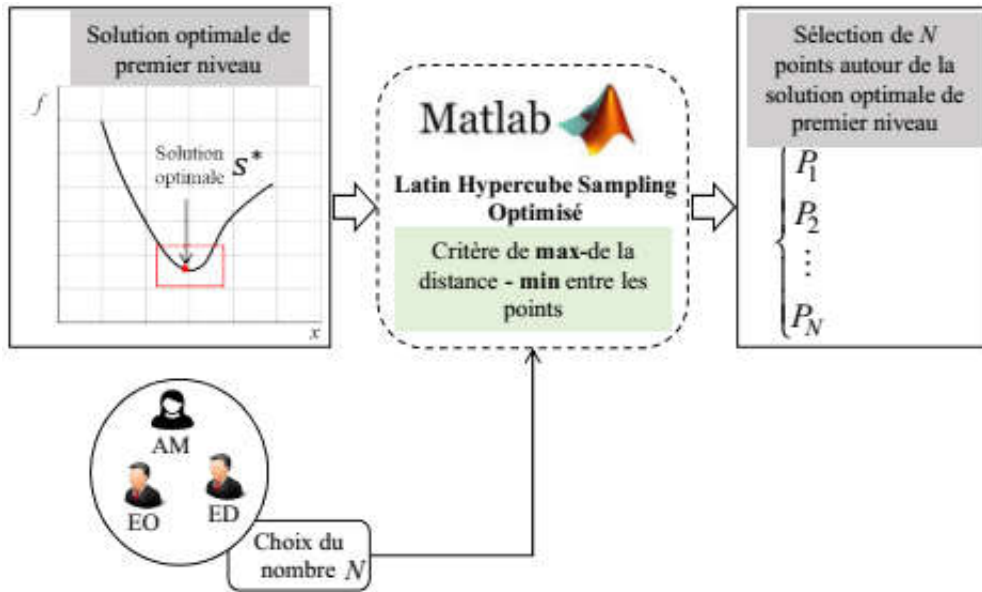


Figure 5.8 : Principe de sélection des solutions optimales à partir du front de Pareto

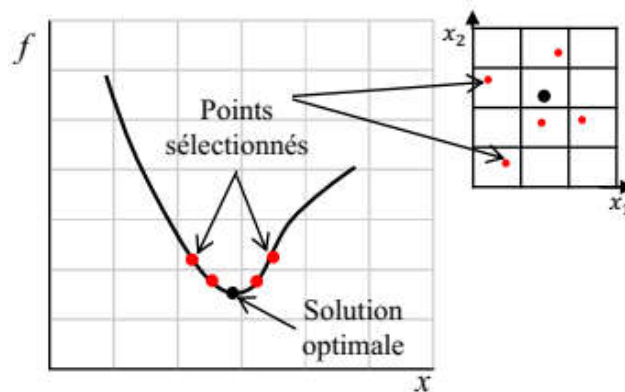


Figure 5.9 : Points sélectionnés suivant le critère du LHSO

La construction du métamodèle consiste à trouver le modèle mathématique qui vérifie la relation suivante :

$$\hat{y} = \hat{M}(x_i, y_i), \quad i=1, \dots, N \quad (5.3)$$

Avec : x_i sont les points sélectionnés autour de la solution optimale obtenues dans le premier niveau , y_i sont l'évaluation de ces points par le modèle numérique adapté, et N est le nombre de points sélectionnés.

Dans cette phase, l'espace de conception du premier niveau peut être réajusté ou modifié complètement en ajoutant de nouvelles variables de conception au problème de conception. Cette phase a pour finalité de construire les premiers métamodèles (Figure 5.10), qui sont

généralement des métamodèles à faible fidélité. Ces métamodèles vont être validés dans la phase suivante.

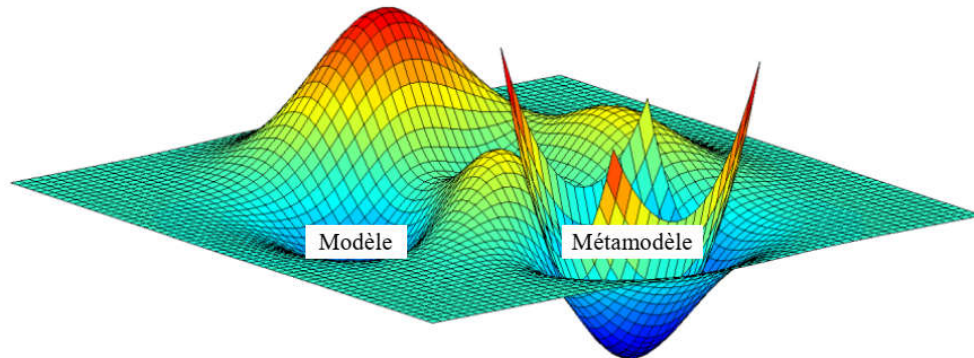


Figure 5.10 : Construction du métamodèle à partir de N points sélectionnés

Phase 2 : dans cette phase, les métamodèles générées dans la phase précédente doivent être validés en collaboration de l'architecte modèle, l'expert de domaine et l'expert en optimisation. Pour ce faire, pour chaque métamodèle un nouveau jeu de paramètres de conception (test) doit être sélectionné, à condition qu'il ne soit pas utilisé pour sa construction, ce jeu de paramètres est évalué en utilisant le métamodèle et le modèle numérique associé. Cette validation régénère un temps de conception supplémentaire, afin d'éviter l'évaluation totale de ce jeu de paramètres, la technique de validation croisée peut être utilisée. Cependant, cette technique n'est pas vraiment recommandée (Wang and Shan, 2007), car elle permet souvent de valider la sensibilité du métamodèle. Donc, elle peut accepter un métamodèle ayant une mauvaise prédiction globale, et comme elle peut rejeter un métamodèle ayant une meilleure prédiction globale. Différentes mesures existent dans la littérature pour valider la qualité du métamodèle. Dans notre approche, quatre critères de mesures sont choisis pour évaluer l'erreur locale et globale du métamodèle. Pour mesurer l'erreur globale, la moyenne de l'erreur absolue est utilisée (RAAE : Relative Average Absolute Error), elle est donnée par la relation suivante (Wang and Shan, 2007):

$$RAAE = \frac{\sum_{i=1}^{N'} |y^i(x) - \hat{y}^i(x)|}{N' \sigma_y} \quad (5.4)$$

Où, x est le jeu de paramètres de test de taille N' , y représente les valeurs observées sur le modèle numérique d'intérêt, \hat{y} représente les valeurs prédites par le métamodèle et σ_y est l'écart-type des valeurs observées sur les points d'évaluation. Cette mesure est très utilisée

pour quantifier l'erreur globale du métamodèle. Quant à l'erreur locale, le maximum de l'erreur absolue (RMAE : Relative Maximum Absolute Error) est sélectionné, il est donné par la relation (Wang and Shan, 2007):

$$RMAE = \frac{\max_{i=1, \dots, N'} |y^i(x) - \hat{y}^i(x)|}{\sigma_y} \quad (5.5)$$

Cette mesure complète celle présentée auparavant. Elle fournit le plus grand écart entre les valeurs prédites et les valeurs observées sur le jeu de paramètres de test. Les autres mesures qui sont utilisées sont : le *RMSE* (Root Mean Squared Error) et le R^2 , qui sont données par les relations suivantes (Wang and Shan, 2007):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} (y^i(x) - \hat{y}^i(x))^2} \quad (5.6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N'} (y^i(x) - \hat{y}^i(x))^2}{\sigma_y^2} \quad (5.7)$$

Plus la valeur du *RMSE* est faible et plus le métamodèle a une meilleure prédiction. Plus la mesure R^2 est proche de 1 et plus la qualité de prédiction du métamodèle est intéressante.

Si le métamodèle ne satisfait pas ces critères de mesures, donc l'amélioration de sa qualité doit être nécessaire. Dans ce cas-là, l'expert de domaine et l'expert en optimisation en coordination avec l'architecte modèle peuvent sélectionner N'' nouveaux points dans l'espace de conception (Figure 5.11) pour enrichir le plan d'expériences (Latin Hypercube Simpling Optimisée) associée. Après l'évaluation de ces points par le modèle numérique, une autre étape de reconstruction et revalidation du métamodèle va être procéder. Ce processus continue itérativement, jusqu'à ce qu'un métamodèle est considéré valide après une décision prise par ces acteurs en respectant les besoins et les exigences du concepteur.

Phase 3 : dès que les métamodèles sont validés et acceptés, l'expert en optimisation peut reformuler le problème d'optimisation de deuxième niveau en déterminant les variables de conception, les fonctions objectifs à optimiser et les contraintes. Les métamodèles sont utilisés pour évaluer les fonctions objectifs et les contraintes dans le processus d'optimisation. Suivant la nature du problème d'optimisation formulé (multiobjectif ou multidisciplinaire), le

concepteur doit choisir la méthode de résolution appropriée. Les solutions optimales trouvées sont analysées et interprétées afin de prendre des décisions de conception.

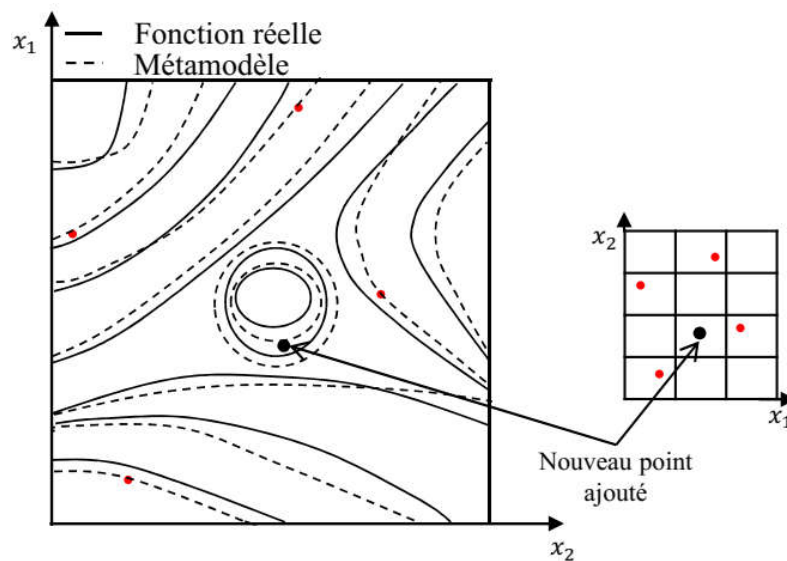


Figure 5.11 : Nouveaux points sélectionnés dans l'espace de solution

5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré en quoi consiste l'approche proposée et comment elle se déroule au sein d'une équipe de conception. L'approche a pour but d'améliorer la phase de conception préliminaire d'un produit, elle pourra être adaptée pour différents processus de conception, suivant le type du produit et les objectifs de conception. Cette approche est composée de deux niveaux de conception et d'optimisation ainsi qu'une étape intermédiaire qui permet le passage entre les deux niveaux. Elle permet aux concepteurs l'organisation et la structuration des activités de la conception préliminaire, en partant du cahier des charges fonctionnel jusqu'à l'obtention d'une solution de conception optimale et performante du produit.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter l'application de cette approche pour un projet de conception routinière, sur un produit mécanique. Il s'agit d'un réducteur de vitesse à simple étage. Sur le même produit, différents cas d'étude seront abordés afin de valider cette approche et les hypothèses proposées.

Chapitre 6 - Validation de l'approche proposée

6. Validation de l’approche proposée

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons résumer les principaux résultats auxquels nous sommes arrivés suite à l’application de l’approche proposée pour la conception préliminaire d’un produit mécanique. Il s’agit d’un réducteur de vitesse à simple étage considéré dans le contexte d’une conception routinière. Essentiellement, nous allons présenter les résultats parus dans les deux publications (Mahiddini et al., 2019a) et (Mahiddini et al., 2019b).

Le choix de ce type de produit pour la validation de notre approche est justifié par les éléments suivants. Premièrement, ce produit est considéré comme un élément essentiel dans différents systèmes de transmission de puissance mécanique. Il s’avère simple, mais sa conception et sa fabrication restent toujours une activité complexe en raison des nombreuses restrictions et exigences imposées par différentes normes (ISO, AGMA et DIN). En outre, il existe différents procédés et technologies dédiés à sa fabrication (Henriot, 2013). Même dans la littérature, son processus de conception est considéré comme un modèle de référence et fait l’objet de diverses activités de recherche en raison de la nature des variables de conception (discrètes, continues et mixtes) et des disciplines impliquées pour sa mise en œuvre. En effet, le problème de conception de réducteur de vitesse a été étudié dans la littérature spécialisée sous différents angles et résolu à l’aide de différentes approches. Deuxièmement, à travers les projets antérieurs réalisés au sein de mon laboratoire d’appartenance, on a acquis des connaissances et une certaine maîtrise des différents processus de conception et de fabrication de ce type de systèmes mécaniques.

Dans ce cadre, deux cas test seront présentés (Figure 6.1), le premier cas test est une application du premier niveau uniquement de l’approche proposée dans le chapitre 5, tandis que le deuxième cas test représente une application directe de l’approche globale avec les deux niveaux et l’étape intermédiaire.

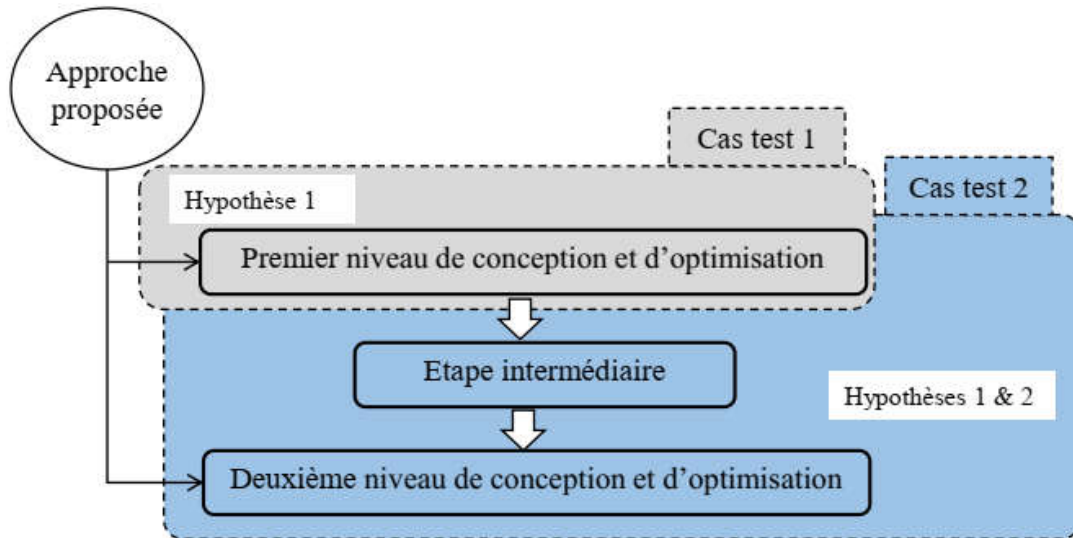


Figure 6.1 : Démarche de validation de l’approche proposée

6.2 Définition du cahier des charges fonctionnel

A travers les deux cas test, nous allons essayer de répondre aux besoins d’un utilisateur qui sont exprimés par le cahier des charges fonctionnel CdCF du Tableau 6.1. Ce cahier des charges est composé par un ensemble de spécifications que doit satisfaire le produit final et un ensemble de critères de performances sur lesquels le concepteur peut formuler ses préférences de décision afin de sélectionner une solution de conception performante parmi les autres alternatives.

Tableau 6.1 : Cahier des charges fonctionnel pour les deux cas test

CdCF	Cas test 1	Cas test 2
Spécifications		
• Vitesse de rotation	1150 tr/min	1500tr/min
• Rendement	> 90%	> 90%
• Rapport de transmission	$\eta = 3.5$	$\eta = 4$
• Puissance à transmettre	15 kW	7.5 kW
• Encombrement (entraxe)	150 mm	188 mm
• Qualité (ISO)	--	6
• Modularité	2 segments de marché	--
Critères de performances		
• Coût	Min<	--
• Fiabilité	Max>	--

• Poids	--	Min<
---------	----	------

6.3 Description générale du problème de conception

Comme il a été mentionné précédemment, nous nous intéressons à la conception routinière pour les deux cas test présentés dans ce chapitre. Dans ce cas, les acteurs (i.e. concepteur, architecte produit et expert domaine) du premier niveau connaissent à l’avance les stratégies globales de conception de ce type de produit. Dans l’approche proposée, durant le premier niveau de conception et d’optimisation, le rôle du concepteur consiste à retenir ou éliminer les différentes alternatives de conception qui vérifie les spécifications du CdCF en collaboration avec l’architecte produit. Comme il peut s’agir à améliorer les performances d’une solution existante en modifiant certains paramètres ou en introduisant de nouveaux composants à la configuration du produit considérée. Ainsi, le concept de solution qui est retenu par le concepteur pour répondre au cahier des charges peut être présenté comme illustré sur la Figure 6.2. Pour les deux cas test, le choix porte sur un réducteur à simple étage car le rapport de transmission est inférieur à la valeur recommandée par la majorité des normes ($\eta < 8$), son modèle géométrique est adopté pour les deux cas test. Dans le premier niveau, l’équipe de conception cherche donc à adapter ou à améliorer cette solution en respectant les objectifs du CdCF. Tous les paramètres géométriques de cette solution sont donnés dans le Tableau 6.2. Il faut noter que pour les deux cas test, l’étude de dimensionnement des clavettes n’est pas prise en considération. En outre, le calcul de dimensionnement des roulements est exclu pour le deuxième cas test en raison de simplification de l’étude. Par ailleurs, il faut noter que la forme géométrique des évidements de matière pour l’allègement de la roue est différente pour les deux cas test. Pour le premier cas on a quatre trous oblong tandis que pour le deuxième cas test, on a six trous de même diamètre d_p .

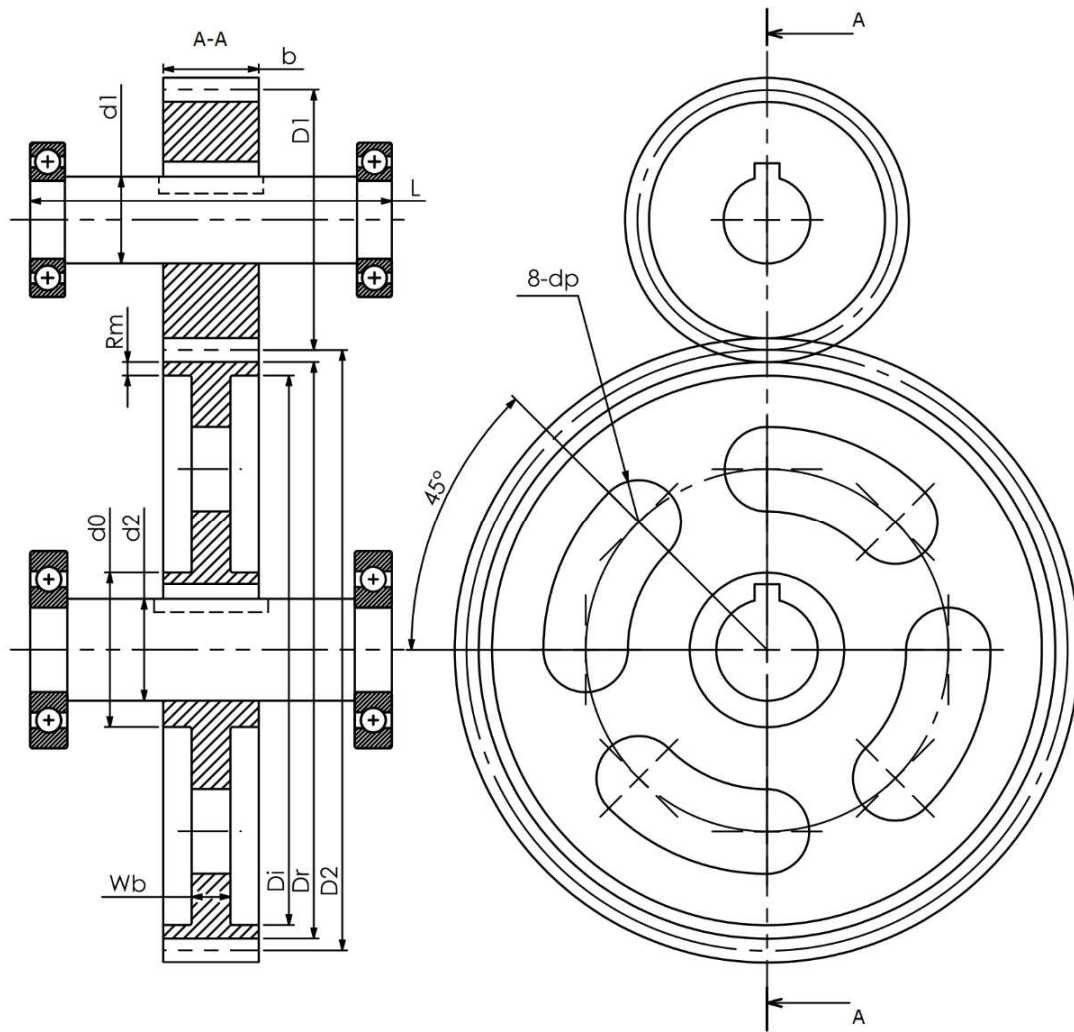


Figure 6.2 : Modèle géométrique de réducteur de vitesse

Tableau 6.2 : Paramètres géométriques adaptés

Paramètre	Relation	Paramètre	Relation
d_0	$d_2 + 25$	W_b	$3.5m$
D_1	mZ_1	D_i	$D_r - 2l_w$
D_2	ηD_1	d_p	$0.25(D_i - R_m)$
D_r	$m(\eta Z_1 - 2.5)$	η	6
R_m	$2.5m$	L	200mm (cas test 1) 100mm (cas test 2)

6.4 Cas test 1

Pour ce premier cas test, nous allons voir l'application du premier niveau de l'approche proposée afin de valider la 1^{ère} hypothèse, qui se focalise globalement sur l'aspect

organisationnel des activités de conception et d'optimisation de la phase de conception préliminaire. Afin de répondre aux spécifications du cahier des charges (Tableau 6.1), l'équipe de conception doit effectuer ses activités de conception en explorant efficacement l'espace de recherche dans un temps réduit, pour aboutir à la fin de cette phase à une (ou des) solution (s) de conception performante(s) et satisfaisant les objectifs de conception. Sachant qu'en conception routinière, le temps d'exécution de ces activités de conception est considéré comme un facteur important qui doit être respecté par les concepteurs. D'après le cahier des charges, le seul objectif de conception qui pourrait augmenter la complexité de ces activités de conception concerne la conception modulaire de produit (personnalisation du produit) comme le montre dans la Figure 6.3.

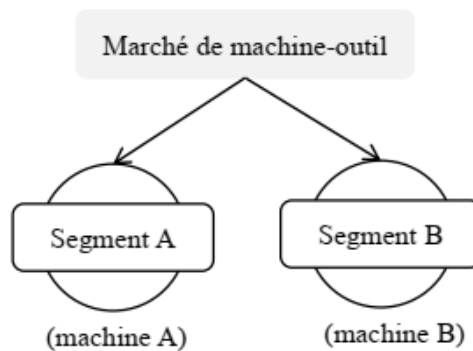


Figure 6.3 : Deux segments de marché ciblé

La structuration du problème de conception préliminaire avec la bonne mise en œuvre de certaines méthodes de conception que nous avons adaptées à la démarche classique de conception (cf. Figure 6.2), permettrait à l'équipe de conception de mieux gérer leurs activités de conception et de formuler un modèle analytique du produit adéquat à la conception et à l'optimisation. Dans ce niveau, ces activités de conception sont effectuées généralement en collaboration entre le concepteur, l'architecte produit, l'expert domaine et l'expert en optimisation.

La Figure 6.4 illustre les étapes du processus de premier niveau de conception et d'optimisation adaptées pour ce premier cas test. Elle indique également les rôles de chaque acteur de conception et les tâches à réaliser. A noter que cette répartition est similaire à celle appliquée dans le 2^{ème} cas test.

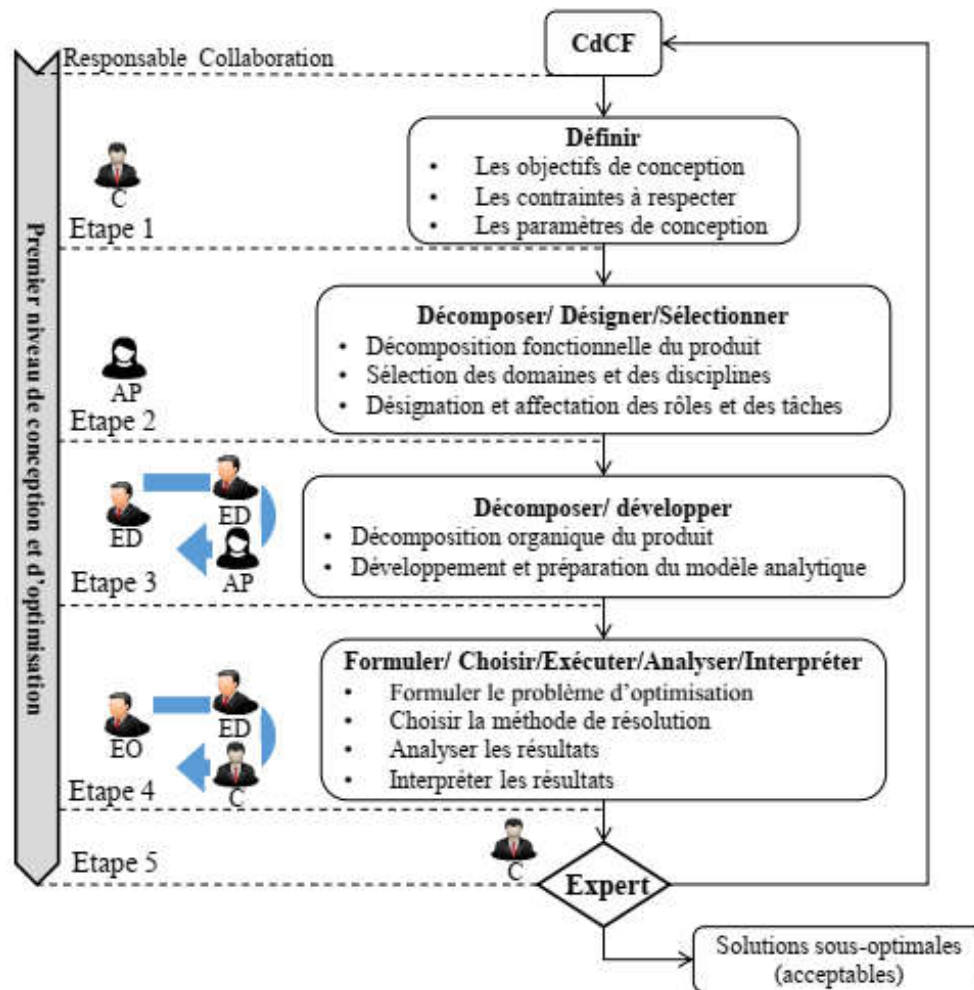


Figure 6.4 : processus de premier niveau

Etape 1 : A partir du cahier des charges (Tableau 6.1), le concepteur peut définir les objectifs et les contraintes du projet de conception. Il peut donner aussi les limitations en matière de temps et de coût. Dans ce cas test, les objectifs de conception qui peuvent être retenus sont :

- Le produit doit satisfaire deux segments du marché cible ;
- Le produit doit être avoir une bonne performance en terme de fiabilité ;
- Le coût total de produit ne doit pas dépasser celui du concurrent.

Dans cette étape, le concepteur, en collaboration avec certains acteurs de l'équipe, peut formuler la matrice QFD du produit afin de poursuivre les spécifications de conception durant la phase de conception préliminaire, en déterminant certains paramètres de conception qui doivent être pris en considération lors de la formulation du problème d'optimisation.

Etape 2 : l'architecte modèle reçoit les spécifications du concepteur et commence à définir les critères de performance et les paramètres décisionnels (voir le Tableau 6.1) de ce projet de conception. Selon les spécifications du concepteur, il propose et décrit une architecture

fonctionnelle adéquate du produit en proposant les solutions technologiques envisagées. Tout d'abord il doit établir une analyse du cycle de vie du produit en identifiant toutes les situations de vie potentielles, afin d'effectuer l'analyse fonctionnelle externe du produit. Pour chaque situation, il doit recenser une liste des éléments constituant son environnement (milieu extérieur). Ensuite, ces éléments sont présentés graphiquement sous forme d'un diagramme « pieuvre », cela lui permet d'identifier les fonctions de service (que le produit doit assurer) et de contraintes (que le produit doit respecter), et de faire les liens entre le produit à concevoir et ces éléments du milieu extérieur ou entre un élément et un autre. Ces fonctions doivent être validées et quantifiées par certains acteurs. A travers la démarche d'analyse fonctionnelle externe, les exigences fonctionnelles du produit sont déterminées. La Figure 6.5 présente le diagramme pieuvre du réducteur de vitesse pour la situation de vie « Utilisation ».

Cette analyse fonctionnelle externe, lui permet de déterminer les fonctions de service et de contraintes. Dans ce cas d'étude, il y a une seule fonction de service (FS1) « Transmettre la puissance de l'arbre moteur à l'arbre récepteur », et trois fonctions de contrainte (FC1, FC2, FC3) dans cette situation de vie « Utilisateur ».

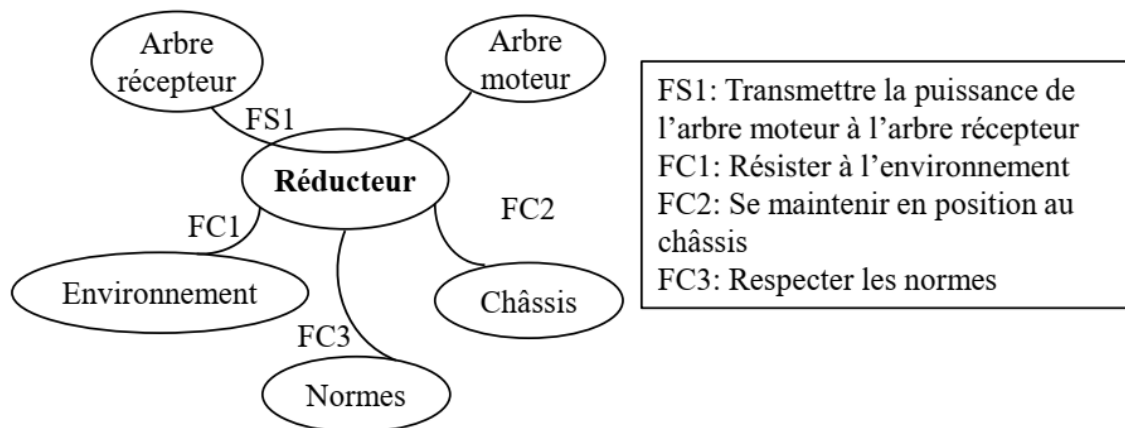


Figure 6.5 : Analyse fonctionnelle externe du réducteur de vitesse

Afin de matérialiser les fonctions de service et de contraintes une analyse fonctionnelle interne est effectuée. En effet, les fonctions techniques (interne du produit) sont développées par l'architecte produit. Elles dépendent de l'activité de conception et de solutions technologiques retenues, elles sont souvent non perçues par le client et ne donnent pas directement la valeur au produit. Contrairement aux fonctions de service qui sont directement perçues par lui et peuvent faire de la valeur au produit.

Cette analyse peut être effectuée à l'aide du diagramme FAST (Functional Analysis System Technique) qui consiste à modéliser le système technique. Ce diagramme permet d'identifier

les différentes fonctions techniques du système et de représenter les solutions constructives qu'il doit mettre en place pour répondre aux spécifications de conception, La Figure 6.6 présente le digramme FAST du réducteur de vitesse pour la fonction FS1.

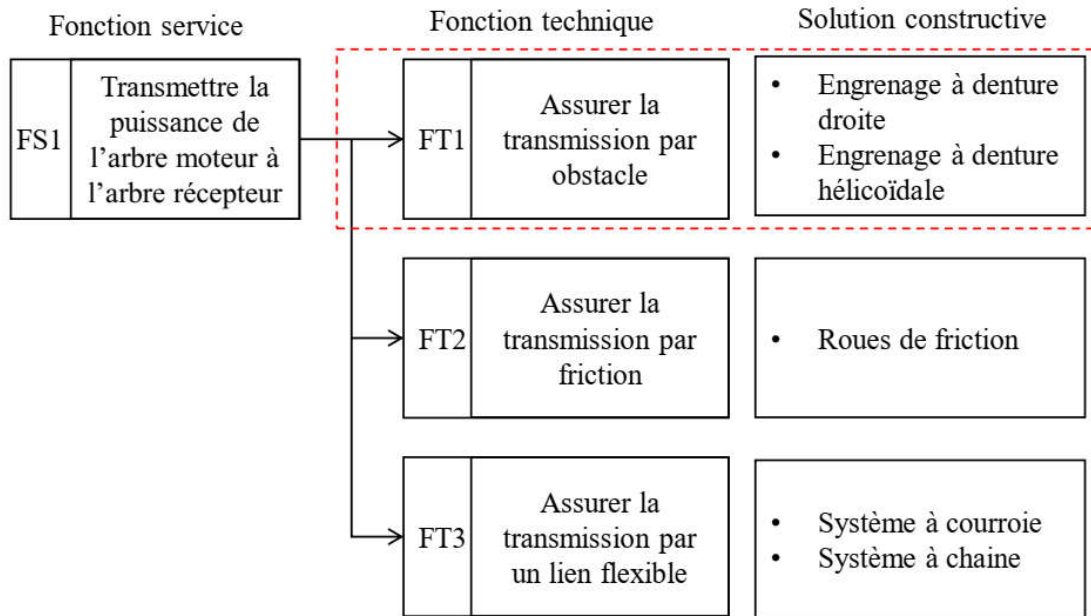


Figure 6.6 : Réalisation de la fonctions FS1 et blocs fonctionnels associées (diagramme FAST)

Dans cette étape, l'architecte produit peut aussi définir les domaines et les disciplines nécessaires au développement du produit, il doit aussi étudier et définir les interactions entre les disciplines afin de localiser la nature de la conception (classique ou multidisciplinaire). Les disciplines qui sont concernées dans ce cas test sont :

- La fiabilité ;
- Le marketing
- Le coût
- La structure

Dans cette étape, pour étudier l'interaction entre les disciplines ou les sous-systèmes, la méthode DSM (Design Structure Matrix) peut être utilisée, elle est considérée comme un outil de conception efficace pour déterminer toutes les interactions et leurs types (forte et faible). En conséquence, l'architecte produit peut orienter les acteurs des étapes subséquentes vers une conception multidisciplinaire ou classique.

Etape 3 : dans cette étape, après avoir défini l'architecture organique du réducteur de vitesse (Figure 6.7), l'architecte produit désigne et affecte les rôles et les tâches aux experts domaines

selon les disciplines citées précédemment. Les experts domaine qui sont concernés à ce type de projet de conception et leurs rôles sont discutés ci-dessous :

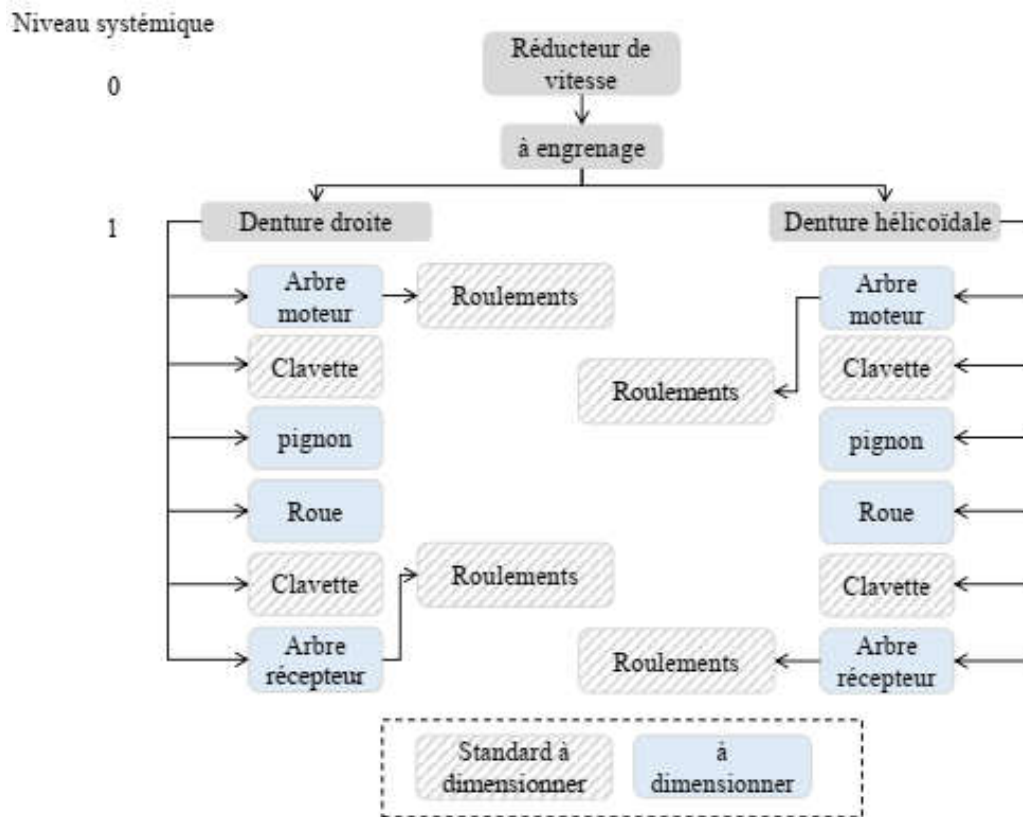


Figure 6.7 : Configuration proposée par l'architecte produit

L'expert en fiabilité évalue la fiabilité du train d'engrenage. Il exploite les données issues du retour d'expériences de la phase exploitation de systèmes de transmission par engrenages, afin de connaître tous les modes de défaillance potentiels de ce type du produit. Généralement, ces modes sont la rupture (par fatigue) des dents, les piqûres (pitting) de la surface de dents et l'usure de la surface de denture. Durant la phase de conception préliminaire, l'expert en fiabilité et l'architecte produit doivent analyser le cycle de vie du produit pour connaître les conditions de travail du futur produit et établir une bonne évaluation de sa fiabilité. Dans ce cas test, les principaux éléments du train d'engrenage qui sont pris en considération pour l'évaluation de la fiabilité sont présentés dans le Tableau 6.3, avec R_{11} et R_{12} désignent respectivement la fiabilité de la résistance à la fatigue en contact de la surface, et en flexion de pied de dents du pignon, R_{22} est la fiabilité de la résistance à la fatigue en flexion de pied de dents de la roue, R_3 et R_4 représentent la fiabilité de la résistance à la fatigue en torsion et en flexion des arbres de transmission du pignon et de la roue, respectivement. Enfin, R_5 et R_6 représentent la fiabilité de roulements de l'arbre pignon et de l'arbre roue, respectivement.

En effet, le développement d'un train d'engrenage a haute fiabilité implique le déploiement de ressources humaines et matérielles de l'entreprise, et nécessite un choix judicieux de procédés de fabrication et de traitements thermiques. Evidemment, cela aura un impact significatif sur son coût final (Adjoul et al., 2019 ; Adjoul et al, 2020).

Tableau 6.3 : Les éléments du train d'engrenage considérés pour l'évaluation de la fiabilité

Composant	Fiabilité
Pignon	$R_{11} \times R_{12}$
Roue	$R_{21} \times R_{22}$
Arbre pignon	R_3
Arbre roue	R_4
Roulement de l'arbre pignon	$(R_5)^2$
Roulement de l'arbre roue	$(R_6)^2$

L'**expert en marketing** (ou de préférence d'utilisateur) veille à la prise en considération des préférences d'utilisateur afin d'améliorer la productivité et d'augmenter les chances du succès du produit sur le marché. Actuellement, le principal défi des entreprises est de savoir comment associer les attributs du produit à la satisfaction de l'utilisateur. Dans ce contexte, l'analyse conjointe et les modèles de KANO sont deux approches populaires et les plus utilisées pour mesurer la satisfaction de l'utilisateur. L'analyse conjointe permet de mesurer l'impact des attributs du produit sur le niveau de satisfaction et les préférences d'utilisateur à l'aide de trois modèles différents : le modèle vectoriel, le modèle de point idéal et le modèle de fonction d'utilité. Dans ce cas test, l'expert en marketing peut utiliser le troisième modèle pour la modélisation de préférences d'utilisateur car il relie les attributs du produit et les préférences d'utilisateur sous forme d'une fonction linéaire qui peut être intégrée facilement dans le processus d'optimisation. Le Tableau 6.4 présente les attributs de produit considérés pour évaluer les préférences d'utilisateur qui sont le poids total de produit, la déflexion de la dent (présentée en Annexe) selon le modèle d'Ishikawa (Wang et al., 2017) et la qualité d'engrenage selon la norme ISO.

Contrairement au modèle de Kano, qui est basé sur un modèle graphique à deux dimensions pour présenter l'impact des attributs du produit sur la satisfaction des préférences utilisateurs, l'élaboration de ce modèle est basée sur des questionnaires qui permettent d'en cartographier

les réponses. Dans ce modèle, les attributs du produit sont classés en cinq catégories principales : performance, basique, attractive, indifférent et inversé.

Tableau 6.4 : Les attributs de produit et leurs poids

Attributs de produit	Segments de marché	
	Machine A	Machine B
Poids de produit	0.2	0.4
Déflexion de la dent	0.5	0.3
Qualité d'engrenage	0.3	0.3

L'**expert de coût** estime le coût total du produit qui est considéré comme un facteur très significatif de performance, il doit être optimisé afin de garantir la compétitivité de l'entreprise dans le marché. Les techniques d'estimation du coût sont classées en deux catégories principales, qui sont qualitatives et quantitatives. Les techniques qualitatives d'estimation du coût reposent essentiellement sur une analyse comparative entre le nouveau produit et les produits déjà réalisés afin d'identifier la similitude entre eux. Ces techniques peuvent aussi être classées en deux types : intuitives et analogiques. Les techniques quantitatives reposent sur une analyse détaillée de la conception du produit, de ses caractéristiques et ses propriétés et des procédés de fabrication correspondants. Les techniques quantitatives sont divisées en techniques paramétriques et analytiques. Dans ce cas test, l'**expert de coût** utilise la technique paramétrique pour estimer le coût total du train d'engrenage. Toutes les données utilisées dans cette activité sont présentées en Annexe.

L'**expert en structure** développe les modèles analytiques décrivant le comportement mécanique du produit et qui sont fondamentaux pour vérifier que tous les composants de produit satisfont les contraintes mécaniques telles que la résistance à la flexion de pied de dents, la résistance à la pression de contact (pression de Hertz) et la résistance à la torsion et à la flexion des arbres de transmission. Il se base pour ce développement sur les normes ISO et le code ASME.

En fait, les acteurs cités précédents sont censés développer les modèles analytiques appropriés décrivant le comportement et les performances du réducteur afin de formuler le problème d'optimisation, en prenant en compte toutes les interactions entre les sous-systèmes et les composants (Figure 6.8). Chaque expert domaine doit choisir une méthode ou une approche qui convient à son développement en respectant les exigences du concepteur définies par l'architecte produit.

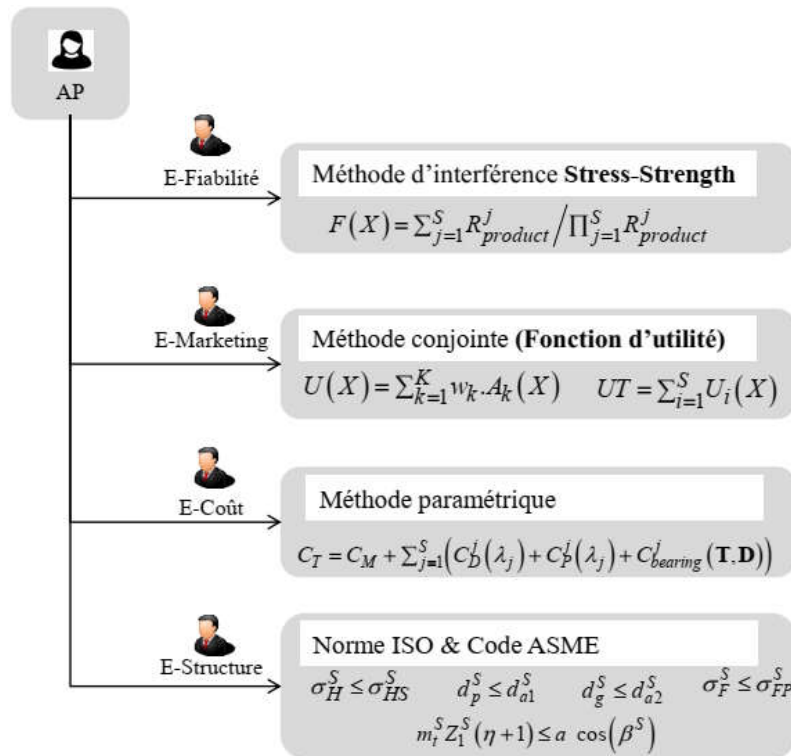


Figure 6.8 : Tâches et rôles de chaque expert domaine

Etape 4 : dans cette étape l'expert en optimisation prépare la formulation mathématique du problème d'optimisation considéré et détermine tous les éléments nécessaires à la configuration de prétraitement. Il peut sélectionner l'algorithme d'optimisation adéquat y compris : ses paramètres spécifiques, l'architecture de la procédure d'optimisation multidisciplinaire (mono-niveau ou multi-niveaux), la méthode de traitement des contraintes (pénalité ou domination sous contraintes). Cet acteur devrait garantir la convergence de l'optimisation et la qualité des résultats. Il est responsable aussi durant la partie de post-traitement de la présentation et l'interprétation des résultats d'optimisation au concepteur qui est l'utilisateur final des résultats.

Dans ce cas test, l'expert en optimisation peut utiliser l'approche MDF (Multidisciplinary Feasible) pour gérer l'interaction entre les quatre disciplines (Figure 6.9). Cette approche est bien recommandée pour traiter les problèmes de conception routinière et peut résoudre efficacement le problème de pré-dimensionnement du train d'engrenage. Il faut noter qu'au niveau processus de conception, le problème d'optimisation adapté doit assurer une réalisation multidisciplinaire à chaque itération du processus d'optimisation, cette propriété est propre à l'approche MDF qui permet de mettre fin au processus d'optimisation à n'importe quelle itération avec la certitude d'avoir des solutions faisables de point de vue disciplinaire et qui sont acceptables du point de vue concepteur.

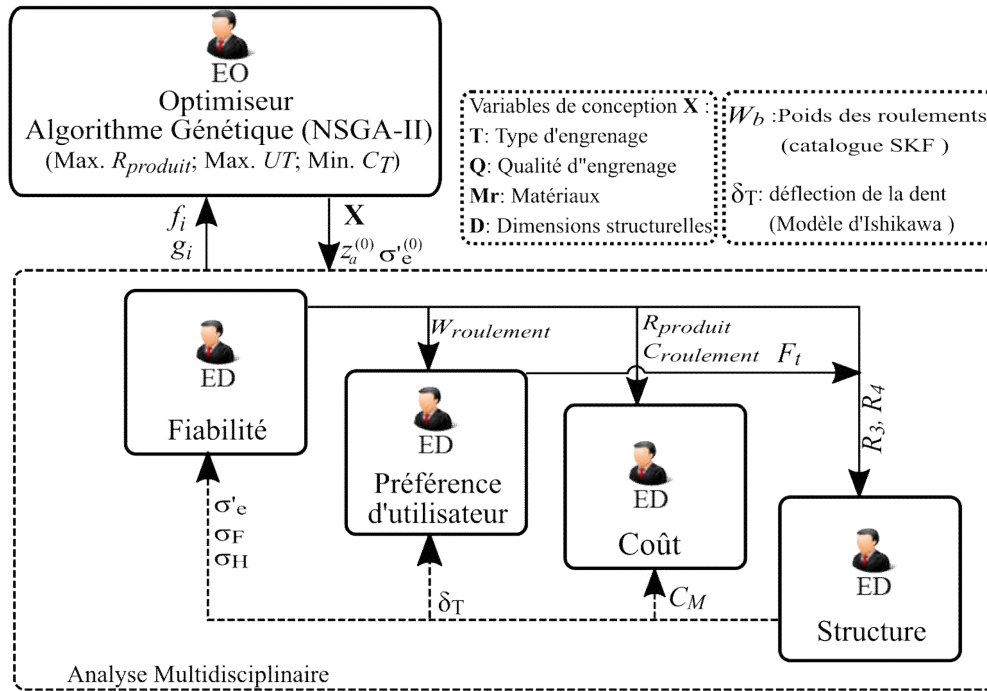


Figure 6.9 : Approche MDF adaptée

Généralement, l'approche MDF est la plus simple à implémenter et la plus utilisée pour résoudre les problèmes d'optimisation en conception multidisciplinaires. Cette approche requière un analyseur multidisciplinaire (MDA) pour chaque itération du processus d'optimisation (Figure 6.9) qui est gouverné par un seul optimiseur nommé « optimiseur global ». Ce dernier est géré et contrôlé par l'expert en optimisation, il envoie un vecteur des variables de conception aux disciplines (experts domaines) et reçoit un retour des données, une fois que l'analyseur multidisciplinaire (MDA) atteint son équilibre interdisciplinaire, ces données sont utilisées par l'expert en optimisation pour calculer les fonctions objectives et les contraintes de son problème d'optimisation.

L'avantage de l'approche MDF est que la taille du problème d'optimisation reste inchangé, et la résolution se fait sans l'introduction de contraintes supplémentaires au problème d'optimisation et toutes les variables de conception et les contraintes sont contrôlées de manière directe par l'optimiseur global. Un autre avantage est que l'approche MDF fournit toujours des solutions de conception acceptables, même si le processus d'optimisation est arrêté plus tôt. Ceci est important dans l'ingénierie de la conception, en particulier si le temps de développement est limité ou si les concepteurs cherchent à trouver des solutions de conception améliorées plutôt qu'à trouver des solutions de conception optimales dans le sens mathématique.

Dans ce cas test, le problème d’optimisation formulé par l’expert en optimisation est présenté par la Figure 6.10.

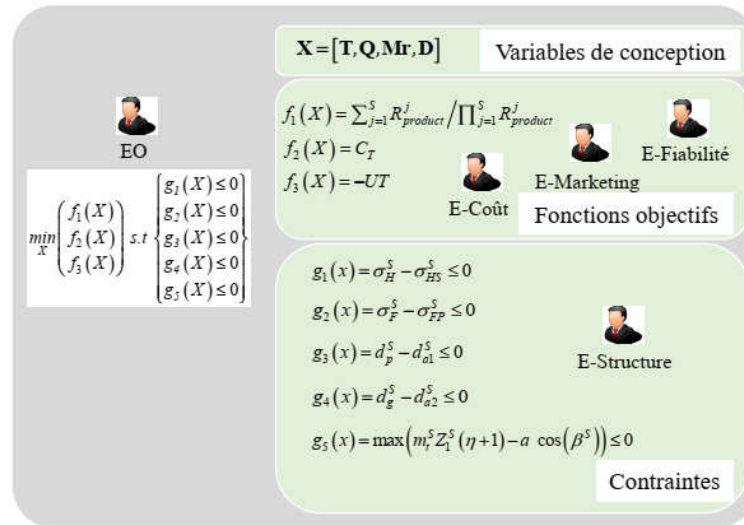


Figure 6.10 : Problème OMD du train d’engrenage

Les variables de conception du problème OMD adaptées dans ce cas test par l’expert en optimisation en collaboration avec des experts disciplinaires sont présentées comme suit :

- **T** : le type de produit prend deux valeurs binaires ($T=1$ pour engrenage à denture droite) et ($T=2$ pour engrenage à denture hélicoïdale),
- **Q** : la qualité de l’engrenage selon la norme ISO prenant quatre valeurs entières qui sont (5, 6, 7, 8),
- **Mr** : les propriétés mécaniques des matériaux pour l’engrenage et les arbres de transmission, qui sont présentées en Annexe (Tableau 7.4),
- **D** : les paramètres dimensionnels du train d’engrenage qui sont: la largeur de la dent $25 \leq b \leq 35$, le module réel $m_n = (2.5, 2.75, 3, 3.5)$, le nombre de dents $Z_1 = (20, 21, 22, 23, 24)$, le diamètre de l’arbre pignon $35 \leq d_1 \leq 50$ et le diamètre de l’arbre roue $45 \leq d_2 \leq 60$.

Le problème d’optimisation formulé (Figure 6.10) est un problème multi-objectif non linéaire sous contraintes comprenant des variables de conception mixtes (entières, discrètes, continues). L’expert en optimisation peut résoudre ce problème à l’aide de l’algorithme évolutionnaire à population (NSGA-II), qui est considéré comme l’un des algorithmes évolutionnaires le plus utilisés, il est capable de trouver l’ensemble de solutions optimales du front de Pareto avec une excellente diversité. Pour résoudre ce problème, les principaux paramètres de l’algorithme génétique NSGA-II adaptés par l’expert en optimisation sont :

- i). la taille de la population : 600 ;
- ii). le nombre de générations : 700 ;
- iii). le taux de croisement : 0.8 ;
- iv). la probabilité de mutation : 0.5.

Après la résolution de ce problème, les résultats d'optimisation (Figure 6.11) doivent être présentés et interprétés devant le concepteur par l'expert en optimisation.

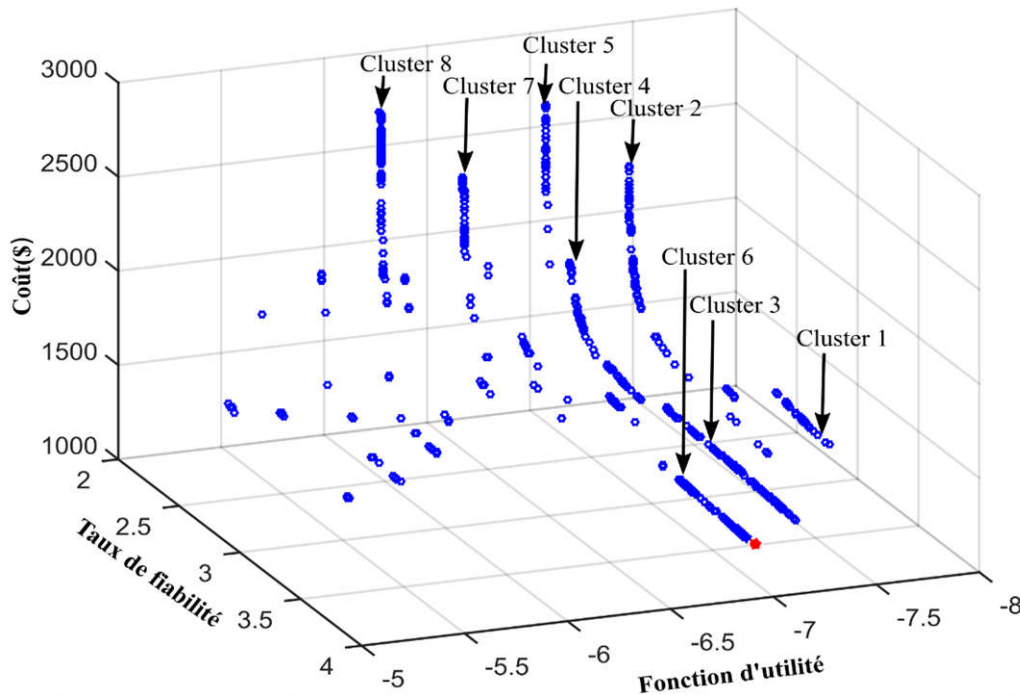


Figure 6.11 : Fronts de Pareto obtenus du problème OMD

Après calcul, l'optimisation a convergé vers les solutions optimales du front de Pareto (3D) représenté par la Figure 6.11. Ces solutions réalisent le compromis entre les objectifs de conception du CdCF à savoir : les préférences d'utilisateur (fonction d'utilité), la fiabilité et le coût du produit tout en satisfaisant les contraintes structurelles. Ce front de Pareto est composé par huit clusters, dont chaque point représente la solution de conception pour deux produits (segment A et segment B). Par exemple, la solution de conception ultime du cluster 6 (le point rouge sur la Figure 6.11) ayant les performances suivantes : le taux de fiabilité = 3,989, la fonction d'utilité = 6,9 et le coût total = 1299 \$.

Les solutions du cluster 1 possède une fonction d'utilité maximale ($UT = 7.7$) par rapport aux autres clusters. Toutes ces solutions représentent un train d'engrenage à denture hélicoïdale ($T = 2$) pour les deux segments du marché ciblé (A et B), son module m_n prend la valeur 2,75 ou 3 et son nombre de dents prend la valeur 22 ou 23, ces valeurs se trouvent

dans les bornes inférieures de paramètres dimensionnelles \mathbf{D} , ceci peut expliquer que les deux attributs du produit (poids et déflexion de la dent) influencent davantage sur la fonction d'utilité. Nous pouvons également remarquer que le coût et la fiabilité du produit sont considérablement faibles comparativement aux clusters 2-8. Dans le cluster 2, la fonction d'utilitaire décroît ($UT=7.4$) alors que le coût et la fiabilité du produit augmentent considérablement par rapport au premier cluster. Toutes les solutions de ce cluster représentent un train d'engrenages à denture droite pour les deux segments de marché (segment A et segment B), son module $m=4$ et son nombre de dents $Z_1=24$. Dans les clusters 3 et 6, les solutions représentent des trains d'engrenage à denture droite ou à denture hélicoïdale pour les deux segments du marché. Ils possèdent respectivement les fonctions d'utilité ($UT=7.2$) et ($UT=6.9$). Quant aux fonctions de coût et de fiabilité, elles sont minimales en raison des faibles valeurs de dimensions structurelles et de propriétés des matériaux. Dans les clusters 5 et 8, les solutions ont les fonctions d'utilité ($UT=6.2$) et ($UT=7.0$) respectivement, et inscrivent des valeurs maximales du coût et de la fiabilité. Toutes les solutions de ces clusters représentent des trains d'engrenages à denture droite pour les deux segments du marché ciblé.

Suite à l'analyse de ces résultats, nous pouvons constater que le type d'engrenage, les dimensions structurelles et le choix des matériaux sont les facteurs les plus déterminants dans la conception préliminaire d'un train d'engrenage. En outre, selon la Figure 6.11 les concepteurs pourraient choisir une (ou des) solution(s) en respectant à la fois la stratégie de l'entreprise, les besoins de clients et les contraintes du cycle de vie. Par exemple, si l'objectif est de concevoir une train d'engrenage à haute fiabilité et à moindre coût, le choix préféré porte sur les clusters 5 et 8.

Etape 5 : c'est la dernière étape du processus de premier niveau de conception et d'optimisation. Selon l'interprétation des résultats fournie par l'expert en optimisation dans l'étape précédente, le concepteur en collaboration avec certains experts de domaines spécifiques doit sélectionner une (ou des) solution(s) de conception optimale(s), qui vérifient les objectifs et les contraintes de son projet de conception. Ces solutions seront étudiées et raffinées dans la phase de conception détaillée. Si les solutions obtenues ne sont pas acceptables, il peut décider de faire retourner l'équipe de conception vers l'étape initiale en apportant des modifications sur le cahier des charges fonctionnel. Afin de sélectionner des solutions acceptables parmi les solutions optimales du front de Pareto, le concepteur peut

s’appuyer sur la méthode Design for X qui lui permet d’éliminer certaines subjectivités de ses préférences de décision.

6.5 Cas test 2

Pour ce deuxième cas test, nous avons appliqué tous les éléments de l’approche proposée (les deux niveaux (1 et 2) et l’étape intermédiaire) afin de valider la deuxième hypothèse, qui se focalise sur la manière d’implémenter les techniques mathématiques d’optimisation et les modèles prédictifs du produit dans la phase de conception préliminaire. A partir du cahier des charges (Tableau 6.1), l’équipe de conception commence à développer le modèle analytique du produit sur lequel se base la formulation du premier problème d’optimisation. L’avantage de ce modèle et qu’il permet d’explorer l’espace de conception dans un temps raisonnable. Dès que le premier niveau est achevé, les activités de conception et d’optimisation continueront sous la direction du concepteur en accord avec l’avis de l’expert. En fait, une étape intermédiaire, dans laquelle les modèles numériques de simulation sont générés et validés, doit être exécutée. Après cela, le deuxième niveau de conception et d’optimisation est exécuté, dans ce niveau des méta-modèles sont construits et exploités pour améliorer d’avantage le produit.

6.5.1 Premier niveau de conception et d’optimisation

Dans ce 2^{ème} cas test, le déroulement de premier niveau est similaire à celui de premier cas test (Figure 6.4). Nous essayons de présenter brièvement les étapes qui en découlent.

Etape 1 : d’après le cahier des charges (Tableau 6.1), l’objectif de conception retenu par le concepteur est que : le produit doit avoir une bonne performance en terme du poids ;

Etape 2 : en prenant en considération les spécifications du concepteur, l’architecte produit décompose et définit l’objectif de conception en deux critères de performance notamment :
i) le produit doit avoir une bonne tenue mécanique, et *ii)* le produit doit avoir un poids minimal.

Etape 3 : la réalisation de l’objectif de conception retenu nécessite une conception mono-disciplinaire, donc l’architecte produit peut collaborer avec seulement un expert domaine (expert de structure) dans ce niveau, afin de développer le modèle analytique du produit, comme illustré par la Figure 6.12.

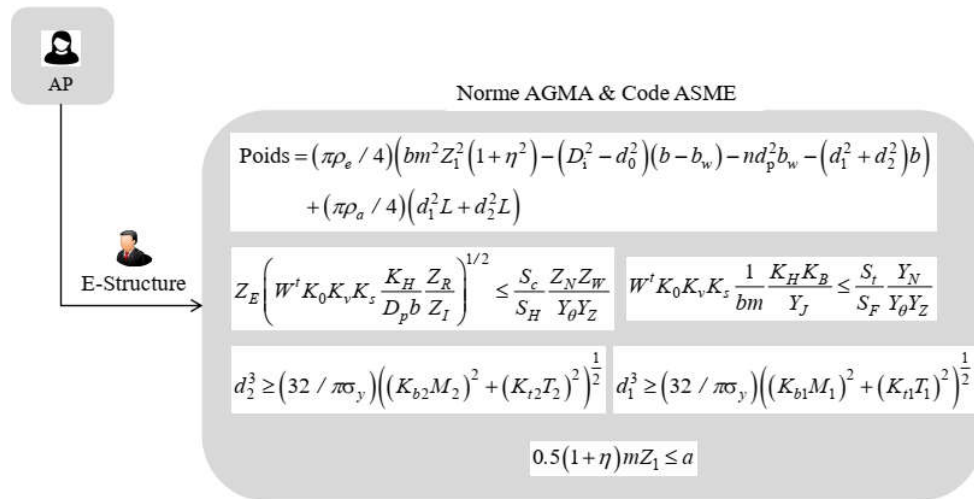


Figure 6.12 : Tâche et rôle d'expert de structure

Dans ce niveau, l'expert de structure peut s'appuyer sur la norme AGMA et le code ASME respectivement pour développer la formulation analytique des conditions de résistance mécanique pour l'engrenage, à savoir la résistance à la flexion en pied de dents et la résistance à la pression de contact (pitting), ainsi que les deux conditions de résistance en fatigue pour les arbres de transmission. En prenant en compte tous les facteurs de correction exigés par cette norme et les coefficients de concentration de contrainte au niveau de logements de clavette pour les arbres. Il peut aussi définir l'espace de conception et les paramètres d'entrée de sa discipline (Tableau 6.5)

Tableau 6.5 : Espace de conception

Variable	Nature	Limite
b	Continue	[25, 40]
d_1	Continue	[20,40]
d_2	Continue	[20,40]
Z_1	Entière	{18,19,...,25}
m	Discrète	{2.5, 2.75, 3, 3.5, 4}

Étape 4 : dans cette étape, l'expert en optimisation formule le problème d'optimisation (cf. Figure 6.13) à partir de la modélisation développée dans l'étape précédente. Il peut collaborer aussi avec l'expert de structure pour réajuster l'espace de conception. Ce problème d'optimisation est un problème mono-objectif avec contraintes dont l'espace de conception est défini par des variables mixtes (continues, entières et discrètes). Selon la nature du problème d'optimisation ainsi formulé, il peut donc choisir l'algorithme d'optimisation adéquate pour le résoudre. En fait, le choix s'est orienté vers l'algorithme génétique qui est disponible dans la Toolbox Global Optimization du logiciel Matlab®, en adaptant les


paramètres suivants : 1) la probabilité de croisement = 0.6, 2) la probabilité de migration=0.1, 3) la taille de la population = 250, 4) le nombre de générations = 500. La meilleure solution obtenue est donnée dans le Tableau 6.6, elle est présentée au concepteur afin qu'il puisse se préparer à l'étape suivante.


Tableau 6.6 : Résultat du premier niveau

Paramètres	Valeur
b	36.5904
d_1	22.9419
d_2	25.6013
Z_1	22
m	2.5
Poids optimal	5059.14gram

$X = (b, m, Z, d_1, d_2)$
Variables de conception

$$f_1(X) = (\pi \rho_e / 4) (bm^2 Z^2 (1 + \eta^2) - (D_1^2 - d_0^2)(b - b_w) - nd_p^2 b_w - (d_1^2 + d_2^2)b) + (\pi \rho_a / 4) (d_1^2 L + d_2^2 L)$$


EO


E-Structure

Fonction objectif

$$\min_x f_1(X) \text{ s.t. } \begin{cases} g_1(X) \leq 0 \\ g_2(X) \leq 0 \\ g_3(X) \leq 0 \\ g_4(X) \leq 0 \\ g_5(X) \leq 0 \end{cases}$$


$$g_1(x) = Z_E \left(W^t K_0 K_1 K_2 \frac{K_H Z_R}{D_p b Z_I} \right)^{1/2} - \frac{S_c}{S_H} \frac{Z_N Z_W}{Y_\theta Y_Z} \leq 0$$

$$g_2(x) = W^t K_0 K_1 K_2 \frac{1}{bm} \frac{K_H K_B}{Y_j} - \frac{S_i}{S_F} \frac{Y_N}{Y_\theta Y_F} \leq 0 \quad \text{E-Structure}$$

$$g_3(x) = (32 / \pi \sigma_y) \left((K_{b1} M_1)^2 + (K_{r1} I_1)^2 \right)^{1/2} - d_1^3 \leq 0$$

$$g_4(x) = (32 / \pi \sigma_y) \left((K_{b2} M_2)^2 + (K_{r2} I_2)^2 \right)^{1/2} - d_2^3 \leq 0$$

$$g_5(x) = 0.5(1 + \eta)mZ_1 - a \leq 0$$


E-Structure

Contraintes

Figure 6.13 : Problème d'optimisation du train d'engrenage

Étapes 5 : elle représente la dernière étape du premier niveau, c'est une étape de décision. Elle est caractérisée par la présence d'un expert en domaine spécifique qui n'est pas sollicité durant le premier niveau (Figure 6.14). Dans ce cas test, le concepteur en collaboration avec cet expert peut prendre une décision sur la nécessité d'entreprendre le deuxième niveau afin d'apporter des améliorations supplémentaires sur la conception et la performance de produit (poids).

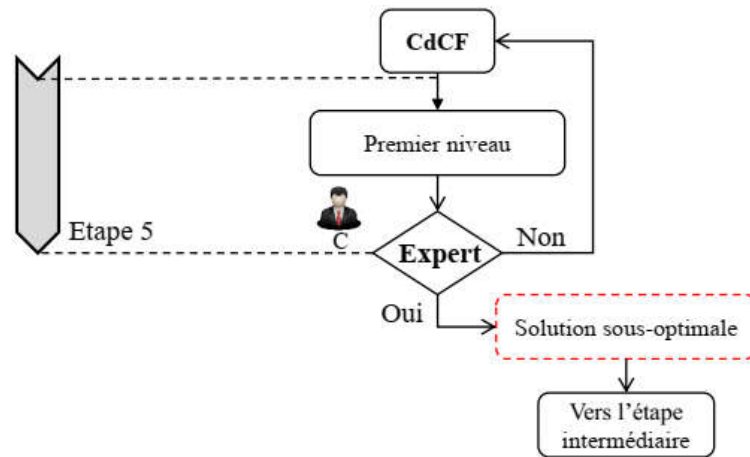


Figure 6.14 : Processus de premier niveau

6.5.2 Etape intermédiaire

Cette étape assure le passage entre les deux niveaux de conception et d’optimisation et a pour but de générer et valider les modèles numériques de simulation, elle s’entreprind suite à une décision du concepteur. En effet, elle est évoquée dans le cas où la solution de conception ne répond pas aux objectifs de cahier des charges, ou on cherche une amélioration particulière de certaines performances de produit. Dans notre 2^{ème} cas test, le concepteur vise à améliorer le poids de produit (solution du premier niveau). Cette étape intermédiaire est composée par trois étapes principales (Figure 6.15) qui sont décrites ci-dessous :

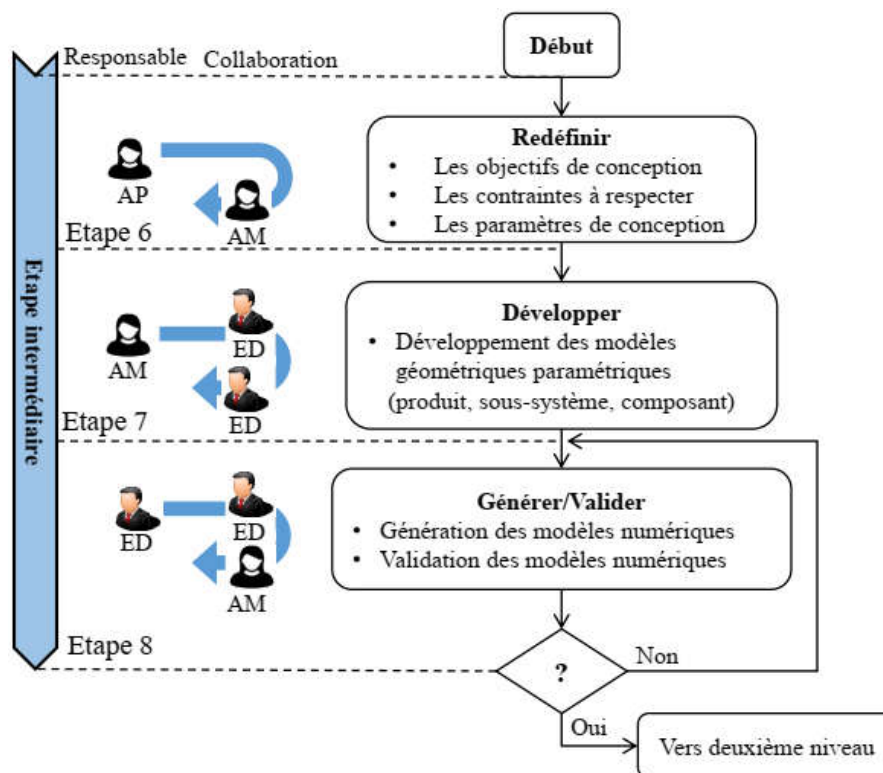


Figure 6.15 : Processus de l’étape intermédiaire

Etape 6 : dans cette étape, l'architecte produit transmet les spécifications du concepteur et l'objectif de la conception à l'architecte modèle. Il lui définit aussi les contraintes de ce projet de conception en termes du temps et du coût. Dans ce cas test, l'objectif de conception est la minimisation du poids de produit sans la détérioration des autres paramètres ou comportements du produit.

Etape 7 : Afin d'assurer le passage au deuxième niveau, l'architecte modèle et l'expert domaine adoptent le logiciel SolidWorks® comme un outil de conception et de simulation pour générer le modèle géométrique du produit et les modèles numériques de simulation. En premier lieu, en utilisant la fonction "Equation" du logiciel afin de construire une conception paramétrique du produit (Figure 7.2 présentée en Annexe) dans laquelle tous les paramètres de conception nécessaires sont introduits, en s'appuyant toujours sur les résultats trouvés dans le premier niveau. En fait, le modèle analytique utilisé dans le premier niveau permet de fournir une solution sous-optimale acceptable dans un temps de calcul raisonnable. Cependant, ce modèle ne permet pas de traduire tous les comportements désirés en termes de formulation mathématique, en particulier dans certaines zones critiques où les concepteurs souhaitent apporter des modifications ou des améliorations possibles. Par contre, dans le deuxième niveau, grâce au modèle paramétrique construit sous le logiciel SolidWorks® (cf. Figure 6.16), les acteurs de conception peuvent accéder à n'importe quelle zone de modèle du produit.

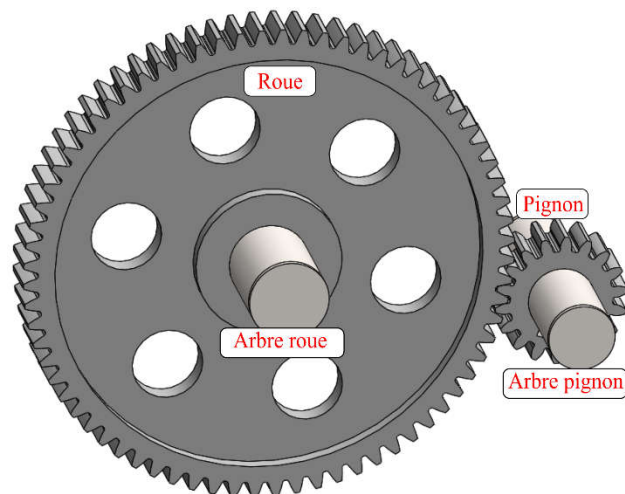


Figure 6.16 : Modèle géométrique 3D du réducteur de vitesse

Etape 8 : l'expert domaine (structure) génère les modèles numériques de simulation selon les objectifs de conception fixés par l'architecte modèle. Ces modèles sont construits en utilisant l'étude statique disponible sous l'outil simulation de SolidWorks®, ils sont utilisés dans le

deuxième niveau pour évaluer les performances désirées du train d'engrenages. La génération et la validation d'études statiques sont décrites ci-dessous :

- **Etude statique 1** : Cette étude permet d'évaluer deux types de contraintes : la contrainte de flexion en pied de dents du pignon et la pression de contact (correspondant aux contraintes g_1 et g_2 du premier niveau respectivement). Pour cela, l'expert structure développe un modèle éléments finis (Figure 7.3 présentée en Annexe) en se basant sur des références de la littérature. Ce modèle repose sur le choix de la position de contact, où la contrainte de flexion en pied de dents du pignon et la pression de contact sont maximales, cela représente un point de contact unique dans la ligne d'action (HPSTC). Le raffinement du maillage est très important pour évaluer la pression de Hertz dans la région de contact. Les paramètres de maillage de cette étude statique développée sont présentés dans le Tableau 7.5 présenté en Annexe. Afin de valider ce modèle numérique, des études comparatives sont réalisées entre les résultats de la solution du premier niveau, de la formule de Lewis, de la théorie de Hertz et de la norme AGMA ; les résultats sont présentés dans le Tableau 7.6 en Annexe. Selon ce tableau, les résultats obtenus par la méthode d'éléments finis sont proches de ceux obtenus par la norme AGMA.
- **Étude statique 2 et 3** : Le but de ces études statiques est d'évaluer les contraintes de von Mises des arbres de transmission (pignon et roue), avec prise en compte de l'effet de la concentration de contrainte dans la rainure de clavette. Ces études correspondent aux contraintes g_3 et g_4 du premier niveau, en introduisant également les moments de flexion dans le plan vertical et horizontal dus aux forces radiales et tangentielles. En se basant sur des références de la littérature spécialisée, les experts construisent des modèles numériques (Figure 7.4 présentée en Annexe). Les dimensions des clavettes adoptées selon la norme ISO R773 sont présentées dans le Tableau 7.7 en Annexe. Le Tableau 7.8 (voir l'Annexe) présente une comparaison entre les résultats de la solution de premier niveau, les résultats de la théorie de contrainte de cisaillement maximale (TCCM) et celle obtenue par les modèles numériques pour les arbres du pignon et de la roue. Compte tenu de la similitude des résultats obtenus par les deux méthodes (FEM et TCCM), plusieurs tests sont effectués pour valider les modèles numériques.
- **Etude statique 4** : La modification géométrique de la roue permet de réduire le poids du réducteur de vitesse, mais elle affecte négativement sa rigidité. Pour cette raison, on doit introduire deux contraintes supplémentaires au problème d'optimisation, la

première représente la résistance à la flexion en pied de dents de la roue g_6 et la seconde correspond à la contrainte de von Mises g_7 dans la gante. Un autre modèle numérique correspondant à cette étude est construit, comme indiqué dans la Figure 7.5 présentée en Annexe. Il représente une configuration critique dans laquelle les deux contraintes sont maximales, cette configuration correspond à un seul point de contact dans la ligne d'action, et l'angle entre l'axe du trou et la dent en cours du contact est égal à 10° (Figure 7.6 présentée en Annexe). Les paramètres de maillage utilisés dans cette étude sont présentés dans le Tableau 7.5 (voir l'Annexe).

6.5.3 Deuxième niveau de conception et d'optimisation

Dans ce niveau, il est possible de réévaluer la conception optimale trouvée dans le premier niveau de la procédure et d'y apporter quelques améliorations supplémentaires. En outre, les acteurs de conception de ce niveau peuvent ajouter des variables de conception au problème original afin de bien explorer l'espace de conception. De plus, il peut y avoir des comportements qui ont été ignorés dans le premier niveau ou qui étaient difficiles à évaluer par le biais du modèle analytique. Maintenant, grâce au modèle numérique, ils peuvent être analysés en détail.

Le processus de déroulement du deuxième niveau de conception et d'optimisation est présenté sur la Figure 6.17.

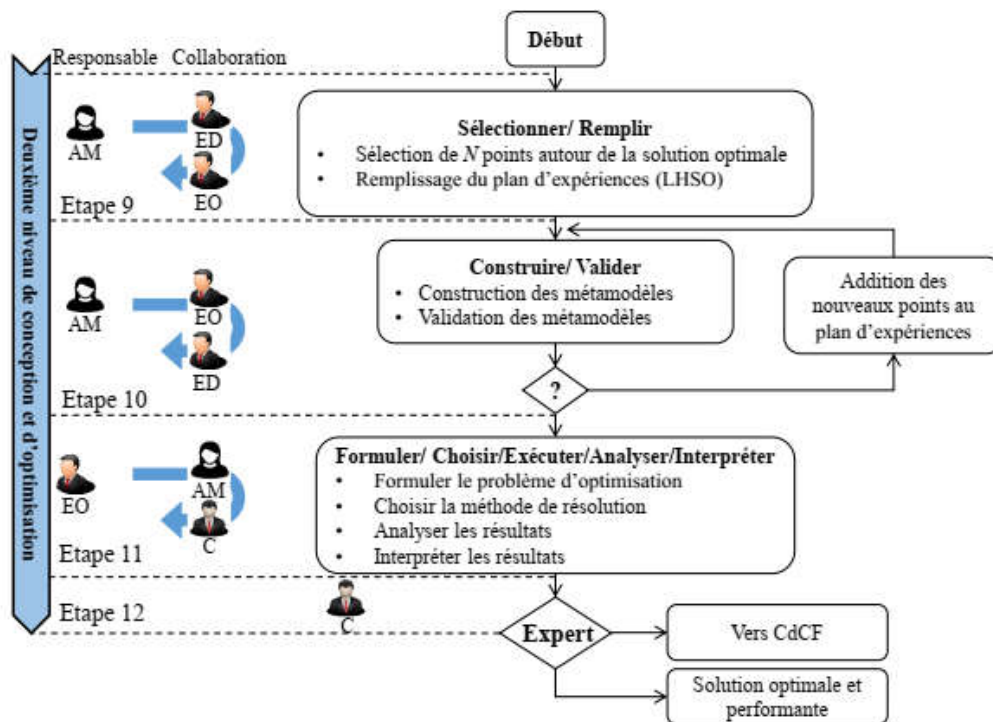


Figure 6.17 : Processus du deuxième niveau

Etape 9 : l'architecte modèle en collaboration avec l'expert domaine et l'expert en optimisation sélectionnent N points (ici $N= 40$) autour de la solution optimale du premier niveau afin de construire et remplir le plan d'expériences adapté à ce cas d'étude. En effet, dans cette étape l'évaluation de performances désirées sont devenues possibles et en plus, de nouveaux paramètres de conception sont introduits dans le problème d'optimisation, tels que : l'épaisseur de la gante et les diamètres d'évidement (cf. Figure 6.18). Cette étape peut être résumée dans les deux points suivants :

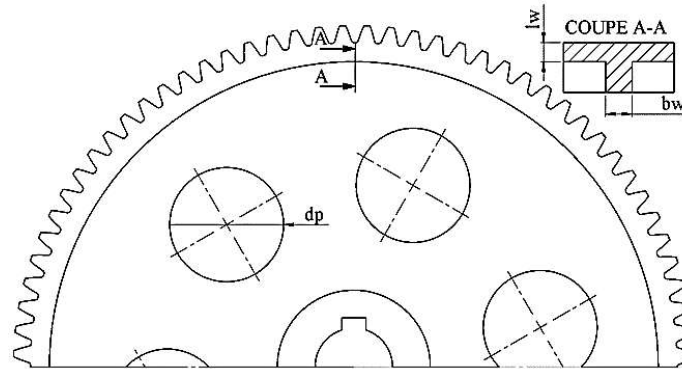


Figure 6.18 : Trois paramètres de conception ajoutés dans le deuxième niveau

- Génération d'un nouvel espace de conception autour de la solution sous-optimale trouvée dans le premier niveau. Cela permet d'un côté de réduire la taille du plan d'expériences (DoE) et de l'autre côté d'améliorer la qualité des métamodèles à construire. Le Tableau 6.7 illustre les nouvelles variables de conception adoptées et leurs limites. On utilise le logiciel Matlab[®] pour générer le plan d'expériences de type Latin Hypercube Sampling Optimisé (LHSO) qui est généralement le plus adapté à la construction du métamodèle de type RBF. Ensuite, ce plan d'expériences est exporté vers le logiciel SolidWorks[®] via un fichier Excel.
- Après avoir importé le plan d'expériences dans le logiciel SolidWorks[®]. Des études statiques (Modèles numérique) développées dans l'étape intermédiaire sont exécutées à l'aide de l'étude de conception disponible dans l'outil simulation de SolidWorks[®], dans lequel des capteurs spécifiques sont créés pour évaluer la fonction objectif et les contraintes. Les résultats obtenus sont ensuite exportés vers le Matlab[®] via un fichier Excel.

Tableau 6.7 : Nouvel espace de recherche généré

Variable	Nature	Limite
b	Continue	[35.5, 37.5]

d_1	Continue	[21.1, 24.1]
d_2	Continue	[24.5, 26.6]
Z_1	Entière	{21,22,23}
m	Discrète	{2.5, 2.75}
l_w	Continue	[5.25, 7.25]
b_w	Continue	[7.75, 57]
d_p	Continue	[26.6, 49]

Etape 10 : Dans cette étape, l'architecte modèle en collaboration avec l'expert domaine et l'expert en optimisation construisent sept métamodèles de type RBF en utilisant le logiciel Matlab[®] afin de formuler le nouveau problème d'optimisation. En effet, il y a cinq métamodèles qui correspondent au problème d'optimisation du premier niveau plus deux autres métamodèles ajoutés dans ce niveau pour évaluer les contraintes dans la roue. Enfin, un processus de validation du métamodèle est nécessaire afin d'évaluer leur fidélité. Pour chaque métamodèle, ce processus se fait itérativement, à chaque itération si le métamodèle ne vérifie pas les quatre critères de mesure (section 5.2.4), on ajoute de nouveaux points au plan d'expériences associé jusqu'à l'obtention d'un métamodèle à haute-fidélité. Le Tableau 7.9 présenté en Annexe récapitule les résultats de cette validation.

Etape 11 : dans cette étape, l'expert en optimisation peut formuler à nouveau le problème d'optimisation du deuxième niveau à partir des métamodèles construits et validés dans l'étape précédente. Il peut aussi collaborer avec l'expert de structure pour réajuster l'espace de conception. Le problème d'optimisation de ce deuxième niveau est un problème mono-objectif avec contraintes (au nombre sept) dont l'espace de conception est composé par des variables mixtes (continues, entières et discrètes). Sa résolution nécessite l'utilisation de l'algorithme génétique qui est disponible dans la Toolbox Global Optimization du logiciel Matlab[®], en adaptant les paramètres suivants : 1) la probabilité de croisement = 0.6, 2) la probabilité de migration=0.1, 3) la taille de la population = 200, 4) le nombre de générations = 500. Les résultats de résolution de ce problème d'optimisation sont présentés dans le Tableau 6.8. Ces résultats sont présentés au concepteur afin qu'il puisse préparer l'étape de décision suivante. La solution optimale obtenue est vérifiée et comparée par rapport à celle trouvée dans le premier niveau (réduction du poids de 20.83%).

Tableau 6.8 : Résultats de deuxième niveau

Paramètres	Valeur
b	35.7495
d_1	22.853
d_2	25.8654
Z_1	22
m	2.5
l_w	6.2004
b_w	8.2535
d_p	56.3689
Poids minimal	4005.44gramme

Etape 12 : c'est la dernière étape de l'approche de conception et d'optimisation proposée. Elle se caractérise par la présence d'un expert en domaine spécifique. Dans ce cas test, le concepteur en collaboration avec cet expert peut prendre une décision sur l'obligation de revenir en arrière, vers le cahier des charges, si la solution optimale trouvée n'est pas acceptable en raison de la non satisfaction de certains objectifs ou contraintes de conception, sinon la solution trouvée est acceptée et sera introduite dans la phase de conception détaillée.

La Figure 6.19 illustre la mise en œuvre de l'étape intermédiaire ainsi que le deuxième niveau de l'approche proposée en utilisant :

- Le logiciel SolidWorks® pour la simulation numérique et le calcul
- Le logiciel Matlab® pour générer le plan d'expériences, les métamodèles et l'optimisation.

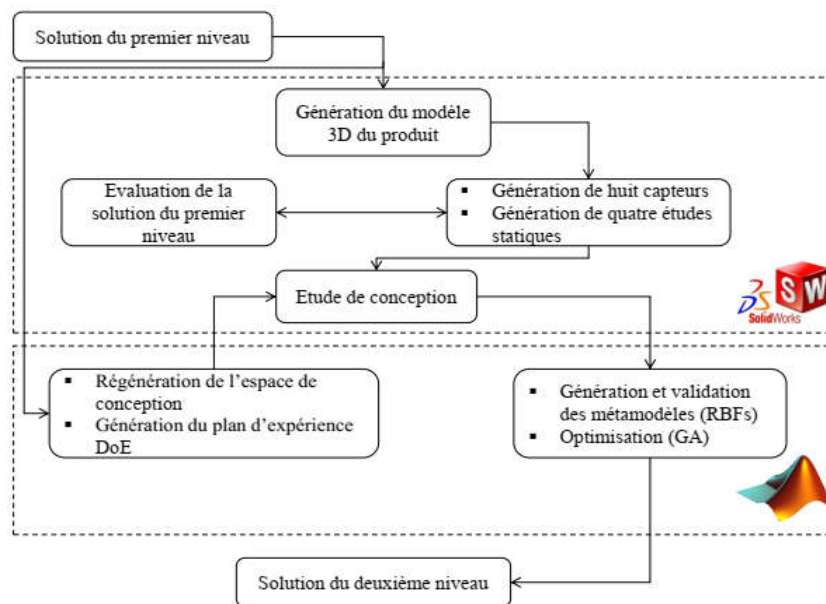


Figure 6.19 : Mise en œuvre de l'étape intermédiaire et le deuxième niveau

6.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la validation de l'approche de conception et d'optimisation interactive proposée dans le cadre de notre thèse. Cette approche a pour but l'amélioration de la phase de conception préliminaire d'un produit. Cette amélioration concerne à la fois le processus de conception, en ce qui concerne le temps de développement et la qualité de la solution de conception obtenue, et le produit en termes de performances. L'approche consiste en fait à diviser les activités de conception et d'optimisation de cette phase en deux niveaux entre lesquels on a une étape intermédiaire qui assure le passage cohérent entre eux. Dans le premier niveau, les concepteurs aboutissent à une (des) solution(s) acceptable(s), en utilisant uniquement le modèle simplifié (analytique) du produit. Dans le deuxième niveau, autour de ces solutions les concepteurs peuvent utiliser les modèles numériques (métamodèles) pour améliorer la conception du produit et ses performances

Cette approche a été testée et validée sur deux cas test. Nous avons considéré le même produit mécanique (réducteur de vitesse) mais, pour chaque cas test les objectifs de conception et la formulation mathématiques du problème d'optimisation sont variés. Ainsi, dans les deux cas test, nous avons utilisé certaines méthodes classiques de conception dans la structuration du problème de conception et d'optimisation. Cette structuration permettait aux concepteurs durant le premier niveau d'extraire et de formuler le modèle analytique adéquat.

Dans le premier cas test, nous avons vu l'utilité de l'optimisation en conception multidisciplinaire (OMD) dans l'approche proposée pour gérer et traiter la complexité de conception, et améliorer la collaboration entre les acteurs impliqués dans la procédure. Les résultats obtenus montrent l'importance de cette optimisation pour explorer efficacement l'espace de conception, tout en permettant aux concepteurs de sélectionner les meilleures solutions de conception à leur projet, qui répondent aux objectifs et les contraintes du cahier des charges.

Le second cas test est dédié spécialement à la validation de l'étape intermédiaire et du deuxième niveau de l'approche proposée. Il illustre en particulier l'intérêt de l'utilisation conjointe du modèle analytique et du modèle numérique dans la conception préliminaire d'un produit. Pour le cas test considéré, le résultat de l'optimisation montre une amélioration significative en termes de performance du produit, une réduction de 20.83% du poids obtenu après application du second niveau.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Cette thèse, a été réalisée en cotutelle entre le laboratoire LTAFC de l'Ecole Militaire Polytechnique et le laboratoire LCPI de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech. Elle avait pour objectif l'amélioration de la conception préliminaire d'un produit par l'implémentation de techniques mathématiques d'optimisation. L'état de l'art a permis de formuler trois constats essentiels qui ont menés à la formalisation de la problématique suivante : « Comment les techniques mathématiques d'optimisation peuvent-elles aider les concepteurs à sélectionner une solution optimale et performante de produit, et améliorer sa conception, sans recourir excessivement aux experts ? ». Afin d'apporter une réponse à cette problématique, une approche de conception et d'optimisation interactive a été proposée, et des hypothèses ont été formulées. Ces hypothèses ont été démontrées dans le chapitre 6 grâce à l'application de cette approche sur un produit mécanique dans le cas d'une conception routinière. Il s'agit d'un réducteur de vitesse à simple étage.

Apports de recherche

Dans cette thèse, nous avons pu illustrer dans un premier lieu l'importance et le rôle de la conception préliminaire pour améliorer les performances de produit et minimiser les échecs de conception, mais aussi les difficultés que peuvent être rencontrées. En effet, les méthodes de conception classiques et le processus itératif « essai-erreur » ont prouvé certaines limites pour supporter ces activités et même aussi pour permettre aux concepteurs d'aboutir à une solution optimale de produit. Par conséquent, les techniques mathématiques d'optimisation et les outils informatiques de simulation et calcul (CAD-CAE) sont détectés comme des moyens avantageux pour soulever certaines de ces difficultés.

Ainsi, dans ces travaux thèse nous avons proposés une approche de conception et d'optimisation interactive, dont l'objectif est l'amélioration de la conception préliminaire d'un produit. L'approche est basée principalement sur l'implémentation des techniques mathématiques d'optimisation et l'utilisation de la simulation numérique, afin de combler les insuffisances constatées dans les autres méthodes classiques de conception et d'offrir des

outils d'aide à la prise de décision aux concepteurs pour mener à bien la conception préliminaire sans solliciter les experts d'une façon intensive.

Cette approche consiste à structurer la phase de conception préliminaire en deux niveaux de conception et d'optimisation :

- Le premier niveau repose sur l'utilisation d'un modèle simplifié (analytique) du produit considéré et rechercher les solutions de conception associées.
- Le deuxième niveau de conception et d'optimisation repose sur l'utilisation d'un modèle fin (numérique) du produit pour améliorer la conception autour de la conception retenue durant le premier niveau.

Cette approche a été testée pour différents cas test sur un produit mécanique (réducteur de vitesse) afin de s'assurer au fur et à mesure de sa validité et de ressortir ses limitations et les points d'amélioration.

Perspectives

L'approche de conception et d'optimisation interactive développée dans le cadre de cette thèse correspond à une première version test pour l'amélioration de la conception préliminaire d'un produit. Sur la base des évaluations réalisées, il est possible de dégager des perspectives de recherche pour montrer les améliorations envisagées.

Perspectives de développement

Dans un premier temps, il s'agit de présenter les améliorations et les enrichissements possibles à apporter à l'approche proposée à court terme. Trois axes de développement peuvent ainsi se dégager :

Le **premier axe de développement** serait le développement et l'amélioration du deuxième niveau de l'approche proposée. Actuellement, le premier niveau de conception et d'optimisation est capable de traiter tous les types de problèmes d'optimisation : mono-objectifs, multi-objectifs et multidisciplinaires. Même le deuxième niveau peut aussi traiter ces types de problème d'optimisation moyennant certaines améliorations. Cependant, l'étape intermédiaire n'est pas encore adaptée pour le transfert des solutions de conception du premier niveau vers le deuxième niveau dans le cas d'optimisation multi-objectif et multidisciplinaire. L'amélioration de cette étape est nécessaire pour cette contribution afin de rendre cette approche plus efficace, et plus adaptable pour tous les cas de problèmes de conception et d'optimisation.

Le **deuxième axe de développement** s'orientera vers la réalisation d'une plateforme graphique interactive. Afin de concrétiser le besoin d'utilisation de cette approche et d'augmenter le nombre d'utilisateurs, il serait souhaitable de développer une plateforme graphique interactive. En effet, actuellement, cette approche est réservée à une population limitée aux concepteurs. Or, des besoins existent sur d'autre population cible telle que les étudiants (formation aux processus de conception et méthodologies de conception), les chercheurs en science de la conception (valorisation des résultats de recherche). Pour ce développement, une base de données sera envisagée dans laquelle, le concepteur peut introduire tous les éléments nécessaires à la conception de son produit tels que : les dimensions de composants standards, les matériaux, les lois physiques pour caractériser les interactions entre les composants et les normes les plus utilisées pour le pré-dimensionnement. Ce développement permettra de tisser une passerelle entre cette approche et d'autres outils de type PLM (Product Life Management), dont l'utilisation en entreprise s'accroît de façon importante.

Le **troisième axe de développement** consistera à l'étude et la conception d'un autre type de produit ou système. Afin de rendre cette approche plus générique et plus fiable, il serait souhaitable d'étudier son exhaustivité en introduisant d'autres acteurs de conception, et d'autres domaines et disciplines. Pour ce faire, nous proposerons d'améliorer et d'adapter les deux niveaux de l'approche proposée afin qu'elle permette améliorer la conception préliminaire des produits complexes comme les systèmes mécatroniques. La conception de ces produits par définition, est un domaine à la croisée de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique. Le but de cette action de synergie est d'améliorer les performances et les fonctionnalités d'un produit. La spécificité de la conception de produits mécatroniques réside spécialement dans la collaboration entre les acteurs de conception et les différents niveaux d'intégration : intégration fonctionnelle, multi domaine et physique, à mettre en œuvre pour concevoir un produit ayant une haute valeur ajoutée.

Perspectives de recherche

Les perspectives de recherche qu'ouvre cette thèse sont diverses. Nous proposons de développer deux perspectives en particulier :

Le **premier axe de recherche** serait d'introduire le concept de la conception robuste dans l'approche proposée. En effet, les problèmes de conception et d'optimisation sont souvent stochastiques que déterministes, donc il serait souhaitable de redévelopper les deux niveaux

de l'approche de conception et d'optimisation interactive en adaptant les méthodes de l'optimisation robuste, avec une analyse rigoureuse du cycle de vie. Ce concept permet d'éviter les coûteux obstacles de conception de produit, qui sont liées d'un côté à un mauvais déploiement du cahier des charges fonctionnel. Et d'un autre côté à une mauvaise intégration des contraintes du cycle de vie. Il faut noter que robustesse et performance d'une solution de conception sont souvent des objectifs antagonistes. Ainsi, nous aborderons la conception robuste car nous ne cherchons plus à améliorer la moyenne de l'objectif de conception ou la performance de produit, mais aussi sa dispersion.

Le **deuxième axe de recherche** serait l'amélioration et l'adaptation de l'approche proposée afin qu'elle puisse confronter aux problèmes de conception innovante. Dans ce cadre, l'intégration des autres méthodes et outils de conception à l'approche proposée telles que : l'optimisation topologique, les logiciels à base de la méthode TRIZ, de l'analyse fonctionnelle et de la méthode AMDEC, permettrait de mettre à la portée du concepteur un outil performant à l'innovation.

Production scientifique

Production scientifique

Conférences internationales

- Conception optimale d'un train d'engrenage à denture droite par l'application des techniques métaheuristiques. The 12th *Conference on Mechanical Engineering* April 10-11, 2018, EMP, Algiers – Algeria.
- La synergie entre la méthode TRIZ et l'optimisation multiobjectif (NSGA-II) pour améliorer la conception d'un produit : Application au cas d'un réducteur de vitesse. *International Conference on Advanced Mechanics and Renewable Energies ICAMRE2018*. November 28 & 29, 2018 Boumerdes - Algeria

Reuves scientifiques internationales

- Optimum design of a spur gear using a two level optimization approach. *MECHANIKA*. Vol. 25(4): 304–312. 2019
- Multidisciplinary design optimization of a gear train transmission. *Concurrent Engineering: research and applications*. Vol. 27(3), 2019

Annexes

Annexes

- Pseudo-code de l'algorithme NSGA-II

Algorithme : Principe de NSGA-II

- 1 **Pour** chaque génération g de population P_g **faire**
 - 2 $Q_g \leftarrow \text{Générer}(P_g)$
 - 3 $\text{Evaluer_objectifs}(Q_g)$
 - 4 $R_g \leftarrow P_g \cup Q_g$
 - 5 $F \leftarrow \text{Classement par dominance}(R_g)$
 - 6 $P_{g+1} \leftarrow \emptyset$
 - 7 $i \leftarrow i+1$
 - 8 **Tant que** $|P_{g+1}| + |F_i| \leq \text{Taille de population}$ **faire**
 - 9 $P_{g+1} \leftarrow P_{g+1} \cup F_i$
 - 10 $i \leftarrow i+1$
 - 11 **Fin**
 - 12 $\text{Classement par nichage}(F_i)$
 - 13 $P_{g+1} \leftarrow P_{g+1} \cup F_i[1: \text{Taille de population} - |P_{g+1}|]$
 - 14 **Fin**
-

Algorithme : Classement par nichage (F_i)

- 1 $\text{Nombre_solutions} \leftarrow |F_i|$
 - 2 **Pour** $j \in \{1, 2, \dots, \text{Nombre_solutions}\}$ **faire**
 - 3 $\text{Distance_nichage}[j] \leftarrow 0$
 - 4 **Fin**
 - 5 **Pour** $j \in \{1, 2, \dots, n_f\}$ **faire**
 - 6 $T \leftarrow \text{Trier selon valeur objectif}(F_i, f_j)$
 - 7 $\text{Distance_nichage}[T_1] \leftarrow +\infty$
 - 8 $\text{Distance_nichage}[T_{\text{Nombre_solutions}}] \leftarrow +\infty$
 - 9 $\text{Variable_globale } f \leftarrow f_j(F_i[T_{\text{Nombre_solutions}}]) - f_j(F_j[T_1])$
 - 10 **Pour** $k \in \{2, 3, \dots, \text{Nombre_solutions} - 1\}$ **faire**
 - 11 $\Delta f \leftarrow f_j(F_i[T_{k+1}]) - f_j(F_i[T_{k-1}])$
 - 12 $\text{Distance_nichage}[T_k] \leftarrow \text{Distance_nichage}[T_k] + \frac{\Delta f}{\text{Variable_globale } f}$
 - 13 **Fin**
 - 14 **Fin**
 - 15 $\text{Trier selon la distance}(F_i, \text{Distance_nichage})$
-

- Déflexion statique totale de la dent δ selon le modèle d'Ishikawa

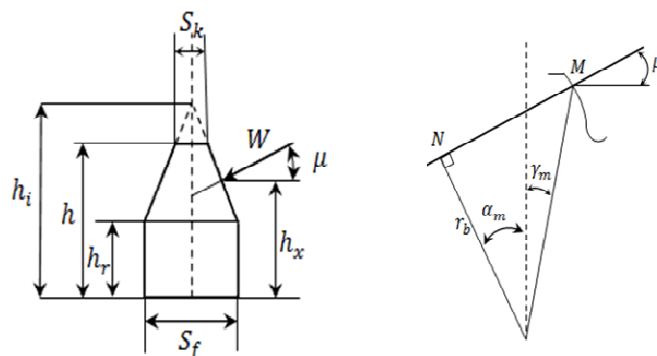


Figure 7.1 : Modélisation de la dent selon Ishikawa

$$\delta = \delta_{fr} + \delta_{ft} + \delta_c + \delta_H$$

Avec

δ_{fr} : La déflexion de la section rectangulaire.

δ_{ft} : La déflexion de la section trapézoïdale.

δ_c : La déflexion due au cisaillement.

δ_H : La déflexion due à la pression de contact (pression d'Hertz).

$$\delta_{fr} = \left(\frac{12W (\cos \mu)^2}{bES_f} \right) \left(h_x h_r (h_x - h_r) + \frac{h_r^3}{3} \right)$$

$$\delta_{ft} = \left(\frac{6W (\cos \mu)^2}{bES_f} \right) \left(\left(\frac{h_i - h_x}{h_i - h_r} \right) \left(4 - \frac{h_i - h_x}{h_i - h_r} \right) - \ln \left(\frac{h_i - h_x}{h_i - h_r} \right) \right) (h_i - h_x)^3$$

$$\delta_c = \left(\frac{2W (1 + \nu^2) (\cos \mu)^2}{bES_f} \right) \left(h_x h_r (h_x - h_r) + \frac{h_r^3}{3} \right)$$

$$\delta_H = \left(\frac{2W (1 - \nu^2)}{\pi b E} \right)$$

Avec

$$\mu = \alpha_m - \gamma_m, \quad \alpha_m = ar \cos \left(\frac{r_b}{\sqrt{r_b^2 + NM}} \right), \quad \gamma_m = \frac{1}{Z} \left(\frac{\pi}{2} + 2 \operatorname{tg} \alpha \right) + \operatorname{inv} \alpha - \operatorname{inv} \alpha_m,$$

$$h_i = \frac{hS_f - h_r S_k}{S_f - S_k}$$

W : la force tangentielle, E : le module de Young, ν : le coefficient de Poisson, b : la largeur de la denture.

- **Données utilisées pour estimer le coût de produit**

Tableau 7.1 : Coût de matériaux de l'engrenage et de l'arbre

¹ Matériaux de l'engrenage	20NiCrMo2	25CrMo4	42CrMo4	41Cr4
² Matériaux de l'arbre	34Cr4	25CrMo4	16MnCr5	42CrMo4
¹ Coût (\$/Kg)	0.4875	0.515	0.48963	0.4295
² Coût(\$/Kg)	0.6	0.515	0.3437	0.5736

Tableau 7.2 : Coût de fabrication de l'engrenage et l'arbre de transmission

¹ Matériaux de l'engrenage	20NiCrMo2	25CrMo4	42CrMo4	41Cr4
² Matériaux de l'arbre	34Cr4	25CrMo4	16MnCr5	42CrMo4
¹ Coût (\$/m)	4.1	4.5	3.8	3.5
² Coût (\$/m)	2.8	3	2.5	2.3

Tableau 7.3 : les paramètres produit pour calculer le coût pour fiabilité

	A_1	A_2	B_1	B_2	λ_{min}	λ_{max}	r	ν
Denture droite	280	137.5	156	0.089	7.0495E-7	3.4657E-5	0.1	0.5
Denture hélicoïdale	285	138	160	0.091	6.5426E-7	3.4657E-5	0.12	0.62

Tableau 7.4 : Matériaux d'engrenage et d'arbre

		Limite à la rupture (MPa)	Limite élastique (MPa)	Module de Young (MPa)x10 ⁵	Coefficient de Poisson	Dureté HB	Densité x10 ³ kg/m ³
Matériaux engrenage	20NiCrMo2	540	385	2.1	0.28	149	7.85
	25CrMo4	560	460	2.115	0.28	217	7.85
	42CrMo4	915	655	2.1	0.28	197	7.8187
	41Cr4	570	290	2.05	0.28	167	7.8114
Matériaux arbre	34Cr4	700	460	2.1	0.28	223	7.8
	25CrMo4	560	460	2.115	0.28	217	7.85
	16MnCr5	800	590.59	2.1	0.28	207	7.8
	42CrMo4	915	655	2.1	0.28	197	7.8187

Equations, variables globales et cotes

Nom	Valeur / Equation	Equivaut à	Commentaires
Equations - Composants			
"D1@Esquisse1@roue_dent<	= abs ("Dr_base" * 0.5 * (cos ("tr" * 180 / pi) + "tr" * s	92.47mm	
"D2@Esquisse1@roue_dent<	= abs ("Dr_base" * 0.5 * (sin ("tr" * 180 / pi) - "tr" * co	2.4mm	
"D3@Esquisse1@roue_dent<	= abs ("Dr_base" * 0.5 * (cos (- ("tr" * 180 / pi) + "bet	92.4mm	
"D4@Esquisse1@roue_dent<	= abs ("Dr_base" * 0.5 * (sin (- ("tr" * 180 / pi) + "bet	4.39mm	
"D5@Esquisse1@roue_dent<	= "beta_r"	4.21deg	
"D6@Esquisse1@roue_dent<	= "Dr_base"	169.14mm	
"D7@Esquisse1@roue_dent<	= "Dr_pied"	173.75mm	
"D8@Esquisse1@roue_dent<	= "Dr_primitif"	180mm	
"D9@Esquisse1@roue_dent<	= "Dr_tete"	185mm	
"D10@Esquisse1@roue_dent<	= 0.5 * 360 / ("n" * "z")	2.5deg	
"D11@Esquisse1@roue_dent<	= 0.5 * 360 / ("n" * "z")	2.5deg	

Reconstruction automatique Unités angulaires des équation Ordre de résolution automatique
 Lier au fichier externe:

Figure 7.2 : Conception paramétrique du réducteur de vitesse sous SolidWorks

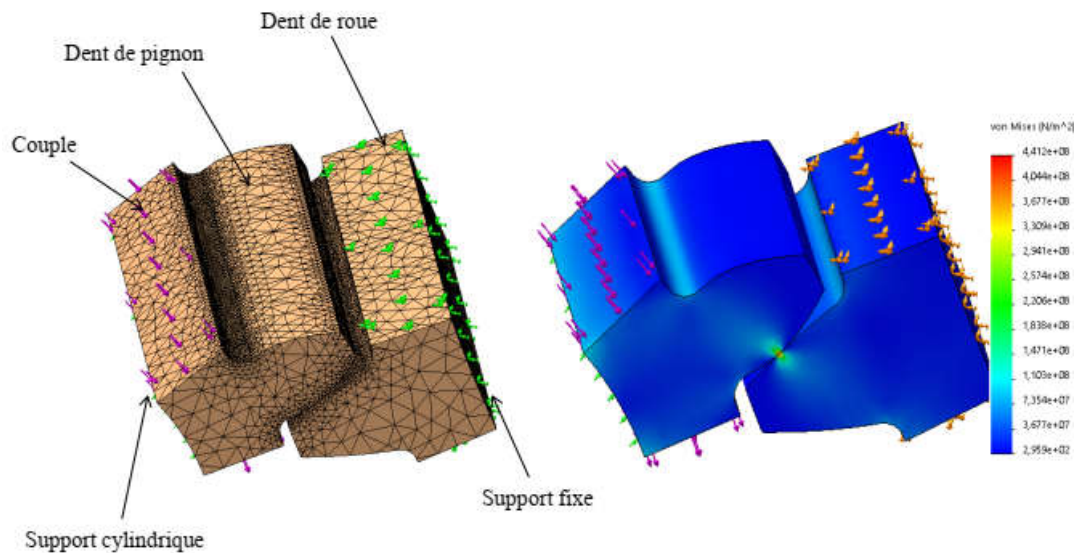


Figure 7.3 : Modèle numérique adapté pour évaluer la flexion en pied de dent et la pression de contact

Tableau 7.5: Paramètres de maillage adaptés pour les études statiques

Etude statique ^o	1		2 & 3		4
Type de maillage	Maillage solide à base de courbure		Maillage solide à base de courbure		Maillage solide à base de courbure
Points de Jacobian	4		4		4
Taille maximale d'élément (mm)	1.5		1		4
Taille minimale d'élément (mm)	0.3		0.2		0.8
Nombre totale de nœuds	546895		257347 288638		535695
Nombre total d'éléments	397760		180214 203340		370479
	Rayon de raccordement en pied de la dent de pignon	Surface de contact	Rayon de raccordement de la rainure de clavette	Rayon de raccordement en pied de la dent de roue	Autour de l'évidement dans la gante
Taille d'élément	0.2	0.2	0.4	0.4	1
Ratio	1	1	1.2	1.2	1.2

Tableau 7.6 : Evaluation et comparaison de la solution de premier niveau

	Contrainte de flexion en pied de dent de pignon	Pression de Hertz
Formule analytique	61.416 MPa (formule de Lewis)	493.3 MPa (formule de Hertz)
AGMA	175.488 MPa	855.174 MPa
MEF	56.1497 MPa	462.84 MPa

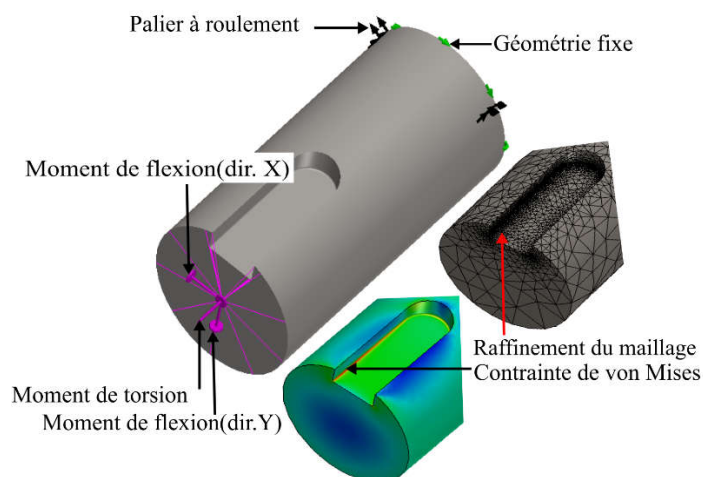


Figure 7.4 : Modèle numérique adopté pour évaluer la contrainte de von Mises dans les arbres de transmission

Tableau 7.7 : Dimensions de clavette

Diamètre de l'arbre		W	H	t	r
de	Jusqu'à (Inclu)				
17	22	6	6	3.5	0.25
22	30	8	7	4	0.25

Tableau 7.8 : Comparaison des résultats entre TCM et MEF

	Pinion shaft (von Mises stress)	Gear shaft (von Mises stress)
MSST	152.660 MPa	331.560 MPa
FEM	133.596 MPa	347.685 MPa

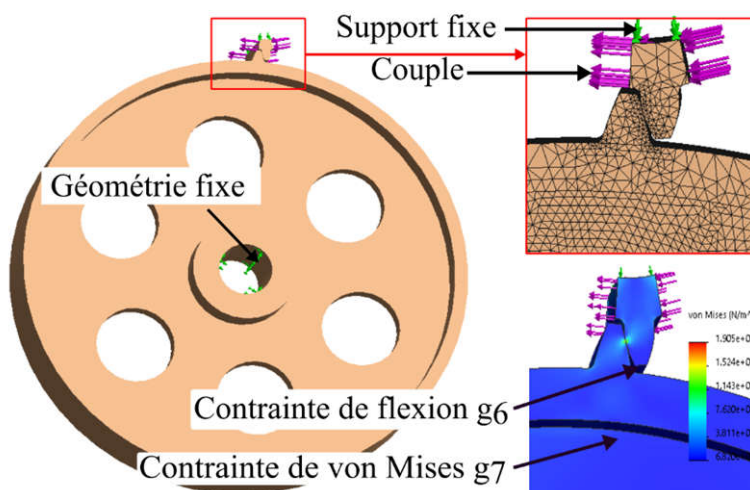


Figure 7.5 : Modèle numérique adopté pour évaluer la contrainte de flexion en pied de dent et la contrainte de von Mises dans la gante

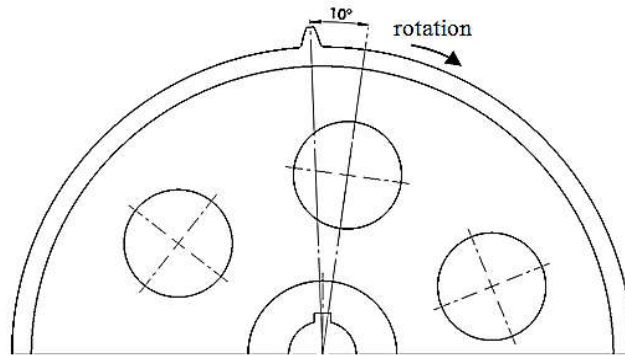


Figure 7.6 : Configuration correspondant à la contrainte maximale dans le gante

Tableau 7.9 : Résultats de validation de sept métamodèles RBFs

N° de RBF	Désignation	Paramètres d'entrée	Ecart	RMSE	MAE
1	Contrainte $g_1(x)$	b, Z_1, m	0.09	0.0616	0.2218
2	Contrainte $g_2(x)$	b, Z_1, m	0.08	0.2122	0.8560
3	Contrainte $g_3(x)$	b, d_1, Z_1, m	0.7	0.2627	0.6643
4	Contrainte $g_4(x)$	b, d_2, Z_1, m	0.7	0.1413	0.3576
5	Contrainte $g_6(x)$	$b, d_2, Z_1, m, l_w, b_w, d_p$	0.8	3.3018E-8	8.9407E-8
6	Contrainte $g_7(x)$	$b, d_2, Z_1, m, l_w, b_w, d_p$	0.8	3.0511E-8	8.5682E-8
7	Fonction objectif $F(x)$	$b, d_1, d_2, Z_1, m, l_w, b_w, d$	1	2.05E-15	2.6645E-15

Bibliographie

Bibliographie

- Adjoul, O. (2019). Développement d'un modèle algorithmique pour l'optimisation simultanée de la conception et de la maintenance des systèmes industriels. PhD thesis, ENSAM, Paris.
- Adjoul, O., Benfriha, K., Aoussat, A. (2019). Algorithmic strategy for optimizing product design considering the production costs. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 13(4), 1313-1329.
- Adjoul, O., Benfriha, K., Aoussat, A. (2020). Design for maintenance: new algorithmic approach. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/JQME-12-2018-0107>.
- Aguirre, A.H., Rionda, S.B., Coello, C.A.C., Lizárraga, G.L., Montes, E.M., (2004). Handling constraints using multiobjective optimization concepts. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 59, 1989–2017. <https://doi.org/10.1002/nme.947>
- Aidi, M., (2007). Vers la planification des buts de simulation en conception dans une démarche d'ingénierie système. PhD thesis, Grenoble INPG.
- Aifaoui, N., (2003). Intégration CAO-Calcul : une approche par les features de calcul. PhD thesis, Université de Valenciennes.
- Allaire, G., Schoenauer, M. (2007). *Conception optimale de structures* . Berlin: Springer.
- Allison, J., Kokkolaras, M., Zawislak, M., Papalambros, P.Y., (2005). On the use of analytical target cascading and collaborative optimization for complex system design. In: *Proceedings of 6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*.
- Altshuller, G., (1984). *Creativity as an Exact Science: the theory of the solution of inventive problems*. Amsterdam : Gordon and Breach.
- Anghel, D.-C., (2007). Contribution à l'analyse des itérations dans le processus de conception : proposition d'indicateurs d'évaluation de performances. PhD thesis, Université de Franche - Comté (Besançon).
- Anselmi, A., Cesare, S., Dionisio, S., Fasano, G., Massotti, L., (2019). Control Propellant Minimization for the Next Generation Gravity Mission. In: Fasano, G., Pintér, J.D. (Eds.), *Modeling and Optimization in Space Engineering: State of the Art and New Challenges*, Springer Optimization and Its Applications. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–32. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10501-3_1

- Aoussat, A., (1996). Contribution à la Modélisation du Processus de Conception de Produits Industriels. HDR, ENSAM, Paris.
- Aoussat, A., (1990). La Pertinence en Innovation : Nécessité d'une Approche Plurielle. Laboratoire Conception de Produits et Innovation. PhD thesis, ENSAM, Paris.
- Audoux, K., (2019). Méthodologie d'évaluation multidomaine pour la conception de produit. PhD thesis, ENSAM, Paris.
- Baizet, Y., (2004). La Gestion des Connaissances en Conception : application à la simulation numérique chez Renault-DIEC. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Balesdent, M., (2011). Multidisciplinary Design Optimization of Launch Vehicles. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes.
- Balesdent, M., Bérend, N., Dépincé, P., Chriette, A., (2012). A survey of multidisciplinary design optimization methods in launch vehicle design. *Structural and Multidisciplinary optimization*, 45, 619–642.
- Balling, R.J., Sobieszczanski-Sobieski, J., (1996). Optimization of coupled systems-a critical overview of approaches. *AIAA journal*, 34(1), 6–17.
- Bandler, J.W., Biernacki, R.M., Chen, S.H., Grobelny, P.A., Hemmers, R.H., (1994). Space mapping technique for electromagnetic optimization. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 42(12), 2536–2544.
- Ben Amara, A., (1998). Contribution à l'intégration de la composante calcul dans une démarche de conception fonctionnelle intégrée. PhD thesis, Université de Valenciennes.
- Benabid, Y., (2014). Contribution à l'amélioration du processus de conception des produits innovants : Développement d'outils d'aide au choix des processus. PhD thesis, Paris, ENSAM.
- Bendsoe, M. P., Sigmund, O. (2013). *Topology optimization: theory, methods, and applications*. Springer Science & Business Media.
- Berliner, C., Brimson, J.A., (1988). *Cost management for today's advanced manufacturing: The CAM-I conceptual design*. Harvard Business School Press.
- Blickle, T., & Thiele, L. (1995). A comparison of selection schemes used in genetic algorithms. TIK-Report 11, TIK Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze. *Computer Engineering and Networks Laboratory, ETH, Swiss Federal Institute of Technology, Gloriastrasse, 35(8092)*, 279-284

- Bonabeau, E., Marco, D. de R.D.F., Dorigo, M., Theraulaz, G., (1999). *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. Oxford university press.
- Boothroyd, G., (1994). Product design for manufacture and assembly. *Computer-Aided Design*, 26(7), 505–520. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(94\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0010-4485(94)90082-5)
- Boudouh, T., Anghel, D.-C., Garro, O., (2006). Design Iterations in a Geographically Distributed Design Process. In: ElMaraghy, H.A., ElMaraghy, W.H. (Eds.), *Advances in Design, Springer Series in Advanced Manufacturing*. Springer London, London, pp. 377–385. https://doi.org/10.1007/1-84628-210-1_31
- Boussaïd, I., Lepagnot, J., Siarry, P., (2013). A survey on optimization metaheuristics. *Information sciences*, 237, 82–117.
- Braun, R.D., (1996). Collaborative optimization: an architecture for large-scale distributed design. PhD thesis, Stanford University, Palo Alto, Calif, USA.
- Breitkopf, P., Coelho, R.F., (2013). *Multidisciplinary design optimization in computational mechanics*. John Wiley & Sons.
- Broyden, C.G., (1970). The Convergence of a Class of Double-rank Minimization Algorithms :2. The New Algorithm. *IMA J Appl Math*, 6(3), 222–231. <https://doi.org/10.1093/imamat/6.3.222>
- Bylund, N., Grante, C., López-Mesa, B., (2003). Usability in industry of methods from design research. In: *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design*, Stockholm.
- Caplat, G. (2002). *Modélisation cognitive et résolution de problèmes*. PPUR presses polytechniques
- Cauchy, A., (1847). Méthode générale pour la résolution des systèmes d'équations simultanées. *Comp. Rend. Sci. Paris*, 25(1847), 536–538.
- Cavaillès, J., (1995). *Méthodes de management de Programme : Pour l'utilisation interne à la DGA, cet ouvrage est repéré sous le code DGA/AQ902*. Teknea.
- Černý, V., (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *J Optim Theory Appl*, 45(1), 41–51. <https://doi.org/10.1007/BF00940812>
- Chamekh, A., (2008). Optimisation des procédés de mise en forme par les réseaux de neurones artificiels. PhD thesis, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Tunisie.

- Chandrasekaran, B., (1990). Design problem solving: A task analysis. *AI magazine*, 11(4), 59-59.
- Charles, S., (2005). Gestion intégrée de données CAO et EF : contribution à la liaison entre conception mécanique et calcul de structures. PhD thesis, Université de technologie de Troyes.
- Choulier, D., Drăghici, G., (2000). TRIZ : une approche de résolution des problèmes d'innovation dans la conception de produits. *Modélisation de la connaissance pour la conception et la fabrication intégrées*, Editura Mirton, 31-58.
- Clerc, M., Kennedy, J., (2002). The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 6(1), 58–73.
- Coello, C.A.C., (2002). Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 191(11-12), 1245–1287.
- Collignan, A., (2011). Méthode d'optimisation et d'aide à la décision en conception mécanique : application à une structure aéronautique. PhD thesis, Université Bordeaux 1.
- Corne, D.W., Knowles, J.D., (2007). Techniques for highly multiobjective optimisation: some nondominated points are better than others. In: Proceedings of the 9th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. ACM, pp. 773–780.
- Cramer, E.J., Dennis, Jr., J.E., Frank, P.D., Lewis, R. M., Shubin, G.R., (1994). Problem Formulation for Multidisciplinary Optimization. *SIAM J. Optim.*, 4(4), 754–776. <https://doi.org/10.1137/0804044>
- Cross, N., (2001). Designerly ways of knowing: Design discipline versus design science. *Design issues*, 17(3), 49–55.
- Dantan, J.Y., Qureshi, A.J., Antoine, J.F., Eisenbart, B., Blessing, L., (2013). Management of product characteristics uncertainty based on formal logic and characteristics properties model. *CIRP Annals*, 62(1), 147–150. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.077>
- Darwin, C., (1956). *The Origin of Species: By means of natural selection or the preservation of favoured races in the struggle for life*. Oxford University Press.
- Davidon, W.C., (1991). Variable Metric Method for Minimization. *SIAM J. Optim.*, 1(1), 1–17. <https://doi.org/10.1137/0801001>
- Deb, K., (2000). An efficient constraint handling method for genetic algorithms. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 186(2-6), 311–338.

- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182–197.
- Deneux, D., (2002). Méthodes et modèles pour la conception concurrente. Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- Devalan, P., (2009). Simulation numérique dans le processus de conception de systèmes mécaniques. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Dieter, G.E., (2000). *Engineering design a materials and processing approach*, 2nd ed. New York McGraw-Hill.
- Dieter, G.E., Schmidt, L.C., (2007). *Engineering design*. Boston: McGraw-Hill Higher Education,.
- Doufene, A., (2013). Architecture des systèmes complexes et Optimisation - Application aux véhicules électriques. PhD thesis, Ecole polytechnique, Palaiseau.
- Dréo, J., Petrowski, A., Siarry, P., Taillard, E., (2003). *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*. EYROLLES.
- Dubois, S., (2004). Contribution à la formulation des problèmes en conception de systèmes techniques. Etude basée sur la méthode TRIZ. PhD thesis, INSA de Strasbourg.
- Durantin, C., (2018). Métamodélisation et optimisation de dispositifs photoniques. PhD thesis, Université Côte d'Azur.
- Eberhart, R., Simpson, P., Dobbins, R., (1996). *Computational Intelligence PC Tools*. Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA, USA.
- Edgeworth, F.Y., (1885). Methods of Statistics. *Journal of the Statistical Society of London*, 181–217.
- El Amine, M., (2015). Intégration de la maturité des connaissances dans la prise de décision en conception mécanique : application à un système solaire. PhD thesis, ENSAM, Bordeaux.
- ElMaraghy, W., ElMaraghy, H., Tomiyama, T., Monostori, L., (2012). Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP annals*, 61(2), 793–814.
- Farmer, J.D., Packard, N.H., Perelson, A.S., (1986). The immune system, adaptation, and machine learning. *Physica D : Nonlinear Phenomena*, 22(1-3), 187–204.

- Fayemi, P.-E., (2016). Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances. PhD thesis, ENSAM, Paris.
- Filomeno Coelho, R., Breitkopf, P., Knopf-Lenoir, C., Villon, P., (2009). Bi-level model reduction for coupled problems. *Struct. Multidisc. Optim.*, 39(4), 401–418. <https://doi.org/10.1007/s00158-008-0335-3>
- Fletcher, R., (1970). A new approach to variable metric algorithms. *The computer journal*, 13(3), 317–322.
- Fletcher, R., Powell, M.J., (1963). A rapidly convergent descent method for minimization. *The computer journal*, 6(2), 163–168.
- Fogel, D.B., (1991). System identification through simulated evolution: A machine learning approach to modeling. Ginn Press.
- Fonseca, C.M., Fleming, P.J., (1993). Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation Discussion and Generalization. In: *Icga*. Citeseer, pp. 416–423.
- Franco, J., (2008). Planification d'expériences numériques en phase exploratoire pour la simulation des phénomènes complexes. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Gass, S., Saaty, T., (1955). The computational algorithm for the parametric objective function. *Naval Research Logistics Quarterly*, 2(1-2), 39–45. <https://doi.org/10.1002/nav.3800020106>
- Gericke, K., Blessing, L., (2012). An analysis of design process models across disciplines. In *DS 70: Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*.
- Gero, J.S., (2001). Mass customisation of creative designs. In: *International Conference on Engineering Design ICED*.
- Girard, P., (2001). Analyse des décisions en conception. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Goldberg, D.E., Deb, K., (1991). A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms. In: *Foundations of Genetic Algorithms*. Elsevier, pp. 69–93.
- Goldfarb, D., (1970). A family of variable-metric methods derived by variational means. *Mathematics of computation*, 24(109), 23–26.
- Goldschmidt, G., (2014). Modeling the Role of Sketching in Design Idea Generation. In: Chakrabarti, A., Blessing, L.T.M. (Eds.), *An Anthology of Theories and Models of*

Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations. Springer London, London, pp. 433–450. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_21

Goupy, J., (1999). *Plans d'expériences pour surfaces de réponse*. Dunod.

Haik, Y., Shahin, T.M.M., (2011). *Engineering design process*, 2nd ed. Cengage Learning, Stamford, CT.

Hassan, A., (2010). Proposition et développement d'une approche pour la maîtrise conjointe qualité/coût lors de la conception et de l'industrialisation du produit. PhD thesis, ENSAM, Paris.

Henriot, G., (2013). *Engrenages : Conception - Fabrication - Mise en œuvre*, 8e édition. ed. Dunod.

Heppner, F., Grenander, U., (1990). A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks. *The ubiquity of chaos*, 233, 238.

Hestenes, M. R., Stiefel, E. (1952). Methods of conjugate gradients for solving linear systems. *Journal of research of the National Bureau of Standards*, 49(6), 409-436.

Holland, J.H., (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*, university of michigan press, ann arbor,”. Cité page 100.

Holt, R., Barnes, C., (2010). Towards an integrated approach to “Design for X”: an agenda for decision-based DFX research. *Res Eng Design*, 21(2), 123–136. <https://doi.org/10.1007/s00163-009-0081-6>

Howard, T.J., Culley, S.J., Dekoninck, E., (2008). Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. *Design Studies*, 29(2), 160–180. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2008.01.001>

Huang, G.Q., (2002). Web-based support for collaborative product design review. *Computers in Industry, CSCW in Design*, 48(1), 71–88. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(02\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(02)00011-8)

Huang, G.Q., (1996). Introduction to design for X: concurrent engineering imperatives. *Design for X-Concurrent Engineering Imperatives*.

Huang, G.Q., Shi, J., Mak, K.L., (2000). Synchronized system for “Design for X” guidelines over the WWW. *Journal of Materials Processing Technology*, 107(1-3), 71–78. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00702-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00702-0)

Hubka, V., Eder, W.E., (1996). Conception of Design Science and its Methods, in: *Design Science*. Springer, London, pp. 77–87.

- Jacques, G., (2017). *Plans d'expériences pour surfaces de réponse*, 5ème édition. ed. Dunod.
- Jaluria, Y., (2007). *Design and optimization of thermal systems*. CRC press.
- Jeong, S., Murayama, M., Yamamoto, K., (2005). Efficient optimization design method using kriging model. *Journal of aircraft*, 42(2), 413–420.
- Jonassen, D.H., (1997). Instructional design models for well-structured and III-structured problem-solving learning outcomes. *ETR&D*, 45(1), 65–94. <https://doi.org/10.1007/BF02299613>
- Jun, H.-B., Kiritsis, D., Xirouchakis, P., (2007). Research issues on closed-loop PLM. *Computers in Industry*, 58(8-9), 855–868. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2007.04.001>
- Jun, L., Huibin, X., (2012). Reliability Analysis of Aircraft Equipment Based on FMECA Method. *Physics Procedia*, 25, 1816–1822. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.316>
- Keane, A.J., Nair, P.B., (2005). *Computational approaches for aerospace design: the pursuit of excellence*. John Wiley&Sons.
- Kennedy, G.J., Martins, J.R., (2014). A parallel aerostructural optimization framework for aircraft design studies. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 50(6), 1079–1101.
- Kennedy, J., Eberhart, R., (1995). Particle swarm optimization (PSO). In: Proc. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia. pp. 1942–1948.
- Khomenko, N., Kucharavy, D., (2002, November). OTSM-TRIZ problem solving process: solutions and their classification. In *Proceedings of TRIZ Future Conference*, pp. 6-8.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P., (1983). Optimization by simulated annealing. *science* 220(4598), 671–680.
- Koehler, J.R., Owen, A.B., (1996). Computer experiments, in: Handbook of Statistics, *Design and Analysis of Experiments*. Elsevier, pp. 261–308. [https://doi.org/10.1016/S0169-7161\(96\)13011-X](https://doi.org/10.1016/S0169-7161(96)13011-X)
- Koza, J.R., Koza, J.R., (1992). Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection. MIT press.
- Kuo, T.-C., Huang, S.H., Zhang, H.-C., (2001). Design for manufacture and design for ‘X’: concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering* 41(3), 241–260. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(01\)00045-6](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(01)00045-6)

- Lahonde, N., (2010). Optimisation du processus de conception : proposition d'un modèle de sélection des méthodes pour l'aide à la décision. PhD thesis, ENSAM, Paris.
- Laurent, L., (2013). Stratégie multiparamétrique et métamodèles pour l'optimisation multiniveaux de structures. PhD thesis, Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- Lavaud, G., (2007). Optimisation robuste appliquée au crash automobile. PhD thesis, Ecole centrale de Lyon.
- Le coq, M., (1992). Approche intégrative en conception de projet. PhD thesis, ENSAM, Paris.
- Le Moigne, J.-L., Simon, H.A., (1991). *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel*. Dunod.
- Ledoux, Y., (2005). Optimisation des procédés d'emboutissage par caractérisation géométrique et essais numériques. PhD thesis, Université de SAVOIE.
- Lei, G., Zhu, J., Guo, Y., (2016). *Multidisciplinary design optimization methods for electrical machines and drive systems*. Heidelberg : Springer.
- Loch, C.H., DeMeyer, A., Pich, M., (2011). *Managing the Unknown: A New Approach to Managing High Uncertainty and Risk in Projects*. John Wiley & Sons.
- Mahiddini, B., Chettibi, T., Benfriha, K., Aoussat, A., (2019a). Multidisciplinary design optimization of a gear train transmission. *Concurrent Engineering* 27(3), 268–281. <https://doi.org/10.1177/1063293X19862605>
- Mahiddini, B., Chettibi, T., Benfriha, K., Améziane, A., (2019b). Optimum design of a spur gear using a two level optimization approach. *Mechanika* 25(4), 304–312.
- Maillard, E.P., Gueriot, D., (1997). RBF neural network, basis functions and genetic algorithm. In: Proceedings of International Conference on Neural Networks (ICNN'97). IEEE, pp. 2187–2192.
- Marichal, J.-L., (2002). Aggregation of interacting criteria by means of the discrete Choquet integral. In: Aggregation Operators. Physica, Heidelberg, pp. 224–244.
- Marler, R.T., Arora, J.S., (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and multidisciplinary optimization* 26(6), 369–395.
- Matthews, P.C., Blessing, L.T., Wallace, K.M., (2002). The introduction of a design heuristics extraction method. *Advanced Engineering Informatics* 16(1), 3–19.
- Mazhoud, I., (2014). Contribution à l'optimisation en conception préliminaire de produit. PhD thesis, Université de Grenoble.

- Michalewicz, Z., Schoenauer, M., (1996). Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems. *Evolutionary computation* 4(1), 1–32.
- Morris, M.D., Mitchell, T.J., (1995). Exploratory designs for computational experiments. *Journal of Statistical Planning and Inference* 43(3), 381–402. [https://doi.org/10.1016/0378-3758\(94\)00035-T](https://doi.org/10.1016/0378-3758(94)00035-T)
- Okudan, G.E., Tauhid, S., (2008). Concept selection methods - a literature review from 1980 to 2008. *IJDE* 1(3), 243. <https://doi.org/10.1504/IJDE.2008.023764>
- Ortega, J.M., (1973). Stability of Difference Equations and Convergence of Iterative Processes. *SIAM J. Numer. Anal.* 10(2), 268–282. <https://doi.org/10.1137/0710026>
- Osborne, S.M., (1993). Product development cycle time characterization through modeling of process iteration. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Osteras, T., Murthy, D.N.P., Rausand, M., (2006). Product performance and specification in new product development. *Journal of Engineering Design* 17(2), 177–192. <https://doi.org/10.1080/09544820500275735>
- Pahl and Beitz, (1996). *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer, London.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.H., (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach*, Springer.
- Papalambros, P.Y., (2002). The optimization paradigm in engineering design: promises and challenges. *Computer-Aided Design, Computer-based tools and methods of competitive engineering* 34(12), 939–951. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(01\)00148-8](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00148-8)
- Pareto, V., (1896). *Cours d'Économie Politique, Œuvres complètes, Tompe I*. Genève, Droz.
- Park, H.-S., Dang, X.-P., (2010). Structural optimization based on CAD–CAE integration and metamodeling techniques. *Computer-Aided Design* 42(10), 889–902. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.06.003>
- Prasad, B., (1998). Review of QFD and related deployment techniques. *Journal of Manufacturing Systems* 17(3), 221–234. [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(98\)80063-0](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(98)80063-0)
- Rao, S.S., (2009). *Engineering Optimization: Theory and Practice*. John Wiley & Sons.
- Rechenberg, I., (1965). Cybernetic solution path of an experimental problem. Royal Aircraft Establishment Library Translation 1122.

- Rey Horn, J., Nafpliotis, N., Goldberg, D.E., (1994). A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. In: Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence. Citeseer, pp. 82–87.
- Reymen, I., (2001). Improving design processes through structured reflection: A domain-independent approach. Technische Universiteit Eindhoven.
- Reynolds, C.W., (1987). Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. ACM.
- Roy, R., Hinduja, S., Teti, R., (2008). Recent advances in engineering design optimisation: Challenges and future trends. *CIRP Annals* 57(2), 697–715.
- Sacks, J., Welch, W.J., Mitchell, T.J., Wynn, H.P., (1989). Design and Analysis of Computer Experiments. *Statistical Science*, 409–423.
- Safavi, E., (2016). Collaborative Multidisciplinary Design Optimization for Conceptual Design of Complex Products. PhD thesis, LI, Linköping, Sweden. <https://doi.org/10.3384/diss.diva-131792>
- Sawada, H., (2001). Constraint-based computer support for insightful multidisciplinary engineering design. PhD thesis, University of Strathclyde.
- Scaravetti, D., (2004). Formulation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire. PhD thesis, ENSAM, Bordeaux.
- Segonds, F., Père, C., Véron, P., Aoussat, A., (2009). Collaboration Amont et PLM : Etat des Lieux. In: CPI 2009, 6th International Conference Integrated Design and Production. pp. 19–21.
- Sengupta, R.N., Gupta, A., Dutta, J., (2016). *Decision sciences: theory and practice*. Crc Press.
- Shanno, D.F., (1970). Conditioning of quasi-Newton methods for function minimization. *Mathematics of computation* 24(111), 647–656.
- Shi, Y., Eberhart, R., (1998). A modified particle swarm optimizer. In: 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No. 98TH8360). IEEE, pp. 69–73.
- Simon, H.A., (1960). *The new science of management decision*. Harper & Brothers, New York, NY, US. <https://doi.org/10.1037/13978-000>
- Sobieszczanski-Sobieski, J., (1988). Optimization by decomposition: a step from hierarchic to non-hierarchic systems.

- Sobieszczanski-Sobieski, J., Agte, J., Robert Sandusky, Jr., (1998). Bi-level integrated system synthesis (BLISS). In: 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.1998-4916>
- Sosa, M.E., Eppinger, S.D., Rowles, C.M., (2004). The Misalignment of Product Architecture and Organizational Structure in Complex Product Development. *Management Science* 50(12), 1674–1689. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0289>
- Srinivas, N., Deb, K., (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation* 2(3), 221–248.
- Suh, N. P., (2005a). Complexity in Engineering. *CIRP Annals* 54(2), 46–63. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60019-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60019-5)
- Suh, N. P., (2005b). *Complexity: Theory and applications*: Oxford University Press. USA.
- Suh, N.P., (2001). *Axiomatic design: advances and applications*. Mit-Pappalardo Series in Mecha.
- Suh, N.P., (1990). *The Principles of Design*: Oxford University Press. New York, Oxford.
- Sullivan, L.P., (1986). Quality Function Deployment. *Quality Progress (ASQC)* 39–50.
- Blessing, T. A, Chakrabarti, K, Wallace, (1998). An Overview of Descriptive Studies in Relation to a General Design Research Methodology. *Designers Springer* pp-42-56.
- Tedford, N.P., Martins, J.R., (2010). Benchmarking multidisciplinary design optimization algorithms. *Optimization and Engineering* 11(1), 159–183.
- Terzi, S., (2005). Elements of Product Lifecycle Management: Definitions, Open Issues and Reference Models 364.
- Thunnissen, D. P. (2005). Propagating and mitigating uncertainty in the design of complex multidisciplinary systems. PhD thesis, California Institute of Technology.
- Tiwari, A., Hoyos, P.N., Hutabarat, W., Turner, C., Ince, N., Gan, X.-P., Prajapat, N., (2015). Survey on the use of computational optimisation in UK engineering companies. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 9, 57–68.
- Tomiyaama, T., D’Amelio, V., Urbanic, J., ElMaraghy, W., (2007). Complexity of multidisciplinary design. *CIRP annals* 56, 185–188.
- Tomiyaama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., Kimura, F., (2009). Design methodologies: Industrial and educational applications. *CIRP annals* 58, 543–565.

- Travé-Massuyès, L., Dague, P., Guerrin, F., (1997). *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*. Hermes.
- Ullman, D.G., (2010). *The mechanical design process*, 4th ed. McGraw-Hill series in mechanical engineering. McGraw-Hill Higher Education, Boston.
- Ullman, D.G., (1997). *The mechanical design process*. 1997. McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- Darlington, M.J., Cully, S.J., (2004). A model of factors influencing the design requirement. *Design Studies* 25(4), 329–350.
- Ulrich and Eppinger, (2003). *Product design and development*. McGraw-Hill Education
- Ulrich and Eppinger, (1995). *Product Design and Development*. McGraw-Hill 289.
- Vadcard, P., (1996). Aide à la programmation de l'utilisation des outils en conception de produit. PhD thesis, ENSAM, Paris.
- Vanderplaats, G.N., (2002). Optimization: The Competitive Edge. In: Parmee, I.C., Hajela, P. (Eds.), *Optimization in Industry*. Springer, London, pp. 3–14. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0675-3_1
- Vargas, C., (1995). Modélisation du processus de conception en ingénierie des systèmes mécaniques : mise en œuvre basée sur la propagation de contraintes : application à la conception d'une culasse automobile. PhD thesis, Ecole Normale Supérieur, Cachan.
- Vermaas, P.E., (2009). The flexible meaning of function in engineering. In: *DS 58-2: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design*, Vol. 2, Design Theory and Research Methodology, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08. 2009. pp. 113–124.
- Vernat, Y., (2004). Formalisation et qualification de modèles par contraintes en conception préliminaire. PhD thesis,. Paris, ENSAM.
- Vernat, Y., Nadeau, J.-P., Sébastien, P., (2010). Formalization and qualification of models adapted to preliminary design. *Int J Interact Des Manuf* 4, 11–24. <https://doi.org/10.1007/s12008-009-0081-9>
- Viana, F.A., (2013). Things you wanted to know about the Latin hypercube design and were afraid to ask. In: *10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*. sn, pp. 1–9.
- Vosgien, T., (2015). Model-based system engineering enabling design-analysis data integration in digital design environments: application to collaborative aeronautics

- simulation-based design process and turbojet integration studies. PhD thesis, Ecole Centrale Paris.
- Wang, G.G., Shan, S., (2007). Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization. *Journal of Mechanical design* 129, 370–380.
- Wang, J., He, G., Zhang, J., Zhao, Y., Yao, Y., (2017). Nonlinear dynamics analysis of the spur gear system for railway locomotive. *Mechanical Systems and Signal Processing* 85, 41–55.
- Weber, C., Werner, H., Deubel, T., (2003). A different view on Product Data Management/Product Life-Cycle Management and its future potentials. *Journal of engineering design* 14, 447–464.
- de Weck, O., Agte, J., Sobieszczanski-Sobieski, J., Arendsen, P., Morris, A., Spieck, M., (2007). State-of-the-Art and Future Trends in Multidisciplinary Design Optimization. In: 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2007-1905>
- Wood and al, (2001). *Function-Based Synthesis Methods in Engineering Design: State-of-the-Art, Methods Analysis, and Visions for the Future*. FORMAL ENGINEERING DESIGN SYNTHESIS 77.
- Yang, S., Ong, Y.-S., Jin, Y., (2007). Evolutionary Computation in Dynamic and Uncertain Environments. Springer Science & Business Media.
- Yannou, B., (2001). Préconception de produits. PhD, thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Yannou, B., (1998). Analyse fonctionnelle et analyse de la valeur. Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils. M. Tollenaere, Hermes.
- Yassine, A., Whitney, D., Daleiden, S., Lavine, J., (2003). Connectivity maps: Modeling and analysing relationships in product development processes. *Journal of Engineering Design* 14, 377–394. <https://doi.org/10.1080/0954482031000091103>
- Yi, S.-I., Shin, J.-K., Park, G.J., (2008). Comparison of MDO methods with mathematical examples. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 35, 391–402.
- Zadeh, L., (1963). Optimality and non-scalar-valued performance criteria. *IEEE transactions on Automatic Control* 8, 59–60.
- Zapata, D.R., (2018). Démarche méthodologique pour la conception préliminaire et interactive. PhD thesis, ENSAM, Bordeaux.

Zeng, Y., Gu, P., (1999). A science-based approach to product design theory Part II: formulation of design requirements and products. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 15, 341–352. [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(99\)00029-0](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(99)00029-0)

Zimmer, L., Zablit, P., (2001). “ Global Aircraft” pre-design based on constraint propagation and interval analysis. DGLR BERICHT 77–86.

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1.1: Position de la thèse dans les sciences de la conception	14
Figure 1.2 : Les phases du processus de conception	15
Figure 1.3 : Influence stratégique de la conception préliminaire sur les coûts de développement d'un produit (Zimmer and Zablit, 2001)	15
Figure 1.4 : Différentes approches d'optimisation en conception (Roy et al., 2008)	16
Figure 1.5 : situation de l'optimisation dans l'industrie : (a) Expérience d'utilisation, (b) : différents niveaux d'utilisation (Tiwari et al., 2015).....	17
Figure 1.6 : Position de la conception préliminaire et la conception amont dans le processus de conception.....	20
Figure 1.7 : La prévention est moins coûteuse que la correction (Aidi, 2007)	21
Figure 2.1 : Espaces des solutions des trois types de conception (Dieter, 2000).....	27
Figure 2.2: Processus de conception systématique de Pahl et Beitz (Pahl et al., 2007).....	29
Figure 2.3 : Démarche générale de l'analyse fonctionnelle	31
Figure 2.4 : Analogie Mathématique tirée de (Khomenko and Kucharavy, 2002).....	33
Figure 2.5 : La maison de la qualité	35
Figure 2.6 : Déploiement de la maison de la qualité	35
Figure 2.7 : Itération et construction de connaissances (Anghel, 2007)	38
Figure 2.8 : Le processus de conception proposé par Simon (Simon, 60).....	39
Figure 2.9 : Taxonomie de l'incertitude selon Thunnissen (Thunnissen, 2005).....	40
Figure 2.10 : Différentes performances d'un produit durant son cycle de vie(Osteras et al., 2006).....	44
Figure 2.11 : Cycle de vie du produit et situations de vie correspondantes (Scaravetti, 2004)45	45
Figure 2.12 : Modèle Caractéristiques-Propriétés (Weber et al., 2003).....	47
Figure 2.13 : Modèle FBS de Gero (Gero, 2001).....	47
Figure 2.14 : Modèle, variables, paramètres et données	48
Figure 2.15 : Un produit (Machine électrique) et son modèle analytique (Mazhoud, 2014)...	50
Figure 2.16 : Modes d'intégration de la simulation dans le processus d'optimisation.	51
Figure 2.17 : LHS avec une mauvaise couverture de paramètres de conception.....	53
Figure 2.18 : Exemple d'OLHS de 16 points dans l'espace de recherche	54
Figure 2.19 : Réseau de neurones de fonctions à base radiale	56
Figure 2.20 : Boucle d'optimisation classique et le Space Mapping	58

Figure 2.21 : Définition du modèle fin et grossier	58
Figure 3.1 : Différents types d'optimisation de forme. (a) Optimisation de forme paramétrique, (b) Optimisation de forme géométrique. (c) Optimisation topologique (Bendsøe and Sigmund, 2013)	62
Figure 3.2 : Formulation et résolution d'un problème d'optimisation en conception.....	63
Figure 3.3 : Classification des méthodes d'optimisation	67
Figure 3.4 : Principe d'algorithmes évolutionnaires (EA) (Dréo et al., 2003).....	72
Figure 3.5 : Exemples de croisement : (a) croisement simple en un point, (b) croisement en deux points, (c) croisement uniforme.....	74
Figure 3.6 : PSO-Déplacement d'une particule dans l'espace de recherche.....	75
Figure 3.7 : Correspondance entre l'espace de décision et l'espace des objectifs	76
Figure 3.8 : Méthode d'agrégation : (a) Front de Pareto convexe, (b) Front de Pareto non convexe.....	79
Figure 3.9 : Front de Pareto pour un problème d'optimisation bi-objectif	80
Figure 3.10 : Obtention de la nouvelle population par croisement et mutation, puis classement par dominance et nichage (Deb et al., 2002).....	81
Figure 3.11 : Modélisation d'une discipline.....	83
Figure 3.12 : Couplage entre la discipline i et la discipline j	84
Figure 3.13 : Couplage entre deux disciplines : Structure et Aérodynamique.....	85
Figure 3.14 : Approche couplée	86
Figure 3.15 : FPI entre la discipline i et la discipline j	87
Figure 3.16 : Approche découplée	87
Figure 3.17: Classification des approches d'OMD	88
Figure 3.18: Approche MDF	90
Figure 4.1 : Décalage entre les fonctions de produit et les spécifications de conception	92
Figure 4.2 : Enoncé de la problématique.....	93
Figure 4.3 : Position de l'approche proposée	94
Figure 4.4 : Intérêt de l'approche proposée.....	95
Figure 5.1 : Approche de conception et optimisation interactive proposée	99
Figure 5.2 : Démarche de conception proposée	102
Figure 5.3 : Extraction et intégration du modèle analytique dans le processus d'optimisation	104
Figure 5.4 : Processus d'optimisation du premier niveau	104

Figure 5.5 : Résultats du premier niveau.....	105
Figure 5.6 : Génération et validation des modèles numériques	105
Figure 5.7 : Démarche suivie dans le deuxième niveau	110
Figure 5.8 : Principe de sélection des solutions optimales à partir du front de Pareto.....	111
Figure 5.9 : Points sélectionnés suivant le critère du LHSO	111
Figure 5.10 : Construction du métamodèle à partir de N points sélectionnés.....	112
Figure 5.11 : Nouveaux points sélectionnés dans l'espace de solution.....	114
Figure 6.1 : Démarche de validation de l'approche proposée	116
Figure 6.2 : Modèle géométrique de réducteur de vitesse.....	118
Figure 6.3 : Deux segments de marché ciblé	119
Figure 6.4 : processus de premier niveau	120
Figure 6.5 : Analyse fonctionnelle externe du réducteur de vitesse.....	121
Figure 6.6 : Réalisation de la fonctions FS1 et blocs fonctionnels associées (diagramme FAST).....	122
Figure 6.7 : Configuration proposée par l'architecte produit.....	123
Figure 6.8 : Tâches et rôles de chaque expert domaine	126
Figure 6.9 : Approche MDF adaptée.....	127
Figure 6.10 : Problème OMD du train d'engrenage.....	128
Figure 6.11 : Fronts de Pareto obtenus du problème OMD	129
Figure 6.12 : Tâche et rôle d'expert de structure	132
Figure 6.13 : Problème d'optimisation du train d'engrenage.....	133
Figure 6.14 : Processus de premier niveau.....	134
Figure 6.15 : Processus de l'étape intermédiaire.....	134
Figure 6.16 : Modèle géométrique 3D du réducteur de vitesse	135
Figure 6.17 : Processus du deuxième niveau	137
Figure 6.18 : Trois paramètres de conception ajoutés dans le deuxième niveau	138
Figure 6.19 : Mise en œuvre de l'étape intermédiaire et le deuxième niveau.....	140
Figure 7.1 : Modélisation de la dent selon Ishikawa.....	149
Figure 7.2 : Conception paramétrique du réducteur de vitesse sous SolidWorks.....	151
Figure 7.3 : Modèle numérique adapté pour évaluer la flexion en pied de dent et la pression de contact	152
Figure 7.4 : Modèle numérique adopté pour évaluer la contrainte de von Mises dans les arbres de transmission.....	153

Figure 7.5 : Modèle numérique adopté pour évaluer la contrainte de flexion en pied de dent et la contrainte de von Mises dans la gante.....	153
Figure 7.6 : Configuration correspondant à la contrainte maximale dans le gante.....	154

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Exemple d'un tableau FMEA produit (Hassan, 2010).....	34
Tableau 3.1 : Classification des problèmes d'optimisation.....	66
Tableau 5.1 : Mesures d'exactitude proposées par Meckesheimer (El Amine, 2015).....	107
Tableau 6.1 : Cahier des charges fonctionnel pour les deux cas test	116
Tableau 6.2 : Paramètres géométriques adaptés.....	118
Tableau 6.3 : Les éléments du train d'engrenage considérés pour l'évaluation de la fiabilité	124
Tableau 6.4 : Les attributs de produit et leurs poids	125
Tableau 6.5 : Espace de conception	132
Tableau 6.6 : Résultat du premier niveau.....	133
Tableau 6.7 : Nouvel espace de recherche généré	138
Tableau 6.8 : Résultats de deuxième niveau	140
Tableau 7.1 : Coût de matériaux de l'engrenage et de l'arbre	150
Tableau 7.2 : Coût de fabrication de l'engrenage et l'arbre de transmission.....	150
Tableau 7.3 : les paramètres produit pour calculer le coût pour fiabilité.....	150
Tableau 7.4 : Matériaux d'engrenage et d'arbre	151
Tableau 7.5: Paramètres de maillage adaptés pour les études statiques.....	152
Tableau 7.6 : Evaluation et comparaison de la solution de premier niveau.....	152
Tableau 7.7 : Dimensions de clavette.....	153
Tableau 7.8 : Comparaison des résultats entre TCM et MEF	153
Tableau 7.9 : Résultats de validation de sept métamodèles RBFs	154

Liste des abréviations et des acronymes

Liste des abréviations et des acronymes

AES	Algorithmes Evolutionnaires
AF	Analyse Fonctionnelle
AGMA	American Gear Manufacturers Association
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité
ANN	Artificial Neural Network
CAD	Computer - Aided Design
CAE	Computer - Aided Engineering
CAM	Computer – Aided Manufacturing
CdCF	Cahier des Charges Fonctionnel
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMDO	Collaborative Multidisciplinary Design Optimization
CPM	Characteristics - Properties - Modelling
DFMA	Design for Manufacture and Assembly
DFX	Conception pour X
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOE	Design of Experiments
DSM	Design Structure Matrix
EF	Eléments Finis
FBS	Fonction-Comportement-Structure
GA	Algorithmes Génétiques
GRASP	Greedy randomized adaptive search procedure

HPSTC	Highest Point of Single Tooth Contact
ISO	International Organization of Standardisation
LCPI	Laboratoire de conception de produits et d'innovation
KKT	Karush - Kuhn - Tucker (conditions d'optimalité)
LHS	Latin Hypercube Sampling
LHSO	Latin Hypercube Sampling Optimisé
LTAFC	Laboratoire des Techniques Avancées de Fabrication et Contrôle
MDA	Multidisciplinary Design Analysis
MDF	Multidisciplinary Feasible
MDO	Multidisciplinary Design Optimization
MEF	Méthode d'Eléments Finis
NSGA-II	Nondominated Sorting Genetic Algorithm II
OMD	Optimisation Multidisciplinaire
PLM	Product Life Management
PSC	Problème par Satisfaction de Contraintes
PSO	Optimisation par Essaim Particulaire
QFD	Quality Function Deployment
RBF	Fonctions a Base Radiale
RPN	Risk Priority Number
SGDT	Systèmes de Gestion des Données Techniques
SI	Intelligence en Essaim
SP	Space Mapping
TCCM	Théorie de Contrainte de Cisaillement Maximale
TRIZ	Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs

**CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DE LA CONCEPTION
PRELIMINAIRE D'UN PRODUIT : APPROCHE BASEE SUR
L'IMPLEMENTATION DES TECHNIQUES D'OPTIMISATION**

RÉSUMÉ :

L'objectif de cette thèse est de proposer une approche de conception et d'optimisation interactive afin d'améliorer la conception préliminaire d'un produit. Cette approche offre des outils d'aide à la prise de décision aux concepteurs pour mener à bien la conception préliminaire sans solliciter les experts d'une façon intensive. Cette approche consiste à structurer la phase de conception préliminaire en deux niveaux. Le premier niveau repose sur l'utilisation d'un modèle simplifié (analytique) du produit considéré et rechercher les solutions de conception associées. Le deuxième niveau de conception et d'optimisation repose sur l'utilisation d'un modèle fin (numérique) du produit pour améliorer la conception autour de la conception retenue durant le premier niveau. L'approche proposée est testée sur un cas de conception routinière d'un produit mécanique. Suite à deux cas test, l'utilisation de cette approche a permis une amélioration significative de la conception et des performances du produit. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité de l'approche proposée et ouvrent de nouvelles voies de recherche dans le domaine de l'amélioration du processus de conception.

Mots clés : Conception Préliminaire, Optimisation, Performances de Produit.

**CONTRIBUTION TO THE IMPROVEMENT OF THE PRELIMINARY
DESIGN OF A PRODUCT: APPROACH BASED ON THE IMPLEMENTATION
OF OPTIMIZATION TECHNIQUES**

ABSTRACT:

The aim of this thesis is to propose an interactive design and optimization approach to improve the preliminary design of product. This approach offers a set of tools to assist designers to make decisions without intensive expert inquiries. It consists in splitting the preliminary design phase into two levels of design and optimization. In the first level, the design process is based on a reduced (analytical) model of the product, which is integrated in an appropriate optimization procedure to select best design solutions. The second level is based on the use of a fine (numerical) model of the considered product to improve the design around a solution selected from results of the first level.

The proposed approach is tested on a redesign case of a mechanical product. Through two case study, the use of this approach leads to a significant improvement of the product design and the satisfaction of desired objectives in terms of performances. The obtained results highlighted the efficiency of the proposed approach and open new perspectives for future research activities in the field of design process enhancement.

Keywords : Preliminary Design, Optimization, Product Performances

