HAL
open science

Intégration de la maturité des connaissances dans la prise de décision en conception mécanique : application à un système solaire.

Mehdi El Amine

To cite this version:

Mehdi El Amine. Intégration de la maturité des connaissances dans la prise de décision en conception mécanique : application à un système solaire.. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2015. Français. NNT : 2015ENAM0046 . tel-01264683

HAL Id: tel-01264683

https://pastel.hal.science/tel-01264683v1

Submitted on 29 Jan 2016

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.

2015-ENAM-0046

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

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Conception "

présentée et soutenue publiquement par

Mehdi EL AMINE

le 16 décembre 2015

Intégration de la maturité des connaissances dans la prise de décision en conception mécanique - application à un système solaire -

Directeur de thèse : **Nicolas PERRY**
Co-encadrement de la thèse : **Jérôme PAILHES**

Jury

M. Laurent GENESTE, Professeur, Laboratoire Génie de Production, ENIT	Président
M. Fouad BENNIS, Professeur, IRCCyN, Ecole Centrale de Nantes	Rapporteur
M. Dominique DENEUX, Professeur, TEMPO, Université de Valenciennes	Rapporteur
M. Mohammed SALLAOU, Professeur Habilité, Département GMS, ENSAM-Meknès	Examinateur
M. Michel COUDRAIS-DUHAMEL, Responsable Recherche et Développement, ASTF	Invité

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech – Campus de Bordeaux
Nom de l'Unité de recherche

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du laboratoire I2M-IMC site ENSAM (UMR CNRS 5295).

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Nicolas PERRY, pour m'avoir guidé, encouragé et conseillé pendant plus de trois ans. Je le remercie beaucoup pour ces qualités humaines et son hospitalité. Mes remerciements vont également à Jérôme PAILHES, qui a co-encadré cette thèse, pour tous les conseils précieux qu'il m'a donné et qui a toujours trouvé du temps à me consacrer.

Je remercie également les rapporteurs de cette thèse, le professeur Dominique DENEUX, de l'Université de Valenciennes et le professeur Fouad BENNIS, de l'Ecole Centrale de Nantes, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Mes remerciements s'adressent aussi au professeur Laurent GENESTE, de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, président du jury, pour avoir accepté de juger ce travail et M. Mohamed SALLAOU, professeur assistant à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Meknès pour avoir accepté d'examiner mon travail..

Mes remerciements s'adressent aussi à Eric ARQUIS, actuel directeur du laboratoire et aussi à Jean Pierre NADEAU, Directeur du laboratoire à mon arrivée.

Je tiens à remercier mes amis et mes collègues à l'université de Bordeaux. Je remercie particulièrement Youssef BENAMA, Mohammed EL MOUSSAID, Ernesto Efrén VELÁZQUEZ ROMO, Mehrez AGNAOU et Ulises VALVERDE, et pour leur soutien moral et leurs encouragements.

Enfin, le parcours mené jusqu'à l'écriture de ce mémoire n'aurait pas été possible sans le soutien et l'amour inconditionnel de ma famille. Pour cela, je ne pourrais jamais assez vous remercier. Votre présence était primordiale pour l'accomplissement de ce travail.

A ma famille

RESUME

Titre : Intégration de la maturité des connaissances dans la prise de décision en conception mécanique - application à un système solaire -

Résumé : Les décisions préliminaires en conception ont un impact considérable sur le coût global du cycle de vie du produit. Elles doivent donc être encadrées par des démarches appropriées. Ces démarches doivent être en adéquation avec le niveau de connaissance acquis en conception, la nature des décisions à prendre et les outils d'évaluation disponibles. Ainsi, deux démarches d'aide à la décision ont été développées selon la phase de conception étudiée.

Une première démarche est proposée pour les phases en amont de conception afin de réduire le nombre de concepts proposés initialement. Ces phases sont caractérisées par une description incomplète du produit et des données imprécises du problème. La nécessité de prendre des décisions dans ce contexte d'incertitude nous a conduit à utiliser la connaissance implicite, obtenue au travers de l'expérience et du savoir-faire des concepteurs. Afin d'intégrer cette connaissance dans la prise de décision, elle est d'abord formalisée à travers plusieurs outils. La démarche globale d'aide à la décision proposée permet de combiner à la fois cette connaissance implicite et la connaissance explicite, traduite par les modèles de comportement, pour évaluer chaque concept en termes d'aptitude à respecter les exigences minimales de validation et du potentiel de performance qu'il peut atteindre. Les préférences du décideur sont intégrées via le modèle Observation-Interprétation-Agrégation.

Une deuxième démarche a été proposée pour les phases en aval de conception pour définir l'architecture du produit (choix des matériaux, dimensions, etc.). Durant ces phases, les modèles de comportement utilisés pour explorer l'espace de conception sont basés sur des hypothèses qui conduisent souvent à une remise en question de leur exactitude. Le choix de

fixer l'architecture du produit en se basant sur les résultats de ces modèles nécessite la prise en compte de leur niveau d'exactitude. Nous avons ainsi développé un indicateur d'exactitude qui intègre, d'une part, une évaluation objective qui est la mesure d'écart entre le modèle et un comportement de référence (supposée exact) et, d'autre part, sur une évaluation subjective basée sur l'utilisation de fonctions de confiance établies par les concepteurs. La combinaison de ces deux types d'évaluation permet d'obtenir un indicateur d'exactitude capable de couvrir l'intégralité de l'espace de conception. Le décideur a ainsi la possibilité d'explorer cet espace à la recherche d'architectures offrant le meilleur compromis entre performance et risque lié à l'inexactitude des modèles de comportement utilisés.

Les deux démarches proposées sont appliquées sur un cas industriel de développement d'un système solaire.

Mots-clés : Aide à la décision, Modélisation des préférences, Conception préliminaire, Méconnaissance, Exactitude des modèles, risque.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I : Introduction générale et contexte 1

I.1 Contexte 2

I.1.1. Introduction à la conception 2

I.1.2. Terminologie 2

I.1.3. Sélection de concept 3

I.1.4. Conception architecturale 4

I.2 Verrous scientifiques de la thèse 5

I.3 Organisation du document 6

CHAPITRE II : Etat de l'art 9

II.1 Introduction 10

II.2 Théories et méthodes de conception 10

II.2.1. Théorie générale de la conception 11

II.2.2. Décomposition des théories et méthodes de conception 12

II.2.3. Le modèle Fonction-Comportement-Structure 13

II.3 Aide à la décision multicritère en conception de produits 15

II.3.1. Quelques définitions 16

II.3.2. Processus de prise de décision multicritères en conception 17

II.3.3. Formalisation d'un modèle de comportement en conception 19

II.3.4. Formalisation des préférences en conception de produits 21

II.3.4.1 Formalisation de l'interprétation des performances 21

II.3.4.1.1 Fonctions de désirabilité 22

II.3.4.1.1.1 Fonctions de Harington 22

II.3.4.1.1.2 Fonctions de Derringer 24

II.3.4.1.2 Fonction d'utilité 26

II.3.4.2 Agrégation des préférences en conception de produits 27

II.3.4.2.1 Axiomes de Scott 28

II.3.4.2.2 Opérateurs d'agrégation 29

II.3.4.2.2.1 Opérateur de la moyenne arithmétique pondérée 29

II.3.4.2.2.2 Opérateur de la moyenne géométrique pondérée 30
II.3.4.2.2.3 Opérateur de Kim et Lin 30
II.3.4.2.2.4 Famille des opérateurs d'agrégation de Yager 31
II.3.4.2.3 Détermination des paramètres d'un opérateur d'agrégation 33
II.3.4.2.3.1 Processus de hiérarchie analytique 33
II.3.4.2.3.2 Méthode des points indifférents 35
II.3.5. Bilan 37

II.4 Modélisation de l'incertitude des données en conception 37

II.4.1. Classification des incertitudes en conception 38
II.4.1.1 Incertitude épistémique et aléatoire 38
II.4.1.2 Décomposition en fonction des étapes du processus de prise de décision 39
II.4.2. Approches qualitatives pour la modélisation de l'incertitude 40
II.4.2.1 Pérennité 41
II.4.2.2 Variation 41
II.4.2.3 Sensibilité 42
II.4.2.4 Complétude 42
II.4.2.5 Caractérisation et qualification de l'information 43
II.4.3. Approches quantitatives pour la modélisation de l'incertitude 44
II.4.3.1 Ensembles flous 44
II.4.3.2 Théorie des possibilités 44

II.5 Qualification des modèles de comportement en conception 45

II.5.1. Distinction entre exactitude et précision d'un modèle 45
II.5.2. Parcimonie 46
II.5.3. Exactitude 46
II.5.4. Précision 48
II.5.5. Spécialisation 48

II.6 Intégration d'incertain dans la prise de décision 49

II.6.1. Théorie de l'utilité 49
II.6.2. Méthode de l'imprécision 50

II.7 Conclusion 51

CHAPITRE III : Démarche de sélection de concepts 53

III.1 Introduction 54
III.1.1. Organisation du processus industriel de développement 55
III.1.2. L'aspect collaboratif de la conception 56
III.1.3. Risque dans la sélection de concepts 57
III.1.4. Aperçu de la démarche proposée et organisation du chapitre 59
III.2 Formalisation des préférences du décideur 59
III.2.1. Aperçu global du modèle proposé 60
III.2.2. Identification et structuration des objectifs de conception 60
III.2.3. Formalisation du comportement : modèle d'observation 64
III.2.4. Formalisation des préférences du décideur 65
III.2.4.1 Modèle l'interprétation 65
III.2.4.2 Modèle d'agrégation 67
III.2.5. Bilan sur le modèle proposé 69
III.3 Caractérisation des données d'entrée 70
III.3.1. Modélisation de l'état d'imprécision 70
III.3.2. Détermination des indices de variation 73
III.3.3. Détermination des indices de couplage 74
III.3.4. Bilan sur la caractérisation des données d'entrée 77
III.4 Sélection des concepts 78
III.4.1. Indice global de criticité du risque 78
III.4.1.1 L'occurrence 80
III.4.1.2 La détectabilité 82
III.4.2. Indice global de désirabilité 83
III.4.3. Bilan et exploitation des deux indices 85
III.5 Conclusion 86
CHAPITRE IV : Démarche de sélection des paramètres de conception 89
IV.1 Introduction 90
IV.1.1. Démarche itérative pour la conception architecturale 90
IV.1.2. Vers une conception basée sur les modèles 92
IV.1.3. Interaction entre maquette numérique et prototypage physique 93

IV.1.4. Objectifs et approche proposée 93

IV.2 Proposition d'un indicateur d'exactitude des modèles de comportement 95

IV.2.1. Solution de référence 96
IV.2.2. Evaluation objective de l'exactitude 97
IV.2.2.1 Mesure de la distance 97
IV.2.2.2 Prise en compte de l'imprécision 98
IV.2.2.3 Normalisation de la mesure de la distance 99
IV.2.2.4 Bilan 99
IV.2.3. Evaluation subjective de l'exactitude 100
IV.2.4. Mesure d'exactitude généralisée 103
IV.2.5. Bilan 104

IV.3 Proposition d'un modèle d'aide à la décision 105

IV.3.1. Indice global de désirabilité 106
IV.3.2. Indice de maitrise de risque 107
IV.3.3. Utilisation dans le cadre de la conception itérative 109
IV.3.4. Bilan de l'approche proposée 110

IV.4 Conclusion 111

CHAPITRE V : Application à la conception d'un système solaire 113

V.1 Avant-propos 114

V.2 Introduction 114

V.3 Présentation du cas industriel 114

V.3.1. Centrale solaire thermodynamique à miroirs de Fresnel 114
V.3.2. Une technologie peu mature 116
V.3.3. Le réflecteur solaire 116

V.4 Formalisation des préférences du décideur 117

V.4.1. Identification et structuration des objectifs de conception 117
V.4.2. Modèle d'interprétation ϕ 119
V.4.3. Modèle d'agrégation φ 120

V.5 Concepts du support réflecteur proposés initialement 121

V.6 Modèles de comportement utilisés 122
V.6.1. Modèles de comportement préliminaires 123
V.6.1.1 Coût de la matière première 123
V.6.1.2 Performance optique 124
V.6.1.2.1 Concept treillis 126
V.6.1.2.2 Concept sandwich 127
V.6.1.2.3 Concept tube 128
V.6.1.3 Résistance au vent extrême 129
V.6.1.3.1 Concept treillis 131
V.6.1.3.2 Concept Sandwich 132
V.6.1.3.3 Concept tube 135
V.6.2. Modèles de comportement avancés : cas du treillis 138
V.7 Sélection préliminaire de concepts 141
V.7.1. Caractérisation des données d'entrée 142
V.7.2. Résultats des calculs 145
V.7.3. Interprétation des résultats 147
V.8 Conception architecturale 148
V.8.1. Solution de référence 148
V.8.2. Mesure de l'exactitude des modèles de comportement 149
V.8.3. Résultats et interprétation 151
V.8.4. Etude de différents scénarios de conception 154
V.9 Conclusion 156
CHAPITRE VI : Conclusion et perspectives 157
VI.1 Conclusion 158
VI.2 Perspectives 160
ANNEXES 163
ANNEXE A : Actions du vent sur les réflecteurs 164
ANNEXE B : Calcul des charges critiques de flambement 170

ANNEXE C : Fonctions de préférence, indices de variation et indices de couplage pour les concepts sandwich et tube 172

ANNEXE D : Plan d'expérience réalisé pour la conception architecturale 176

NOMENCLATURE 183

REFERENCES 187

PUBLICATIONS PERSONNELLES 198

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 Illustration du processus de conception 3
Figure II-1 Processus de conception dans le cadre de la théorie générale de la conception 12
Figure II-2 Processus de conception dans le cadre du Modèle FBS de Gero [Ger04] 14
Figure II-3 Le processus de décision proposé par Simon [Sim60] 15
Figure II-4 Décomposition du processus de prise de décision multicritère en conception de produits 19
Figure II-5 Formalisation d'un modèle de comportement en conception de produits 20
Figure II-6 Fonctions de désirabilité de Harrington [Har65] 23
Figure II-7 Fonctions de désirabilité de Derringer [Der80] 25
Figure II-8 Exemple d'évaluation de loterie [Kri06] 27
Figure II-9 Opérateurs de Yager obtenues pour différentes valeurs de s 33
Figure II-10 Echelle de comparaison et construction de la matrice de jugement 35
Figure II-11 Illustration de trois points équivalents évaluée sur deux préférences 36
Figure II-12 Incertitude de l'information de l'émetteur au récepteur 44
Figure II-13 Distinction entre précision et exactitude d'un modèle de comportement 46
Figure III-1 Développement de plusieurs concepts en parallèle 57
Figure III-2 Exemple illustrant trois choix de développement 59
Figure III-3 Modèle global utilisé pour la formalisation des préférences du décideur 61
Figure III-4 Décomposition de l'objectif global de conception en plusieurs sous-objectifs de conception 62
Figure III-5 Cycle de vie du produit et situations de vie correspondantes [Sca04] 63
Figure III-6 Diagramme pieuvre (APTE®) 64
Figure III-7 Structure du modèle d'observation pour un concept A 65
Figure III-8 Structure du modèle d'interprétation 67
Figure III-9 Structure du modèle d'agrégation 69
Figure III-10 Modèle global de formalisation des préférences du décideur 70
Figure III-11 Représentation de la préférence du concepteur sur les paramètres conception 72
Figure III-12 Réduction de l'état d'imprécision sur les paramètres de conception 73
Figure III-13 Utilisation de la méthode du vertex pour la propagation d'imprécision 77
Figure III-14 Démarche globale pour l'évaluation de l'indice de criticité de risque d'une variable p_k 80
Figure III-15 Comparaison de l'espace des performances possibles et l'espaces des performances admissibles 81
Figure III-16 Illustration des trois cas possibles dans le calcul de l'occurrence 83
Figure III-17 Exemple illustrant la limite de l'utilisation de l'indice global de criticité de risque seul 84
Figure III-18 Etapes de calcul de l'espace de désirabilités possibles 86

Figure III-19 Exemple de résultats obtenus par l'utilisation des deux indices 87
Figure IV-1 Démarche itérative dans la conception architecturale 91
Figure IV-2 Structure globale de la démarche proposée 95
Figure IV-3 Evaluation objective de l'exactitude..... 100
Figure IV-4 Les fonctions de confiance pour le modèle δ_i 102
Figure IV-5 Procédure de calcul de la mesure subjective de l'exactitude du modèle δ_i 104
Figure IV-6 Synthèse de la démarche de calcul de la mesure globale de l'exactitude d'un modèle de comportement δ_i 105
Figure IV-7 Constitution du plan d'expérience 106
Figure IV-8 Modèle de calcul de l'indice global de désirabilité d'une solution candidate 107
Figure IV-10 Evaluation de l'indice global de désirabilité et de l'indice de maitrise de risque pour chaque solution candidate du plan d'expérience 110
Figure V-1 Structure du réflecteur solaire 117
Figure V-2 Décomposition de l'objectif global de conception en plusieurs sous-objectifs de conception 119
Figure V-3 Concepts de support réflecteur proposés initialement et les paramètres de conception qui leur sont associés 123
Figure V-4 Structure du modèle de rigidité en torsion 125
Figure V-5 Conditions aux limites et état de chargement pour le modèle de rigidité en torsion et le modèle de rigidité en flexion 126
Figure V-6 Structure du modèle de rigidité en flexion 127
Figure V-7 : Configuration géométrique, conditions aux limites et état de chargement pour le modèle de rigidité en torsion et le modèle de rigidité en flexion du concept treillis 128
Figure V-8 Conditions aux limites et état de chargement utilisés pour le modèle de rigidité en torsion et le modèle de rigidité en flexion du concept sandwich 129
Figure V-9 Structure du modèle de résistance au vent extrême 130
Figure V-10 Conditions aux limites et état de chargement pour le modèle de résistance au vent extrême 131
Figure V-11 Configuration géométrique, conditions aux limites et état de chargement considérés pour le calcul de l'effort de traction dans les points de fixation 132
Figure V-12 Structure de l'algorithme utilisé pour le calcul de la pression dynamique de pointe Qpr que peut supporter la structure treillis 133
Figure V-13 Illustration de l'effort rasant 135
Figure V-14 Structure de l'algorithme utilisé pour le calcul de la pression dynamique de pointe supportée par la structure sandwich 136
Figure V-15 Configuration simplifier pour le calculer la contrainte maximale dans les traverses 137

Figure V-16 Structure de l'algorithme utilisé pour le calcul de la pression dynamique de pointe Qpr que peut supporter la structure treillis 139
Figure V-17 Etapes de la construction du modèle éléments finis avec des éléments de type *"coque"* 141
Figure V-18 Fonctions de préférence des paramètres de conception du concept treillis 144
Figure V-19 Espaces des performances possibles pour chacun des trois concepts 146
Figure V-20 Résultats des deux indicateurs ICR et IGD pour les trois concepts étudiés 147
Figure V-22 Exactitude des modèles de comportement utilisés dans différentes phases du projet de développement 150
Figure V-23 Fonctions de confiance pour les différents paramètres de conception du treillis 151
Figure V-24 Résultats pour les indicateurs IGD et $IGMR$ 152
Figure V-25 Répartition des poids pour trois scénarios d'étude 155
Figure V-26 Evolution de la valeur de l'indicateur IGD entre le scénario de base (scénario 1) et les scénarios 2 et 3 imaginés 156

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 Classification des TMC basée sur la théorie générale de la conception [Tom09]..... 13
Tableau II-2 Axiomes à respecter pour un avoir un opérateur d'agrégation design-appropriate [Sco98] 29
Tableau II-3 Types de résolution du système d'équations [Sco00]..... 37
Tableau II-4 Niveaux de pérennité [Gre07] 42
Tableau II-5 Niveaux de variation d'une activité [Kri96]..... 42
Tableau II-6 Niveaux de sensibilité d'une information (inspiré des travaux de [Yas99]) 43
Tableau II-7 Niveaux de complétude de l'information [Gre06]..... 43
Tableau II-8 Mesures d'exactitude proposées par Meckesheimer [Mec01]..... 48
Tableau III-1 Echelle utilisée pour évaluer l'indice de variation d'un paramètre..... 74
Tableau IV-1 Echelle utilisée pour l'évaluation de la sévérité Si 109
Tableau V-1 Paramètres des fonctions de désirabilité de Harrington pour le modèle d'interprétation [Gaz11, Ben10] 116
Tableau V-1 Paramètres des fonctions de désirabilité de Harrington pour le modèle d'interprétation 120
Tableau V-2 Les points équivalents utilisés pour déterminer les opérateurs d'agrégation 121
Tableau V-3 Paramètres des opérateurs d'agrégation utilisés (poids et degrés de compensation) 121
Tableau V-4 Indices de variation et indices de couplage pour les paramètres de conception (du treillis) et les paramètres du milieu environnant..... 145
Tableau V-5 Résultats détaillés pour les indices de criticité de risque 147
Tableau V-6 Paramètres de conception à fixer et les intervalles possibles 149
Tableau V-7 Solution de référence et évaluation de ses performances par modèles de comportement et expérimentation physique sur le prototype V3.0..... 150
Tableau V-8 Informations détaillées sur les solutions candidates du front de Pareto : cas de l'indice global de désirabilité 153
Tableau V-9 Informations détaillées sur les solutions candidates du front de Pareto : cas de l'indice global de maitrise de risque..... 153

CHAPITRE I

Introduction générale et contexte

I.1 Contexte

I.1.1. Introduction à la conception

La réussite du développement de produits industriels est un enjeu économique considérable pour l'entreprise. Les objectifs industriels en termes de qualité, coût et délais sont de plus en plus exigeants. Ces objectifs sont d'autant plus contraignants que le niveau de complexité des produits ne cesse de s'accroître, exigeant une plus forte collaboration entre les intervenants du projet [Tom07]. Dans ces circonstances, les industriels sont de plus en plus encouragés à adopter des méthodologies visant à rationaliser et à améliorer leurs activités de développement. Etant donné l'aspect collaboratif, ces méthodologies se doivent aussi d'offrir un cadre favorable à l'échange d'informations et de connaissances entre des parties prenantes, souvent issues de différents métiers [Lu07]. Dans ce sens, la formalisation et la capitalisation de connaissances sont des objectifs de plus en plus recherchés par les entreprises.

La prise de décision est une partie inhérente de ces activités de développement et intervient le long du processus de développement, que ce soit pour définir les principes de fonctionnement du futur produit ou pour choisir ses caractéristiques géométriques. Durant les premières phases de développement d'un produit, ces décisions déterminent jusqu'à 70% des futurs coûts du cycle de vie [Zim01]. Les choix réalisés durant ces premières phases se doivent alors d'être encadrés par des théories, des méthodes et des outils appropriés.

I.1.2. Terminologie

Nous souhaitons ici définir quelques termes qui seront beaucoup utilisés dans la suite de ce manuscrit. Dans la plupart des processus se retrouvent souvent les phases successives suivantes : analyse du besoin, définition des spécifications, recherche de concepts, recherche d'architecture, conception détaillée. Ces phases sont illustrées dans la Figure I-1.

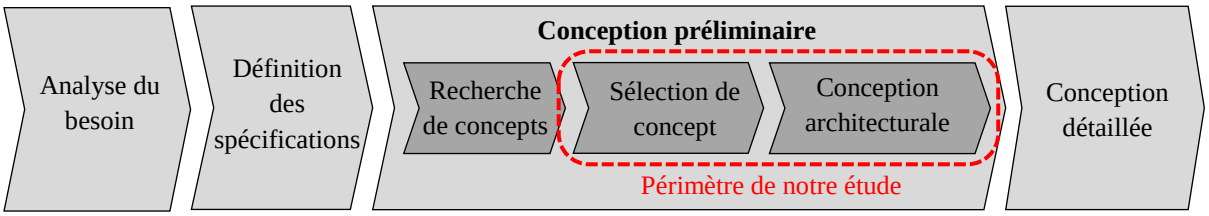


Figure I-1 Illustration du processus de conception

L'analyse du besoin du marché aboutit à la description de l'ensemble des spécifications que doit satisfaire le produit. Ces spécifications sont regroupées dans le cahier des charges fonctionnel (CdCF). Vient ensuite la phase de conception préliminaire qui comporte la phase de recherche de concepts et conception architecturale. **La recherche de concepts** met en œuvre des processus de créativité et consiste à explorer diverses solutions de principe pour aboutir au choix du concept répondant aux besoins fonctionnels et spécifiés. Yannou parle également de *"concept de solution"* comme d'une représentation intermédiaire du produit, à un stade où tous les principes de conception n'ont pas été choisis [Yan01].

L'activité de **conception architecturale** (ou *"embodiment design"* en anglais) consiste à définir les formes, les arrangements de composants, les matériaux, les dimensions structurelles et d'architectures. Les différents choix effectués durant l'activité de conception architecturale seront appelés **paramètres de conception** dans cette thèse. Nous définissons **une alternative de conception** comme un choix particulier de paramètres de conception. Ainsi, la définition d'une alternative de conception nécessite au préalable le choix d'un concept et ensuite le choix des paramètres de conception.

Finalement, il y a la phase de **conception détaillée** dans laquelle chaque élément de l'architecture sélectionnée est défini complétement et validé. Les plans, la nomenclature ainsi que les procédés de fabrication et de contrôle sont déterminés. A la suite de cette phase, qui constitue la dernière étape du processus de conception, le produit est entièrement défini.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la prise de décision pour le choix de concept et pour le choix des paramètres de conception. Dans les deux paragraphes qui suivent, nous décrivons plus en détail les deux phases étudiées et nous exposons les problématiques industrielles qui leur sont associées.

I.1.3. Sélection de concept

A l'issue de la définition des spécifications, les concepteurs commencent par proposer un ensemble de concepts susceptibles de répondre à ces spécifications. Les choix effectués dans les premières phases de conception sont déterminants. Or, durant ces premières phases, les caractéristiques du produit sont incomplètement définies. En plus, les modèles de comportement développés à ce stade sont très approximatifs et peu représentatifs des phénomènes physiques réels liés au comportement du produit. Dans ces circonstances, il est difficile de déterminer, d'une manière précise, les performances associées à chacun des concepts proposés. Sélectionner un seul concept pour en faire l'objet de développement est

risqué. Il pourrait s'avérer que le concept choisi ne permette pas d'aboutir à un produit respectant les exigences minimales de validation. Les surcoûts liés à la remise en cause tardive du choix de concept sont généralement très élevés. Se pose alors la question suivante qui sera notre première question de recherche : comment intégrer les incertitudes dans la définition du produit et comment faire des choix de concept alors que peu de connaissances sont disponibles à ce stade de développement ?

Pour répondre à cette problématique, certain bureaux d'études choisissent de développer plusieurs concepts en parallèle. Les bureaux d'études Toyota, par exemple, suivent cette pratique [Mor06]. Cela permet de générer des connaissances sur différents concepts, en parallèle, jusqu'à un niveau suffisant pour faciliter et fiabiliser le choix du concept au regard des objectifs de conception. Les connaissances acquises à travers les activités de développement permettent de passer progressivement d'une description générale du produit à une description plus détaillée. Cependant, l'intérêt de repousser le choix du concept est limité par le coût élevé des activités de développement engendrées. Une présélection de concepts est souvent nécessaire pour concentrer les efforts et les ressources de l'entreprise sur le concept (ou les concepts) le(s) plus prometteur(s).

I.1.4. Conception architecturale

Une fois le choix du concept figé, la conception architecturale permet de fixer les formes, les arrangements de composants, les matériaux, les dimensions structurelles et d'architectures [Pah96]. Des modèles de comportement sont souvent utilisés à ce stade pour explorer les différentes combinaisons possibles d'éléments et aboutir à l'architecture la plus pertinente vis-à-vis des objectifs de conception. Cependant, ces modèles de comportement utilisent un ensemble d'hypothèses et d'approximations qui conduisent souvent à une remise en question de leur exactitude, surtout pour certaines régions de l'espace de conception. A défaut de méthodes adéquates pour mesurer cette exactitude de modèles, ainsi que son impact sur la fiabilité des choix réalisés, le concepteur se trouve souvent contraint de procéder au prototypage physique à chaque évolution de l'architecture du produit. Dans un souci de réduire le recours au prototypage physique, très consommateur en temps et en ressources, il apparaît nécessaire de tenir compte du niveau d'exactitude des modèles de comportement dans le choix des éléments de l'architecture. Se pose alors la seconde question de recherche que nous considérons : comment qualifier l'exactitude des modèles de comportement utilisés en conception et comment intégrer ce niveau d'exactitude dans la prise de décidions quant au

choix de l'architecture du produit. Le deuxième objectif de notre thèse est de développer une démarche permettant d'explorer l'espace de conception à la recherche de solutions candidates les plus performantes tout en intégrant le risque lié à l'inexactitude des modèles de comportement utilisés.

I.2 Verrous scientifiques de la thèse

D'une manière générale, lorsqu'on souhaite comparer plusieurs alternatives de conception, il faut être capable d'évaluer les performances propres à chacune (coût de fabrication, résistance mécanique, etc.), mais aussi d'intégrer les préférences du décideur pour pouvoir interpréter convenablement les performances évaluées. La formalisation des préférences du décideur constitue une vraie difficulté scientifique, d'abord parce qu'il faut formaliser ces préférences sur des objectifs qui sont souvent de nature très hétérogène (esthétiques, économiques, physiques, etc.). De plus, ces objectifs sont souvent contradictoires et antagonistes. Le compromis, qui s'avère être une étape indispensable dans cette situation, doit également être formalisé en adéquation avec les préférences du décideur. La mise en place d'un modèle capable de formaliser l'ensemble des préférences du décideur permet à terme d'améliorer le choix entre les alternatives de conception en se basant sur les performances observées de chacune. De plus, dans un projet collaboratif, cette formalisation contribue à une meilleure compréhension et un meilleur partage des informations liées aux préférences et affinités du décideur.

Dans les toutes premières phases de développement, les caractéristiques du produit sont incomplètement définies et les connaissances générées sont faibles [Cha99]. La nécessité de faire des choix de concepts a priori rend le recours à l'expérience et le savoir-faire des concepteurs obligatoire. Cette expérience et savoir-faire, qu'on peut qualifier de connaissances implicites, sont exploités pour choisir le concept le plus pertinent, mais sans suivre un cadre rationnel. La conception est à la fois déductive et intuitive [Sca04]. Les décisions prises dans ces circonstances sont rarement optimales et sont fréquemment remises en cause [Hub01]. Un des principaux verrous scientifiques à lever est **comment intégrer les connaissances implicites, qui sont généralement difficiles à formaliser, dans une démarche rationnelle et structurée de prise de décision**. Une telle démarche permettrait à terme de fiabiliser les choix de concepts dans les premières phases de développement.

Dans la phase de conception architecturale, des modèles de comportement sont souvent développés et permettent une exploration rapide et peu couteuse de l'espace de conception à

la recherche d'une architecture pertinente. Cependant, comme nous l'avons expliqué précédemment, la fiabilité des choix de conception basés sur ces modèles est souvent compromise à cause de la faible confiance accordée aux résultats fournis par ces modèles. Si des mesures de l'exactitude des modèles existent dans la littérature [Ver04, Mec01], elles se limitent à certains points particuliers de l'espace de conception et ne sont pas généralisables à tout l'espace de conception. A ce stade de développement, le retour d'expérience lié à la phase de prototypage physique permet de fournir beaucoup d'informations sur le produit et il contribue notamment à une meilleure compréhension des phénomènes physiques qui régissent son comportement. Le second verrou scientifique à lever dans notre étude est **comment valoriser ce retour d'expérience en vue de qualifier l'exactitude des modèles de comportement utilisés**. Cet objectif est d'autant plus contraignant qu'il nous faut une mesure de l'exactitude qui soit utilisables dans tout l'espace de conception.

I.3 Organisation du document

Le chapitre II constitue une synthèse de l'état de l'art. Tout d'abord, nous présentons une classification des théories et méthodes de conception dans la littérature, suivie d'une présentation des fondements théoriques pour rationnaliser la prise de décision. Puis, nous présentons et analysons les outils de formalisation des préférences en conception. A la fin, nous abordons les approches et outils de la littérature pour modéliser l'incertitude dans les données de conception ainsi que les outils pour qualifier l'opérabilité des modèles de comportement en conception.

Dans le chapitre III, nous proposons une démarche pour l'aide au choix des concepts dans les premières phases de conception. Dans un premier temps, nous présentons le modèle proposé pour formaliser les préférences du décideur. Nous nous appuyons pour cela sur plusieurs outils présentés dans la synthèse de l'état de l'art, comme les fonctions de désirabilité ou les opérateurs d'agrégation. L'étape qui suit permet de caractériser l'état des informations utilisées en conception. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous détaillons les indicateurs proposés pour aider le décideur dans le choix des concepts les plus pertinents dans un contexte d'incertitude.

Le chapitre IV nous positionne dans une phase d'étude beaucoup plus avancée. A ce stade de développement, le choix du concept est déjà figé. Une démarche est proposée pour aider le décideur à déterminer l'architecture adéquate du produit en tenant compte du niveau d'exactitude des modèles de comportement utilisés. Nous présentons en détail l'indicateur

proposé pour mesurer l'exactitude des modèles de comportement et nous expliquons ensuite comment l'indicateur proposé est utilisé pour évaluer le risque lié au non-respect des exigences de conception.

Enfin, nous proposons dans le chapitre V d'appliquer l'ensemble des démarches proposées dans la thèse dans le cadre d'un projet de développement de centrales solaires à concentration. Les différentes étapes de nos démarches sont illustrées via un exemple de support réflecteur, en vue d'aider le concepteur à aboutir au concept le plus pertinent dans un premier temps et, de fixer ensuite l'architecture du produit en adéquation avec les objectifs de conception. Les résultats sont présentés et analysés.

CHAPITRE II

Etat de l'art

II.1 Introduction

Comme évoqué précédemment, la complexité croissante des systèmes ainsi que les exigences du marché toujours plus accrues encouragent les entreprises à rationaliser et améliorer leur activité de conception. La prise de décision est une composante inhérente à cette activité, que ce soit pour les phases préliminaires ou les phases avancées de la conception. Elle diffère des sciences dites exactes car l'objet conçu sera un compromis [Gui93, Mat02], qui répondra plus ou moins bien aux différents objectifs de conception, car ceux-ci sont souvent antagonistes ou contradictoires [Jan90]. Dans ce sens, plusieurs méthodes ont été développées dans le but de rationaliser et améliorer l'acte de prise de décision en conception. La littérature est très fournie à ce sujet. Se pose alors la question de l'adéquation de ces méthodes pour traiter les problématiques énoncées dans le premier chapitre. Pour répondre à cette question, une synthèse de l'état de l'art est donnée dans le chapitre actuel et s'articule autour de trois questions principales :

- ✓ Quels sont les fondements théoriques pour rationnaliser la prise de décision ?
- ✓ Quels outils propose la littérature pour formaliser et capitaliser les préférences du décideur dans le cadre de la prise de décision en conception ?
- ✓ Quels outils propose la littérature pour intégrer la méconnaissance dans la prise de décision en conception ?

II.2 Théories et méthodes de conception

Le domaine des théories et méthodes de conception (TMC) comporte une riche collection d'avancées et de connaissances qui résultent à la fois de fondements théoriques et d'expériences sur des processus et des activités de conception. Bien que toutes ces théories et méthodes n'aient pas encore réussi à couvrir tous les aspects de l'activité de conception, de nombreuses observations sur des cas de conception individuels ont amené à développer les fondements pour la rationalisation du processus de conception.

Tomiyama et al. [Tom09] distinguent de nombreuses catégories de théories et méthodes de conception, incluant les théories de conception classiques telles que la conception systématique de Pahl et al. [Pah06], ou la conception axiomatique qui préconise l'association d'une fonction à un composant du produit [Suh90]. Selon la décomposition proposée par Tomiyama et al. [Tom09], les théories et méthodes permettant d'intégrer des préférences

subjectives du décideur constituent une catégorie des théories et méthodes de conception qu'il appelle *"Méthodes de prise de décision en conception"*. C'est dans cette catégorie que nous plaçons les travaux exposés dans ce manuscrit. L'objectif de la section II.2 est d'identifier les principes et fondements théoriques qui constituent la théorie de décision en conception.

II.2.1. Théorie générale de la conception

La théorie générale de la conception (TGC), qui a été développée par Yoshikawa [Yos81, Yos85], est une théorie de connaissances liées à la conception. Cette théorie est principalement basée sur la théorie des ensembles axiomatiques de Suh [Suh90], dans laquelle la conception est définie comme : *"... la création d'une solution synthétisée sous la forme de produits, processus ou systèmes qui satisfont des besoins par la correspondance entre les exigences fonctionnelles dans le domaine fonctionnel et les paramètres de conception du domaine physique, à travers une sélection appropriée des paramètres de conception qui satisfont les exigences fonctionnelles"*. La principale contribution de la TGC est une formulation mathématique du processus de conception. La TGC traite des concepts qui n'existent que dans notre esprit et vise à expliquer comment le développement du produit est conceptuellement réalisé en manipulant les connaissances et en se basant sur la théorie des ensembles axiomatiques. De ce fait, la TGC n'est pas une théorie de la conception mais une théorie abstraite sur les connaissances liées à la conception ainsi que sur leur exploitation. Elle est basée sur le constat que notre raisonnement et les connaissances liées à la conception peuvent être mathématiquement formalisés et exploités. Dans le cadre de la TGC, trois axiomes permettent de définir les connaissances comme une topologie, et les étapes du processus de conception comme un ensemble d'opérations sur des ensembles (théorie des ensembles axiomatiques). Les produits à concevoir remplissent des fonctions à travers un ensemble d'attributs (propriétés). Le processus de conception est alors considéré comme une correspondance entre l'espace des fonctions et l'espace des attributs. La Figure II-1 illustre le processus de conception dans le cadre de la TGC.

La TGC a inspiré bon nombre de chercheurs et a abouti par exemple, à la théorie universelle de conception de Grabowski et al. [Gra98] et à la théorie abstraite de conception de Kakuda et Kikuchi [Kak01]. Dans notre étude, la théorie générale de la conception constitue une première étape vers une rationalisation du processus de prise de décision en conception.

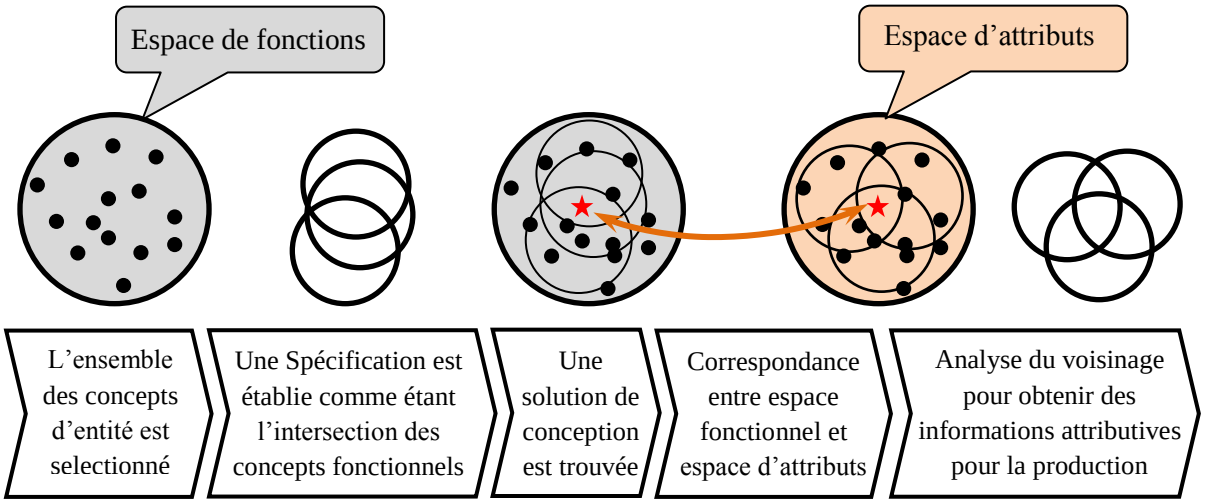


Figure II-1 Processus de conception dans le cadre de la théorie générale de la conception

II.2.2. Décomposition des théories et méthodes de conception

En se basant sur la théorie générale de la conception et son aptitude à couvrir l'ensemble des phases de conception, Tomiyama et al. [Tom09] proposent une classification des théories et méthodes de conception en trois grandes catégories :

- ✓ Les théories et méthodes pour générer de nouvelles solutions de conception ;
- ✓ Les théories et méthodes pour enrichir les informations fonctionnelles et attributives des solutions de conception ;
- ✓ Les théories et méthodes pour gérer la conception et représenter les connaissances liées à la conception ;

Le Tableau II-1 expose plus en détail la classification des théories et méthodes de conception (TMC) proposée par Tomiyama et al. [Tom09] et énumère quelques exemples.

Catégories des TMC	Exemples
Catégorie 1 : les TMC pour générer de nouvelles solutions de conception	
- Sous-catégorie 1 : conception basée sur la créativité	Abduction - Les synthèses émergentes (algorithme génétique, recuit simulé, réseaux de neurones artificiels, et algorithmes d'apprentissage, etc.) - Les approches intuitives (association, analogie, méthodes de stimulation, brainstorming, conception bio-inspirée, etc.)
- Sous-catégorie 2 : conception basée	- Les approches systématiques (Pahl et Beitz)

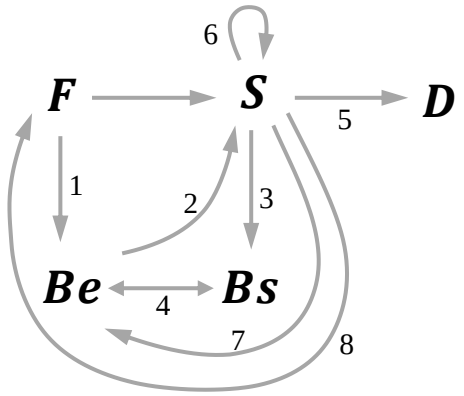
sur la combinaison - Sous-catégorie 3 : conception basée sur la modification	- Conception paramétrique, raisonnement à partir de cas, grammaire de forme, règles de modification
Catégorie 2 : les TMC pour enrichir les informations fonctionnelles et attributives des solutions de conception	- QFD (Quality Function Deployment), conception axiomatique, AMDEC (Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité)
Catégorie 3 : les TMC pour gérer la conception et représenter la connaissance liée à la conception	- Modélisation/représentation de la connaissance en conception - Technologies de processus (ingénierie concourante, DSM (design structure matrix))

Tableau II-1 Classification des TMC basée sur la théorie générale de la conception [Tom09]

La conception architecturale appartient à la deuxième catégorie (Tableau II-1). Une fois qu'un concept a été sélectionné dans le respect des exigences fonctionnelles, l'analyse de solutions candidates voisines est nécessaire pour trouver une solution optimale (maximisant la satisfaction des objectifs de conception), non seulement au sein de l'espace d'attributs, mais aussi dans l'espace de fonctions. Cela conduit à l'amélioration de la performance et la génération d'informations supplémentaires pour la réalisation physique du produit.

II.2.3. Le modèle Fonction-Comportement-Structure

En se basant sur la théorie générale de la conception, des modèles décrivant le processus de conception ont pu voir le jour durant les dernières années. Parmi ces modèles, Gero et Kannengiesser [Ger04] ont proposé le modèle de conception Fonction-Comportement-Structure (ou "FBS" pour *Function-Behaviour-Structure*). Le modèle FBS étend la théorie générale de la conception en couvrant la notion des interactions entre concepteur et environnement à travers des actions comme l'observation ou l'interprétation. Gero et Kannengiesser précisent que matière et intention se rejoignent au travers de la notion de comportement. La matière (appelée structure et notée S) rejoint la fonction (notée F) au travers de deux comportements, l'un attendu (comportement attendu, B_e), l'autre effectif (comportement obtenu, B_s) dans la conception et la réalisation du produit [Ger04]. Gero et Kannengiesser soulignent que toute la difficulté en conception de produits consiste à relier les comportements attendus et obtenus.



Be : Comportement attendu *F : Fonction* → *: Transformation*
Bs : Comportement obtenu *S : Structure* ↔ *: Comparaison*
D : Description de la conception

Figure II-2 Processus de conception dans le cadre du Modèle FBS de Gero [Ger04]

Dans le cadre du modèle FBS, le processus de conception est décrit par un ensemble d'étapes élémentaires de conception dans lesquels la fonction, le comportement et la structure sont reliés entre eux. La Figure II-2 décrit le processus de conception dans le cadre du modèle FBS. Comme le montre cette figure, huit étapes élémentaires communes à toutes les activités de conception sont considérées :

- ✓ La première étape, appelée *étape de formulation* (1), transforme le problème de conception exprimé initialement sous forme de fonctions (F), en un comportement attendu (Be) qui est sensé satisfaire ces fonctions ;
- ✓ Dans la deuxième étape, le comportement attendu est transformé par une *étape de synthèse* (2) en une structure de solution (S) dans le but de réaliser le comportement attendu (Be) ;
- ✓ Dans la troisième étape, le comportement (Bs) est obtenu de l'*analyse* (3) de la structure de solution (S) ;
- ✓ Dans la quatrième étape, le comportement obtenu (Bs) est *évalué* (4) et comparé avec le comportement souhaité (Be) ;
- ✓ Si l'évaluation est satisfaisante, une description de la conception (D) est *documenté* (5) pour la fabrication du produit. Dans le cas contraire, les concepteurs doivent revenir aux étapes précédentes. Ceci définit trois étapes élémentaires qui transforment la conception en une procédure itérative [Ger04] ;

- ✓ Les étapes de reformulation (6, 7, 8) permettent d'effectuer les changements dans l'espace de conception en termes de variables de structure (S'), de variables de comportement (Be'), de variables de fonction (F') et de plages de valeurs ;

II.3 Aide à la décision multicritère en conception de produits

Simon [Sim60] considère la prise de décision comme un processus itératif composé de quatre étapes principales (Figure II-3) qui sont *(i)* la définition du problème, *(ii)* la génération d'alternatives, *(iii)* le choix de la meilleure alternative, et *(iv)* l'implémentation de l'alternative choisie. Selon plusieurs chercheurs dans l'aide à la décision, le problème principal en conception n'est pas la génération d'alternatives mais le choix de la meilleure alternative [Tom09, Oku08]. Cette difficulté est liée principalement à la nature antinomique des objectifs de conception (l'amélioration d'un objectif entraine souvent la dégradation des autres) et aux incertitudes inhérentes au processus de conception [Pah96].

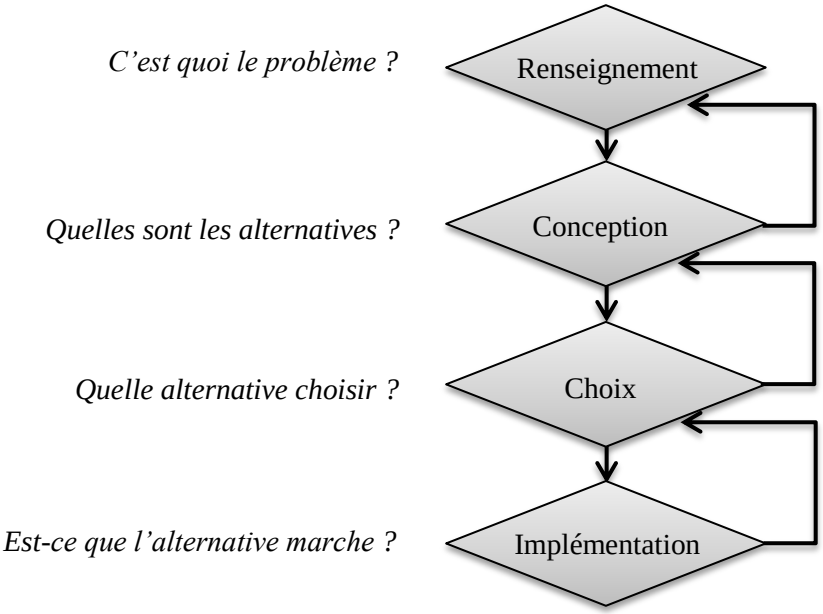


Figure II-3 Le processus de décision proposé par Simon [Sim60]

La littérature contient une riche collection de méthodes d'aide à la décision multicritère. Nous pouvons distinguer par exemple les méthodes de surclassement (ELECTRE I [Roy68], PROMETHEE I [Bra82], etc.), qui permettent d'établir des relations de dominance (ou surclassement) entre chaque paire d'alternatives, ou les méthodes agrégatives (l'analyse d'utilité multi-attribut [Neu44], méthode de l'imprécision [Ant95], etc.), qui permettent d'attribuer une valeur numérique à chaque alternative pour traduire son appréciation globale par le décideur. Définir la méthode la plus '*appropriée*' est une question cruciale, surtout que

ces méthodes peuvent produire des résultats contradictoires pour le même problème de prise de décision [Zan98]. Plusieurs auteurs reconnaissent la difficulté de choisir la méthode la plus appropriée [Roy13, Gui98, Oze88, Rei10]. Ce choix dépend fortement de la situation de prise de décision considérée. Dans les éléments à prendre en compte dans ce choix, il y a en premier lieu la nature des résultats attendus (est ce qu'on veut un classement cardinal, surclassement, etc.) [Roy13], la nature des informations disponibles sur les alternatives, la présence ou pas d'incertitudes sur les données d'entrée, la stratégie de compensation souhaitée entre les objectifs de conception (est ce qu'on accepte la compensation ou pas entre ces objectifs ?) et, l'existence ou pas d'interaction entre les objectifs de conception [Ste92, Roy13, Gui98]. Dans [Ela15a], nous donnons une synthèse plus détaillée des éléments pertinents à prendre en compte dans le choix de la méthode d'aide à la décision en conception

Dans ce chapitre, nous choisissons d'aborder la problématique en identifiant et en décrivant dans un premier temps les étapes d'un processus de prise de décision multicritère en conception de produits (section II.3.2). Ensuite, nous explorons et nous analysons les outils permettant d'exécuter chacune de ces étapes en adéquation avec notre besoin et notre contexte. Une telle décomposition du problème permet de le simplifier. Les outils les plus pertinents seront ainsi choisis pour construire nos démarches d'aide à la décision dans les autres chapitres.

II.3.1. Quelques définitions

Nous définissons ici quelques termes qui seront beaucoup utilisés dans la suite du manuscrit.

Solutions candidates :

Nous avons déjà défini une alternative de conception dans le chapitre I. Par abus de langage, nous utilisons le terme *"solutions candidates"* lorsque les alternatives de conception considérées sont issues d'un même concept. Les solutions candidates sont donc un cas particulier d'alternatives de conception. Ce terme sera beaucoup utilisé dans le chapitre IV lorsque le choix du concept est supposé fait.

Variables de performance p_i :

Les variables de performance (notées p_i) sont utilisées par le concepteur pour décrire le comportement d'une alternative de conception. Elles sont notées p_i et peuvent correspondre par exemple à la masse du produit, sa résistance maximale, son empreinte carbone, son coût,

etc. Ces variables sont intrinsèques à l'alternative de conception étudiée et n'intègrent aucune préférence subjective du décideur.

Paramètres du milieu environnant PE_i :

Les paramètres du milieu environnant (notés PE_i) permettent de décrire l'environnement extérieur avec lequel le produit qu'on souhaite concevoir va interagir. Ces paramètres peuvent être la température de fonctionnement, le niveau de sollicitation mécanique extérieure appliquée sur le produit, le niveau d'humidité ambiante, etc.

II.3.2. Processus de prise de décision multicritères en conception

En s'appuyant sur le modèle FBS de Gero [Ger04], nous proposons une décomposition en quatre étapes du processus de prise de décision multicritère en conception de produits. Ces étapes sont indiquées ci-dessous et sont illustrées aussi dans la Figure II-4.

- ✓ ***Etape I : définition des alternatives de conception à comparer.*** Toute prise de décision en conception débute par la définition les alternatives de conception à comparer. Etant donné que nous traitons dans ce travail les phases de sélection de concepts et de conception architecturale, les alternatives de conception à comparer peuvent être issues du même concept (appelées solutions candidates dans ce cas) ou de concepts différents.
- ✓ ***Etape II : Evaluation des performances.*** En fonction des objectifs recherchés par le décideur, des évaluations de performance doivent être réalisées sur chacune des alternatives de conception. Ces évaluations sont faites par rapport à un environnement de fonctionnement donné et permettent de vérifier la satisfaction des objectifs de conception établis initialement. Les variables de performance, définies dans la section II.3.1, permettent de quantifier cette évaluation. On peut aussi avoir une évaluation qualitative (*e.g.* une description linguistique d'une performance). Ces évaluations peuvent être qualifiées d'objectives car elles dépendent uniquement de l'alternative de conception étudiée et n'intègrent pas les préférences subjectives du décideur.
- ✓ ***Etape III : Interprétation des performances évaluées.*** Les résultats des performances issus de la précédente étape sont interprétés pour vérifier leur adéquation avec les objectifs et attentes du décideur. En d'autres termes, cette étape consiste à faire le lien entre les performances observées sur l'alternative de conception d'une part, et les attentes et préférences du décideur d'autre part. Contrairement à l'étape II, c'est une étape qui peut être qualifiée de subjective car elle intègre les préférences de décideur.

- ✓ ***Etape IV : Synthèse globale.*** Au final, les interprétations établies par rapport aux différentes évaluations des performances sont combinées pour obtenir un jugement global de l'alternative de conception considérée. Un tel jugement est nécessaire pour permettre la discrimination des différentes alternatives comparées et donc faire un choix. Etant donné que maximiser la satisfaction de tous les objectifs de conception est souvent impossible, il est nécessaire d'adopter une certaine logique de compromis entre la satisfaction de ces objectifs. Dans un sens large, cette logique définie comment les objectifs *"bien"* satisfaits compensent les objectifs *"mal"* satisfaits. Cette étape peut également être qualifiée de subjective car elle intègre les préférences du décideur.

Ces étapes sont schématisées dans la Figure II-4. Par analogie à la structure FBS représentée dans la Figure II-2, l'étape I correspond à la définition de la structure (S). L'étape II correspond à l'évaluation du comportement de la structure (B_e). L'étape III correspond à la comparaison entre le comportement souhaité (B_s) et le comportement obtenu (B_s). L'étape IV correspond à la vérification de l'adéquation avec la fonction globale du produit. Comparée au modèle FBS, la décomposition décrite dans cette section permet prend en compte l'aspect multicritère de la prise de décision, en intégrant notamment la notion de compromis entre objectifs de conception.

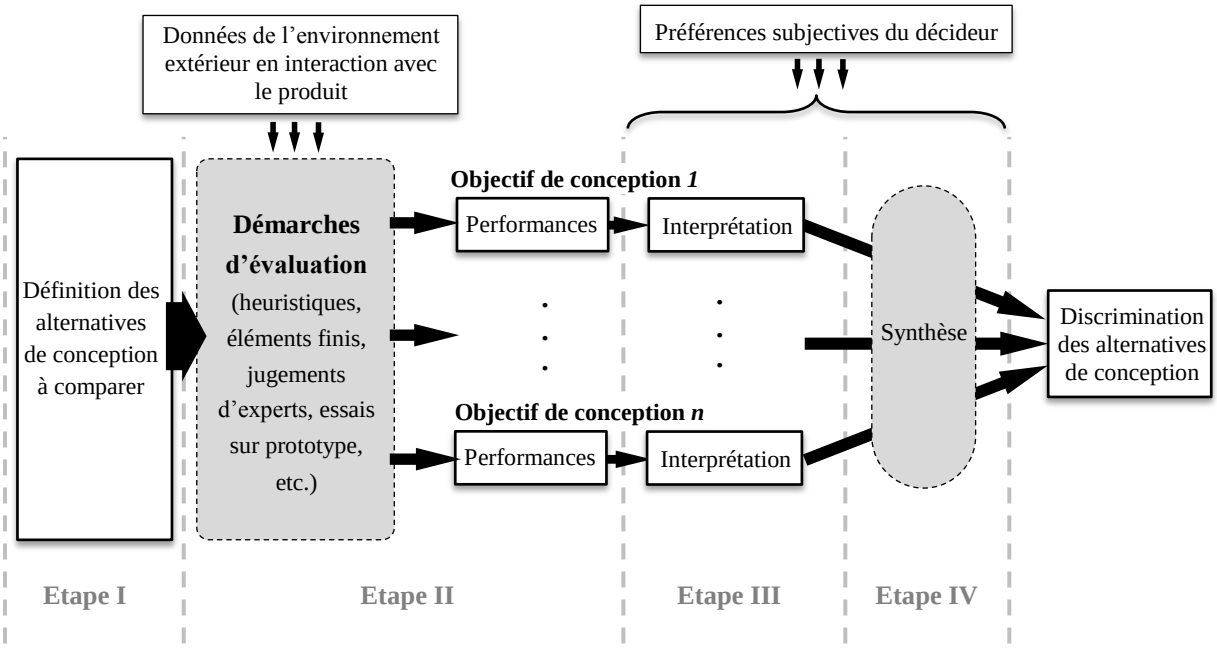


Figure II-4 Décomposition du processus de prise de décision multicritère en conception de produits

Cette décomposition constitue notre point de départ pour formaliser la prise de décision multicritère dans notre travail. Elle sera utilisée souvent dans notre raisonnement. D'autres

auteurs l'ont utilisée dans la construction de leurs approches [Col12, Qui12, Ull13]. Dans ce chapitre, elle sera évoquée à nouveau dans la section II.4.1.2 pour faciliter l'identification et la classification des sources d'incertitude dans la prise de décision en conception.

Dans la suite du paragraphe II.3, nous nous intéressons aux modèles permettant de formaliser le processus de prise de décision en se basant sur la décomposition donnée dans la Figure II-4. Selon Sebastien et al. [Seb11], les modèles permettant une telle formalisation sont de deux types : les modèles de comportement (modèles objectifs), permettant d'obtenir les variables de performance de l'alternative de conception (correspondent à l'étape II) et, les modèles décisionnels (modèles subjectifs) permettant de formaliser les préférences du décideur en termes d'aide à la décision (correspondent à l'étape III et IV). Les modèles de comportement sont extrêmement variés car ils dépendent de la nature du système à concevoir et des objectifs de conception recherchés. Nous nous intéressons dans ce chapitre uniquement à la formalisation de ces modèles de comportement (section II.3.3) et aux méthodes permettant de les qualifier (section II.5). Pour le cas d'étude présenté dans le chapitre V, nous utilisons les modèles de comportement que nous avons développés en collaboration avec l'entreprise.

II.3.3. Formalisation d'un modèle de comportement en conception

Il convient de rappeler que les modèles de comportement constituent un moyen parmi d'autres pour accomplir l'étape II (évaluation des performances) du processus de prise de décision décrit dans la section II.3.2. Il est aussi possible d'utiliser par exemple des jugements d'experts ou des essais mécaniques sur des prototypes physiques. Gass et Harris [Gas96] proposent la définition suivante d'un modèle de comportement : *" Un modèle de comportement est une représentation idéalisée – une description abstraite et simplifiée – d'une situation du monde réel à étudier ou à analyser "*. Généralement, le modèle de comportement peut être formalisé tel qu'il est indiqué sur la Figure II-5. D'après cette figure, trois types de données sont mis en jeu dans un modèle de comportement en conception de produits : (*i*) les paramètres de conception permettant de décrire l'objet à modéliser (l'alternative de conception dans notre cas), (*ii*) les paramètres de contrôle sont fixés et définissent le cadre du modèle ; ils sont liés aux hypothèses (il peut par exemple s'agir d'une température de consigne pour laquelle le modèle est valide) et, (*iii*) les variables de sortie qui permettent de répondre à la motivation du modèle en satisfaisant le besoin qui en est à

l'origine. Dans notre étude, ces variables de sortie correspondent aux variables de performance.

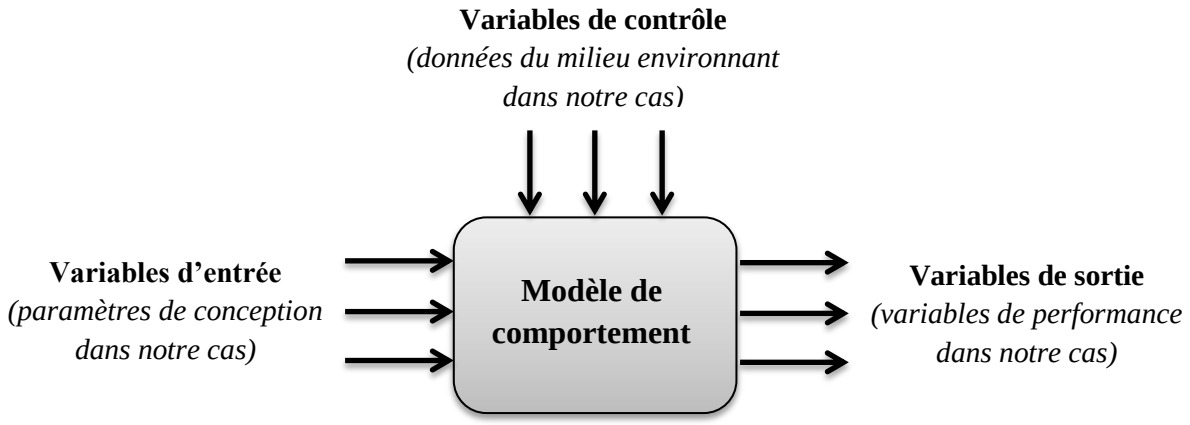


Figure II-5 Formalisation d'un modèle de comportement en conception de produits

Selon Vernat et al. [Ver04, Ver10], un modèle de comportement peut être décrit par quatre attributs décrits ci-dessous. Nous retrouvons les trois premiers attributs dans la définition de Gass et Harris [Gas96] donnée au début de cette section.

- ✓ **L'objet d'étude**, que le modèle vise à représenter. Dans notre cas, il s'agit de l'alternative de conception que nous souhaitons évaluer ;
- ✓ **La représentation**, qui couvre le support de représentation du modèle. Ça peut être par exemple les schémas, les graphes, les relations mathématiques, le langage de programmation, la modélisation géométrique 3D ;
- ✓ **L'abstraction d'un modèle**, qui le distingue de l'objet réel. Une logique de schématisation est donc utilisée en ne gardant que les éléments pertinents. Une perte d'information est donc inévitable ;
- ✓ **Sa motivation**, qui constitue les objectifs pour lesquels il a été créé (observation d'un phénomène physique, optimisation des performances, etc.) ;

D'après Vernat [Ver04, Ver10], trois étapes sont indispensables pour construire un modèle de comportement en conception de produits : *(i)* la formulation des hypothèses, *(ii)* la réalisation du modèle, et (*iii*) la qualification du modèle construit. Les hypothèses dépendent de l'objet de conception qu'on veut modéliser, ainsi que de son contexte et des connaissances expertes de son auteur. Elles nécessitent d'identifier les comportements pertinents de l'objet de conception afin de réduire le modèle au juste nécessaire, restreignant de ce fait son champ d'utilisation [Red05]. La réalisation du modèle de comportement constitue l'étape la plus

longue et la plus complexe. La qualification des modèles de comportement en conception de produits sera abordée dans la section II.5.

II.3.4. Formalisation des préférences en conception de produits

II.3.4.1 Formalisation de l'interprétation des performances

La formalisation de l'interprétation des performances intervient à l'étape III du processus de prise de décision décrit dans le paragraphe II.3.2. La procédure de formalisation consiste à transformer une variable de performance p_i (masse du produit, résistance maximale, déplacement, empreinte carbone, coût, etc.) en une variable adimensionnée, que nous appelons indice d'interprétation (noté z_i), et qui mesure le degré de satisfaction et traduit ainsi le jugement *à priori* subjectif du décideur. La valeur fournie est souvent comprise entre 0 et 1 ou entre 0 et 10. En plus de faciliter la prise de décision, cette formalisation a beaucoup d'avantages dans un contexte collaboratif de développement. Elle permet de réduire les ambigüités vis-à-vis des intentions et préférences du décideur car ces dernières sont traduites dans des modèles qui peuvent être facilement utilisables par la suite par plusieurs intervenants du projet. En plus, en permettant d'automatiser la procédure d'interprétation, cette formalisation devient une nécessité lorsqu'il faut traiter des centaines, voire des milliers d'alternatives de conception. Cependant il faut veiller à ce que la procédure de formalisation utilisée puisse intégrer correctement les préférences du décideur. Il faut aussi que la signification des valeurs qu'elle renvoie (les z_i) soit facilement compréhensible par les différents intervenants du projet. Par exemple, les valeurs de z_i peuvent avoir un sens cardinal ou ordinal. On dit qu'une valeur de z_i a un sens ordinal lorsqu'elle renseigne uniquement le classement de l'alternative de conception par rapport à d'autres, pour une performance donnée (résistance maximale par exemple). Une valeur de z_i a un sens cardinal lorsqu'elle renseigne, en plus du classement de l'alternative, sur l'importance relative entre les alternatives de conception pour une performance donnée. Il est également nécessaire de savoir si z_i correspond à une valeur d'utilité ou à une valeur de désirabilité. Dans le cadre de la formalisation de l'interprétation, les deux notions de désirabilité et d'utilité sont souvent rencontrées et sont souvent sources de confusion. L'utilité, qui a été introduite par Neumann [Neu44], mesure à quel point l'alternative de conception fournit des fonctionnalités qui répondent aux besoins réels des usagers, tels que ceux associés à la vie autonome et la participation dans la société. La désirabilité, qui a été introduite par Harrington [Har65], n'exprime pas de préférence en présence de risque ou d'incertitude comme l'utilité, mais plutôt l'intention de modéliser la connaissance des experts et le jugement de concepteurs sur la façon

dont le produit doit être conçu. Elle reflète le degré de satisfaction (ou l'intensité du désir) du décideur pour la valeur de propriétés particulières (variables de performance dans notre cas) de l'alternative de conception [Har65]. La désirabilité lie connaissance objective et subjective sur le système à concevoir dans le respect des exigences et des expériences passées du décideur.

II.3.4.1.1 Fonctions de désirabilité

Les fonctions de désirabilité permettent d'associer une valeur de désirabilité adimensionnée entre 0 et 1 à une valeur donnée de p_i (variable de performance). Les valeurs de désirabilité fournies sont de nature cardinale. Une valeur de désirabilité de 1 signifie que la valeur de p_i est tout-à-fait satisfaisante par rapport aux attentes du décideur, tandis qu'une valeur de désirabilité de 0 signifie que la valeur de p_i est totalement inacceptable. Ces fonctions sont faciles à paramétrer et sont largement utilisées [Pas06]. Cependant, elles ne permettent pas d'intégrer l'incertitude ou le risque, contrairement à la fonction d'utilité [Neu44]. Cette dernière sera présentée dans la section II.3.4.1.2. Nous allons présenter les deux classes de fonctions de désirabilité les plus couramment utilisées, à savoir les fonctions de Harington [Har65] et les fonctions de Derringer [Der80].

II.3.4.1.1.1 Fonctions de Harington

En 1965, Harrington a proposé des fonctions de désirabilité [Har65] dans le domaine de la qualité. Ces fonctions sont au nombre de trois et leur forme est illustrée dans la Figure II-6. Elles sont adaptées aux trois buts recherchés dans un problème de décision multicritère en conception : diminution, augmentation et ciblage.

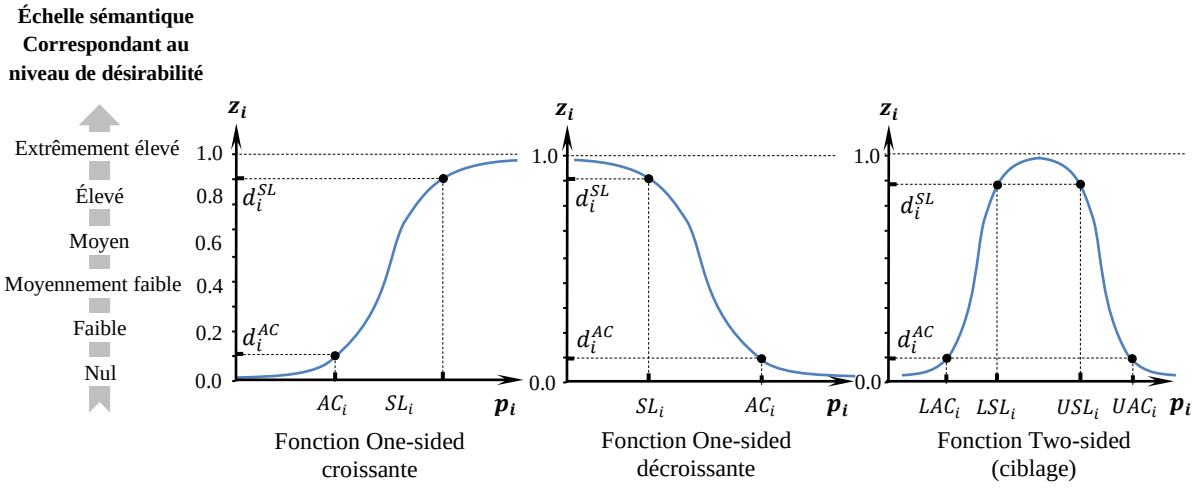


Figure II-6 Fonctions de désirabilité de Harrington [Har65]

Comme nous pouvons constater sur la Figure II-6, les deux premières fonctions sont monotones. Ils permettent de formaliser la préférence du décideur pour des objectifs d'augmentation (la fonction à gauche) ou de diminution (la fonction au milieu). Ces deux premières fonctions sont nommées *One-sided*. Chacune d'elles est paramétrée par deux points nommés *soft limit* (noté SL_i) et *accurate constraint* (noté AC_i). SL_i indique la zone au-delà de laquelle les valeurs de p_i sont considérées comme parfaitement satisfaisantes, tandis que AC_i indique la zone de non satisfaction. Les niveaux de désirabilité qui leur correspondent (notés d_i^{SL} pour SL_i et d_i^{AC} pour AC_i) paramètrent la relaxation des préférences. Les deux fonctions de désirabilités *One-sided* de Harrington sont paramétrées à l'aide de l'équation suivante :

$$z_i(p_i) = exp(-exp(\alpha_i + \beta_i . p_i)) \tag{II.1}$$

Avec, dans le cas d'une fonction *One-sided* décroissante :

$$\text{Si } AC_i > SL_i \text{ alors } \begin{cases} \beta_i = \dfrac{ln\left(ln\left(d_i^{AC}\right) / ln\left(d_i^{SL}\right)\right)}{AC_i - SL_i} \\ \alpha_i = ln\left(-ln\left(d_i^{SL}\right)\right) - \beta_i . SL_i \end{cases} \tag{II.2}$$

Et dans le cas d'une fonction *One-sided* croissante :

$$\text{Si } AC_i < SL_i \text{ alors } \begin{cases} \beta_i = \dfrac{ln\left(ln\left(d_i^{SL}\right) / ln\left(d_i^{AC}\right)\right)}{SL_i - AC_i} \\ \alpha_i = ln\left(-ln\left(d_i^{SL}\right)\right) - \beta_i . SL_i \end{cases} \tag{II.3}$$

La troisième fonction proposée par Harrington est qualifiée de *Two-sided* et permet le ciblage d'une valeur particulière de p_i, ou la spécification d'une zone de satisfaction pour plusieurs valeurs de p_i (Figure II-6). Elle est paramétrée par deux points, la SL inférieure (LSL_i : *Lower Soft Limit*) et la SL supérieure (USL_i : *Upper Soft Limit*). En outre, deux valeurs supplémentaires (LAC_i : *Lower Accurate Constraint* et UAC_i : *Upper Accurate Constraint*) permettent de paramétrer la pente de la fonction avec toutefois la restriction suivante :

$$LSL_i - LAC_i = UAC_i - USL_i \text{ et } UAC_i > USL_i > LSL_i > LAC_i \tag{II.4}$$

La fonction *Two-sided* de Harrington est calculée par la relation suivante :

$$z_i(p_i) = exp\left(-\left|\left(\frac{2.p_i-(U+L)}{U-L}\right)^n\right|\right) \text{ avec } \begin{cases} U = \dfrac{UAC_i + USL_i}{2} \\ L = \dfrac{LSL_i + LAC_i}{2} \\ n = \dfrac{ln\left(-ln\left(d_i^{SL}\right)\right)}{ln\left(\left|\dfrac{2.LSL_i - (U+L)}{U-L}\right|\right)} \end{cases} \quad \text{(II.5)}$$

Ces fonctions de désirabilité présentent de nombreux avantages. Elles sont aisées à paramétrer et facilement compréhensibles pour le concepteur. Grâce à leur forme exponentielle, les fonctions de Harrington ne présentent pas de discontinuités et elles permettent une variation de désirabilité très progressive lorsque cette dernière s'approche des bornes $z_i = 1$ et $z_i = 0$. Les deux bornes n'étant jamais atteintes, il devient possible de classer l'ensemble des alternatives de conception, y compris les alternatives acceptables et inacceptables.

II.3.4.1.1.2 Fonctions de Derringer

En 1980, Derringer [Der80] a proposé une autre classe de fonctions de désirabilité en se basant sur les travaux de Harrington [Har65]. Il applique ses fonctions à des problèmes d'optimisation multicritère [Der80]. Ces fonctions sont illustrées dans la Figure II-7. A la différence des fonctions de Harrington, les fonctions de désirabilité de Derringer présentent des discontinuités et sont définies par morceaux, comme on peut le voir sur la Figure II-7.

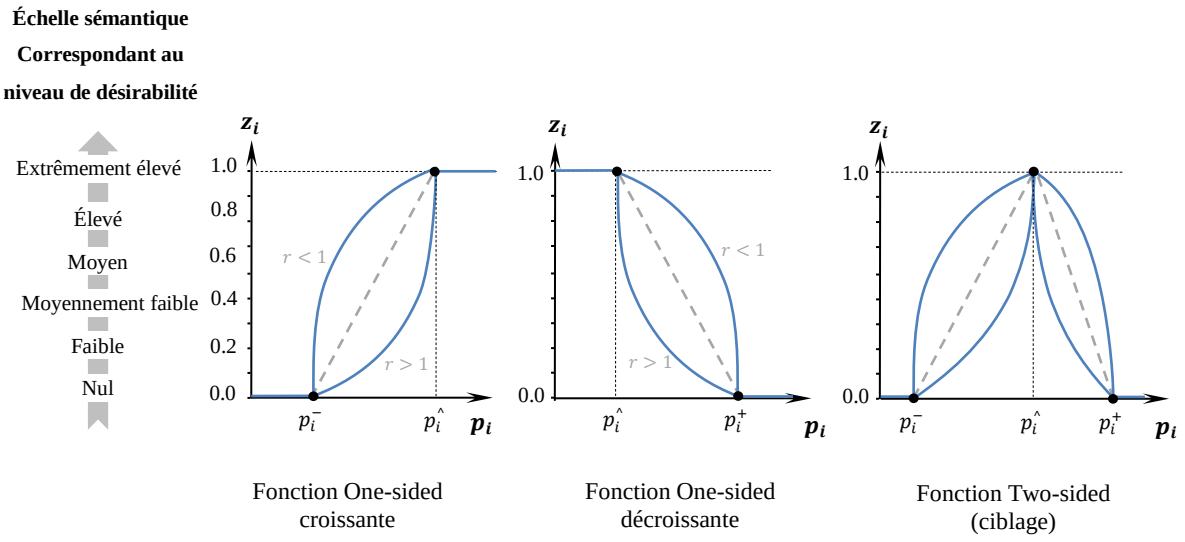


Figure II-7 Fonctions de désirabilité de Derringer [Der80]

En fonction du but recherché, Derringer propose deux types de fonctions (comme l'a fait Harrington [Har65]). Le premier type est destiné à un but d'augmentation ou de diminution. Le deuxième est destiné à un but de ciblage. Les deux types sont illustrés dans la Figure II-7.

La fonction de désirabilité *One-sided* de Derringer dispose de trois paramètres (expression (II.6)). Nous prenons l'exemple d'une fonction croissante (Figure II-7). Le paramètre p_i^- indique la limite au-dessous de laquelle les valeurs de p_i sont complétement inadmissibles pour le décideur ; de même, le paramètre $\hat{p_i}$ indique la limite au-dessus de laquelle les valeurs de p_i sont totalement satisfaisantes. Enfin, le paramètre r permet de piloter la courbure de la fonction. Dans la Figure II-7, la fonction de désirabilité linéaire par morceaux (trait en pointillé de couleur gris) correspond à $r = 1$. En fonction des valeurs de r, la courbure peut être orientée (trait plein de couleur bleu).

$$d_i(p_i) = \begin{cases} 0 & \text{pour} \quad p_i \leq p_i^- \\ \left(\dfrac{p_i - p_i^-}{\hat{p_i} - p_i^-}\right)^r & \text{pour} \quad \mathrm{p_i^-} \leq p_i \leq \mathrm{p_i^\wedge} \\ 1 & \text{pour} \quad p_i \geq \hat{p_i} \end{cases} \tag{II.6}$$

La fonction de désirabilité Two-sided de Derringer (Figure II-7) est construite sur un principe identique à celui de la fonction One-sided, en la définissant par morceaux comme l'indique la relation (II.7). Les paramètres de la fonction Two-sided de Derringer sont les deux bornes p_i^- et p_i^+ au-delà desquelles la désirabilité est nulle. La valeur cible est notée $\hat{p_i}$. Enfin, les paramètres r et t définissent les niveaux de courbure de la fonction.

$$z_i(p_i) = \begin{cases} \left(\dfrac{p_i - p_i^-}{\hat{p_i} - p_i^-}\right)^r & \text{pour} \quad p_i^- \leq p_i \leq \hat{p_i} \\ \left(\dfrac{p_i - p_i^+}{\hat{p_i} - p_i^+}\right)^r & \text{pour} \quad \hat{p_i} < p_i \leq p_i^+ \\ 0 & \text{pour} \quad p_i < p_i^- \; ou \; p_i^+ < p_i \end{cases} \tag{II.7}$$

Les fonctions de désirabilité de Derringer sont plus simples à utiliser que les fonctions de Harrington. En plus, les paramètres de réglage des courbures permettent de formaliser plus finement les préférences du concepteur. On constate cependant que les fonctions de Derringer présentent des discontinuités qui sont difficilement justifiables pour des problèmes de conception de produits. En plus, contrairement aux fonctions de Harrington, les fonctions de Derringer ont l'inconvénient de présenter des paliers (régions dans lesquelles $z_i = 1$ ou $z_i = 0$), ce qui empêche toute différentiation entre des alternatives de conception ayant un

niveau de désirabilité maximal ($z_i = 1$), ou entre des alternatives de conception ayant un niveau de désirabilité minimal ($z_i = 0$).

II.3.4.1.2 Fonction d'utilité

Dans le cadre de la théorie d'utilité proposée par Neumann [Neu44], la fonction d'utilité propose d'associer une probabilité z_i entre 0 et 1 à chaque variable de performance p_i pour exprimer le niveau de satisfaction du décideur en considérant l'incertitude et le risque. Selon les axiomes de Von Neumann-Morgenstern [Neu44], une fonction mono-attribut peut être construite à partir du jugement du concepteur en utilisant la méthode de la loterie [Kra71]. Selon cette méthode, la valeur de la performance la moins satisfaisante p_i^0 et la plus satisfaisante p_i^1 sont déterminées dans un premier temps. Ensuite, la méthode de la loterie [Kra71] est employée et consiste à attribuer à une valeur donnée de p_i, une probabilité z_i entre 0 et 1 en répondant à la question suivante :

" Sur une échelle de 0 à 1, qu'elle est votre estimation de z_i pour laquelle vous êtes indifférents entre les deux affirmations suivantes : (i) avoir p_i ou (ii) avoir p_i^1 avec une certitude de z_i et p_i^0 avec une certitude de 1- z_i ? "

Pour mieux comprendre, un exemple schématisant l'utilisation de la méthode de la loterie est donné dans la Figure II-8.

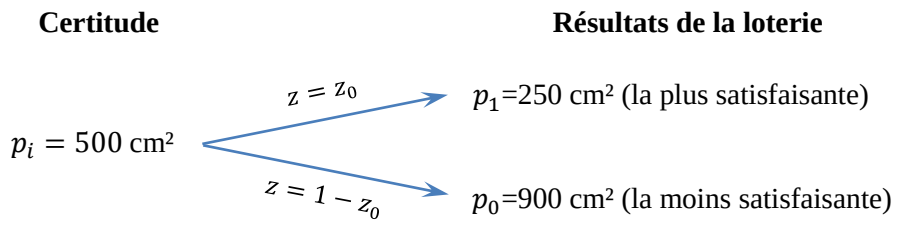


Figure II-8 Exemple d'évaluation de loterie [Kri06]

Cette figure illustre une évaluation typique de loterie d'une section transversale d'une poutre en I [Kri06]. Dans ce cas, la surface de la section transversale de 500 cm² représente un résultat garanti (certitude) comparé aux deux résultats de loterie dans lesquels il y a une probabilité z_0 d'obtenir la meilleure valeur de 250 cm² et une probabilité $1 - z_0$ d'obtenir la valeur la moins satisfaisante de 900 cm². Ici, la meilleure valeur (250 cm²) peut désigner la surface la moins admissible de la section transversale selon les objectifs de sécurité, tandis que la valeur la plus élevée (900 cm²) peut être déterminée à partir de considérations de coût.

Par conséquent, l'utilité de l'équivalent certain (500 cm²) correspond à l'espérance mathématique de la loterie qui peut être exprimée par l'expression suivante :

$$u(500\ cm^2) = p_0.u(250\ cm^2) + (1 - p_0).u(900\ cm^2) \quad \text{(II.8)}$$

Il est possible d'utiliser de telles fonctions d'utilité en conception [Mar98, Ull06]. Pour construire une fonction d'utilité, la méthode de la loterie peut être appliquée en plusieurs points qui sont ensuite joints ou lissés.

Selon Scott [Sco99], la théorie de l'utilité vise à traiter les problèmes de prise de décision en situation d'incertitude probabiliste ou de risque, plutôt que de définir des solutions au problème de décision multicritère. Bien que l'évaluation de loterie semble être appropriée pour obtenir une échelle numérique de valeur pour l'évaluation de la préférence en présence d'incertitude et de risque, le problème de conception considéré peut ne pas respecter les axiomes de Von Neumann-Morgenstern [Neu44]. Dans ce cas, les fonctions d'utilité établies ne sont plus pertinentes. De plus, étant donné que la conception de produits est une activité très collaborative où de multiples préférences sont exprimées par différents experts impliqués dans le processus de conception, les hypothèses de la théorie de l'utilité rendent difficile toute comparaison interpersonnelle de l'utilité (de préférence) entre plusieurs attributs [Qui12].

II.3.4.2 Agrégation des préférences en conception de produits

L'agrégation est définie comme le processus permettant de synthétiser l'ensemble des valeurs numériques issues de l'interprétation (les z_i), par le biais d'un opérateur d'agrégation, dans le but d'obtenir une valeur numérique unique qui traduit l'appréciation globale de l'alternative de conception étudiée. Cette valeur sera appelée *"indice global de désirabilité"* dans la suite de ce manuscrit et sera notée IGD. En se référant à la décomposition donnée dans la section II.3.2, l'agrégation est l'une des approches pour accomplir l'étape IV que nous avons nommé *"synthèse globale"*. Une telle approche permet de transformer le problème de décision multicritère en un problème de décision monocritère, ce qui le rend beaucoup plus simple et permet de discriminer directement les alternatives de conception. L'agrégation permet aussi d'automatiser le processus d'évaluation et de traiter ainsi un grand nombre d'alternatives de conception.

Il est important de noter que chaque opérateur d'agrégation présente une certaine logique de compromis entre objectifs de conception. Cette logique de compromis tient compte à la fois de l'importance relative entre les objectifs ainsi que du niveau de compensation entre eux

[Zhi06]. Pour obtenir une grandeur de sortie (IGD) qui reflète effectivement les préférences et les affinités du décideur, il faut que la logique de compromis de l'opérateur d'agrégation choisi traduise effectivement les intentions et les préférences du décideur. Dans ce cadre-là, Scott et al. [Sco98] proposent un ensemble d'axiomes pour vérifier qu'un opérateur d'agrégation est approprié pour un problème de conception de produits. Dans le reste de cette section, nous présentons les axiomes de Scott et nous présentons ensuite quelques opérateurs d'agrégation très utilisés dans la littérature.

II.3.4.2.1 Axiomes de Scott

Scott et Antonsson [Sco98] ont formalisé les notions intuitives du comportement humain rationnel dans un ensemble d'axiomes qui doivent être satisfaits par un opérateur d'agrégation lorsque ce dernier est utilisé pour un problème de conception de produits. Ces axiomes sont présentés dans le Tableau II-2.

Les axiomes de monotonie, de commutativité et de continuité sont communs à de nombreux domaines de prise de décision (pas seulement le domaine de conception) et ils sont incontestables [Kee94, Fod94]. Il est aussi incontestable qu'un indice d'interprétation (z_i) avec une pondération (w_i) égale à zéro ne devrait contribuer à rien à la performance globale (IGD) de l'alternative de conception considérée [Sco98]. L'axiome d'idempotence indique que si plusieurs objectifs de conception avec des indices d'interprétation identiques sont combinés, la préférence globale (IGD) doit être identique aux préférences (z_i) sur les objectifs de conception individuels. Cet axiome défend donc une notion de comportement rationnel. La combinaison de l'axiome d'idempotence et de monotonie implique que la préférence globale (IGD) pour une alternative de conception ne doit jamais dépasser la préférence (z_i) de l'objectif de conception le mieux satisfait, ni être inférieure à la préférence (z_i) de l'objectif de conception le moins satisfait.

Monotonie: $IGD((z_1,w_1),\dots,(z_n,w_n)) \le IGD((z_1,w_1),\dots,(z'_n,w_n))$ pour $z_n \le z'_n$ $IGD((z_1,w_1),\dots,(z_n,w_n)) \le IGD((z_1,w_1),\dots,(z_n,w'_n))$ pour $w_n \le w'_n$; $z_i \le z_n \ \forall i \le n$
Commutativité: $IGD((z_1,w_1),\dots,(z_i,w_i),\dots,(z_j,w_j),\dots,(z_n,w_n)) = IGD((z_1,w_1),\dots,(z_j,w_j),\dots,(z_i,w_i),\dots,(z_n,w_n))$ $\forall i,j$
Continuité: $IGD((z_1,w_1),\dots,(z_k,w_k),\dots,(z_n,w_n)) = lim_{z'_k \to z_k} IGD((z_1,w_1),\dots,(z'_k,w_k),\dots,(z_n,w_n)) \ \forall k$

$IGD((z_1,w_1),\dots,(z_k,w_k),\dots,(z_n,w_n)) = lim_{w_k \to w'_k} IGD((z_1,w_1),\dots,(z_k,w'_k),\dots,(z_n,w_n))\ \forall k$
Idempotence: $IGD((z,w_1),\dots,(z,w_n)) = z\ pour\ w_1,\dots,w_n \geq 0\ \ ;\ \ w_1+\dots+w_n > 0$
Annihilation: $IGD((z_1,w_1),\dots,(0,w),\dots,(z_n,w_n)) = 0\ \ pour\ \ w \neq 0$
Conservation d'échelle des poids: $IGD((z_1,w_1.t),\dots,(z_n,w_n.t)) = IGD((z_1,w_1),\dots,(z_n,w_n))\ \forall w_1,\dots,w_n \geq 0\ ;\ w_1+\dots+w_n = 0\ ;\ t > 0$
Poids nuls: $IGD((z_1,w_1),\dots,(z_k,0),\dots,(z_n,w_n)) = IGD((z_1,w_1),\dots,(z_{k-1},w_{k-1}),(z_{k+1},w_{k+1}),\dots,(z_n,w_n))$ pour $w \neq 0$

Tableau II-2 Axiomes à respecter pour un avoir un opérateur d'agrégation *design-appropriate* [Sco98]

L'axiome d'annihilation est spécifique aux problèmes de conception. D'autres auteurs ont défendu sa validité pour les problèmes de conception [Bie91, Ott93, Vin83]. Cet axiome stipule que, si l'indice de préférence pour un quelconque objectif de conception est égale à zéro (inacceptable), alors la préférence globale (IGD) de l'alternative de conception est égale à zéro également, ce qui signifie que l'alternative de conception est inacceptable. Ceci est en contraste avec une situation de prise de décision dans laquelle tous les objectifs peuvent être convertis en unités monétaires, comme, par exemple, les décisions dans le domaine de l'économie. Dans ce cas-là, deux objectifs peuvent toujours être négociés.

Ces axiomes sont reconnus et largement utilisés dans le domaine de l'aide à la décision en conception. Les opérateurs d'agrégation respectant ces axiomes sont appelées *"design-appropriate"*. Ces axiomes constituent un premier filtre qui permet de réduire considérablement le champ des opérateurs d'agrégation utilisables en conception de produits. Cependant, un opérateur d'agrégation qui respecte ces axiomes n'est pas forcément approprié au problème de décision considéré [Ela15a, Sco05]. Comme nous l'avons expliqué auparavant, il faut que la logique de compromis de l'opérateur d'agrégation traduit effectivement les intentions et les préférences du décideur. On peut avoir plusieurs opérateurs respectant les axiomes de Scott mais qui produisent comme même des résultats contradictoires pour le même problème de décision [Ela15a].

II.3.4.2.2 Opérateurs d'agrégation

II.3.4.2.2.1 Opérateur de la moyenne arithmétique pondérée

La moyenne arithmétique pondérée reste l'opérateur d'agrégation le plus connu et le plus employé. Il fait partie de la famille des moyennes quasi-arithmétiques et en est un cas particulier [Gra98]. Il consiste à additionner les indices d'interprétation z_i, chacun étant pondéré par un poids notée w_i :

$$IGD(z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_n) = \sum_{i=1}^{n} (w_i . z_i) \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^{n} w_i = 1 \text{ et } w_i \geq 0 \ \forall i \qquad \text{(II.9)}$$

Le principal avantage de la moyenne arithmétique pondérée est que c'est un opérateur intuitif car l'attribution des poids permet de refléter l'importance proportionnelle des différents indices d'interprétation agrégés entre eux [Cho08]. Cependant, cet opérateur ne respecte pas l'axiome d'annihilation qui est fondamental en conception [Bie91, Ott93, Vin83]. Dans le domaine de l'économie, les aspects de la prise de décision (objectifs) peuvent toujours être convertis en coût monétaire, ce qui justifie l'utilisation de cet opérateur.

II.3.4.2.2.2 Opérateur de la moyenne géométrique pondérée

Pour pallier au problème du non-respect de l'axiome d'annihilation, Derringer propose d'agréger en utilisant la moyenne géométrique pondérée [Der94]. Contrairement à la moyenne arithmétique pondérée, cet opérateur assure un IGD nul lorsqu'un indice d'interprétation z_i est nul. Cet opérateur est exprimé par :

$$IGD(z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_n) = \prod_{i=1}^{n} (z_i)^{w_i} \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^{n} w_i = 1 \ \text{ et } \ w_i \geq 0 \ \forall i \qquad \text{(II.10)}$$

Cependant, comparé à la moyenne arithmétique pondérée, le sens donné aux poids w_i est moins intuitif [Cho08] car ils reflètent une importance relative exponentielle, et non plus proportionnelle, entre variables. L'interprétation des poids w_i lors de l'utilisation de la moyenne géométrique pondérée n'est pas claire pour le décideur [Cho99].

II.3.4.2.2.3 Opérateur de Kim et Lin

Afin d'éviter les problèmes liés à l'utilisation de poids w_i, Kim et Lin [Kim00] préconisent d'agréger les indices d'interprétation z_i en prenant leur valeur minimale (équation (II.11)). La stratégie adoptée est donc celle du pire des cas, considérant que seul l'objectif de conception le moins satisfait renseigne sur l'appréciation globale de l'alternative de conception. Aucune compensation n'est donc permise et donc nul besoin de connaitre les poids des objectifs de conception. L'agrégation par le minimum peut constituer un moyen rapide et simple pour trier

un grand nombre d'alternatives de conception. En plus, lorsqu'une forte incertitude existe dans l'attribution des poids w_i (ce qui est souvent le cas dans les premières phases d'un projet), l'utilisation de cet opérateur permet de rendre robuste la prise de décision.

$$IGD(z_1, \dots, z_i, \dots, z_n) = \min_{i=1\dots n}(z_i) \quad \text{(II.11)}$$

Tout comme l'opérateur du produit pondéré, cet opérateur d'agrégation respecte l'axiome d'annihilation car un z_i nul entraine un IGD nul. Les autres axiomes du Tableau II-2 sont également respectés par cet opérateur, ce qui en fait un opérateur *design-appropriate*.

II.3.4.2.2.4 Famille des opérateurs d'agrégation de Yager

L'agrégation par le minimum (opérateur de Kim et Lim [Kim00]) et l'agrégation par le maximum correspondent respectivement aux degrés de compensation le moins élevé et le plus élevé possibles. Dans le domaine de la logique floue, ils sont plus connus sous les appellations *"et"* et *"ou"* respectivement. Entre ces deux cas extrêmes, Yager [Yag88] a proposé l'opérateur GOWA (*Ordered Weighted Averaging Operator*) qui permet une progression continue du degré de compensation entre les deux cas extrêmes. Contrairement aux opérateurs présentés auparavant, cet opérateur intègre un nouveau paramètre, noté s, qui permet de fixer le degré de compensation souhaité par le décideur. Nous préférons donc parler de famille d'opérateurs, puisque chaque valeur de s donne lieu à un opérateur d'agrégation particulier. Cette famille d'opérateurs est exprimée par la relation (II.12).

$$IGD\big((z_1, w_1), \dots, (z_n, w_n), s\big) = \sqrt[s]{\frac{\sum_1^n (w_i (z_i)^s)}{\sum_1^n w_i}} \text{ avec } \begin{cases} w_i \geq 0 \\ s \in]-\infty, +\infty[\end{cases} \text{ et } \sum_{i=1}^{n} w_i = 1 \quad \text{(II.12)}$$

La Figure II-9 montre les différents opérateurs retrouvés lorsqu'on fait varier la valeur de s. Nous pouvons retrouver en particulier les trois opérateurs décrits précédemment. Cette figure montre aussi l'allure des courbes iso-performances obtenues pour différentes valeurs de s.

Scott a proposé une étude approfondie de cette famille d'opérateurs d'agrégation. Il a notamment démontré que les opérateurs d'agrégation *design-appropriate* (respectant les axiomes du Tableau II-2) sont ceux pour lesquels $s \in]-\infty, 0[$. Scott a aussi démontré que pour n'importe quelle alternative de conception appartenant au front de Pareto, il existe au moins une combinaison de pondérations $(w_1, \dots, w_n)$ et de paramètre s pour lesquels cette alternative est supérieure aux autres alternatives (appartenant également au front de Pareto) par l'opérateur de Yager. Cependant, l'utilisation de cet opérateur ajoute un autre inconnu au

problème, qui est le paramètre s. Se pose alors la question de savoir comment déterminer la bonne valeur de ce paramètre en adéquation avec le degré de compensation souhaité par le décideur. Cette question sera traitée dans la section II.3.4.2.3.

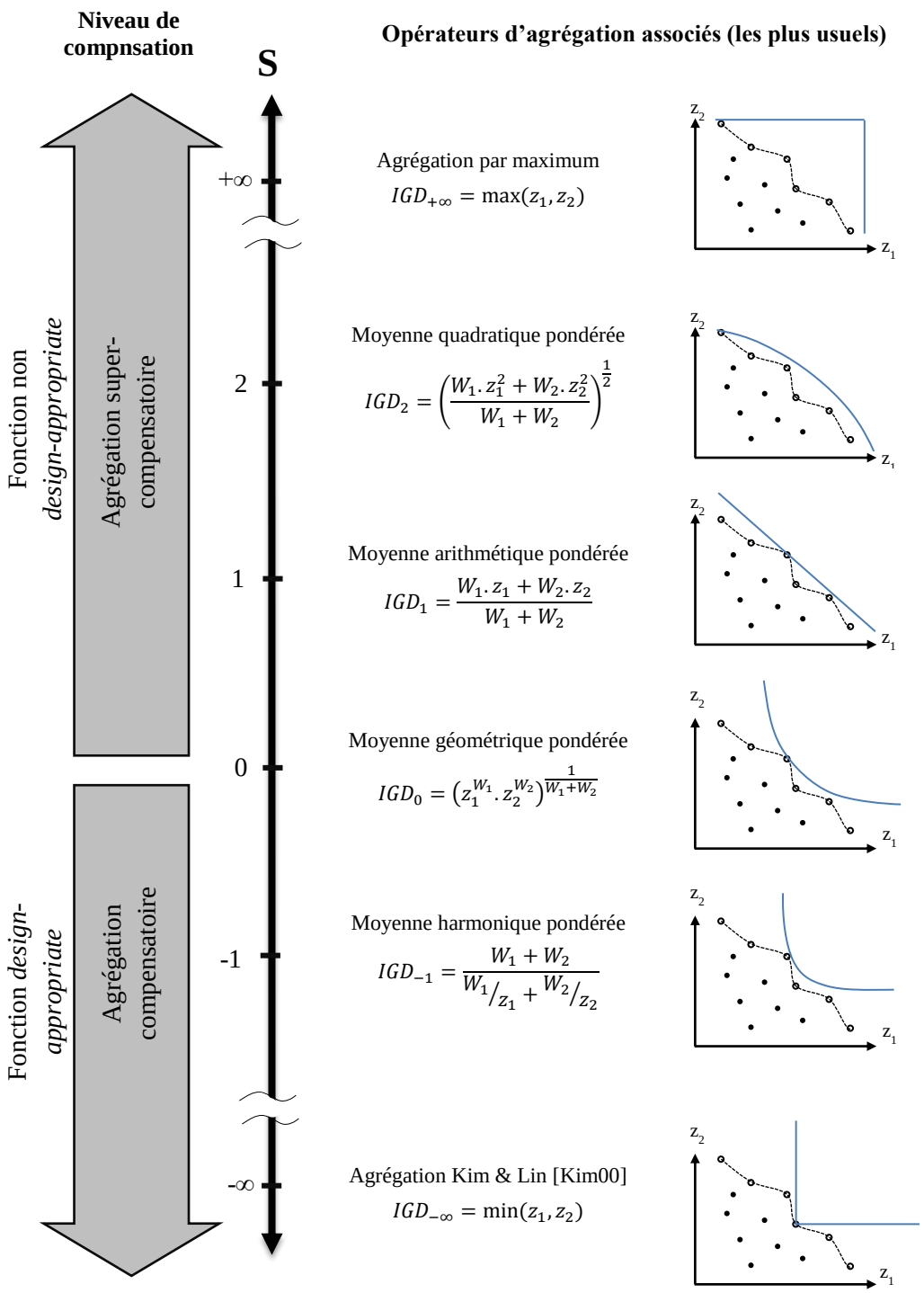


Figure II-9 Opérateurs de Yager obtenus pour différentes valeurs de s

II.3.4.2.3 Détermination des paramètres d'un opérateur d'agrégation

Comme évoqué précédemment, choisir un opérateur d'agrégation correspond à choisir une certaine logique de compromis entre objectifs de conception. Cette logique de compromis inclut d'une part l'importance relative entre objectifs de conception et d'autre part le niveau de compensation entre eux [Zhi06]. La plupart des méthodes d'aide à la décision multicritère en littérature proposent l'utilisation de pondérations numériques des critères pour prendre en compte l'importance relative entre eux. Dans la grande majorité des cas, les pondérations sont normalisées. Comme indiqué dans les relations (II.9), (II.10) et (II.12). Elles sont comprises en général entre 0 et 1, et leur somme est égale à 1. Dans la littérature, plusieurs auteurs proposent des méthodes différentes dans la détermination de ces pondérations [Cho85, Dar91, Dye79, Nut80, Pek74, Sol86, Zha92]. Cependant, l'interprétation et la validité des pondérations produites sont différentes d'un opérateur d'agrégation à un autre [Cho99, Sch91]. Par conséquent, la procédure suivie pour la détermination des pondérations ne doit pas être indépendante de l'opérateur d'agrégation choisi. Elle doit être tenir compte de ce dernier. Cette considération est souvent négligée par les chercheurs et les décideurs. Malgré l'existence de plusieurs méthodes pour la détermination des pondérations, nous nous limitons dans cette section aux méthodes les plus pertinentes.

II.3.4.2.3.1 Processus de hiérarchie analytique

Dans les problèmes de conception de produits, les objectifs de conception considérés sont souvent de natures hétérogènes. Dans ces conditions, il est difficile et risqué pour le décideur de leur attribuer directement des pondérations [Saa06]. Le processus de hiérarchie analytique (ou AHP pour " *Analytic Hierarchy Process* "), qui fut proposé par Saaty [Saa80, Saa90], suscite un grand intérêt dans le domaine de la recherche opérationnelle et la théorie de décision pour son adéquation avec la nature hétérogène des critères [Vin82, Saa06]. C'est une méthode de modélisation hiérarchique des objectifs de conception en vue de leur affecter des pondérations formalisant les importances relatives entre eux.

Dans un premier temps, les objectifs de conception sont décomposés d'une manière hiérarchique. Ensuite, une matrice de jugement carrée J relative à chaque niveau supérieur est remplie en comparant par paires les différents objectifs du même niveau. L'échelle linguistique illustrée dans la Figure II-10 est utilisée pour aider à quantifier numériquement l'importance d'un objectif de conception par rapport à un autre. Cette procédure est illustrée dans la Figure II-10. Comparée à la méthode qui consiste à attribuer directement des

pondérations aux objectifs de conception, l'utilisation des comparaisons par paires s'avère être un moyen plus facile et moins risqué pour capturer la préférence du décideur vis-à-vis d'objectifs de conception de natures hétérogènes [Vin82, Saa06]. Une fois la matrice de jugement établie, la méthode de normalisation de la matrice [Leb09] ou la méthode de la plus grande valeur propre [Saa77] permettent de calculer les pondérations finales pour chaque objectif de conception.

Etant donné que les comparaisons par paires sont effectuées par un humain, elles peuvent être sujettes à des incohérences, comme par exemple le non-respect des règles de transitivité entre préférences. Ces incohérences sont d'autant plus importantes que le nombre d'objectifs est élevé. Elles peuvent être contrôlées en utilisant le ratio de cohérence proposé par Saaty [Saa77]. Une valeur minimale, fixée à l'avance par le décideur, permet de s'assurer qu'un niveau minimal de cohérence est respecté. Le seuil proposé par Saaty est de 0.10 [Saa77].

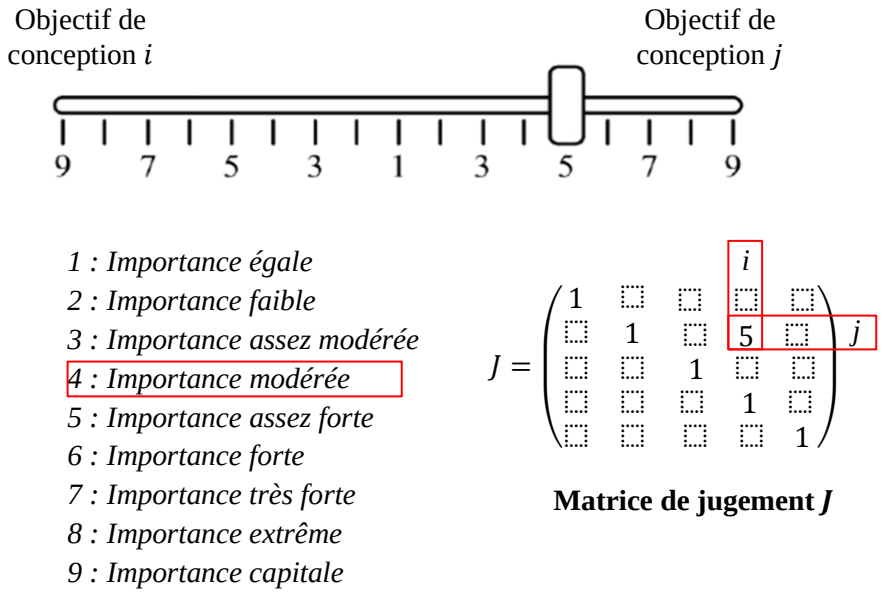


Figure II-10 Echelle de comparaison et construction de la matrice de jugement

Lorsque le nombre d'objectifs de conception est élevé, le remplissage de la matrice de jugement devient long et fastidieux. En plus, il devient difficile de conserver une cohérence acceptable. Selon Saaty, la méthode de l'AHP n'est pas appropriée pour traiter plus de 7 objectifs de conception. Le deuxième inconvénient dans l'utilisation de cette méthode est que les pondérations obtenues ne sont compatibles qu'avec l'opérateur de la somme pondérée. Par exemple, l'utilisation de pondérations issues de cette méthode avec la moyenne géométrique pondérée n'est pas appropriée [Cho99].

II.3.4.2.3.2 Méthode des points indifférents

Dans le cadre de l'utilisation de la famille des opérateurs de Yager [Yag88], Scott [Sco99, Sco00] a proposé une méthode pour déterminer à la fois les poids w_i des objectifs de conception et le paramètre d'agrégation s. L'intérêt majeur de cette méthode, contrairement à la méthode de l'AHP par exemple, est qu'elle permet d'obtenir des poids qui sont cohérents avec le paramètre s et donc avec l'opérateur d'agrégation choisi. Dans la suite de ce paragraphe, nous décrivons cette méthode via le cas de deux objectifs de conception (notés O_1 et O_2). La même méthode peut être étendue ensuite au cas de plusieurs objectifs de conception. Notons par w_1 et w_2 les poids pour les deux objectifs considérés. A partir de l'équation (II.12), l'indice global de désirabilité IGD est exprimé par :

$$IGD\big((z_1,w_1),(z_2,w_2)\big) = \left(\frac{w_1.{z_1}^s + w_2.{z_2}^s}{w_1+w_2}\right)^{1/s} \quad \text{avec} \begin{cases} w_1 + w_2 = 1 \\ 0 \le w_1 \le 1 \\ 0 \le w_2 \le 1 \\ s \in \,]-\infty,+\infty[\end{cases} \tag{II.13}$$

Considérons une alternative de conception, appelée alternative de référence et notée A_r, dont les indices d'interprétation sont connus d'avance et sont égaux à $p_r = 0.5$ pour les deux objectifs de conception O_1 et O_2. Etant donné que la famille des opérateurs de Yager respecte l'axiome d'idempotence (Tableau II-2), nous avons :

$$\forall\, w_1; w_2 \in \mathbb{R} \quad \forall s \in \mathbb{R} \quad IGD_r\big((p_r,w_1),(p_r,w_2)\big) = p_r \tag{II.14}$$

Deux alternatives de conception sont considérées indifférentes si elles ont le même indice global de désirabilité. Considérons deux alternatives de conception A_1et A_2 dont les indices d'interprétation sont respectivement (z_1^1, z_2^1) et (z_1^2, z_2^2). Avec $z_1^1 = 1$ et $z_2^2 = 1$. Pour z_2^1 et z_1^2, ce sont toutes les deux des inconnues.

La première étape de la méthode des points équivalents est d'estimer la valeur z_2^1 pour laquelle le décideur est indifférent entre *(i)* choisir l'alternative de référence A_r, dont l'indice d'interprétation pour les deux objectifs de conception est égale à 0,5 et *(ii)* choisir la solution A_1 donc l'indice d'interprétation pour l'objectif de conception O_1 est égal 1 et l'indice d'interprétation pour l'objectif de conception O_1 est égal à z_2^1. La même question est posée pour le cas de z_1^2 . Cette procédure est schématisée dans la Figure II-11.

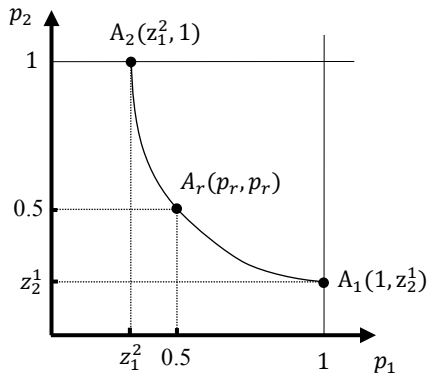


Figure II-11 Illustration de trois points équivalents évaluée sur deux préférences

Une fois les valeurs z_2^1 et z_1^2 estimées en fonction des préférences du décideur, il suffit de déterminer les poids w_1 et w_2 ainsi que le paramètre d'agrégation s en résolvant le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \left(\dfrac{w_1 + w_2.(z_2^1)^s}{w_1 + w_2}\right)^{1/s} = 0.5 \\ \left(\dfrac{w_1.(z_1^2)^s + w_2}{w_1 + w_2}\right)^{1/s} = 0.5 \end{cases} \quad \text{avec} \begin{cases} w_1 + w_2 = 1 \\ 0 \leq w_1 \leq 1 \\ 0 \leq w_2 \leq 1 \\ s \in]-\infty, +\infty[\end{cases} \tag{II.15}$$

Posant $w = w_2/w_1$. En fonction des valeurs estimées de z_2^1 et z_1^2, plusieurs cas de figure sont possibles pour la résolution du système d'équation (II.15). Ces cas de figure sont résumés dans le Tableau II-3.

Conditions sur z_2^1 et z_1^2		**Résolution**
$z_2^1 = z_1^2$	$z_2^1 = 0{,}5$	$w = 0$ et $s = -\infty$ (opérateur Kim et Lin [Kim00])
	$z_2^1 = 0{,}25$	$w = 0$ et $s = 0$ (opérateur de la moyenne géométrique pondérée)
	$z_2^1 > 0{,}25$	$w = 0$ et $s \in [-\infty, 0]$ Il faut résoudre numériquement : $z_2^{1\,s} + 1 = 2.(0{,}5)^s$
	$z_2^1 < 0{,}25$	$w = 0$ et $s \in [0, +\infty[$ Il faut résoudre numériquement : $z_2^{1\,s} + 1 = 2.(0{,}5)^s$
$z_2^1 \neq z_1^2$	$z_2^{1\,1-log_{z_2^1} 0{,}5} = 0{,}5$	$s = 0$ et $w = \frac{1-log_{z_2^1} 0{,}5}{log_{z_2^1} 0{,}5}$

	$z_2^{1\,1-\log_{z_2^1} 0,5} > 0,5$	Il faut résoudre numériquement : $\left(z_2^{1^s} - 0,5^s\right)\left(z_1^{2^s} - 0,5^s\right) = (1 - 0,5^s)^2$ Une fois la valeur de s déterminée. Calculé w en résolvant : $\left(\frac{z_1^{2^s} + w}{1 + w}\right)^{1/s} = 0,5$

Tableau II-3 Types de résolution du système d'équations [Sco00]

II.3.5. Bilan

Dans cette section, nous avons identifié et analysé les principaux outils proposés dans la littérature pour formaliser les préférences du décideur en conception de produits. En suivant la décomposition du processus de prise de décision présenté dans la section II.3.2, les outils présentés sont décomposés en outils pour formaliser le comportement objectif des alternatives de conception, outils pour formaliser l'interprétation les performances individuelles (les p_i) des alternatives de conception et outils d'agrégation permettant de combiner ces interprétations pour porter un jugement global sur l'alternative de conception évaluée. Ces outils de formalisation présentent un grand intérêt dans un projet de développement collaboratif car ils permettent de capturer et de capitaliser les informations liées aux préférences et attentes du décideur.

Cependant, une des principales problématiques dans notre cas est la prise en compte de la maturité des concepts, traduite par une description incomplète et imprécise du produit, et la qualité des modèles de comportement utilisés. Exception faite des fonctions d'utilité, les autres outils présenté jusqu'à maintenant ne permettent pas de prendre en compte l'incertitude en conception. Les fonctions d'utilité ont cependant bien d'autres inconvénients (cités dans la section II.3.4.1.2) qui empêchent leur utilisation dans notre cas.

II.4 Modélisation de l'incertitude des données en conception

D'une manière générale, et en se basant sur la décomposition du processus de prise de décision proposée dans la section II.3.2, la capacité à choisir la meilleure alternative de conception est conditionnée par trois principaux facteurs qui sont (*i*) une définition claire et précise des alternatives de conception que nous voulons comparer, (*ii*) la capacité à évaluer ou à prédire les performances de ces alternatives et, (*iii*) la capacité à vérifier l'adéquation entre les performances évaluées sur les alternatives de conception et les attentes et préférences du décideur. Ces conditions sont rarement réunies dans un projet de développement réel. Dans cette section, nous nous penchons principalement sur les incertitudes liées à la description des

alternatives de conception que le décideur souhaite comparer. Il s'agit donc d'incertitudes sur les paramètres de conception. Nous incluons également l'incertitude sur les paramètres du milieu environnant (PE_i) avec lequel le produit interagit comme, par exemple, la température de fonctionnement, la sollicitation mécanique appliquée sur le produit, etc. Comme nous l'avons mentionné sur la Figure II-4, ces données interviennent dans l'évaluation des alternatives de conception et ont donc un impact sur la prise de décision.

Les premières phases de conception sont souvent caractérisées par une description incomplète des alternatives de conception proposées (incertitudes sur les paramètres de conception). Comment ainsi choisir entre plusieurs concepts si on n'est pas en mesure de définir avec certitude les paramètres de conception propres à chaque concept ? Les différentes activités de développement comme, par exemple, les calculs par éléments finis ou les essais mécaniques sur des prototypes physiques, permettent de générer de la connaissance sur les concepts étudiés ce qui contribue à affiner la définition des paramètres de conception et à faciliter ainsi la prise de décision. Cependant, les premières phases de conception, où les décisions ont le plus d'impact sur le cycle de vie du produit [Zim01], sont aussi les phases où la définition des paramètres de conception est la moins précise. La nécessité d'utiliser des moyens pour modéliser et manipuler l'incertitude est plus importante alors au début du projet. La plupart des méthodes assistées par ordinateur comme, par exemple, la modélisation de solides, l'optimisation, l'analyse de mécanisme, etc., requirent une représentation très précise du produit [Ant01]. Dans ces méthodes, il n'est pas possible d'indiquer, par exemple, qu'une dimension est vaguement connue par le concepteur.

Avant d'aborder les méthodes qui existent dans la littérature pour modéliser les incertitudes en conception de produits, il serait utile de classifier d'abord les types d'incertitude qu'on peut rencontrer lors du développement d'un produit. On se propose deux types de classification : une première classification est basée sur la nature de l'incertitude (épistémique ou aléatoire), et une deuxième classification qui en fonction des étapes du processus de prise de décision tel qu'il est décrit dans la section II.3.2.

II.4.1. Classification des incertitudes en conception

II.4.1.1 Incertitude épistémique et aléatoire

Les notions d'incertitude et d'imprécision sont liées et souvent confondues dans la littérature. Selon Malak et al. [Mal09], l'incertitude en conception de produits peut être décomposée en incertitude épistémique et aléatoire. L'incertitude épistémique, appelée aussi imprécision,

désigne le caractère approximative de certaines descriptions du produit (en l'occurrence les paramètres de conception) ou d'autres données liées au milieu environnant. Il s'agit donc d'incertitudes subjectives dues au manque de connaissances et d'informations sur le système étudié, aux imprécisions de langage et, plus généralement, à la rationalité limitée. Ce type d'incertitude peut être réduit ou même éliminé par davantage d'efforts et d'analyses. Formaliser les moyens d'échange d'informations au sein de l'entreprise contribue à réduire les imprécisions de langage. L'incertitude aléatoire, appelée aussi variabilité, résulte du caractère naturellement aléatoire de certaines caractéristiques physiques du produit (propriétés des matériaux utilisés, cotes réalisées par usinage conventionnel, etc.) ou du système environnant (température de fonctionnement, sollicitations mécaniques du milieu extérieur, etc.). Elle est parfois qualifiée d'incertitude objective [Fer96]. La variabilité est aussi appelée *"incertitude irréductible"* [Der89] car elle ne peut être ni éliminée ni réduite. L'utilisation de distributions probabilistes est appropriée pour modéliser ce type d'incertitude [Obe99]. Dans les premières phases de conception, les incertitudes de nature épistémique (ou imprécision) sont prépondérantes [Mal09]. Dans la section II.4, nous nous intéressons uniquement aux méthodes qui permettent de modéliser les incertitudes épistémiques.

II.4.1.2 Décomposition en fonction des étapes du processus de prise de décision

Dans la section II.3.2, la prise de décision multicritère en conception de produits est représentée par un processus de quatre étapes. Nous identifions dans cette section les sources d'incertitude dans chacune de ses étapes.

Etape I : définition des alternatives de conception à comparer. Comme nous l'avons déjà expliqué au début de la section II.4, des incertitudes peuvent caractériser la définition des paramètres de conception propres à chaque concept. Ces incertitudes peuvent être de nature épistémique lorsque les concepteurs n'ont pas assez de connaissances sur les concepts pour fixer leurs paramètres de conception d'une manière précise. L'incertitude de type variabilité peut aussi être présente sur ces paramètres comme, par exemple, les variabilités dans les propriétés des matériaux utilisés ou les variabilités dans les côtes usinées.

Etape II : Evaluation des performances des alternatives de conception. Cette étape fait intervenir un ensemble de moyens d'évaluation tels que les simulations par éléments finis, les jugements d'experts, les méthodes heuristiques, les essais mécaniques sur des

prototypes physiques, etc. Or, ces moyens d'évaluation ont souvent une capacité limitée à prédire les performances des alternatives de conception. L'exactitude des modèles de comportement est abordée dans la section II.5. D'un autre côté, le produit à concevoir est en interaction avec un environnement extérieur. Un ensemble de données relatives à cet environnement doit donc être déterminé pour évaluer correctement les performances des alternatives de conception. Or, des difficultés peuvent apparaitre lors de la détermination de ces données, ce qui conduit à des écarts entre les performances prédites et les performances réelles.

Etape III : Interprétation des performances. La manière d'interpréter les mesures de performance effectuées à l'étape II dépond des préférences et des objectifs du décideur. Ces préférences et ces objectifs peuvent être incertains dans les premières phases d'un projet de développement. Ces incertitudes sont de nature épistémique et correspondent souvent à une ambiguïté liée à l'expression du besoin du client ou à une mauvaise étude de marché. Comment interpréter, par exemple, une valeur de consommation de 4 l/100km pour un moteur thermique ? A quel point cette valeur est adéquate avec les exigences du client ?

Etape IV : Synthèse finale. Comme pour l'étape III, la manière de combiner les différentes interprétations pour donner lieu à un jugement global de l'alternative de conception dépend des préférences du décideur. Ces préférences se traduisent par des importances relatives entre les objectifs de conception et un degré de compensation entre eux. Or, ces éléments ne sont pas souvent clairs, ce qui peut rendre difficile la prise de décision finale. Il peut arriver, par exemple, que plusieurs décideurs aient des points de vue différents sur les importances relatives entre objectifs de conception.

D'après cette classification, nous pouvons constater la multitude des sources d'incertitude dans un processus de prise de décision en conception. Elles constituent toutes des causes potentielles pouvant induire en erreur le décideur dans ces choix. Il est important de noter que certaines sources d'incertitude peuvent être plus importantes que d'autres en fonction du contexte et de la phase considérée du projet de développement. Nous rappelons que dans la suite de la section II.4, nous nous intéressons aux imprécisions (incertitudes épistémiques) dans la définition des paramètres de conception et dans les données qui caractérisent le milieu environnant. L'exactitude des modèles de comportement est abordée dans la section II.5.

II.4.2. Approches qualitatives pour la modélisation de l'incertitude

Les approches qualitatives sont basées sur le concept d'information préliminaire, introduit par Clark et Fujimoto [Cla91] afin de permettre l'exécution des activités de façon parallèle dans les processus de développement de produit. Plus tard, Krishnan et al. [Kri97] définissent le terme d'information préliminaire comme un paramètre qui est en continuelle évolution avant d'atteindre sa valeur finale. Les statuts du paramètre dans son évolution se réfèrent à sa maturité [Han97]. La qualification et la caractérisation de l'information peuvent inclure plusieurs aspects dont la pérennité, la variation, la sensibilité et la complétude. Ces quatre aspects sont présentés dans les sections qui suivent.

II.4.2.1 Pérennité

Les informations de conception d'un bureau d'études peuvent être classées en fonction de leurs niveaux de pérennité [Gre07] c'est-à-dire de la longévité de l'information. Une échelle de 1 à 5 est utilisée et fait référence à des degrés de validité de l'information relative à l'objet concerné. Le classement du Tableau II-4 présente le niveau de pérennité et la qualification correspondante.

Niveau de pérennité	Qualification
1	Information non pérenne.
2	Information valable environ une semaine jusqu'aux prochaines modifications.
3	Information valable le jour de l'étude, soit environ six mois
4	Information valable sur plusieurs programmes
5	Information valable pour les technologies utilisées actuellement.

Tableau II-4 Niveaux de pérennité [Gre07]

II.4.2.2 Variation

Ce deuxième aspect caractérise le taux de variation d'une information. Le Tableau II-5 représente les différents niveaux de qualification de la variation qui correspondent à la probabilité que l'information atteigne sa valeur finale. Ces niveaux résultent des travaux de Krishnan [Kri96] et ils vont de 0 pour une variation très instable à 3 pour une variable stable, signifiant que la probabilité que l'objet approche sa valeur finale est élevée.

Niveaux de	Qualification

variation	
0	Très instable : la probabilité qu'un objet approche sa valeur finale quasi nulle.
1	Instable : la probabilité qu'un objet approche sa valeur finale est faible.
2	Modérément instable : la probabilité qu'un objet approche sa valeur finale est modérément élevée.
3	Stable : la probabilité qu'un objet approche sa valeur finale est élevée.

Tableau II-5 Niveaux de variation d'une activité [Kri96]

II.4.2.3 Sensibilité

Les niveaux de sensibilité c'est-à-dire l'impact du changement sur l'information sont classés selon les travaux de Yassine et al. [Yas99] par une échelle de 0 à 3 allant d'une information qualifiée " non sensible " à " sensible ". Le classement est détaillé sur le Tableau II-6.

Niveaux de sensibilité	Qualification
0	Non sensible : l'activité est insensible à tout changement de l'objet entrant.
1	Faiblement sensible : l'activité est peu sensible à tout changement de l'objet entrant.
2	Modérément sensible : l'activité est sensible de façon modérée au moindre changement de l'objet entrant.
3	Sensible : l'activité est très sensible au moindre changement de l'objet entrant.

Tableau II-6 Niveaux de sensibilité d'une information (inspiré des travaux de [Yas99])

II.4.2.4 Complétude

Le dernier classement présenté est le niveau de complétude. Il représente l'association de la combinaison de la profondeur (nature du changement) avec l'ampleur de d'information. La profondeur représente la nature du changement incident sur l'objet (l'imprécision, l'abstraction, le dégrée de détail). L'ampleur est l'importance d'une information par rapport à son état de développement attendu par l'utilisateur. La complétude représente l'évolution des deux dimensions. Le Tableau II-7 présente cette échelle allant de 0 à 3. Les niveaux de la complétude exposés dans ce tableau ont été proposés dans les travaux de Gebrici et al. [Gre06].

Niveau de complétude	Qualification
0	Incomplet : l'objet est de profondeur nulle ou d'ampleur nulle.
1	Très partiel : l'objet est d'ampleur et de profondeur faibles ; l'objet ne répond pas à la majorité des attentes et la majorité et ses parties n'a pas été finalisée.
2	Partiel : l'objet est de profondeur et d'ampleur modérées ; l'objet répond à la majorité des attentes et la plupart de ses parties sont finalisées.
3	Complet : l'objet est d'ampleur et de profondeur élevées ; l'objet répond à toutes les attentes et toutes ses parties sont finalisées.

Tableau II-7 Niveaux de complétude de l'information [Gre06]

II.4.2.5 Caractérisation et qualification de l'information

Le schéma de la Figure II-12 [Gre06] montre les deux processus synthétisant la maturité d'une information. Le premier processus est celui de la caractérisation de l'incertitude de l'information par son émetteur. La caractérisation de l'incertitude revient à répondre aux questions suivantes : quelle est la nature du changement ? Quelle est la fréquence du changement attendu ? Quel est le taux de changement ? La réponse à ces deux questions fait référence à l'instabilité ou au degré d'évolution de l'information [Kri96, Yas99, Ter99]. Quelles sont les raisons possibles du changement ? Quel est le degré de confiance que l'émetteur de l'information a sur ce dernier ? La réponse à cette question détermine le degré de connaissance que l'émetteur a sur les informations qu'il produit [Goh05].

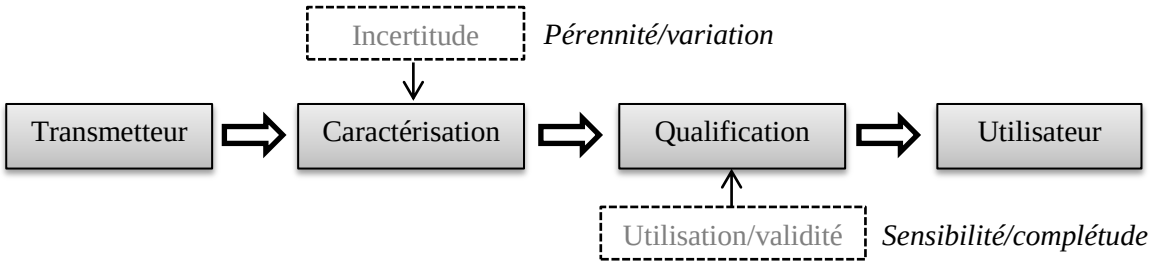


Figure II-12 Incertitude de l'information de l'émetteur au récepteur

Le second processus, la qualification de l'information, est l'évaluation de l'usage/validité de l'information par son émetteur. C'est dans ce processus qu'interviennent les niveaux de pertinence, complétude et confiance présentés précédemment. Ils permettent de répondre aux questions du type : l'information est-elle produite/transmise par un expert ? Répond-elle aux objectifs fixés par l'utilisateur ? Quels sont les risques engendrés par l'utilisation de l'information ?

II.4.3. Approches quantitatives pour la modélisation de l'incertitude

Nous pressentons dans cette section les approches quantitatives qui sont des théories mathématiques permettant de modéliser les incertitudes. La théorie des ensembles flous, la théorie des possibilités et la théorie de l'évidence sont quelques exemples des approches quantitatives les plus connues. Par rapport aux théories probabilistes, ces trois théories présentent l'avantage d'être moins exigeantes en termes d'information nécessaire et, de ce fait, sont plus adaptées pour modéliser l'incertitude épistémique.

II.4.3.1 Ensembles flous

La théorie des ensembles flous a été introduite par Zadeh [Zad65], comme une extension de la théorie classique des ensembles. Dans la théorie classique des ensembles, l'appartenance d'un élément B à un ensemble $\mathcal{F}$ a une valeur binaire; soit il appartient à cet ensemble, soit il n'appartient pas. La proposition " l'élément B est un membre de l'ensemble $\mathcal{F}$ " peut donc avoir une valeur de vérité de 0 ou 1. La théorie des ensembles flous permet une appartenance partielle, ce qui signifie que la proposition " l'élément B est un membre de l'ensemble $\mathcal{F}$ " peut être un nombre réel de l'ensemble fermé [0, 1]. Par exemple, si l'on suppose que la valeur de vérité de 0,3 est attribuée à la proposition " l'élément B est un membre de l'ensemble $\mathcal{F}$ ", cela signifie que l'élément B n'est que partiellement un membre de l'ensemble $\mathcal{F}$, ce qui rend $\mathcal{F}$ flou car la limite d'appartenance n'est pas clairement définie.

La théorie des ensembles flous présente un grand intérêt car elle permet de modéliser l'imprécision dans les données utilisées dans la conception. En plus, la littérature est fournie en outils permettant d'appliquer les équations d'ingénierie sur des membres floues telle que la méthode du vertex [Don87]. Cependant, malgré son intérêt, l'utilisation de la théorie des ensembles flous dans le domaine de la conception de produits reste limitée. Les travaux les plus connus dans ce sens sont ceux d'Antonsson et Wood [Ant95].

II.4.3.2 Théorie des possibilités

La théorie des possibilités a été proposée par Zadeh [Zad78] et constitue un prolongement de la théorie des ensembles flous présentée dans la section II.4.3.1, comme un outil de représentation d'informations exprimées en termes de mesures floues. La théorie des possibilités définit deux évaluations [Dub00] traduisant l'appartenance d'une variable x à un intervalle A :

- La possibilité : $\prod(\mathrm{A}) = \sup_{\mathrm{x}\in\mathrm{A}} \pi(\mathrm{x})$;

- La nécessité : $N(A) = 1 - \prod(\bar{A}) = inf_{x \notin A}(1 - \pi(x))$.

Il est possible d'interpréter toute paire de fonction $[\prod(\mathrm{A}), \mathrm{N}(\mathrm{A})]$ comme les bornes supérieure et inférieure issues de familles de probabilité spécifiques. Il existe une relation claire entre une approche probabiliste et la théorie des possibilités. Celle-ci est justifiée quand il y a peu d'information et la théorie des probabilités est préférable lorsque les données sont suffisantes pour créer un modèle stochastique.

Un des arguments avancés en faveur de son utilisation en conception est la simplicité de ses opérations. Elles sont concises et rapides et il n'apparaît pas de distributions conjointes ou d'autres relations complexes, mais n'est-ce pas une réduction abusive de la physique ?

II.5 Qualification des modèles de comportement en conception

Dans les cycles modernes de développement de produits, l'utilisation de modèles de comportement est très fréquente et permet de réduire considérablement le champ des solutions candidates admissibles, ce qui permet de limiter le recours au prototypage physique. Dans ce cas, la fiabilité des décisions prises est liée à la qualité des modèles de comportement utilisés. Vernat et al. [Ver04, Ver10] évaluent l'opérabilité d'un modèle de comportement en utilisant quatre critères qui sont : parcimonie, exactitude, précision et spécialisation. Ils sont réunis dans l'acronyme PEPS. Les critères qui retiennent le plus notre attention sont ceux de l'exactitude et de la précision du modèle car ils affectent directement les résultats à la sortie (variables de performance) et impactent ainsi la prise de décision. Les autres critères (parcimonie et spécialisation) peuvent être utilisés pour le choix du modèle de comportement mais ils n'influent pas sur les résultats fournis (variables de performance). Avant de présenter les quatre critères, nous donnons d'abord une distinction entre exactitude et précision d'un modèle de comportement.

II.5.1. Distinction entre exactitude et précision d'un modèle

Les termes *"précision"* et *"exactitude"* d'un modèle sont souvent source de confusion. Nous retenons la définition donné par Bevington et Robinson [Bev02] : *" L'exactitude (accuracy) mesure à quelle distance de la valeur réelle se situe le résultat d'une expérience. La précision (precision) est une mesure de la justesse avec laquelle le résultat est déterminé sans aucune référence à la valeur réelle "*. La Figure II-13 illustre la différence qui existe entre exactitude et imprécision d'un modèle de comportement. Dans cette figure, les centres des cercles correspondent aux valeurs réelles des p_i (variables de performance).

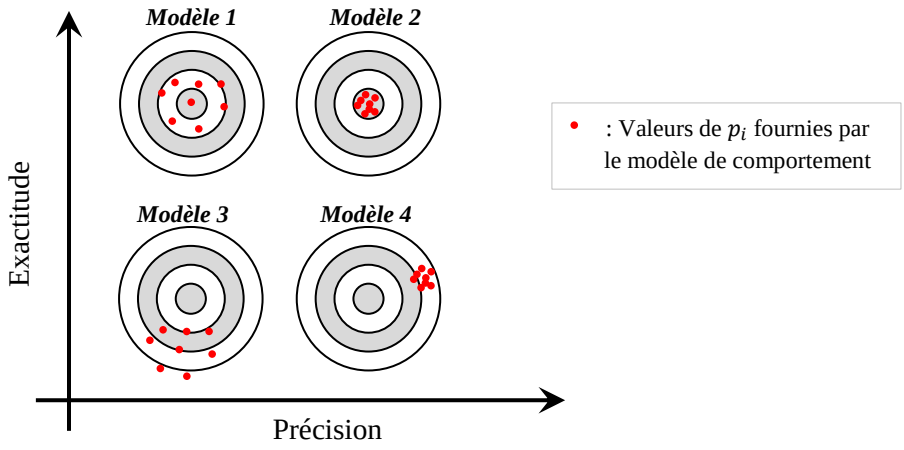


Figure II-13 Distinction entre précision et exactitude d'un modèle de comportement

II.5.2. Parcimonie

La parcimonie est définie comme le paramètre qui caractérise la capacité d'un modèle à décrire le comportement physique d'un système en intégrant le minimum de variables et d'équations. Elle peut donc être vue comme l'inverse de la complexité d'un modèle. C'est un critère qui reste difficile à quantifier. Vernat [Ver04] propose la relation (II.16) pour évaluer la parcimonie (notée P_a) d'un modèle en fonction du nombre de relations (noté n_{rel}) et du nombre de variables (noté n_{var}) requis par ce modèle.

$$P_a = \frac{1}{n_{rel} + n_{var}} \tag{II.16}$$

D'après cette relation, un modèle de comportement est d'autant plus parcimonieux que le nombre de variable et le nombre de couplage entre ces variables sont plus faibles. Une telle évaluation de la parcimonie a l'avantage d'être simple à implémenter. Cependant, elle reste limitée aux modèles de comportement exprimés par des relations algébriques et analytiques.

II.5.3. Exactitude

L'exactitude procure l'appréciation de la distance entre les valeurs de sortie d'un modèle de comportement et ceux d'un comportement de *"référence"* qui correspond, en principe, au comportement observé sur le système réel [Tra97]. Dans notre cas, les valeurs de sortie à comparer sont les valeurs de p_i (variables de performance). Cette définition d'exactitude met en évidence une difficulté majeure qui consiste à trouver un comportement de référence qui doit refléter le comportement réel du produit. Deux cas sont souvent rencontrés. Dans le premier cas, on dispose de résultats obtenus à l'issue d'essais sur des prototypes physiques.

Le comportement dans ce cas sera assez proche de la réalité (il faut cependant considérer les erreurs dans les moyens de mesure et d'acquisition). Dans le deuxième cas, on considère comme référence un autre modèle de comportement qui est réputé pour être assez exacte mais qu'on ne peut cependant pas utiliser tout le temps à cause de sa forte parcimonie.

Selon Meckesheimer [Mec01], les mesures d'estimation de l'exactitude peuvent être décomposées en mesures locales et globales. Les mesures locales ne renseigne que localement sur l'exactitude du modèle, tandis que les mesures globales confèrent à l'erreur déterminée un caractère global. Notons par $\widetilde{p_i^j}$ et p_i^j les variables de performance fournies respectivement par la référence et le modèle de comportement qui nous intéresse. Avec j désigne l'alternative de conception étudiée et i désigne la grandeur que l'on veut mesurer (*e.g.* la charge maximale admissible). Le Tableau II-8 présente les différentes mesures d'exactitude proposées par Meckesheimer [Mec01]. Dans ce tableau, n désigne le nombre de points de comparaison.

Mesure d'exactitude	Description
$MAX_i = \max_{j\in\{1,\dots,n\}} \left\lvert \widetilde{p_i^j} - p_i^j \right\rvert$ $MIN_i = \min_{j\in\{1,\dots,n\}} \left\lvert \widetilde{p_i^j} - p_i^j \right\rvert$	C'est une mesure qui fournit 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.
$MAE_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \left\lvert \widetilde{p_i^j} - p_i^j \right\rvert$	elle est mesurée dans les mêmes unités que les données d'origine. Elle fournit une mesure de la tendance centrale, mais elle est facilement biaisée par les valeurs extrêmes.
$MED_i = \operatorname{med}_{j\in\{1,\dots,n\}} \left\{ \left\lvert \widetilde{p_i^j} - p_i^j \right\rvert \right\}$	Comme le MAE_i, elle fournit une mesure de la tendance centrale, mais elle est moins sensible aux valeurs extrêmes.
$MSE_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \left(\widetilde{p_i^j} - p_i^j \right)^2$	Elle donne plus de poids aux grands écarts que l'erreur absolue moyenne (MAE_i).
$RMSE_i = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \left(\widetilde{p_i^j} - p_i^j \right)^2}$	C'est la mesure d'erreur la plus utilisée. Pour des fins de communication de résultats, elle peut être préférable à MSE parce qu'on mesure l'erreur dans les mêmes unités que les données, plutôt que dans les unités carrées.
$MAPE_i = \max_j \left\lvert \frac{\left(\widetilde{p_i^j} - p_i^j \right)}{p_i^j} \right\rvert \times 100\%$	Elle fournit un calcul d'erreur pratique car elle mesure le pourcentage de points se trouvant au-dessus de l'écart moyen.

Tableau II-8 Mesures d'exactitude proposées par Meckesheimer [Mec01]

A l'exception des mesures d'exactitude MAX_i et MIN_i et $MAPE_i$, toutes les autres mesures renseignent d'une manière globale sur l'exactitude du modèle de comportement. Il est recommandé de comparer la distance obtenue avec une valeur de seuil ou d'un objectif de précision [Ver04, Mec01]. Ça peut être par exemple une norme ou un standard à suivre. Les mesures d'exactitude proposées dans le Tableau II-8 présentent l'avantage d'être objectives. Cependant, ces mesures considèrent un nombre limité de points de comparaison et, de ce fait, il peut être difficile de justifier leur validité pour toutes les alternatives de conception que l'on souhaite évaluer. Cela constitue un obstacle pour le concepteur lorsqu'il souhaite explorer un vaste espace de conception, en évaluant un maximum d'alternatives de conception.

II.5.4. Précision

On évalue la précision intrinsèque d'un modèle de comportement à la précision des variables de performance p_i qu'il fournit. Selon Vernat et al. [Ver04], il existe deux sources d'imprécision d'un modèle : l'imprécision des paramètres incontrôlables et les relations incertaines qui constituent le modèle. Les paramètres incontrôlables sont les paramètres d'entrée du modèle dont l'affectation échappe au contrôle direct du concepteur.

Afin d'évaluer la précision d'un modèle, Vernat propose dans un premier temps de fixer les paramètres contrôlables du modèle (soumis au contrôle direct du concepteur). Ensuite, on fait varier les valeurs des paramètres incontrôlables sur l'intervalle défini par l'imprécision associée au paramètre. La précision induite pour chaque variable de sortie (variable de performance) est ensuite calculée. Finalement, cette précision est comparée à une valeur seuil ou objectif de la précision.

La principale critique de la procédure proposée par Vernat est qu'elle ne permet pas de traduire la précision intrinsèque au modèle liée aux relations incertaines.

II.5.5. Spécialisation

La spécialisation caractérise l'ensemble des hypothèses et informations qui restreignent le champ d'application d'un modèle de comportement. On souhaite qu'un modèle soit peu spécialisé pour qu'il puisse être utilisable à un maximum de cas d'alternatives de conception. D'après Vernat [Ver04], la spécialisation d'un modèle de comportement peut être estimée au travers de deux types de connaissances liées à ce modèle : *(i)* les principales hypothèses restreignant son domaine d'application et *(ii)* le plus bas niveau systémique utilisé pour sa formalisation. Cependant, cette évaluation est purement qualitative et subjective. Elle peut

servir éventuellement à départager des modèles de comportement dont les niveaux de parcimonie, d'exactitude et de précision sont équivalents.

II.6 Intégration d'incertain dans la prise de décision

Nous avons présenté jusqu'à maintenant les outils permettant la formalisation des préférences en conception de produits, les outils de modélisation des incertitudes dans les données d'entrée en conception, et les outils permettant de qualifier l'opérabilité des modèles de comportement en conception. Ils constituent des outils de base qui doivent être explorés et analysés en vue de proposer des démarches de prise de décision. Cependant, ces outils ne répondent pas directement à la question principale qui est "comment décider dans l'incertain". Les travaux présentés dans cette section proposent des réponses à cette question. Nous retrouverons certains des outils et principes présentés dans les sections précédentes.

II.6.1. Théorie de l'utilité

La théorie d'utilité a été développée par Neumann et Morgenstern [Neu44] pour la prise de décision multicritère en présence d'incertitude dans l'évaluation de la performance des alternatives de conception. La théorie de l'utilité a été développée initialement pour le domaine de l'économie mais elle a été largement utilisée les dernières années dans le domaine de la conception de produits [Mar98, Pah96].

La théorie de l'utilité est fondée sur un ensemble d'axiomes restreignant le moyen par lequel le concepteur exprime ces jugements de préférence vis-à-vis d'un ensemble d'alternatives et en présence de risque et d'incertitude. Si l'on tient compte de ces axiomes, la théorie de l'utilité s'avère être l'unique moyen pour fournir des résultats consistants avec les préférences du décideur. Dans la théorie de l'utilité, le concepteur exprime sa préférence vis-à-vis de chaque objectif de conception en utilisant la méthode de loterie (présentée dans la section II.3.4.1.2). Les valeurs obtenues, notées $u_i(p_i)$, sont appelées utilités. Avec p_i les variables de performance obtenues à la suite de l'étape d'évaluation des performances. Ensuite, un poids est donné à chaque objectif de conception pour exprimer son importance relativement aux autres objectifs. À la fin, la somme pondérée est utilisée pour obtenir une utilité générale (notée $u(p_1, p_2, \dots, p_n)$) associée à une alternative de conception donnée :

$$u(p_1, p_2, \dots, p_n) = \sum_{i=1}^{n} w_i \,.\, u_i(p_i) \qquad \text{(II.17)}$$

Où les w_i désignent les poids. L'alternative de conception avec l'utilité générale la plus élevée est choisie. La section II.3.4.1.2 évoque les limites liées à l'utilisation de l'utilité comme moyen pour interpréter les variables de performance p_i dans les problèmes de conception. Une autre critique de la théorie de l'utilité est le non-respect de l'axiome d'annihilation déjà évoqué auparavant. L'utilisation de la théorie de l'utilité n'est donc pas adaptée pour traiter les problèmes de conception de produits. Afin surmonter la limite liée à l'axiome d'annihilation, Thurston [Thu91] propose d'appliquer la théorie de l'utilité à la conception en divisant les objectifs de conception en deux classes : les contraintes objectives et les objectifs de conception de nature subjective. Les contraintes objectives ont des niveaux d'acceptation rigide qu'il est indispensable de respecter (*e.g.* la masse doit absolument être inférieure à 20Kg). Les objectifs de conception de nature subjective sont ceux dans lesquels une compensation est possible. Il devient ainsi possible d'utiliser la théorie de l'utilité standard avec ces objectifs. La stratégie globale proposée par Thurston reste cependant très informelle.

II.6.2. Méthode de l'imprécision

La méthode de l'imprécision (ou MoI pour " *Method of Imprecision* ") a été initialement proposée par Antonsson et Wood [Ant95] et a été ensuite développée dans d'autres travaux [Ant95, Sco98, Sco99, Sco00]. C'est une méthode d'aide à la décision pour le choix des paramètres de conception. En utilisant la théorie des ensembles flous, la MoI consiste d'abord à modéliser l'imprécision dans les paramètres de conception en reliant les valeurs de ces derniers sur l'intervalle [0,1], avec 0 pour les valeurs totalement inadmissibles et 1 pour les valeurs parfaitement acceptables. Des procédures d'évaluation telles les calculs numériques, essais mécaniques et méthodes heuristiques permettent d'associer à des valeurs particulières des paramètres de conception des variables de performance. Pour tenir compte de l'imprécision dans les paramètres de conception, l'arithmétique de la logique floue est utilisée pour propager cette imprécision aux variables de performances. On peut donc associer à chaque valeur de performance un degré d'appartenance, noté μ_d. Antonsson et Wood proposent ensuite d'utiliser des fonctions de préférence (comme celles présentées dans la section II.3.4.1.1) pour associer à chaque variable de performance p_i une valeur de satisfaction μ_p. Finalement, un opérateur d'agrégation est utilisé pour obtenir une valeur numérique unique, notée μ^*, exprimant l'appréciation globale d'une solution candidate (qui est une combinaison de paramètres de conception) en fonction du degré d'appartenance μ_d et

de la valeur de satisfaction μ_p. La solution candidate (ou les solutions candidates) ayant l'indice μ^* le plus élevé est choisie.

Dans le cadre de la MoI, Antonsson et Wood proposent des outils intéressants comme les axiomes permettant d'avoir un opérateur d'agrégation *design-appropriate* (présentés dans la section II.3.4.2.1) ou la méthode des points équivalents pour déterminer les poids w_i et le paramètre s. Cependant, la MoI ne permet pas de tenir compte de l'inexactitude potentielle des modèles de comportement utilisés, alors que ça représente l'une des principales problématiques de notre étude. Dans la MoI, les moyens d'évaluation de la performance (y compris les modèles de comportement utilisés) sont supposés être exacts.

II.7 Conclusion

Nous avons pu identifier au début de ce chapitre les principaux fondements théoriques qui permettent de rationaliser l'acte de prise de décision en conception de produits. L'extension du modèle FBS aux problèmes de décision multicritères nous a permis de mettre en évidence les étapes essentielles de la prise de décision multicritère en conception. Ce cadre d'analyse nous a permis d'étudier d'une manière cohérente et exhaustive les outils de formalisation des préférences et les outils de représentation d'incertitudes adaptés à la prise de décision en conception. Il apparait toutefois nécessaire qu'une démarche globale d'aide à la décision soit proposée en vue d'aiguiller le décideur dans sa prise de décision, que ce soit pour le choix du concept (phase architecturale) ou le choix final des paramètres de conception (phase détaillée).

Dans la section II.6, nous avons présenté et analysé des méthodes d'aide à la décision dans des contextes caractérisés par l'incertitude. A l'issue de cette analyse, quelques questions essentielles restent en suspens, notamment sur la possibilité d'intégrer la connaissance implicite (tacite) acquise par les concepteurs lors du choix de concepts dans les premières phases de développement ou encore sur la manière d'intégrer le niveau d'exactitude des modèles de conception lors du choix des paramètres de conception dans les phases avancées du projet de développement.

CHAPITRE III

Démarche de sélection de concepts

III.1 Introduction

A la suite de la phase de créativité, plusieurs concepts émergent et sont susceptibles de retenir l'intérêt des concepteurs. Comme le montre la relation (III.1), nous avons associé à chaque concept (concepts A, B et C) un ensemble de paramètres de conception qui doivent être fixés en vue d'aboutir à une architecture de produit. Ces paramètres peuvent être continus (dimensions, flux…) ou discrets (nombre d'éléments…), sémantiques (couleur…), ou encore se référer à un catalogue (types de matériaux, de pièces…).

$$A : \begin{pmatrix} PC_1^A \\ PC_2^A \\ \vdots \\ PC_{n^A}^A \end{pmatrix} \qquad B : \begin{pmatrix} PC_1^B \\ PC_2^B \\ \vdots \\ PC_{n^B}^B \end{pmatrix} \qquad C : \begin{pmatrix} PC_1^C \\ PC_2^C \\ \vdots \\ PC_{n^C}^C \end{pmatrix} \qquad \text{avec } n^A, n^B \text{ et } n^C \in \mathbb{N}^* \qquad \text{(III.1)}$$

Dans le cas de la relation (III.1), nous supposons que trois concepts sont proposés (A, B et C). Les nombres de paramètres de conception correspondant aux trois concepts A, B et C sont notés respectivement n^A, n^B et n^C. Le choix du concept à développer doit reposer sur des bases solides car les enjeux dernière sont très importants [Zim01]. La description incomplète des produits, traduite par des imprécisions dans le choix des paramètres de conception, constitue le principal obstacle dans l'évaluation des performances liées à chaque concept [Ott95]. En plus, les modèles de comportement développés dans les premières phases de développement sont souvent très approximatifs et peu représentatifs des phénomènes physiques pertinents liés au fonctionnement réel du produit. Etant donné les enjeux liés au choix de concept, il apparaît risqué de se baser uniquement sur ces modèles pour faire des choix de concepts. Nous nous intéressons dans ce chapitre à proposer une démarche capable d'intégrer les connaissances subjectives (ou connaissances tacites) des concepteurs en vue de faciliter le choix du concept (ou des concepts) le plus approprié. Une telle démarche doit également tenir compte des préférences de conception, dont les outils de formalisation ont été abordés dans le chapitre précédent.

Avant de détailler les étapes de la démarche proposée, nous introduisons dans les sections 1.1.III.1.1, 1.1.III.1.2 et 1.1.III.1.3 quelques considérations à prendre en compte dans la construction de notre démarche. La section 1.1.III.1.4 donne un aperçu global sur cette démarche.

III.1.1. Organisation du processus industriel de développement

Etant donné le manque de connaissances sur les concepts proposés initialement et les enjeux liés au choix du concept à développer, il est souvent risqué de choisir un seul concept dès les premières phases de développement. Comme évoqué au chapitre I, le processus de réduction parallèle d'ensemble (ou « PSNP » pour *Parallel Set Narrowing Process*) est adopté dans notre contexte. Il permet le développement en parallèle de plusieurs concepts jusqu'à avoir un niveau suffisant de connaissance pour permettre la sélection du concept le plus pertinent. En permettant de garder un espace de recherche assez vaste, ce processus permet de concilier deux objectifs souvent conflictuels qui sont, d'une part, l'exploration de concepts innovants mais mal maitrisés par l'entreprise et, d'autre part, garantir un processus de développement fiable et peu risqué.

Dans le cadre de l'utilisation du PSNP par l'entreprise, le processus de développement est souvent décomposé en plusieurs jalons de développement comme illustré sur la Figure III-1. Durant chaque jalon, des activités de développement sont entreprises dans le but de générer de la connaissance sur les concepts développés. Ces activités peuvent correspondre par exemple à des calculs numériques, des essais mécaniques sur prototypes, etc. Une revue de validation est faite entre la fin d'un jalon et le début du jalon suivant. Durant cette revue, les connaissances générées via les activités de conception au cours du jalon sont réunies et sont analysées par l'équipe de développement dans le but, d'une part, de décider quelles sont les concepts les moins pertinents qu'il faut éliminer et, d'autre part, de redéfinir les activités de développement qui doivent être entreprises dans le prochain jalon en vue de gagner davantage de connaissances sur les concepts restants et pouvoir ainsi faire un choix final. Cette organisation du processus de développement est connue parfois dans la littérature sous le nom *"étape-barrière"* [Coo01] (ou "*stage-gate*" en anglais), où *"étape"* désigne le jalon et *"barrière"* désigne la revue de validation. La démarche d'aide à la décision que nous proposons dans ce chapitre s'applique au niveau de la revue de validation et a pour objectif de fournir au décideur les éléments nécessaires de prise de décision pour permettre l'élimination des concepts les moins pertinents.

En réalisant une enquête sur de nombreux projets de développement basés sur cette organisation du processus (PSNP et *étape/barrière*) et touchant diverses industries, Cooper [Coo01] distingue les principaux facteurs conduisant à la réussite de certains projets et à l'échec d'autres. Son étude conclut que parmi les principaux facteurs de réussite d'un projet, il y a la stratégie d'innovation lors de la génération des concepts initiaux et la capacité de

l'entreprise à éliminer les concepts les moins pertinents pour concentrer ses efforts et ses ressources sur les concepts qui ont le plus de chance de réussir (les plus prometteurs).

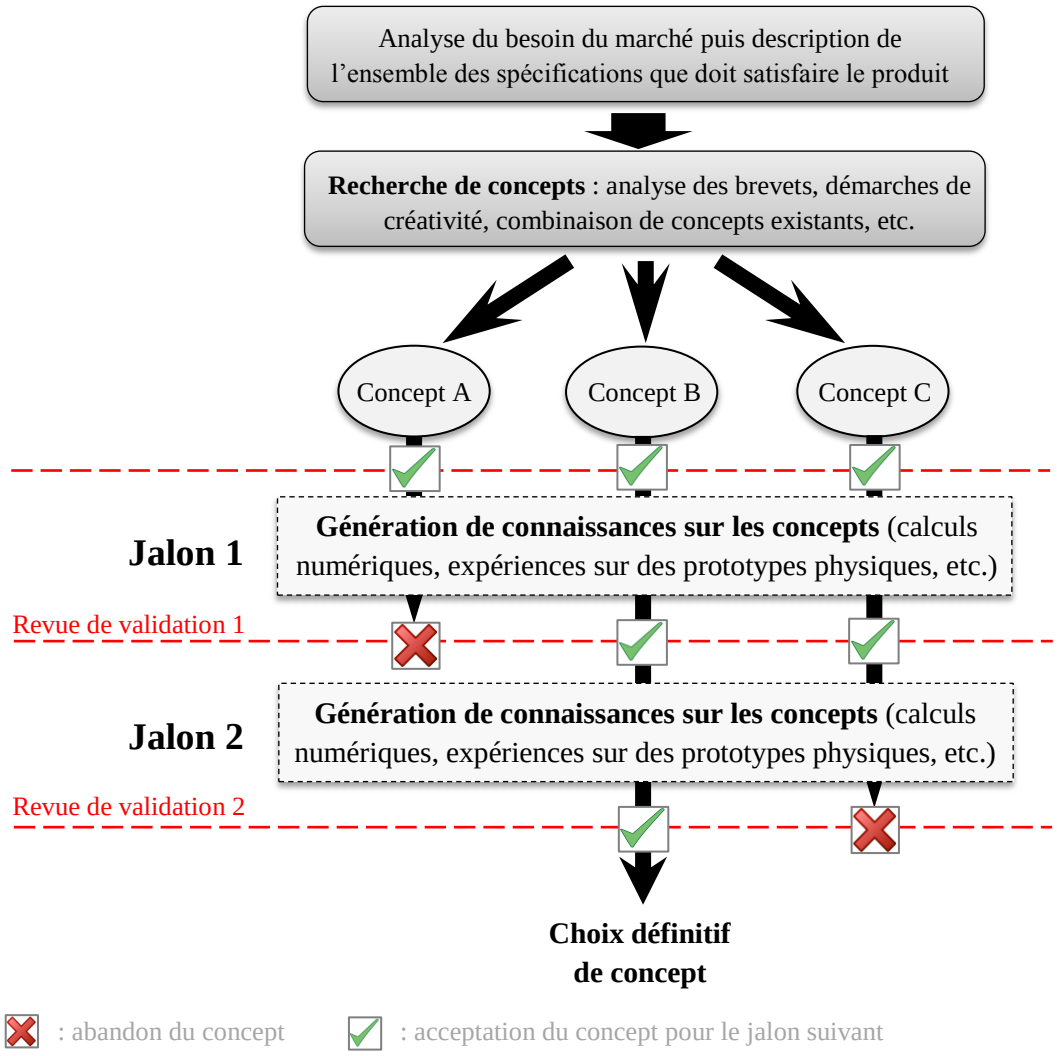


Figure III-1 Développement de plusieurs concepts en parallèle

III.1.2. L'aspect collaboratif de la conception

La conception est considérée comme une activité collective et non individuelle. C'est un processus qui exige la participation de plusieurs intervenants qui travaillent ensemble durant différentes étapes dans l'objectif de définir un produit final [Det96]. Cette collaboration est d'autant plus importante qu'il est nécessaire aujourd'hui de considérer simultanément plusieurs aspects du cycle de vie (exploitation, fabrication/assemblage, fin de vie, etc) durant le développement du produit. Les intervenants dans l'activité de développement peuvent être issus de différentes disciplines, avoir différentes visions et utiliser différents outils et méthodes. Cependant, ils doivent communiquer les informations entre eux et combiner les

connaissances qu'ils ont développées pour prendre conjointement des décisions sur le choix du concept (ou des concepts) ainsi que le choix les paramètres de conception. Les moyens conventionnels, tels que les moyens de communication oraux, laissent parfois le champ à des interprétations différentes et favorisent donc les erreurs de prise de décision. En plus, ils nécessitent un investissement en temps important. Les entreprises cherchent de plus en plus à adopter de nouveaux modèles conceptuels qui améliorent la communication entre des personnes ayant des "*background*" différents. Cette évolution s'accompagne par la nécessité de formaliser et de structurer des connaissances qui sont parfois de nature subjective (tacite) et donc difficile à formaliser.

Ainsi, dans la démarche proposée dans ce chapitre, nous avons insisté sur l'utilisation d'outils qui permettent de formaliser un certain nombre de connaissances liées à la conception du produit, dont les informations liées aux préférences de conception et les connaissances des concepteurs sur les concepts développés. L'utilisation de ces outils n'a pas seulement vocation à faciliter la prise de décision quant au choix des concepts, mais également à permettre un partage de connaissances plus efficace entre les concepteurs tout au long des phases de développement.

III.1.3. Risque dans la sélection de concepts

Compte tenu du faible niveau de connaissances et de la définition incomplète des caractéristiques du produit (imprécisions des paramètres de conception) dans les premières phases de développement, il est difficile pour les concepteurs de prédire, d'une manière précise, les performances liées à chaque concept. Par conséquent, il y a toujours un risque que le concept qui a été choisi pour faire l'objet de développement ne puisse pas aboutir finalement parce qu'il ne permet pas de respecter les exigences minimales requises dans le CdCF (cahier des charges fonctionnel). En plus, les études montrent la forte corrélation qui existe entre le niveau de maturité d'un concept et le risque de dépassement des délais de développement et du budget prévu au début du projet [Kat14]. Dans ce sens, il est fortement recommandé pour une entreprise, lorsqu'elle décide de développer plusieurs concepts en parallèle, de disposer au moins d'un concept avec un degré de maturité élevé pour s'assurer d'avoir un produit qui satisfait au moins les exigences minimales du CdCF et dont le temps/coût de développement est bien maitrisé [Kat14, Obr95, Kay07]. D'un autre côté, la volonté de se distinguer de la concurrence et de suivre l'évolution rapide du marché encourage les entreprises à être créatives dans les produits qu'ils proposent, ce qui se traduit

par la volonté d'explorer des concepts nouveaux pour l'entreprise. La pérennité à long terme de l'entreprise peut dépendre de son aptitude à l'innovation [Sha12].

En résumé, le choix des concepts à développer est donc lié à la fois par la nécessité d'une amélioration de la performance et d'une limitation des risques liés à la faible maturité des concepts. Dans beaucoup de situations, ces deux objectifs sont antagonistes car le développement de concepts nouveaux, et qui présentent un potentiel de performance élevé par rapport à des concepts plus conventionnels, est souvent synonyme de risque pour l'entreprise. En général, le décideur cherche un compromis satisfaisant entre le risque et le potentiel de performance dans ces décisions. Considérant l'exemple illustré dans la Figure III-2 où l'on suppose que le décideur doit réduire le nombre de concepts proposés initialement à deux concepts. Nous pouvons distinguer trois stratégies qui sont la stratégie très conservative (stratégie 3), une stratégie très risquée (stratégie 1) et une stratégie mixte (stratégie 2). Le choix des concepts à développer est très dépendant de la stratégie du décideur, de son aversion au risque, ainsi que de la culture et du cadre réglementaire de l'entreprise. Il dépond aussi des enjeux liés au développement du produit ainsi que du budget que l'entreprise est prête à dépenser. Cependant, afin que la stratégie adoptée puisse être en accord avec les objectifs de l'entreprise, la démarche d'aide à la décision proposée doit fournir au décideur une évaluation du risque lié au développement du concept ainsi que le potentiel de performance qui peut être atteint.

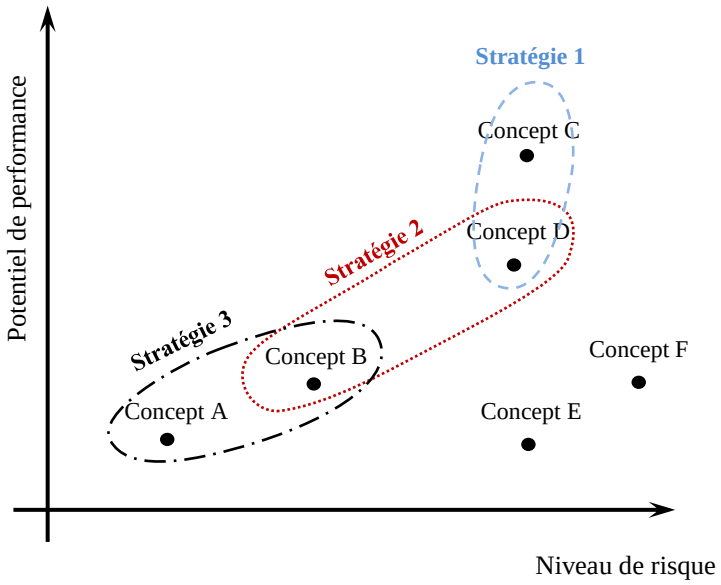


Figure III-2 Exemple illustrant trois choix de développement

III.1.4. Aperçu de la démarche proposée et organisation du chapitre

D'une manière générale, le choix des concepts à retenir dans le cadre de notre démarche repose sur deux considérations. La première est liée à la volonté du décideur de minimiser le risque d'échec d'un concept, ce qui se traduit par le non-respect d'au moins une des spécifications minimales exigées dans le CdCF. Ce risque est évalué en intégrant l'état des données utilisées dans la conception, incluant les paramètres de conception et les données liées au milieu environnant du produit. Ce risque sera évalué par la suite avec l'indice global de criticité de risque. Outre la volonté de minimiser le risque, une deuxième considération traduit la volonté du décideur d'obtenir un produit qui présente des performances élevées vis-à-vis des différents objectifs de conception. Un deuxième indice, appelé indice global de désirabilité, est alors proposé et aura pour rôle d'évaluer les niveaux de performances atteignables par un concept en intégrant pour cela les préférences subjectives du décideur.

Comme souligné dans la section III.1.3, ces deux considérations sont nécessaires afin que le décideur puisse établir une stratégie de développement en adéquation avec ces objectifs. Avant d'introduire plus en détail et expliquer la procédure de calcul des deux indices, nous présentons tout d'abord deux étapes préliminaires qui sont indispensables. La première étape, présentée dans la section III.2 concerne la construction d'un modèle permettant de formaliser et de structurer les préférences du décideur. La deuxième étape, présentée dans la section III.3, permet la caractérisation des données d'entrée en conception. En se basant sur ces deux étapes préliminaires, la procédure de calcul des deux indices présentés ci-dessus est expliquée dans la section III.4.

III.2 Formalisation des préférences du décideur

La première étape de notre démarche consiste à établir un modèle permettant de structurer, formaliser et capitaliser les informations liées aux préférences et aux objectifs de conception. Ainsi, il devient plus aisé de réutiliser et de partager ces informations entre les intervenants du projet de développement, ce qui contribue notamment à guider plus efficacement les concepteurs dans leurs choix de conception, y compris dans les premières phases de développement. Le modèle présenté dans cette section sera utilisé dans les premières phases de développement pour aider au choix des concepts, mais aussi dans la phase de conception architecturale pour aider à la définition des paramètres de conception (chapitre IV). Etant donné que les préférences du décideur ne sont pas toujours bien définies dans les premières phases de développement et qu'elles sont susceptibles d'évoluer au cours du projet, il

convient de maitre à jour ce modèle à chaque fois qu'il y a un changement significatif dans les préférences du décideur.

III.2.1. Aperçu global du modèle proposé

Le modèle proposé est issu de la décomposition du processus de prise de décision décrite dans la section II.3.2 et qui s'inspire du cheminement du raisonnement humain. Ainsi, le point de départ de ce modèle est une alternative de conception, notée $\overrightarrow{X^{j,A}}$ (relation ci-dessous), dont les paramètres de conception sont définis précisément.

$$\overrightarrow{X^{j,A}} = [PC_1^{j,A}, \dots, PC_i^{j,A}, \dots, PC_{n^A}^{j,A}] \quad \text{(III.2)}$$

Avec $\boldsymbol{A}$ le concept considéré, $\boldsymbol{n^A}$ le nombre des paramètres de conception du concept $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{j}$ l'indice de l'alternative de conception étudiée et $\boldsymbol{i}$ l'indice du paramètre de conception.

Le modèle global proposé est découpé en trois modèles qui suivent le principe du cheminement du raisonnement humain : le modèle d'observation, le modèle d'interprétation et le modèle d'agrégation. Le modèle d'observation permet de formaliser le comportement objectif de l'alternative de conception et n'intègre aucune préférence subjective du décideur. Les préférences du décideur sont formalisées dans le modèle d'interprétation et le modèle d'agrégation. Dans notre synthèse de l'état de l'art, nous avons déjà abordé la notion de formalisation des préférences en exposant et en analysant les différents outils existant dans la littérature pour formaliser les préférences du décideur, notamment les outils spécifiques à la conception de produits. Nous nous appuyons ici sur plusieurs de ces outils.

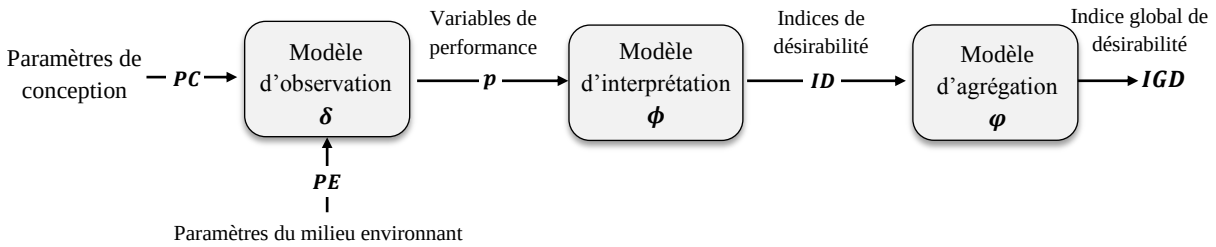


Figure III-3 Modèle global utilisé pour la formalisation des préférences du décideur

La Figure III-3 illustre le modèle global proposé. Dans un premier temps, le comportement de l'alternative de conception est formalisé au travers d'un modèle d'observation qui fournit à la sortie les variables de performance, notées $\boldsymbol{p_i^A}$ pour un concept $\boldsymbol{A}$, indispensables pour vérifier la satisfaction des objectifs de conception. Ces variables sont ensuite traitées au moyen d'un modèle d'interprétation afin de formaliser le niveau de satisfaction des préférences et attentes

du décideur. Les résultats fournis à la sortie sont des indices de désirabilité adimensionnés. Enfin, le troisième modèle permet d'agréger ces indices de désirabilité en une seule grandeur numérique, appelée indice global de désirabilité, qui reflète le niveau global de satisfaction liée à une alternative de conception $\overrightarrow{\boldsymbol{X}^{j,A}}$. Elle permet ainsi de classer différentes alternatives de conception, facilitant grandement la prise de décision. Le modèle tel qu'il est exposé dans cette section ne prend pas en compte l'imprécision dans les paramètres de conception $\boldsymbol{PC_i^{j,A}}$ ni dans les paramètres du milieu environnant (notés $\boldsymbol{PE_i}$). Dans la suite de la section III.2, nous décrivons en détail les étapes de construction de ces trois modèles.

III.2.2. Identification et structuration des objectifs de conception

L'identification et la structuration des objectifs de conception constituent dans notre étude la première étape vers la formalisation des préférences du décideur. Elle doit aboutir à la fin à la structuration décrite dans la Figure III-4.

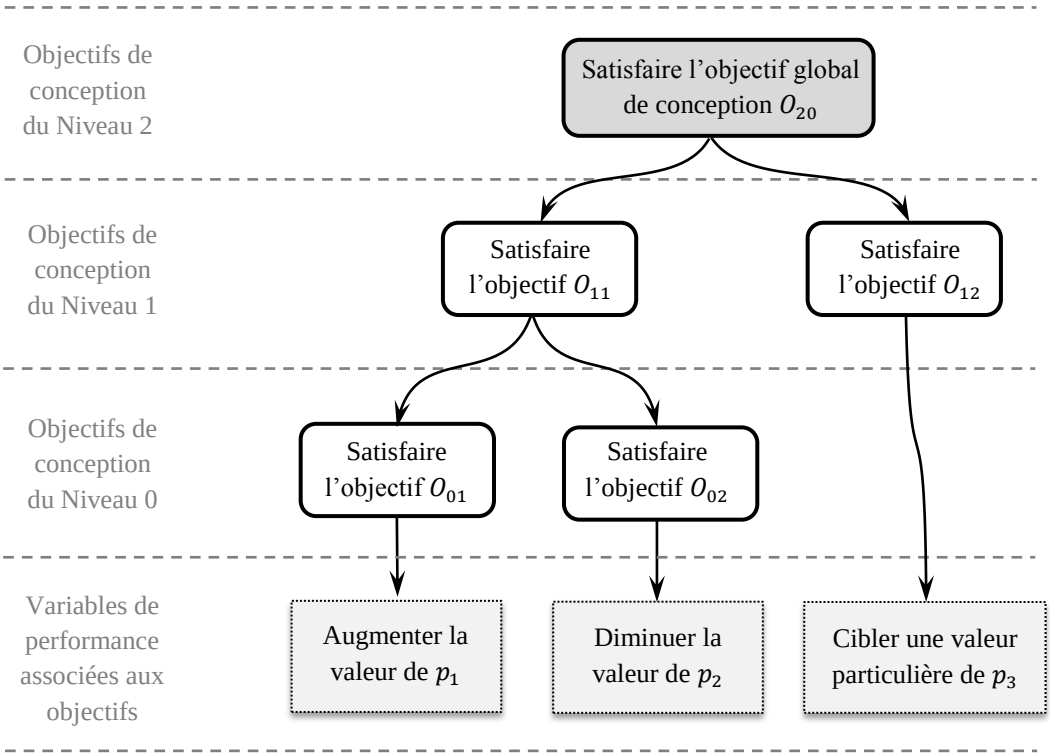


Figure III-4 Décomposition de l'objectif global de conception en plusieurs sous-objectifs de conception

D'un point de vue global, la motivation derrière le processus de développement est d'obtenir un produit qui satisfait un objectif global de conception. En d'autres termes, cet objectif global correspond à l'obtention d'une bonne alternative de conception. Comme le montre la

Figure III-4, la réalisation de cet objectif global se décline par la volonté de satisfaire un ensemble de sous-objectifs de conception. D'après la même figure, plusieurs niveaux de décomposition peuvent être obtenus à la fin. Comme le montre la Figure III-4, les différents objectifs de conception sont notés $\boldsymbol{O_{ij}}$, où $\boldsymbol{i}$ indique le niveau de décomposition et $\boldsymbol{j}$ l'indice qui permet de distinguer les objectifs du même niveau entre eux.

La détermination des objectifs de conception dans un problème de conception n'est pas soumise à des règles strictes. Cependant, il existe des outils facilitant la mise en évidence et l'organisation de ces objectifs. L'analyse fonctionnelle [Afn90] est très largement utilisée pour cet effet. A l'aide d'un ensemble d'outils, elle vise à décomposer le produit à concevoir à travers les fonctions qu'il doit assurer (fonctions et sous fonctions) et les contraintes qu'il doit respecter. Il existe deux niveaux dans cette analyse : l'analyse fonctionnelle externe qui a pour but d'identifier les fonctions du système à concevoir et l'analyse fonctionnelle interne qui permet de mettre en évidence les choix du concepteur en réponse aux spécifications du cahier des charges fonctionnel, c'est à dire les fonctions internes au produit. Dans notre étude, seule l'analyse fonctionnelle externe nous intéresse. Dans ce cadre-là, l'analyse du cycle de vie, décrite dans la Figure III-5, nous permet dans un premier temps d'identifier exhaustivement les situations de vie. Ces situations de vie correspondent à des contextes particuliers d'utilisation du produit. La prise en compte en conception des situations de vie du futur produit permet d'anticiper les exigences qui lui sont associées. Ensuite, pour une situation donnée du cycle de vie, le diagramme pieuvre (ou APTE®), schématisé dans la Figure III-6, permet d'identifier les éléments du milieu extérieur qui sont en interaction avec le produit et les différentes fonctions qui entrent en jeu entre ces éléments et le produit.

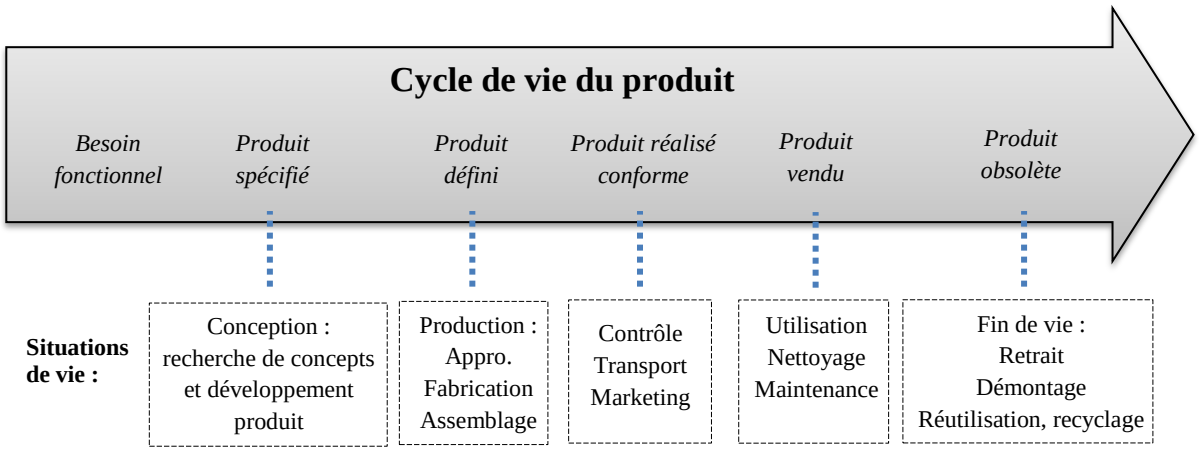


Figure III-5 Cycle de vie du produit et situations de vie correspondantes [Sca04]

La notion de fonction de conception utilisée dans l'analyse APTE® est équivalente à la notion d'objectif de conception utilisée dans notre étude. L'objectif de conception dans notre étude correspond à la satisfaction d'une fonction de conception au sens de l'analyse APTE®.

Selon la norme [Afn90], il existe une distinction entre les Fonctions de Service (FS) et les Fonctions Contrainte (FC). Les Fonctions de Service (FS) expriment l'action attendue du produit sur un élément du milieu extérieur, au bénéfice d'un autre élément de ce milieu. Les Fonctions Contrainte (FC), quant à elles, traduisent les contraintes imposées au produit par un élément du milieu extérieur et qui ont une influence sur le choix et la définition du futur produit. Dans notre étude, nous ne faisons pas de distinction particulière entre FS et FC. Elles correspondent toutes à des objectifs de conception que le produit final doit satisfaire.

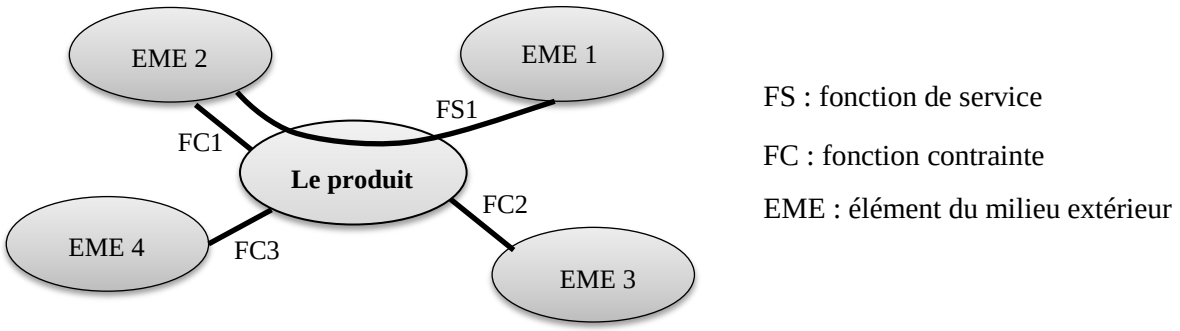


Figure III-6 Diagramme pieuvre (APTE®)

Pour compléter notre analyse, nous associons à chaque objectif du niveau le plus bas (niveau 0) une spécification permettant de renseigner sur la manière dont ces objectifs sont satisfaits. Elles formalisent le comportement attendu du produit. Comme le montre la Figure III-4, la satisfaction des objectifs de conception est transformée en objectifs sur la spécification correspondante. Il peut s'agir d'un objectif d'augmentation (*e.g.* la charge maximale supportée), un objectif de diminution (*e.g.* le coût de fabrication), ou un objectif de ciblage (*e.g.* respect d'une hauteur bien précise). Dans le reste du manuscrit, ces spécifications seront appelées variables de performance et seront notées p_i dans le cas général et $p_i^{j,A}$ pour une alternative $\overrightarrow{X^{j,A}}$. Chaque objectif du niveau 0 est donc lié à une variable de performance.

Il peut arriver qu'un objectif de conception ne puisse pas être directement associé à une variable de performance. Dans ce cas, il est nécessaire de le décomposer à nouveau en sous-objectifs. Par exemple, l'objectif *"Avoir un moteur performant"* peut être décomposé en deux sous-objectifs qui sont : "*Diminuer la consommation"* et *"Augmenter la puissance"*. Nous obtenons ainsi deux nouveaux sous-objectifs auxquels nous pouvons associer des variables de

performance (par exemple le nombre de litres consommés par 100Km et le nombre de chevaux fournis). A ce stade d'analyse, l'évaluation quantitative de ces variables de performance et le degré de satisfaction des objectifs de conception ne sont pas traitées. L'étape présentée dans cette section a pour seul intérêt d'identifier et de structurer les objectifs de conception ainsi que d'identifier les variables de performances associées au objectifs du niveau 0, tel qu'il est montré dans la Figure III-4.

III.2.3. Formalisation du comportement : modèle d'observation

Les variables de performance p_i, qui ont été introduites dans la section III.2.2, formalisent le comportement de l'alternative de conception étudiée et permettent de renseigner sur le niveau de satisfaction des objectifs de conception du niveau 0 (Figure III-4). Ces variables peuvent être de différents ordres : coût, empreinte carbone, masse, puissance, volume, etc. Dans cette section, nous présentons le modèle d'observation qui permet d'obtenir ces variables de performance. Ce modèle peut être qualifié d'objectif car il n'intègre pas les préférences subjectives du décideur. Ces préférences sont formalisées dans la section 0.

Dans la suite de ce manuscrit, on note par δ_i^A la procédure permettant d'évaluer la variable de performance $p_i^{j,A}$ (relative à l'alternative de conception $\overrightarrow{X^{j,A}}$). La procédure δ_i^A peut correspondre par exemple à une simulation par éléments finis, une heuristique, une équation mathématique, un essai mécanique sur un prototype physique, etc. La Figure III-7 schématise le modèle d'observation.

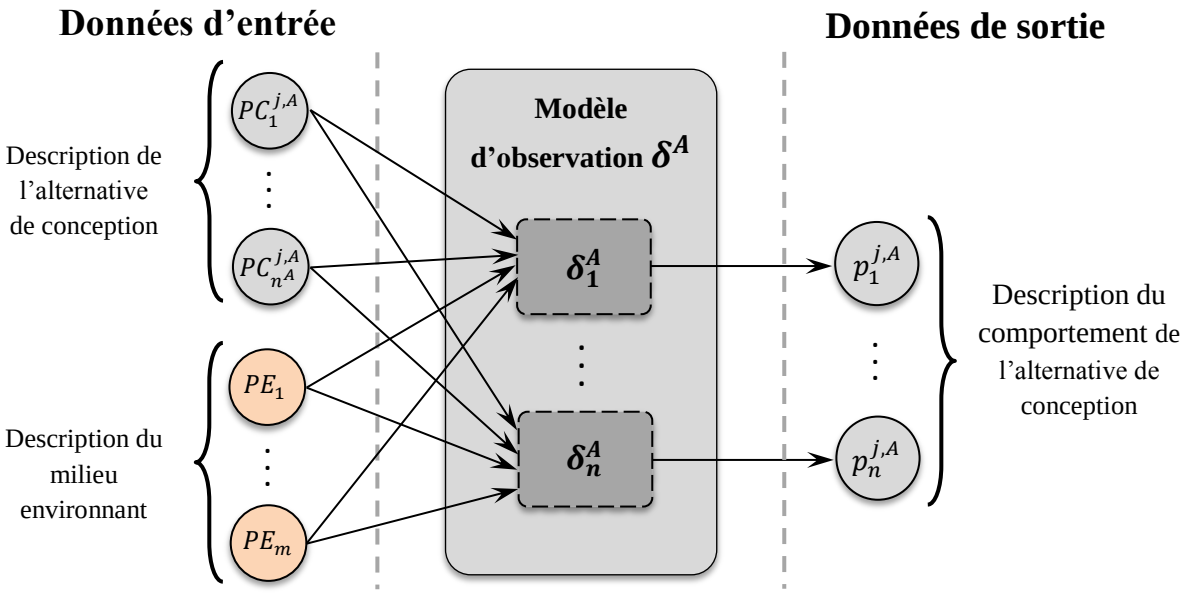


Figure III-7 Structure du modèle d'observation pour un concept A

Nous pouvons voir sur cette figure que trois types de données sont mis en jeu :

- ✓ Les paramètres de conception $PC_i^{j,A}$ décrivant l'alternative de conception étudiée ;
- ✓ Les paramètres d'environnement PE_i décrivant le milieu environnant avec lequel le produit va interagir (*e.g.* température de fonctionnement, niveau d'une sollicitation mécanique extérieure, humidité ambiante) ;
- ✓ Les variables de performance $p_i^{j,A}$ décrivant le comportement de l'alternative de conception étudiée et sur lesquelles les concepteurs appliquent des spécifications ;

Nous définissons le vecteur de performance $\overrightarrow{P^{j,A}}$ d'une alternative de conception comme le vecteur-ligne qui contient les variables de performance associées à chaque objectif du niveau 0, tel qu'il est indiqué dans la relation ci-dessous. Nous notons δ^A le modèle d'observation global, mettant en jeu les procédures δ_i^A, et permettant d'obtenir le vecteur de performance $\overrightarrow{P^{j,A}}$ en fonction des paramètres $PC_i^{j,A}$ et PE_i (relation ci-dessous).

$$\overrightarrow{P^{j,A}} = \left[p_1^{j,A}, \dots, p_n^{j,A}\right] = \delta^A\left(\left[PC_1^{j,A}, \dots, PC_{n^A}^{j,A}\right]; \left[PE_1, \dots, PE_m\right]\right) \quad \text{(III.3)}$$

Avec m le nombre des paramètres du milieu environnant et n le nombre de variables de performance (correspondant au nombre d'objectifs du niveau 0).

III.2.4. Formalisation des préférences du décideur

III.2.4.1 Modèle d'interprétation

D'une manière générale, nous désignons par "interprétation" le processus qui permet de vérifier le niveau d'adéquation des valeurs obtenues de $p_i^{j,A}$ avec les attentes et préférences du décideur. Nous rappelons que la formalisation de ce processus consiste à associer une valeur numérique adimensionnée entre 0 et 1 à chaque valeur de $p_i^{j,A}$ pour quantifier le degré de satisfaction de l'objectif correspondant (objectif du niveau 0). Il s'agit ici des objectifs déjà identifiés dans la section III.2.2. Le modèle global d'interprétation est schématisé dans la Figure III-8. Nous avons présenté et analysé dans la section II.3.4.1 les outils permettant la formalisation du processus d'interprétation. Pour notre étude, nous choisissons d'utiliser les fonctions de désirabilité de Harrington [Har65] pour les raisons suivantes :

- ✓ Elles sont faciles à paramétrer (seulement deux points d'estimation sont nécessaires pour une fonction "*one-sided*" et quatre points pour une fonction "*two-sided*") ;

- ✓ Contrairement aux fonctions d'utilité, les valeurs de sortie sont facilement compréhensibles par les intervenants du projet de développement [Qui12]. Cet avantage est important dans les projets collaboratifs car on cherche toujours à faciliter la communication et l'échange entre les intervenants du projet ;
- ✓ Contrairement à la fonction de Derringer [Der94], elle ne présente pas de discontinuités ni de paliers, ce qui est plus réaliste pour les problèmes de conception ;
- ✓ Elles sont adaptées aux trois types d'objectifs rencontrés dans les problèmes de conception : augmenter la valeur de $p_i^{j,A}$, diminuer la valeur de $p_i^{j,A}$ et cibler une valeur particulière de $p_i^{j,A}$;

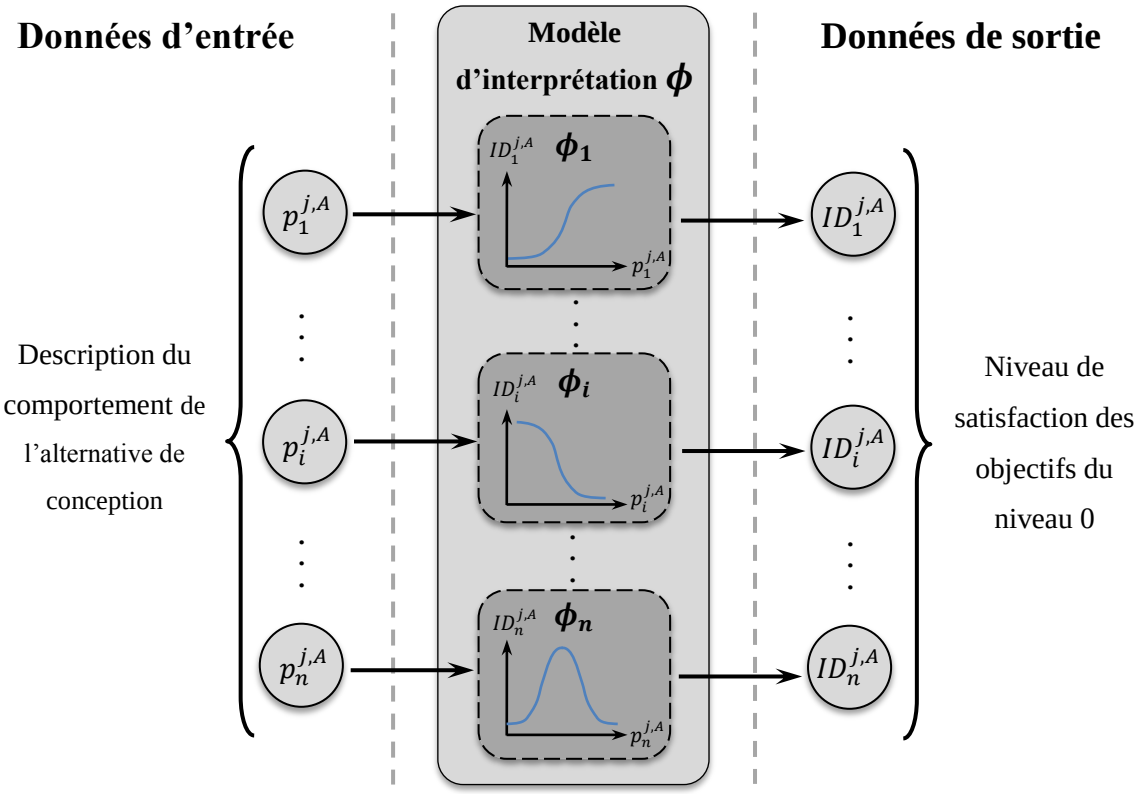


Figure III-8 Structure du modèle d'interprétation

La section II.3.4.1.1.1 présente en détail les fonctions de désirabilité de Harrington. A chaque variable de performance $p_i^{j,A}$, nous associons une fonction de désirabilité de Harrington, notée ϕ_i, pour formaliser la préférence du décideur. La valeur fournie à la sortie est appelée indice de désirabilité et notée $ID_i^{j,A}$. Il y a donc autant d'indices de désirabilité que de variables de performance. Les différents indices de désirabilité forment le vecteur de désirabilité $\overrightarrow{D^{j,A}}$ tel qu'il est indiqué dans la relation ci-dessous. L'utilisation d'une échelle sémantique tel qu'il est indiqué sur la Figure II-6 peut aider le décideur dans son paramétrage de la fonction de

désirabilité ϕ_i car elle lui permet d'associer un niveau de satisfaction sémantique à une valeur donnée de $p_i^{j,A}$. On note par ϕ le modèle global d'interprétation qui permet, par le biais des différentes fonctions de désirabilité ϕ_i, d'associer au vecteur de performance $\overrightarrow{P^{j,A}}$ un vecteur de désirabilité $\overrightarrow{D^{j,A}}$ tel qu'il est indiqué dans la relation suivante :

$$\phi\left(\overrightarrow{P^{j,A}}\right) = \phi\left(\left[p_1^{j,A}, \dots, p_n^{j,A}\right]\right) = \overrightarrow{D^{j,A}} = \left[ID_1^{j,A}, \dots, ID_n^{j,A}\right] \quad \text{(III.4)}$$

Dans le cadre de la prise de décision en conception de produits, une variable de performance est souvent associée à un seuil d'acceptabilité. Le non-respect de ce seuil est synonyme d'un niveau de satisfaction nulle de l'objectif correspondant. Selon le principe d'annihilation défendu par plusieurs auteurs [Bie91, Ott93, Vin83], l'alternative de conception dans ce cas est rejetée quel que soit le niveau de satisfaction des autres objectifs. Dans le cas de l'utilisation d'une fonction de désirabilité de Harington, ce seuil d'acceptabilité correspond à AC_i (*accurate constraint*). Les différents seuils AC_i constituent un intérêt particulier dans notre étude car ils permettent de délimiter l'espace des performances admissibles.

III.2.4.2 Modèle d'agrégation

Le but de ce troisième modèle est de combiner les indices de désirabilité obtenus par le modèle d'interprétation pour donner un jugement global de l'alternative de conception étudiée. En d'autres termes, nous souhaitons évaluer le niveau de satisfaction de l'objectif global de conception, mentionné dans la Figure III-4. De cette manière, il devient possible de comparer plusieurs alternatives de conception. Rappelons que la principale difficulté de cette étape est liée à l'aspect antinomique des objectifs de conception, obligeant le décideur à considérer la notion du compromis entre objectifs. Pour faire face à cette difficulté, le modèle proposé utilise un opérateur d'agrégation qui va nous fournir une grandeur numérique unique qui formalise le niveau global de satisfaction de l'alternative de conception étudiée. Cette grandeur est appelée indice global de désirabilité (notée $IGD^{j,A}$ pour une alternative $\overrightarrow{X^{j,A}}$) et renseigne sur la satisfaction de l'objectif global de conception (Figure III-4). Nous choisissons d'utiliser la famille des opérateurs de Yager [Yag88] pour les raisons suivantes :

- ✓ Elle offre la possibilité d'utiliser plusieurs niveaux de compensation (définis par le paramètre s) en adéquation avec la préférence du décideur ;
- ✓ Pour des valeurs de s inférieures à 0, les opérateurs obtenus sont des opérateurs d'agrégation *design-appropriate* car ils respectent les axiomes de Scott [Sco98] ;

Comme le montre la Figure III-9, l'opérateur d'agrégation peut être utilisé à plusieurs reprises selon la décomposition des objectifs de conception définie initialement (traitée dans la section III.2.2). Cette utilisation en cascade de l'opérateur de Yager est nommée *"agrégation hiérarchique"* [Ott93, Sco99].

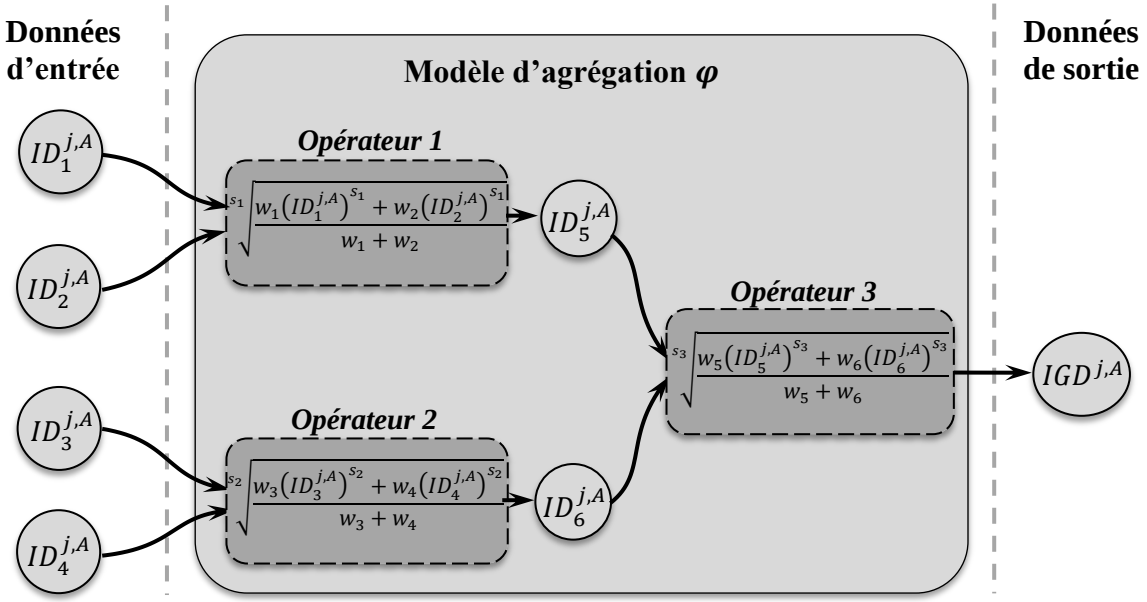


Figure III-9 Structure du modèle d'agrégation

La méthode des points indifférents [Sco99, Sco00] est utilisée dans notre étude pour définir les pondérations w_i et le degré de compensation s. Cette méthode est détaillée dans la section II.3.4.2.3.2. Dans l'exemple d'illustration que nous avons donné, nous avons considéré l'alternative de référence (0.5;0.5). Il est possible d'utiliser d'autres alternatives de référence. Lors de la définition des points indifférents, il est préférable de considérer des valeurs de $p_i^{j,A}$ à la place des indices de désirabilité $ID_i^{j,A}$ pour faciliter au décideur l'estimation des points indifférents (car les $p_i^{j,A}$ ont un sens plus concret que les $ID_i^{j,A}$). Ensuite, il suffit d'utiliser les fonctions de désirabilité établies auparavant pour transformer les $p_i^{j,A}$ en indices de désirabilité. Afin de s'assurer que les valeurs obtenues de s et des w_i sont cohérentes avec les préférences du décideur, il peut être utile d'utiliser la méthode des points indifférents plusieurs fois avec à chaque fois des alternatives de référence différentes. Dans ce cas, une redondance dans les valeurs obtenues de s et des w_i traduit la bonne cohérence avec les préférences du décideur.

Nous notons par φ le modèle d'agréation global qui permet d'obtenir l'indice global de désirabilité $IGD^{j,A}$ à partir du vecteur de désirabilité $\overrightarrow{D^{j,A}}$, tel qu'il est indiqué dans la relation suivante :

$$\varphi\left(\overrightarrow{D^{j,A}}\right) = \varphi\left(\left[ID_1^{j,A}, \dots, ID_n^{j,A}\right]\right) = IGD^{j,A} \quad \text{(III.5)}$$

III.2.5. Bilan sur le modèle proposé

Avec des produits de plus en plus complexes, il apparait le besoin de décomposer le problème de conception en sous problèmes facilement maitrisable par les concepteurs. Dans ce sens, le modèle présenté dans cette section contribue à simplifier le problème de conception car l'objectif global de conception est décomposé en plusieurs sous-objectifs dont le niveau de satisfaction peut être évalué sur une alternative de conception donnée.

Les modèles développés dans la section III.2 dans le but de formaliser le comportement des alternatives de conception et les préférences du décideur sont récapitulés dans la Figure III-10. Nous définissons par χ^A le modèle global composé des trois modèles d'observation δ^A, d'interprétation ϕ et d'agrégation φ. A partir d'une alternative de conception $\overrightarrow{X^{j,A}} = [PC_1^{j,A}, \dots, PC_{n^A}^{j,A}]$ et d'un milieu environnant caractérisé par le vecteur $\vec{E} = [PE_1, \dots, PE_m]$, le modèle globale χ^A permet d'obtenir $IGD^{j,A}$ tel qu'il est indiqué par la relation suivante :

$$IGD^{j,A} = \chi^A\left(\overrightarrow{X^{j,A}}; \vec{E}\right) = \varphi \circ \phi \circ \delta^A\left(\overrightarrow{X^{j,A}}; \vec{E}\right) \quad \text{(III.6)}$$

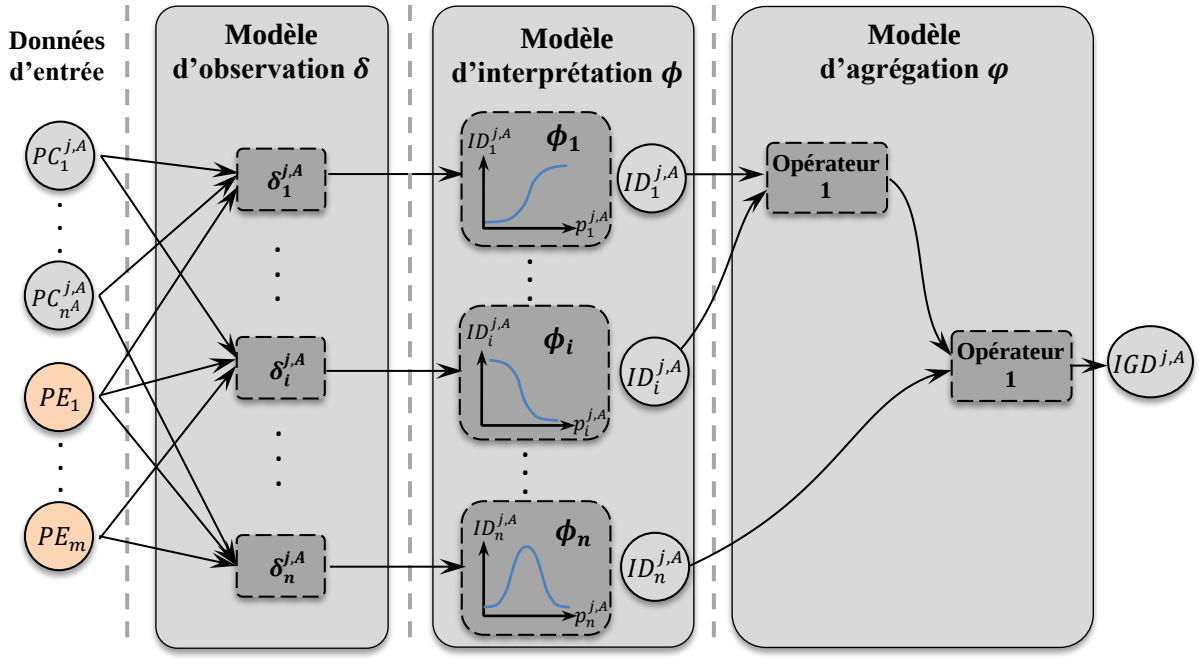


Figure III-10 Modèle global de formalisation des préférences du décideur

Les préférences du décideur sont capturées au travers des différents paramètres qui alimentent le modèle d'interprétation et le modèle d'agrégation : les points de paramétrage des fonctions de Harrington, les pondérations w_i et les paramètres de compensation s.

III.3 Caractérisation des données d'entrée

Avec des exigences en termes de coût, qualité et délais qui deviennent de plus en plus accrues, en plus de la complexité des produits qui accroit également, l'activité de développement est basée de plus en plus sur la collaboration entre différents intervenants. Les décisions prises dans ce contexte doivent intégrer les données et connaissances provenant de différents acteurs, parfois issues de disciplines différentes. Or, le manque de connaissances et l'imprécision des données sont très caractéristiques des premières phases de développement [Cha99]. Pour gérer cette difficulté, il devient nécessaire de caractériser les données échangées entre les différents intervenants du projet [Dré13].

Ainsi, une caractérisation préalable des données d'entrée est requise dans le cadre de notre démarche d'aide à la décision. Les données concernées par cette caractérisation sont les paramètres de conception PC_i, qui décrivent les caractéristiques de l'alternative de conception (*e.g.* dimensions structurantes, nombre de fixations, matériaux utilisés), et les paramètres d'environnement PE_i, qui décrivent l'environnement extérieur avec lequel le produit va interagir (*e.g.* température, sollicitations mécaniques extérieures). Rappelons que chaque concept est caractérisé par ses propres paramètres de conception. Par contre, les paramètres d'environnement sont communs à tous les concepts.

La caractérisation comprend trois aspects qui sont : la modélisation de l'état d'imprécision dans ces paramètres, l'évaluation de leur taux d'évolution et, l'évaluation du degré de couplage entre eux et les variables de performance.

III.3.1. Modélisation de l'état d'imprécision

Une fois que l'entreprise décide de retenir un concept pour faire l'objet de développement, les concepteurs sont confrontés à un ensemble de décisions concernant les caractéristiques du futur produit (paramètres de conception). Ces décisions doivent se faire en adéquation avec les objectifs de conception. Souvent, pour un concept qui est nouveau pour l'entreprise et pour lequel peu d'activités de développement ont été entreprises, les concepteurs n'ont pas encore assez de connaissance pour définir les valeurs adéquates des paramètres de conception. Comme conséquence, les paramètres de conception passent souvent par un ensemble de

modifications qui donne lieu à plusieurs versions intermédiaires avant d'aboutir à la version finale du produit. C'est le principe de conception itérative (ou séquentielle). Nous pouvons considérer que le concept a atteint sa maturité lorsqu'il y a plus (ou très peu) de modifications à introduire sur les paramètres de conception [Dun90]. Cependant, même si les concepteurs ne sont pas en mesure de fixer les bonnes valeurs des paramètres de conception dès les premières phases de développement, ils ont toujours une préférence vers certaines valeurs particulières selon leur expérience, leur savoir-faire inné, et la connaissance qu'ils ont pu acquérir durant les activités de développement antérieures. Dans cette section, nous souhaitons récupérer et formaliser ces préférences en utilisant la notion de fonction de préférence. La Figure III-11 illustre l'utilisation de ces fonctions pour formaliser la préférence sur un paramètre de conception continu et un autre paramètre discret.

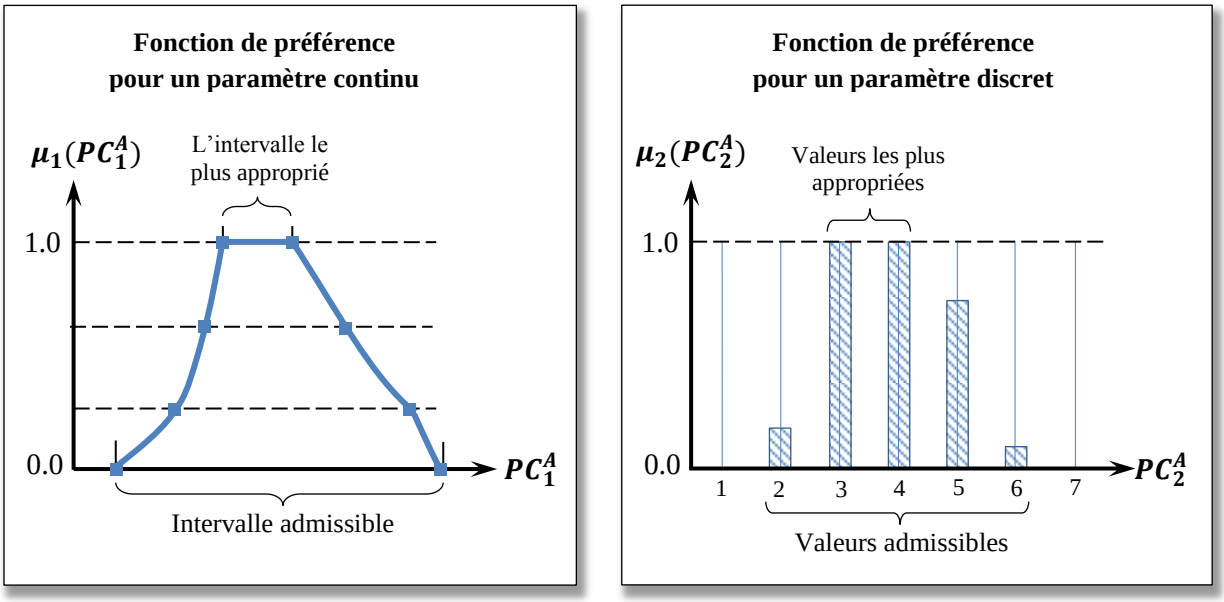


Figure III-11 Représentation de la préférence du concepteur sur les paramètres conception

Cette fonction de préférence est similaire à la notion des ensembles flous [Zad65] introduite dans l'état de l'art. Ces fonctions peuvent intégrer plusieurs aspects comme par exemple :

- ✓ La volonté d'intégrer des objectifs de conception implicites ou qui n'ont pas pu être intégrés dans la phase d'identification et de structuration des objectifs (section III.2.2). Par exemple, le concepteur peut avoir des préférences vers des matériaux particuliers parce que leur approvisionnement est plus facile.
- ✓ La volonté de se rapprocher d'une solution de conception antérieure dont l'efficacité a été démontrée.

- ✓ La volonté d'intégrer des phénomènes physiques qui n'ont pas pu être pris en compte dans le modèle d'observation. Par exemple, le concepteur peut avoir une préférence vers des tôles à épaisseur élevée pour éviter des phénomènes de voilement (car dans son cas, le modèle d'observation utilisé ne prend pas en compte les phénomènes d'instabilité).

Il est possible parfois que le raisonnement justifiant la préférence du concepteur vers des valeurs particulières de PC_i soit perdu ou que le concepteur en question ne fasse plus partie de l'équipe de développement. Les fonctions de préférence permettent dans ce cas de sauvegarder ces préférences pour ne pas perdre l'effort qui a été fait.

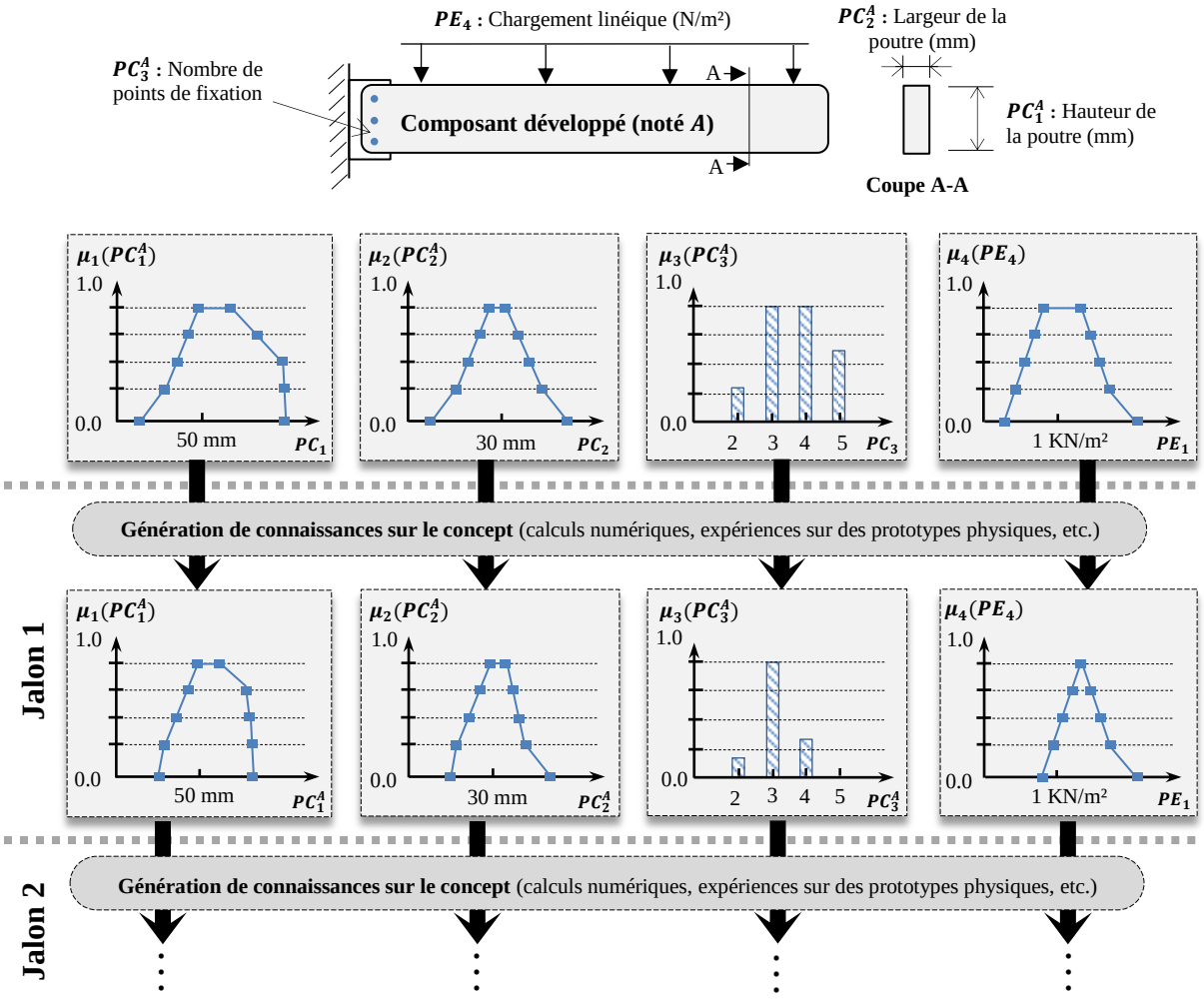


Figure III-12 Réduction de l'état d'imprécision sur les paramètres de conception.

Ces fonctions de préférence représentent pour nous un moyen pour formaliser une partie des connaissances implicites (ou tacites) des concepteurs. De plus, le formalisme de représentation utilisé favorise l'échange d'informations liées à la conception entre les acteurs

du projet. Pour notre démarche, cette connaissance (représentée par les fonctions de préférence) constitue un support de plus pour faciliter le choix des concepts. Dans certains travaux, les auteurs utilisent de simples intervalles pour exprimer la préférence du concepteur [Mal09, Fin97]. Cependant, l'utilisation des fonctions de préférence est plus expressive et permet de récupérer plus d'information des concepteurs.

Au fur et à mesure que des activités de conception sont réalisées, plusieurs possibilités sont éliminées dans les paramètres PC_i et PE_i et on s'approche ainsi de plus en plus vers des valeurs précises. Cette progression est illustrée dans la Figure III-12 via un exemple de développement d'une poutre soumise à une sollicitation mécanique extérieure.

III.3.2. Détermination des indices de variation

La notion de variation d'une donnée, introduite par Krishnan [Kri96], a déjà été présentée dans la section II.4.2.2. Elle évalue le taux avec lequel une donnée approche sa valeur finale. A l'origine, cette notion a été introduite pour étudier l'impact du chevauchement d'activités de développement, qui présentent des couplages entre eux, sur les phénomènes de redondance [Kri96]. Pour les informations ayant un impact élevé sur les activités de développement, Krishnan démontre l'importance d'avoir une variation faible de ces informations pour réduire les risques de redondances dans ces activités. Ici, la notion de variation est utilisée dans un autre contexte. Elle nous sera utile pour évaluer la criticité du risque lié au non-respect des spécifications minimales de conception (section 1.1.III.4.1). Il est souhaitable dans notre cas qu'une donnée d'entrée converge rapidement vers sa valeur finale.

Indice de variation $\boldsymbol{IV(PX_i)}$	**Description sémantique associée**
0.00	Très instable : la probabilité que le paramètre PX_i approche sa valeur finale est quasi nulle.
0.30	Instable : la probabilité que le paramètre PX_i approche sa valeur finale est faible.
0.60	Modérément instable : la probabilité que le paramètre PX_i approche sa valeur finale est modérément élevée.
0.90	Stable : la probabilité que le paramètre PX_i approche sa valeur finale est élevée.

Tableau III-1 Echelle utilisée pour évaluer l'indice de variation d'un paramètre

Comme évoqué dans la section III.3.1, la réduction de l'imprécision sur les données d'entrée (PC_i et PE_i) se fait à travers un ensemble d'activités de développement (*e.g.* calculs numériques, essais mécaniques sur des prototypes). Par conséquent, la rapidité avec laquelle l'imprécision sur ces données d'entrée est réduite est liée à l'état de progression des activités qui leur sont associées. A cause du chevauchement et de l'interdépendance des activités de développement ainsi que des différents aléas dans ces activités, il est difficile d'avoir une estimation précise du taux de variation d'une donnée. C'est pour cette raison que Krishnan [Kri96] préconise une évaluation qualitative, basée sur des estimations d'experts, et à l'aide d'une échelle sémantique (Tableau II-5). Nous utilisons la même démarche dans notre étude, avec une échelle sémantique similaire (représentée dans le Tableau III-1). Bogus et al. [Bog05] recommandent les deux étapes suivantes pour faciliter aux concepteurs l'évaluation des indices de variation en utilisant une échelle comme celle proposée par Krishnan : ils doivent dans un premier temps identifier les activités de conception qui contribuent à la définition précise de la donnée d'entrée considérée. Ensuite, ils doivent évaluer le taux de progression de ces activités, ce qui dépond principalement des ressources allouées à chaque activité et du temps de développement.

Dans la suite de ce chapitre, l'indice de variation d'un paramètre d'entrée PX_i est noté $IV(PX_i)$.

III.3.3. Détermination des indices de couplage

Les indices de couplage mesurent le degré d'influence des paramètres d'entrée (PC_i et PE_i) sur les variables de performance. D'une manière générale, ces informations (degrés d'influence) sont très utiles en conception [Woo89]. Un paramètre d'entrée qui influe faiblement sur les variables de performance peut facilement être fixé à une valeur constante (par exemple la valeur jugée la plus appropriée par le concepteur), ce qui contribue à simplifier le problème de conception. Par contre, les paramètres d'entrée dont l'influence sur les variables de performance est importante nécessitent plus d'analyses de la part des concepteurs. Nous verrons que la démarche de calcul que nous présentons dans cette section permet, non pas seulement d'évaluer ces indices de couplage, mais également d'obtenir les espaces de performance possibles en considérant l'imprécision dans les paramètres d'entrée (PC_i et PE_i).

Afin de simplifier la description de la démarche de calcul, nous considérons dans cette section un exemple de trois paramètres d'entrée PX_1, PX_2 et PX_3 (pouvant être soit des

paramètres de conception PC_i soit des paramètres du milieu environnant PE_i). La démarche peut facilement être généralisée par la suite au cas de plusieurs paramètres d'entrée. Les fonctions de préférence dans ces paramètres sont respectivement illustrées dans la Figure III-13. Nous voulons évaluer le degré d'influence de PX_1, PX_2 et PX_3 sur une certaine variable de performance notée p_i^A. Cette dernière est liée aux paramètres PX_1, PX_2 et PX_3 via la fonction δ_i^A telle que $p_i^A = \delta_i^A(PX_1, PX_2, PX_3)$. δ_i^A fait partie du modèle d'observation global δ^A lié au concept A. Dans le domaine de la logique floue, une coupe α_k, avec α_k un nombre réel compris entre 0 et 1, est définie comme l'ensemble des valeurs d'un paramètre pour lesquelles le degré d'appartenance est supérieur ou égal à α_k. La procédure décrite ci-dessous commence par une discrétisation de l'intervalle d'appartenance [0,1] en générant un nombre fini de $N + 1$ échantillons $\alpha_k = \{k/N\}$, avec $k \in \{0,1,2, \dots, N\}$ comme l'illustre la Figure III-13 ($N = 4$ dans cette figure). Les étapes ci-dessous sont ensuite suivies pour calculer les indices de couplage ainsi que les espaces de performance possibles :

- ***Etape 1 : Constitution des ordonnées***

Pour une valeur donnée α_k (avec $\alpha_k = \left\{\frac{k}{N}\right\}$ et $k \in \{1,2, \dots, N\}$), les trois coupes-α_k correspondant aux trois paramètres d'entrée PX_1, PX_2 et PX_3 sont respectivement $\left[PX_{1,\alpha_k}^{inf}, PX_{1,\alpha_k}^{sup}\right]$, $\left[PX_{2,\alpha_k}^{inf}, PX_{2,\alpha_k}^{sup}\right]$ et $\left[PX_{3,\alpha_k}^{inf}, PX_{3,\alpha_k}^{sup}\right]$. La première étape consiste à définir, pour chaque valeur α_k, toutes les combinaisons possibles $C_{j,\alpha_k} = \left\{PX_{1,\alpha_k}, PX_{2,\alpha_k}, PX_{3,\alpha_k}\right\}$ avec :

$$\begin{cases} PX_{1,\alpha_k} \in \left\{PX_{1,\alpha_k}^{inf}, PX_1^n, PX_{1,\alpha_k}^{sup}\right\} & \text{(III.7)} \\ PX_{2,\alpha_k} \in \left\{PX_{2,\alpha_k}^{inf}, PX_2^n, PX_{2,\alpha_k}^{sup}\right\} & \text{(III.8)} \\ PX_{3,\alpha_k} \in \left\{PX_{3,\alpha_k}^{inf}, PX_3^n, PX_{3,\alpha_k}^{sup}\right\} & \text{(III.9)} \end{cases}$$

Les combinaisons C_{j,α_k} obtenues sont appelées "*ordonnées*". Avec j l'indice qui désigne chaque ordonnée. Pour une valeur donnée de α_k, ils sont au nombre de 3^N. Avec N le nombre de paramètres d'entrée considéré ($N = 3$ dans notre exemple). Le nombre total des ordonnées est donc $(N + 1) \times 3^N$.

- ***Etape 2 : Calcul des performances des ordonnées***

Cette étape consiste à calculer la valeur de $p_{i,\alpha_k}^{A,j}$ correspondante à chaque ordonnée C_{j,α_k} en utilisant la fonction δ_i^A tel que :

$$p_{i,\alpha_k}^{A,j} = \delta_i^A(C_{j,\alpha_k}) \quad \text{(III.10)}$$

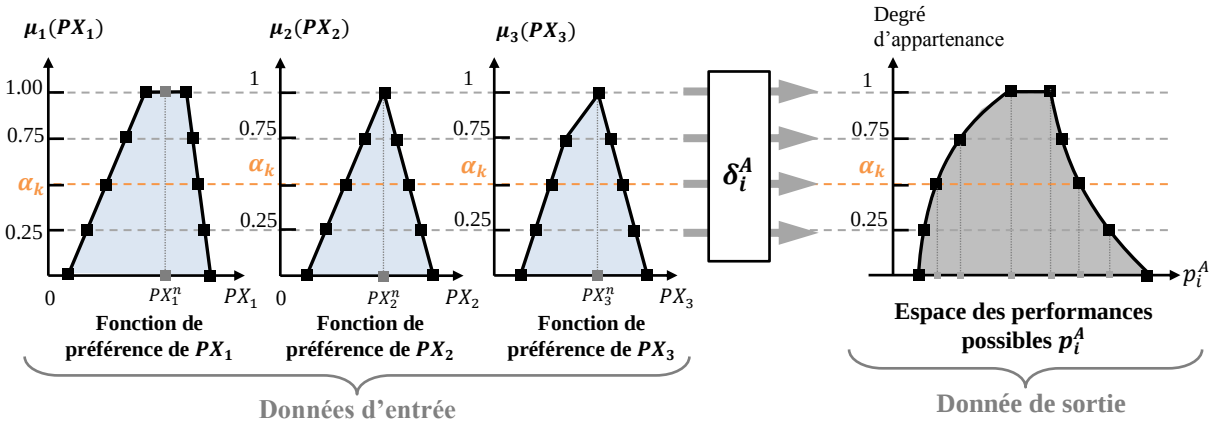
- ***Etape 3 : Détermination des espaces de performance possibles (atteignables)***

Cette étape consiste à déterminer l'espace des performances possibles (atteignables). Pour cela, la méthode du vertex proposée par Dong et Shah [Don87] est utilisée. Selon cette méthode, pour chaque valeur de α_k, l'intervalle $[p_{i,\alpha_k}^{A,inf}, p_{i,\alpha_k}^{A,sup}]$, qui est la coupe α_k correspondante à la variable p_i^A, est obtenue par les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} p_{i,\alpha_k}^{A,inf} = \min_l(p_{i,\alpha_k}^{A,l}) = \min_l(\delta_i^A(C_{l,\alpha_k})) & \text{(III.11)} \\ p_{i,\alpha_k}^{A,sup} = \max_l(p_{i,\alpha_k}^{A,l}) = \max_l(\delta_i^A(C_{l,\alpha_k})) & \text{(III.12)} \end{cases}$$

Nous avons choisi d'utiliser la méthode du vertex car elle permet d'éviter les problèmes de surestimation rencontrée lors de l'utilisation de méthodes conventionnelles d'analyse d'intervalles [Ino12].

L'espace des performances possibles est construit couche par couche en incrémentant à chaque fois la valeur de α_k suivant la discrétisation déjà établie de l'intervalle [0,1]. Le résultat obtenu est illustré dans la Figure III-13.



* PX_1^n, PX_2^n et PX_3^n sont les valeurs nominales (valeurs les plus appropriées) pour les trois paramètres PX_1, PX_2 et PX_3 respectivement

Figure III-13 Utilisation de la méthode du vertex pour la propagation d'imprécision

L'espace des performances possibles obtenu (Figure III-13) à cette étape sera utilisé pour le calcul des indices de couplage dans l'étape d'après, mais également pour d'autre parties de notre démarche.

- ***Etape 4 : Calcul des indices de couplage***

Les indices de couplage entre les paramètres PX_1, PX_2 et PX_3 et la variable de performance p_i^A sont notés respectivement $IC_{PX_1 \to p_i^A}$, $IC_{PX_2 \to p_i^A}$ et $IC_{PX_3 \to p_i^A}$. Une fois les étapes précédentes réalisées, ces indices de couplage sont directement calculés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} IC_{PX_1 \to p_i^A} = \sum_{k=1}^{N} \frac{\left|\widetilde{C_{1,\alpha_k}^{sup}} - \widetilde{C_{1,\alpha_k}^{inf}}\right|}{\left|p_{i,\alpha_k}^{A,inf} - p_{i,\alpha_k}^{A,sup}\right|} & \text{(III.13)} \\ IC_{PX_2 \to p_i^A} = \sum_{k=1}^{N} \frac{\left|\widetilde{C_{2,\alpha_k}^{sup}} - \widetilde{C_{2,\alpha_k}^{inf}}\right|}{\left|p_{i,\alpha_k}^{A,inf} - p_{i,\alpha_k}^{A,sup}\right|} & \text{(III.14)} \\ IC_{PX_3 \to p_i^A} = \sum_{k=1}^{N} \frac{\left|\widetilde{C_{3,\alpha_k}^{sup}} - \widetilde{C_{3,\alpha_k}^{inf}}\right|}{\left|p_{i,\alpha_k}^{A,inf} - p_{i,\alpha_k}^{A,sup}\right|} & \text{(III.15)} \end{cases}$$

Avec $\widetilde{C_{j,\alpha_k}^{sup}}$ l'ordonnée dans laquelle tous les paramètres d'entrée sont fixés à leurs valeurs nominales (voir Figure III-13 pour la définition de la valeur nominale) excepté le paramètre PX_j qui est fixé à la valeur PX_{j,α_k}^{sup}. Même chose pour $\widetilde{C_{j,\alpha_k}^{inf}}$ avec PX_j qui est fixé à la valeur PX_{j,α_k}^{inf}. Il faut noter que les indices obtenus au final représentent des degrés de couplage relatifs et leurs sommes est toujours égale à 1.

D'après Dong et Shah [Don87], l'utilisation de la méthode du vertex produit de bons résultats dans le cas d'une fonction δ_i^A monotone. Dans le cas d'une fonction non monotone, une discrétisation doit être faite sur les coupes α_k. Cela génère un nombre d'ordonnées beaucoup plus grand, ce qui entraine beaucoup plus de calculs.

III.3.4. Bilan sur la caractérisation des données d'entrée

A ce stade-là, tous les éléments de caractérisation des paramètres d'entrée sont réunis pour notre approche d'aide à la décision.

Afin de capitaliser les connaissances, la partie (modélisation de l'incertitude, indices de variation, indices de couplage) pourrait être intégrée dans un système de gestion de données "produit" (ou « PDM » pour Product Data Management). Cela permettrait aussi de partager l'information pour retracer l'évolution de l'état d'information au cours des phases de développement. Cependant, le développement de ce genre de systèmes ne fait pas partie de notre périmètre d'étude.

Compte tenu de l'état des données d'entrée que nous venons de caractériser, la question qui doit être considérée par la suite est la suivante : quel est le risque lié à l'utilisation de ces données sur le choix de retenir un concept donné ? Cette question sera traitée dans la section 1.1.

III.4 Sélection des concepts

A l'issue de l'étape de formalisation des préférences (section III.2) et l'étape de caractérisation des données d'entrée (section III.3), la dernière étape de notre démarche d'aide à la décision consiste à calculer les deux principaux indices sur lesquels se basera le décideur pour juger de la pertinence des concepts proposés initialement. Le premier indice, appelé $IGCR$ (indice global de criticité de risque), sert à évaluer le risque lié au non-respect des spécifications minimales du CdCF. Le deuxième indice, appelé IGD (indice global de désirabilité), permet d'explorer le potentiel de performance que le concept en question peut offrir. Les démarches permettant de calculer ces deux indices sont détaillées dans cette section.

III.4.1. Indice global de criticité du risque

Comme nous avons pu le voir dans la section III.2.4.1, dans les problèmes de prise de décision en conception de produits, les variables de performance sont toujours associées à des seuils d'acceptabilité AC_i dont le non-respect, d'au moins un, entraine le rejet de l'alternative de conception. Ici, nous nous intéressons au risque lié au non-respect de ces seuils d'acceptabilité par les différents concepts proposés initialement.

Pour un concept donné, noté A, qui fait partie des concepts proposés initialement, notons $ICR_i(A)$ l'indice qui mesure la criticité du risque lié au non-respect du seuil d'acceptabilité AC_i, correspondant à la variable de performance p_i. Dans notre étude, nous considérons que l'évaluation de la criticité du risque répond aux deux questions suivantes : Quelles sont les chances pour que le seuil minimal d'acceptabilité AC_i puisse être respecté ? Quelles sont les chances pour qu'on puisse vérifier le respect de ce seuil ? Cette deuxième question est aussi importante que la première car les entreprises souhaitent toujours éviter des remises en cause tardives, et donc couteuses, des choix des concepts. En adéquation avec ces deux questions considérées, les deux indices suivants sont identifiés et évalués par la suite : l'occurrence $O_i(A)$ et la détectabilité $D_i(A)$. L'indice $ICR_i(A)$ est obtenu par la multiplication de ces deux indices comme le montre l'équation (III.16).

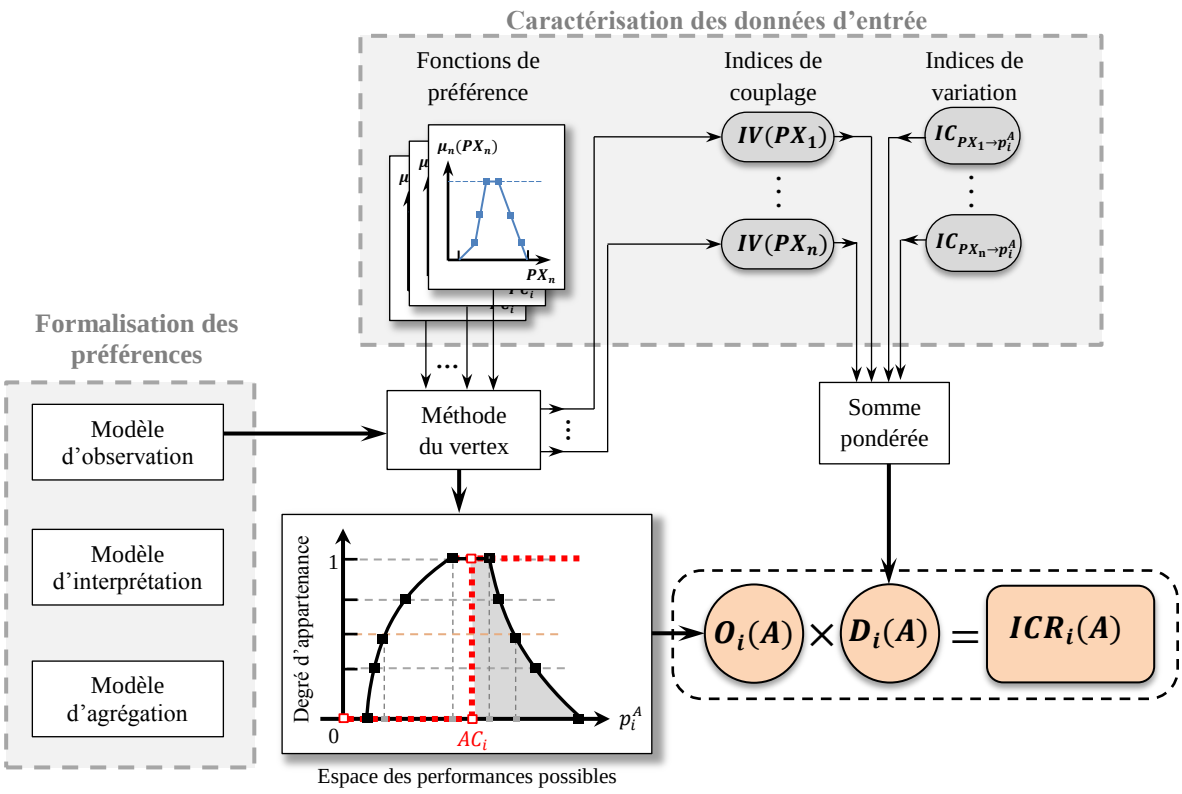
$$ICR_i(A) = O_i(A) \times D_i(A) \tag{III.16}$$

Les indices $ICR_i(A)$ sont compris entre 0 et 1. Une valeur de 0 signifie que le concept n'a aucune chance de respecter le seuil d'acceptabilité. Une valeur de 1 signifie qu'il n'y a aucun risque que le concept A ne puisse pas respecter le seuil d'acceptabilité AC_i.

Finalement, en ayant les indices de criticité du risque correspondant aux différentes variables de performance, l'indice global de criticité de criticité de risque, noté $IGCR(A)$, est obtenu en prenant la valeur minimale des différents $ICR_i(A)$, comme l'indique la relation ci-dessous.

$$IGCR(A) = \min_{i \in \{1,\dots,n\}} ICR_i(A) \tag{III.17}$$

Avec n le nombre des variables de performance. L'indice $IGCR(A)$ représente le risque d'insuccès lié au développement d'un concept A. Nous utilisons ici le minimum car nous souhaitons être conservatif dans l'évaluation du risque : nous considérons que la variable de performance la plus risquée renseigne sur le risque global lié au concept.



* $\{PX_1, \dots, PX_n\}$: peuvent être soit des paramètres de conception soit des paramètres du milieu environnant
* n : nombre des paramètres de conception + nombre des paramètres du milieu environnant

Figure III-14 Démarche globale pour l'évaluation de l'indice de criticité de risque d'une variable p_i^A

La Figure III-14 illustre la démarche globale pour l'évaluation de l'indice global de criticité de risque associé à une variable de performance. Dans la suite de la section III.4.1, nous présentons en détail la démarche pour calculer les deux indices $O_i(A)$ et $D_i(A)$.

III.4.1.1 L'occurrence

Compte tenu de l'imprécision dans la définition du produit (paramètres de conception) ainsi que du milieu environnant (paramètres du milieu environnant), les variables de performance p_i^A pour un concept donné (concept A) ne peuvent pas être évaluées d'une manière précise dans les premières phases de développement. Il en résulte une difficulté pour le concepteur de vérifier, de manière catégorique, si les spécifications minimales (définies par les seuils AC_i) peuvent être respectées. Dans ces conditions d'imprécision, il apparaît plus approprié de considérer la probabilité de non-respect d'un seuil d'acceptabilité. Dans ce sens, l'occurrence $O_i(A)$ est introduite dans notre étude pour évaluer cette probabilité.

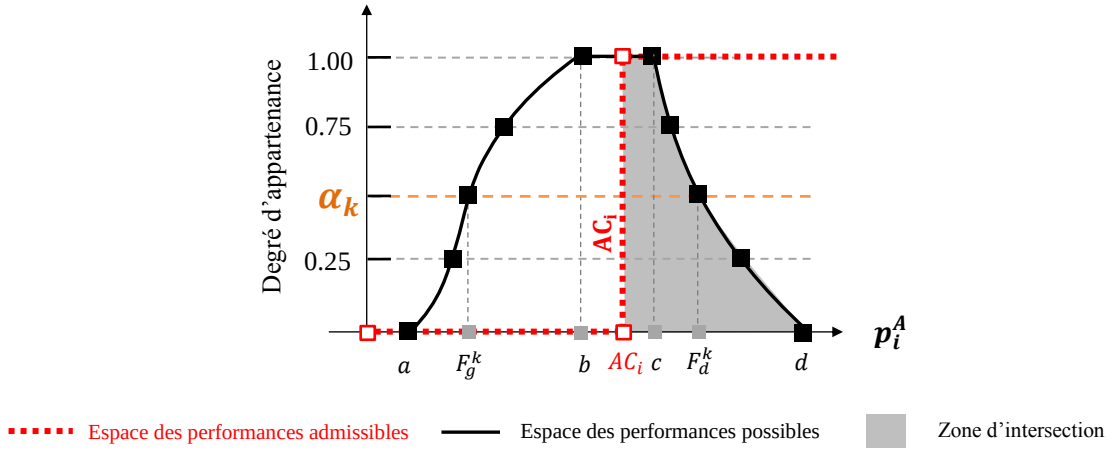


Figure III-15 Comparaison de l'espace des performances possibles et l'espaces des performances admissibles

Une grande partie des calculs nécessaires à l'évaluation de l'occurrence de risque a déjà été réalisée lors de l'étape de calcul des indices de couplage (section III.3.3). La représentation par les nombres flous de la performance, qui a déjà été déterminée lors de cette étape, sera notre point de départ ici. Cette représentation, illustrée dans la Figure III-15, traduit l'espace des performances possibles pour une variable de performance donnée. Il convient de noter que tout l'intérêt de ces espaces des performances est qu'ils résultent de l'association de deux natures de connaissances : une connaissance de nature explicite, représentée par les modèles d'observation δ_i^A utilisés et, une connaissance de nature implicite, obtenue au travers de l'expérience et du savoir-faire des concepteurs et formalisée par le biais des fonctions de

préférence. Sur la Figure III-15, nous avons aussi représenté le seuil d'acceptabilité minimal à respecter, délimitant l'espace des performances admissibles.

Nous définissons l'occurrence $O_i(A)$ correspondante à une variable p_i^A comme le rapport entre la surface de chevauchement (zone d'intersection entre l'espace des performances possibles de p_i^A et l'espace des performances admissibles) et l'espace des performances possibles (voir Figure III-15). Cette zone de chevauchement est représentée graphiquement dans la Figure III-15. La méthode des α-coupes est utilisée pour calculer cette valeur. Elle est expliquée dans les équations (III.18), (III.19) et (III.20).

$$O_i(A) = 1 - \frac{1}{N}\sum_{\alpha_k=1}^{N} C^{\alpha_k} \tag{III.18}$$

Avec :

$$C^{\alpha_k} = \begin{cases} 0 & \text{si } AC_i > F_d^k \\ \dfrac{AC_i - F_g^k}{F_d^k - F_g^k} & \text{si } F_g^k < AC_i \leq F_d^k \\ 1 & \text{si } AC_i \leq F_g^k \end{cases} \tag{III.19}$$

Et :

$$\begin{cases} F_g^k = a + \dfrac{k}{N} \times (b - a) \\ F_d^k = c + \dfrac{k}{N} \times (d - c) \end{cases} \tag{III.20}$$

Avec N le nombre de discrétisation choisi de l'intervalle [0,1]. Les autres grandeurs sont expliquées sur la Figure III-15.

L'indice $O_i(A)$ obtenu à la fin peut être défini comme de degré de vérité de l'affirmation suivante : " *le concept A respecte le seuil minimal d'acceptabilité* ". Il est compris dans l'intervalle [0,1]. La valeur 1 correspond au cas où le concept respecte parfaitement le seuil minimal d'acceptabilité. La valeur 0 correspond au cas où le concept ne respecte pas du tout le seuil minimal d'acceptabilité. La Figure III-16 illustre les trois cas qui peuvent être rencontrés.

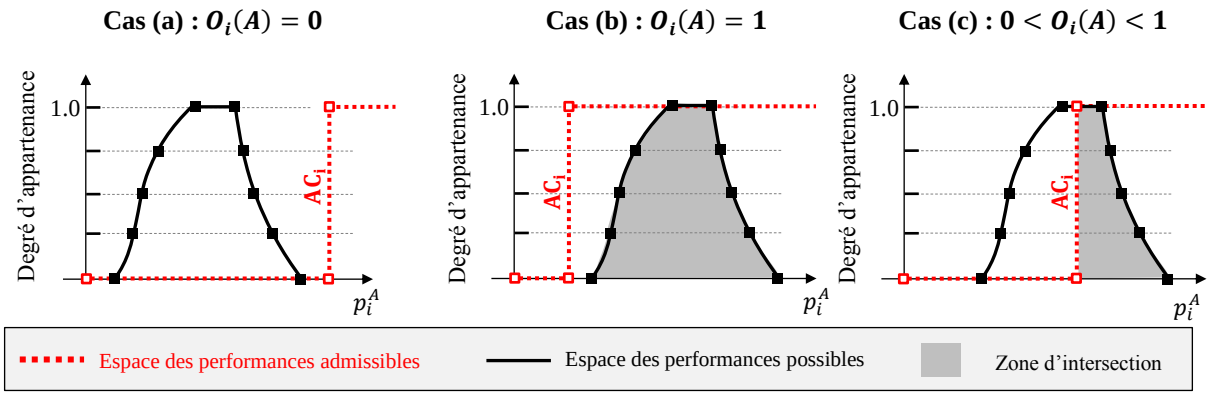


Figure III-16 Illustration des trois cas possibles dans le calcul de l'occurrence

III.4.1.2 La détectabilité

Comme nous l'avons expliqué dans notre description du processus industriel de développement (section III.1.1), à l'issue d'une revue de validation, un ensemble d'activités de développement est planifié pour les jalons qui suivent. Ces activités contribuent à réduire l'imprécision sur les données d'entrée (notamment les PC_i et PE_i), ce qui participe par la même occasion à rendre l'évaluation des performances (les variables p_i^A) plus précise. La capacité à affiner une variable de performance est donc en lien avec la progression des activités de développement qui ont été planifiées par l'entreprise, comme par exemple les calculs numériques, les essais mécaniques sur des prototypes ou les études sur l'environnement de fonctionnement (pour affiner des PE_i). Nous intégrons dans notre étude la détectabilité $D_i(A)$, liée à une variable p_i^A, car nous considérons que la criticité du risque est amplifiée lorsqu'il devient difficile de faire converger la variable de performance p_i^A vers sa valeur définitive.

Pour déterminer la détectabilité $D_i(A)$ associée à une variable p_i^A, nous avons besoin de deux informations sur les données d'entrée (PC_i^A et PE_i) : leurs taux de variation, traduit par les indices de variation, et leur impact sur la variable p_i^A, exprimé par les indices de couplage. La détectabilité $D_i(A)$ est déterminée par l'addition des indices de variation, chacune étant pondérée par l'indice de couplage correspondant :

$$D_i(A) = \sum_{j=1}^{n_A} IC_{PC_j^A \to p_i^A} \times IV\left(PC_j^A\right) + \sum_{j=1}^{n_e} IC_{PE_j \to p_i^A} \times IV\left(PE_j\right) \qquad \text{(III.21)}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} 0 \leq IC_{PC_j^A \to p_i^A} \leq 1 \quad \text{et} \quad 0 \leq IC_{PE_j \to p_i^A} \leq 1 \\ \sum_{j=1}^{n_A} IC_{PC_j^A \to p_i^A} + \sum_{j=1}^{n_e} IC_{PE_j \to p_i^A} = 1 \end{cases}$$

Avec n_A le nombre de paramètres de conception pour le concept A et n_e le nombre de paramètres du milieu environnant (le même pour tous les concepts). Étant donné que les indices $IC_{PC_j^A \to p_i^A}$ sont normalisés (compris entre 0 et 1), la détectabilité finale $D_i(A)$ aura la même plage que les indices de variation (entre 0.2 et 1) et sa signification peut être déterminée en utilisant l'échelle sémantique dans le Tableau III-1.

III.4.2. Indice global de désirabilité

Dans la section III.4.1, l'indice $IGCR(A)$ a été proposé pour évaluer les chances d'insuccès d'un concept donné. Certes, il s'agit d'un élément crucial à prendre en considération lors de la prise de décision. Cependant, la décision finale ne tient pas uniquement au niveau de risque. En effet, l'acceptation de ce risque par le décideur est dépendante des performances que peut atteindre le concept au cas où le respect des seuils d'acceptabilité est assuré. En d'autres termes, la question à laquelle il faut répondre est la suivante: si l'entreprise décide d'investir des ressources et du temps pour développer le concept en question, quels niveaux de performances pourrait-elle espérer ? Cette question devient particulièrement pertinente lorsque l'entreprise dispose d'un concept préexistant qui a déjà été développé, validé et qui présente ainsi un risque très faible. L'exemple illustré dans la Figure III-17 montre deux concepts présentant la même criticité de risque mais qui ne sont pas équivalents : le concept A dans cet exemple présente un bien meilleur potentiel de performance.

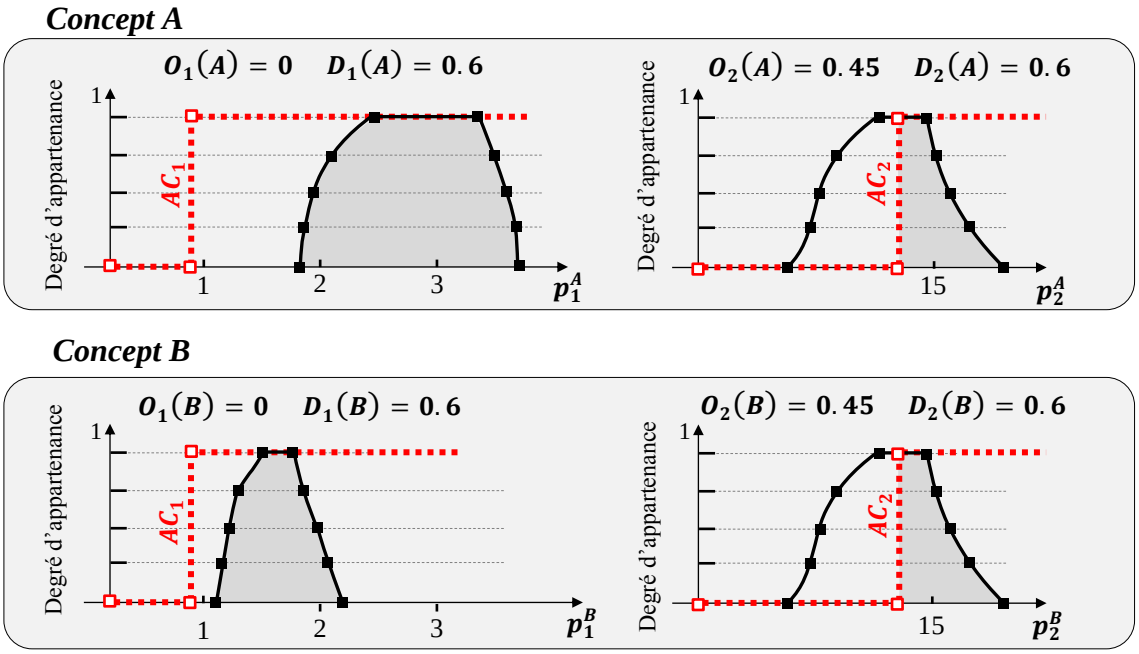


Figure III-17 Exemple illustrant la limite de l'utilisation de l'indice global de criticité de risque seul

Ainsi, l'indice global de désirabilité est donc introduit dans cette section et vise à explorer les niveaux de performance que peuvent atteindre les concepts développés. Nous intégrons dans le calcul de cet indice les préférences subjectives du décideur en utilisant les modèles d'interprétation et d'agrégation définis auparavant.

Etant donné l'imprécision dans les paramètres d'entrée (PC_i et PE_i), les indices globaux de désirabilité seront également imprécis. Ainsi, nous utilisons dans cette section les outils liés à la logique floue, notamment la méthode du vertex [Don87], pour propager les imprécisions dans les données d'entrée.

Durant l'étape de calcul des indices de couplage (section III.3.3), un ensemble d'ordonnées a été généré et pour chacune de ces ordonnées, les variables de performance ont été calculées par le modèle d'observation δ^A. Ces résultats de performance sont réutilisés dans cette partie. La construction de l'espace des désirabilités possibles par la méthode du vertex est illustrée dans la Figure III-18. Pour une valeur donnée de α_k (avec $\alpha_k = \{k/N\}$ et $k \in \{1,2,\dots,N\}$), les étapes suivantes sont à suivre :

- ✓ Nous utilisons le modèle $\varphi \circ \phi$ (association du modèle d'interprétation et du modèle d'agrégation) pour associer directement, à chaque ordonnée C_{l,α_k}, une valeur globale de désirabilité à partir des valeurs de performance $p_{i,\alpha_k}^{A,l}$ déjà évaluées durant l'étape de calcul des indices de couplage (avec $i \in \{1,2,\dots,n\}$ et n le nombre de variables de performance).
- ✓ La méthode du vertex [Don87] est à nouveau utilisée ici pour propager les imprécisions dans les données d'entrée. Ainsi, l'intervalle $\left[IGD_{\alpha_k}^{A,inf}, IGD_{\alpha_k}^{A,sup}\right]$, qui représente la coupe α_k correspondante à notre grandeur de sortie IGD^A, est calculée par les équations (III.22) et (III.23).

$$IGD_{\alpha_k}^{A,inf} = \min_l(\varphi \circ \phi([p_{1,\alpha_k}^{A,l}, \dots, p_{n,\alpha_k}^{A,l}])) \quad \text{(III.22)}$$

$$IGD_{\alpha_k}^{A,sup} = \max_l(\varphi \circ \phi([p_{1,\alpha_k}^{A,l}, \dots, p_{n,\alpha_k}^{A,l}])) \quad \text{(III.23)}$$

En obtenant les intervalles $\left[IGD_{\alpha_k}^{A,inf}, IGD_{\alpha_k}^{A,sup}\right]$ pour chacune des valeurs de α_k, il devient possible de construire l'espace des désirabilités possibles (Figure III-18).

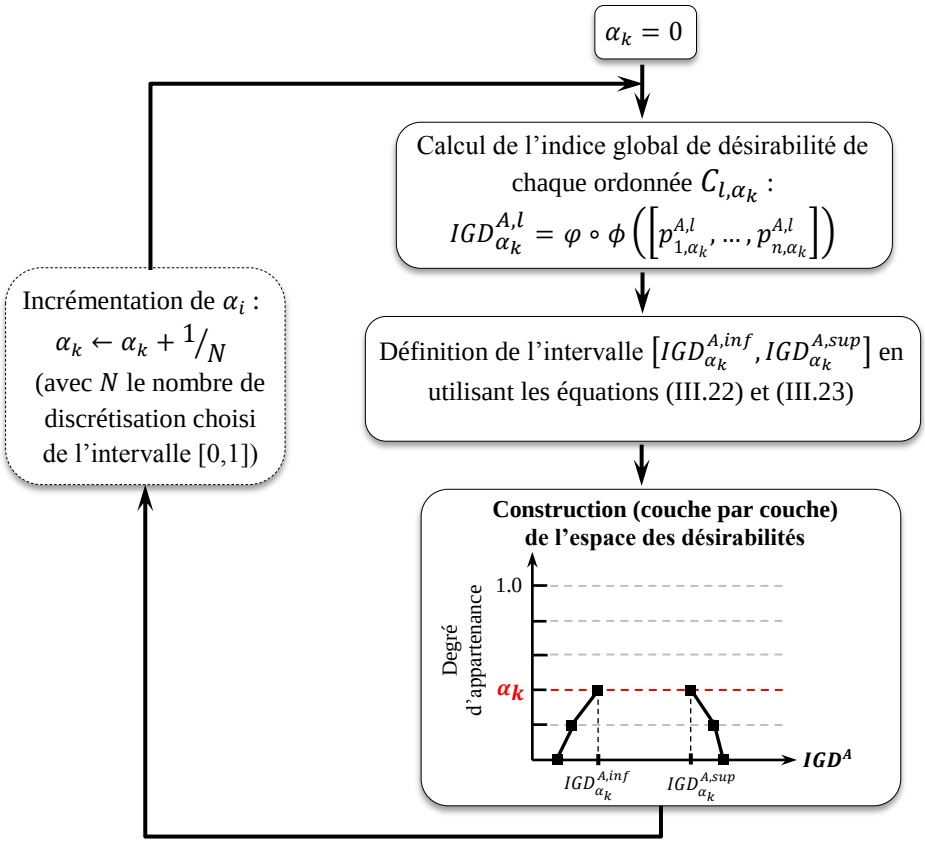


Figure III-18 Etapes de calcul de l'espace de désirabilités possibles

Notons que dans le cas où les performances obtenues (p_i^A) sont précises, il devient facile de comparer directement les concepts entre eux sans passer par l'agrégation. Ça peut même être une meilleure manière de faire parce que, d'une part, le nombre d'objets (concepts dans notre cas) à comparer est faible et, d'autre part, il peut être difficile dans certaines situations de proposer un opérateur d'agrégation qui traduit correctement les préférences subjectives du décideur (erreurs dans l'évaluation des poids w_i ou des paramètres d'agrégation s).

III.4.3. Bilan et exploitation des deux indices

Nous apportons dans la section III.4 les deux éléments jugés essentiels à la prise de décision : les chances d'insuccès associées aux différents concepts et leur potentiel de performance. La Figure III-19 illustre un exemple de résultats obtenus à l'issue du calcul des deux indices, l'IGD et l'$IGCR$. Dans cette figure, l'imprécision dans l'évaluation de l'IGD est représentée par un niveau de gris proportionnel au degré d'appartenance.

En ayant à disposition ces deux éléments (IGD et $IGCR$), il revient au décideur de choisir les concepts à développer selon son aversion au risque et selon la culture et le cadre réglementaire de l'entreprise. Cela dépend des enjeux liés au développement du produit.

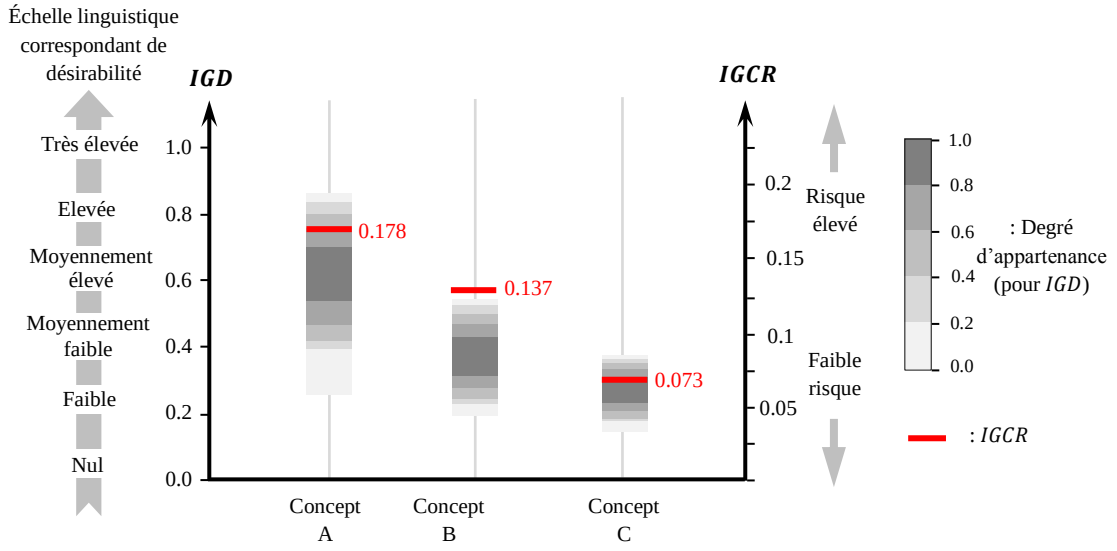


Figure III-19 Exemple de résultats obtenus par l'utilisation des deux indices

III.5 Conclusion

Une démarche a été proposée dans ce chapitre pour faciliter le choix des concepts dans un contexte caractérisé par l'imprécision et le manque de connaissances. Dans cette démarche, l'indice global de criticité de risque permet d'estimer les chances d'insuccès liées aux différents concepts en tenant compte de l'état des données disponibles (niveau d'imprécision, taux de variation, couplage, etc). Un deuxième indice permet d'explorer le potentiel de performance atteignable par chaque concept en intégrant les préférences subjectives du décideur, formalisées au travers du modèle d'interprétation et du modèle d'agrégation. La démarche proposée dans ce chapitre sera appliquée dans le cadre d'un projet de développement de centrales solaires à concentration dans le chapitre V.

Étant donné qu'une bonne partie de la connaissance générée habituellement en conception est de nature implicite (ou tacite), l'intérêt principal de la démarche proposée est sa capacité à combiner cette connaissance, notamment par le biais des fonctions de préférence, avec une connaissance de nature explicite, qui a été traduite dans notre étude par les modèles d'observation (modèle RDM, etc.). Cependant, l'approche proposée fait appel à beaucoup d'opérations mathématiques complexes, notamment les opérations de calcul liées à la logique floue, qui ne font pas partie des taches conventionnelles réalisées par les concepteurs. Cette difficulté peut être surmontée par le développement d'outils informatiques capables d'automatiser ces calculs et qui peuvent être directement intégrés à la maquette numérique du produit, réunissant aussi les autres modèles d'évaluation des performances (modèle d'observation).

Le coût de développement lié au paramétrage des modèles formalisant les préférences (modèle d'interprétation d'agrégation) ainsi qu'à la caractérisation des données d'entrée est contrebalancé par la possibilité de capitaliser beaucoup de connaissances qui sont d'habitude tacites et très peu formalisées dans les bureaux d'étude. Une telle capitalisation devient très demandée dans les entreprises étant donné l'aspect de plus en plus collaboratif des projets de développement et la nécessité de centraliser et de faciliter le partage de la connaissance entre les parties prenantes du projet de développement.

CHAPITRE IV

Démarche de sélection des paramètres de conception

IV.1 Introduction

La démarche proposée dans le chapitre III permet de réduire le nombre des concepts proposés au début du projet. Les efforts et les ressources de l'entreprise pourront ainsi être concentrés sur les concepts les plus prometteurs. Le chapitre III traite des phases de développement très en amont dans le projet. Dans le chapitre actuel, nous nous positionnons dans des phases de développement plus avancée, dont lesquelles nous supposons que le choix du concept est figé. A ce stade de développement, le concept retenu doit faire l'objet de plus d'analyse en vue de maximiser la satisfaction des objectifs de conception. Nous nous intéressons dans ce chapitre à la phase de conception architecturale qui vise à définir les principaux choix de conception, appelés paramètres de conception (PC_i) dans notre étude, comme les matériaux, les composants principaux (types, positionnement) et les dimensions structurantes [Pah96]. La conception architecturale constitue donc le passage d'un concept, qui est une représentation abstraite, vers une architecture du produit qui remplit les objectifs de conception attendus et dont les caractéristiques sont bien définies. C'est souvent la phase qui prend le plus de temps dans un processus de développement [Lan11]. Bien que les plus grands enjeux résident dans le choix du concept, la conception architecturale constitue aussi une étape importante et peut avoir un impact considérable sur le coût global du cycle de vie [Zim01].

Avant de présenter la démarche proposée pour l'aide au choix des paramètres de conception, nous présentons dans la suite de la section IV.1 le contexte industriel et nous expliquons plus en détail les problématiques liées à la phase architecturale de conception.

IV.1.1. Démarche itérative pour la conception architecturale

L'étape de conception architecturale a longtemps été basée sur une démarche itérative du type "*essai/erreur*" pour définir les paramètres de conception PC_i. Cette démarche de développement est illustrée dans la Figure IV-1. Le bureau d'étude commence par dessiner l'assemblage, souvent via un outil de type CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et propose une première solution candidate en fixant les paramètres de conception. Ensuite, le bureau de calcul effectue un ensemble d'études afin de vérifier le respect des spécifications du cahier des charges. La solution candidate initialement proposée est alors régulièrement reprise par les ingénieurs du bureau d'étude jusqu'à ce que toutes les spécifications soient vérifiées par le bureau de calcul. La solution candidate obtenue est ensuite prototypée et une série

d'essais physiques est effectuée. Dans le cas où le prototype physique respecte les spécifications, la solution candidate est validée. Dans le cas contraire, la solution candidate est reprise par le bureau d'étude et le cycle recommence. Le produit peut passer alors par plusieurs versions durant son cycle de développement avant d'aboutir à une version finale qui respecte les spécifications du CdCF.

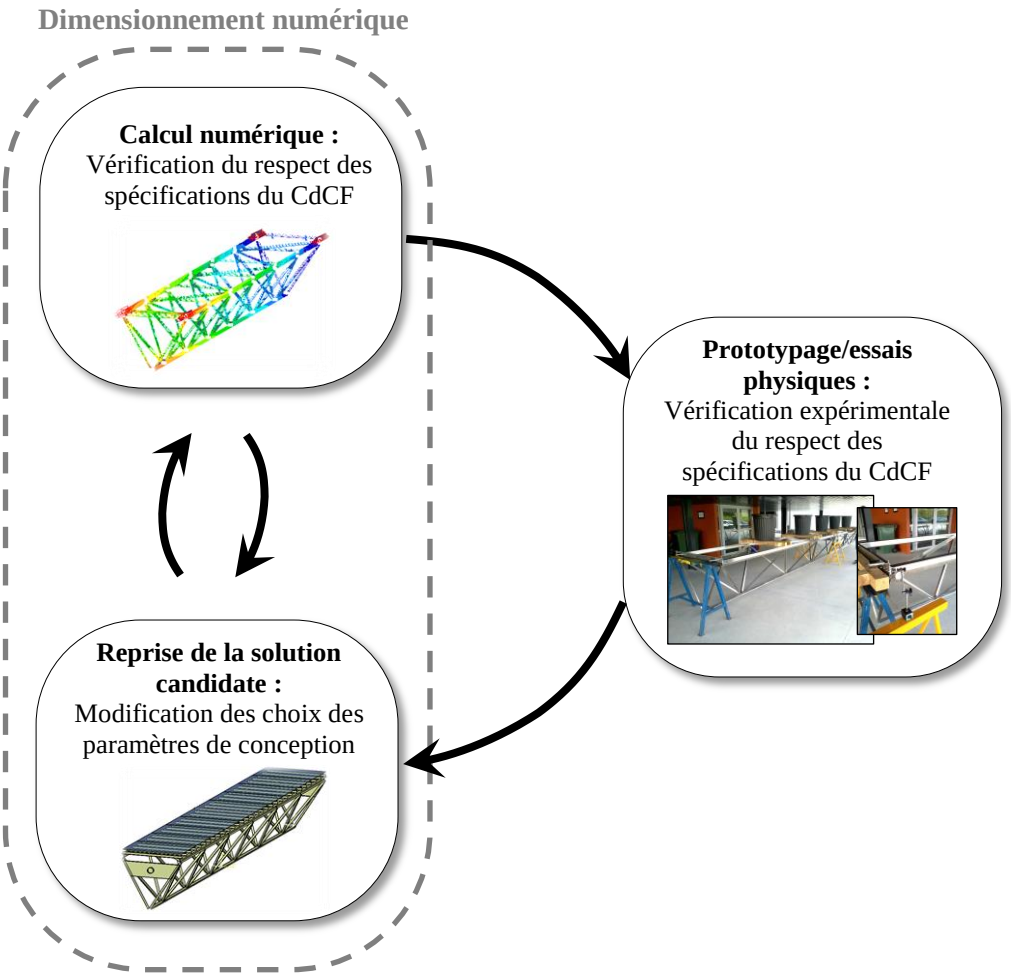


Figure IV-1 Démarche itérative dans la conception architecturale

La définition de l'architecture (détermination des PC_i) suit un processus séquentiel et nécessite souvent de faire des choix de valeurs de PC_i pour pouvoir en définir d'autres. Ces choix sont souvent basés sur les habitudes professionnelles et sur l'expérience et le savoir-faire des concepteurs [Mat02]. Le processus de développement emprunte un chemin labyrinthique qui s'arrête dans le meilleur des cas à la première solution candidate jugée satisfaisante (respectant les spécifications du CdCF). Par conséquent, l'espace de conception exploré est restreint ce qui aboutit la plupart du temps à une solution de conception sous optimale [Saw02]. Ces problématiques sont récurrentes dans l'industrie.

IV.1.2. Vers une conception basée sur les modèles

Jusqu'à aujourd'hui, la démarche itérative (Figure IV-1) est encore très largement répondue dans l'industrie. Cependant, grâce à la puissance informatique ainsi qu'aux progrès considérables dans le développement de modèles de comportement capables de prendre en compte les phénomènes complexes réels dans toutes les disciplines de la mécanique, une grande partie du temps de développement dans les départements de conception est consacrée aux calculs numériques. La phase de dimensionnement numérique, illustrée dans la Figure IV-1, devient plus conséquente dans les processus de développement modernes. Les modèles de comportement utilisés permettent une exploration rapide et peu couteuse de l'espace de conception. Beaucoup de possibilités peuvent ainsi être éliminées avant de procéder au prototypage et à l'expérimentation physique. On parle alors de Prototypage Virtuel. Cela a permis de réduire considérablement le recours au prototypage physique, permettant à l'entreprise de gagner du temps et de l'argent. De cette évolution est né le concept de maquette numérique qui remplace de plus en plus la maquette physique traditionnelle.

Compte tenu des hypothèses et approximations adoptées dans ces modèles de comportement (qui ne sont pas intégrés à la maquette numérique), l'exactitude des résultats fournis et leur capacité à représenter de manière réaliste le comportement de la solution candidate reste une question cruciale pour les concepteurs. De plus, la solution candidate évolue beaucoup le long du cycle de développement et elle est alors susceptible de sortir du domaine de validité pour lequel le modèle de comportement a été conçu. D'une manière générale, l'écart observé entre les résultats fournis par le modèle et le comportement réel peut avoir trois sources :

- ✓ L'incertitude sur les hypothèses qui conduit à bien définir le domaine de validité ;
- ✓ L'incertitude sur l'identification des paramètres qui alimentent le modèle (évoqués dans la section II.3.3.). Il est souvent possible de trouver les paramètres les mieux identifiés pour valider une modélisation par rapport à une expérience, plus difficile de les trouver pour en valider plusieurs ;
- ✓ L'incertitude sur la précision de la résolution numérique ;

A défaut de méthodes adéquates pour mesurer le niveau d'exactitude des modèles utilisés ainsi que l'impact de ce niveau d'exactitude sur la fiabilité de la prise de décision, le concepteur se trouve souvent contraint de recourir au prototypage physique à chaque évolution de la solution candidate. Le prototypage physique se révèle être le seul moyen pour

vérifier l'exactitude des résultats obtenus par les modèles de comportement. Le recours excessif au prototypage physique reste jusqu'à ce jour une cause fréquente de dépassements des budgets de développement et des délais de développement.

IV.1.3. Interaction entre maquette numérique et prototypage physique

La maquette numérique (ou DMU pour "*Digital Mockup*"), évoquée brièvement dans la section précédente, est une représentation numérique étendue du produit développé. Elle ne se limite pas seulement à une définition géométrique du produit mais constitue une plateforme numérique de développement qui permet de capitaliser, gérer et échanger toutes les données relatives aux différentes phases du cycle de vie du produit [Ber07]. Elle permet de simuler et visualiser le comportement aux sollicitations physiques extérieures, le processus de fabrication, etc. Les intervenants de différents métiers travaillent ensemble pour enrichir et gérer la maquette numérique tout au long du cycle de développement. Etant donné son adéquation avec l'ingénierie concourante et le contexte collaboratif des projets de développement, la DMU est devenu un format de représentation et un outil incontournable dans les grandes industries. Elle peut être vue comme une substitution du produit réel par un modèle d'information. Les modèles de comportement ont une place centrale dans la DMU car ils permettent de substituer l'expérimentation physique pour observer le comportement du produit et vérifier le respect des spécifications du CdCF [Ber07].

D'un autre côté, la fabrication de prototypes et l'expérimentation physique qui s'ensuit restent indispensables dans la plupart des applications et permettent, non pas seulement de vérifier l'exactitude des résultats des modèles de comportement de la DMU, mais de fournir une grande quantité de connaissances sur le produit. Le retour d'expérience lié à cette phase de prototypage physique contribue à une meilleure compréhension des phénomènes physiques qui régissent le comportement du produit. Formaliser ces connaissances pour ensuite les intégrer dans la DMU constitue un enjeu important car, pour que la DMU puisse être utilisée pour faire des choix de conception et éviter un recours excessif au prototypage physique, il faut qu'elle puisse intégrer un maximum de connaissances sur le produit, y compris les connaissances acquises à l'issue du prototypage physique réalisé antérieurement par l'entreprise.

IV.1.4. Objectifs et approche proposée

Le travail proposé dans ce chapitre est né d'un besoin industriel qui consiste à réduire le délai de développement en diminuant le nombre d'itérations "*essai-erreur*" et le nombre de

prototypes fabriqués au cours de la phase de conception architecturale. Pour répondre à ce besoin, l'approche suivie dans ce chapitre vise à explorer un vaste espace de conception en utilisant les modèles de comportement développés par les concepteurs. Etant donné que ces modèles présentent souvent une certaine inexactitude par rapport au comportement réel, nous souhaitons intégrer cet aspect lors de l'évaluation des solutions candidates. Une des difficultés majeures dans notre étude est de valoriser le retour d'expérience lié à la phase de prototypage en vue de qualifier l'exactitude des modèles de comportement utilisés.

Il est possible de transformer une solution par l'ensemble de paramètres de conception choisis, intégré dans une structure de solution générique (pattern ou vecteurs propres de l'espace de solutions). L'équation (IV.1) traduit cette formulation dans l'espace des solutions prédéfinies.

$$\overrightarrow{X^j} = \left[PC_1^j, PC_2^j, \dots, PC_i^j, \dots, PC_n^j\right] \text{ avec } n \in \mathbb{N}^* \text{ et } PC_i \in S_i \qquad \text{(IV.1)}$$

Avec n le nombre des paramètres de conception du concept retenu, j l'indice de l'alternative de conception, S_i l'ensemble des valeurs admissibles du paramètre PC_i. L'ensemble des solutions candidates est appelé *"espace de conception"* et noté $\overline{\Psi}$.

La démarche proposée pour définir l'architecture du produit (choix des PC_i) consiste à chercher dans l'espace de conception $\overline{\Psi}$ la solution candidate qui maximise la satisfaction des objectifs de conception et qui minimise le risque liée à l'inexactitude des modèles de comportement utilisés. Etant donné le nombre élevé de solutions candidates à explorer dans la phase de conception architecturale, il convient d'automatiser le processus de traitement de ces solutions.

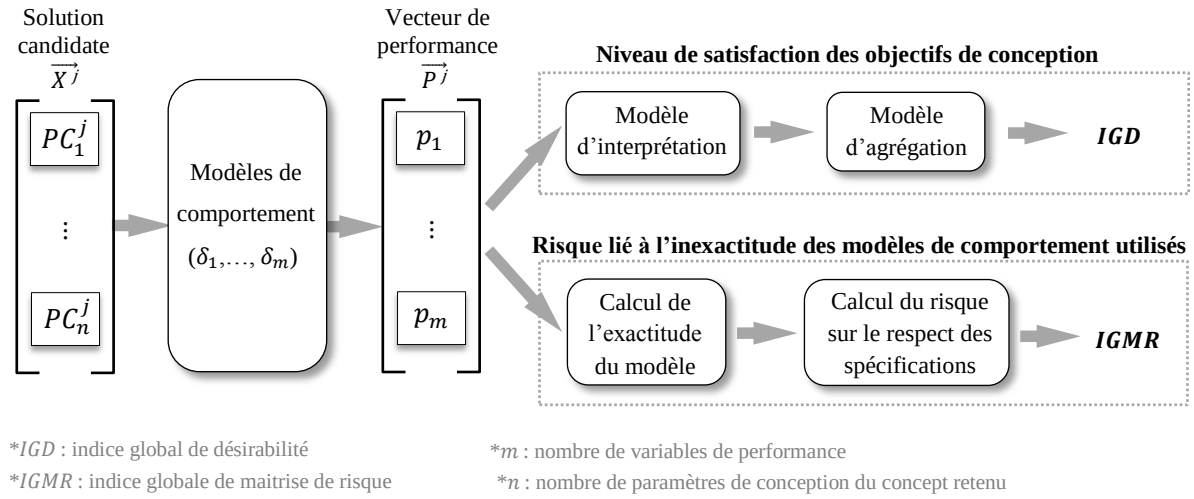


Figure IV-2 Structure globale de la démarche proposée

Ainsi, nous proposons de traiter le problème via deux modèles, chacun étant associé à un indicateur de sortie. Le premier modèle a pour objectif d'**évaluer le degré de satisfaction des objectifs de conception** en se basant sur les modèles de comportement proposés et sans considération de leur niveau d'exactitude. Les préférences subjectives du décideur sont intégrées via les modèles d'interprétation et d'agrégation développés dans le chapitre III (section III.2.4.). Le deuxième modèle a pour objectif d'**évaluer le risque lié à l'inexactitude des modèles de comportement utilisés**. Une telle décomposition a pour objectif de faciliter la prise de décision en permettant au décideur d'exprimer son aversion au risque. La structure globale de la démarche est donnée dans la Figure IV-2.

Avant de présenter en détail les deux indicateurs utilisés, nous introduisons d'abord la méthode utilisée pour évaluer l'exactitude des modèles de comportement utilisés. Cette évaluation d'exactitude sera utilisée pour évaluer l'indice de maitrise de risque.

IV.2 Proposition d'un indicateur d'exactitude des modèles de comportement

Le comportement des solutions candidates a déjà été formalisé dans la section III.2.3. Le modèle d'observation proposé, noté δ, permet de distinguer entre les paramètres PC_i décrivant les caractéristiques de la solution candidate, les paramètres PE_i décrivant le milieu environnant du produit et, les variables p_i décrivant le comportement obtenu de la solution candidate étudiée. A ce stade de développement, nous supposons que les paramètres PE_i ont été fixés (le milieu environnant est bien défini). Chaque variable de performance p_i est évaluée par le biais d'un modèle de comportement δ_i qui lui est associé. Les variables de performance fournies permettent de vérifier la satisfaction des objectifs de conception. Les modèles de comportement δ_i doivent garantir un niveau de confiance suffisamment élevé si nous voulons nous baser sur les variables résultantes p_i pour faire des choix de conception. Ainsi, nous nous intéressons dans cette section à évaluer l'exactitude de des modèles de comportement δ_i.

L'exactitude, selon Travé-Massuyès [Tra97], procure une appréciation de la distance entre le résultat du modèle de comportement et le comportement de *"référence"*, qui est généralement le comportement observé du système réel. Il est important de ne pas confondre entre exactitude et précision d'un modèle de comportement. La différence entre les deux termes est expliquée dans la section II.5.1. D'une manière générale, il est difficile d'évaluer l'exactitude d'un modèle de comportement δ_i. Ceci est particulièrement vrai lorsqu'il s'agit

d'un modèle purement prédicatif pour lequel, même si l'objet d'étude est constitué d'éléments connus, il est impossible d'observer le comportement réel de cet objet. Dans ce cas-là, il n'existe pas encore, à notre connaissance, de méthodes pour mesurer l'exactitude du modèle de comportement. Seule une hiérarchie qualitative des hypothèses adoptées peut être faite [Lem14]. Dans notre contexte, nous supposons disposer d'une référence qui correspond à une solution candidate dont le comportement (formalisé par les variables p_i) est connu d'une manière expérimentale que nous qualifierons alors d'exacte. Cette solution, qui sera appelée par la suite "*solution de référence*", sera notre point de départ pour qualifier l'exactitude de nos modèles de comportement δ_i. En supposant avoir cette solution de référence, nous partons de la définition d'exactitude de Travé-Massuyès et al. [Tra97], qui a été donnée au début de cette section, pour mesurer l'exactitude. Cependant, cette définition engendre deux principales questions :

- ✓ Comment pouvons-nous définir une mesure de distance entre solution de référence et résultats du modèle de comportement ;
- ✓ Comment pouvons-nous généraliser la mesure d'exactitude à tout l'espace de conception ;

Ces deux questions seront traitées dans les sections qui suivent. Dans la section IV.2.1, nous présentons plus en détail la notion de solution de référence. Dans la section IV.2.2, nous expliquons comment la solution de référence est utilisée pour obtenir une mesure objective de l'exactitude d'une modèle de comportement en se basant sur la définition de l'exactitude de Travé-Massuyès et al. [Tra97]. Dans la section IV.2.3, nous proposons une deuxième mesure de l'exactitude, qui est de nature subjective, et qui a pour objectif de généraliser la première mesure d'exactitude à tout l'espace de conception.

IV.2.1. Solution de référence

Dans notre étude, la solution de référence correspond à une solution candidate qui a été prototypée et expérimentée physiquement par l'entreprise. Dans la suite de ce manuscrit, elle est formulée à l'aide de l'équation (IV.2).

$$\overrightarrow{X^*} = [\, PC_1^*, PC_2^*, \dots, PC_i^*, \dots, PC_n^* \,] \qquad \text{(IV.2)}$$

En supposant disposer d'une solution de référence $\overrightarrow{X^*}$, les variables de performance p_i liées à cette solution peuvent être évaluées de deux manières : en utilisant les modèles de comportement δ_i et en utilisant les résultats de l'expérimentation sur le prototype physique.

Les vecteurs de performance issus des modèles de comportement δ_i et de l'expérimentation physique sont représentés respectivement par les équations (IV.3) et (IV.4).

$$\overrightarrow{P^*} = [\, p_1^*, \dots, p_i^*, \dots, p_n^* \,] \tag{IV.3}$$

$$\overrightarrow{\tilde{P}^*} = [\, \widetilde{p_1^*}, \dots, \widetilde{p_i^*}, \dots, \widetilde{p_n^*} \,] \tag{IV.4}$$

Afin de simplifier notre démarche, nous adoptons les hypothèses suivantes à propos de l'expérimentation physique :

- ✓ Le prototype fabriqué est supposé correspondre à la solution candidate imaginée : les mêmes valeurs des paramètres de conception sont utilisés ;
- ✓ Les conditions de l'expérimentation (*e.g.* sollicitation mécanique appliquée, température) coïncident avec les conditions réelles de fonctionnement du produit ;
- ✓ Les moyens de mesure utilisés (*e.g.* comparateur) produisent des résultats exacts ;

Il convient de noter qu'il s'agit d'hypothèses fortes, qui sont rarement réunies dans la réalité. Sur la base de ces hypothèses, nous pouvons supposer que les performances fournies par expérimentation physique (les $\widetilde{p_i^*}$) sont exactes.

IV.2.2. Evaluation objective de l'exactitude

IV.2.2.1 Mesure de la distance

Nous allons dans cette section donner une première évaluation de l'exactitude en utilisant la solution de référence et en se rapportant à la proposition de Travé-Massuyès [Tra97] qui stipule que la mesure de l'exactitude d'un modèle doit se faire en comparant les résultats prédits par les modèles de comportement avec ceux issus de l'expérimentation physique sur le prototype. Les résultats à comparer dans notre cas sont les variables de performance p_i du fait de leur intérêt dominant dans l'aide à la décision. Dans la section II.5.3., nous avons passé en revue les mesures de distance proposées dans la littérature pour mesurer l'exactitude d'un modèle de comportement comme l'erreur maximum, l'erreur minimum, ou l'erreur moyenne. Dans le cas de plusieurs solutions de référence, Vernat [Ver04] préconise l'utilisation de l'erreur maximale afin d'éviter de sous-estimer l'exactitude du modèle de comportement. Dans notre cas, où une seule solution de référence existe, nous pouvons utiliser simplement l'erreur par rapport à la solution de référence, comme l'indique la relation suivante :

$$E_i = \left| \widetilde{p_i^*} - p_i^* \right| \tag{IV.5}$$

Contrairement aux indices de désirabilité ID_i, les variables de performance p_i dépendent uniquement du modèle de comportement et n'intègrent pas les préférences subjectives du décideur. Cela permet d'avoir une mesure E_i qui est intrinsèque au modèle de comportement.

IV.2.2.2 Prise en compte de l'imprécision

Nous étudions dans cette section comment adapter la mesure de l'exactitude qui a été présentée dans la section précédente au cas où le modèle de comportement et/ou l'expérimentation physique fournissent des résultats imprécis. Supposant que les variables de performance p_i fournies par modèle et celles fournies par l'expérimentation physique sont représentées par des intervalles qui sont respectivement notés $P_i^* = \left[p_i^{*\,min}, p_i^{*\,max} \right]$ et $\widetilde{P_i^*} = \left[\widetilde{p_i^*}^{min}, \widetilde{p_i^*}^{max} \right]$. L'arithmétique des intervalles fournit pour les opérations élémentaires sur des variables représentées par des intervalles, la définition de l'intervalle résultant [Kea96]. La soustraction simple de deux intervalles est un intervalle, qui est définie par la relation suivante :

$$\widetilde{P_i^*} - P_i^* = \left[\widetilde{p_i^*}^{min}, \widetilde{p_i^*}^{max} \right] - \left[p_i^{*\,min}, p_i^{*\,max} \right] = \left[\widetilde{p_i^*}^{min} - p_i^{*\,max}, \widetilde{p_i^*}^{max} - p_i^{*\,min} \right] \qquad \text{(IV.6)}$$

La valeur absolue d'un intervalle peut également être définie [Kea96]. Soit $[x, y]$ un intervalle quelconque définie sur $\mathbb{R}$. Sa valeur absolue selon Kearfott [Kea96] est définie par :

$$|[x, y]| = \begin{cases} [min\,(|x|, |y|), max\,(|x|, |y|)] & \text{si} \quad 0 \notin [x, y] \\ [0, max\,(|x|, |y|)] & \text{si} \quad 0 \in [x, y] \end{cases} \qquad \text{(IV.7)}$$

Cette définition peut être appliquée à l'intervalle résultant de la soustraction dans l'équation (IV.6). Pour cela, il suffit de faire les remplacements suivant :

$$\begin{cases} x = \widetilde{p_i^*}^{min} - p_i^{*\,max} \\ y = \widetilde{p_i^*}^{max} - p_i^{*\,min} \end{cases} \qquad \text{(IV.8)}$$

Ainsi, nous obtenons grâce à l'arithmétique des intervalles, une mesure d'exactitude imprécise. La mesure obtenue permet de garder l'aspect imprécis et toute l'information, tous les écarts entre le modèle qualifié et la référence sont conservés. Enfin, si l'on souhaite faire une comparaison, il est nécessaire de proposer une mesure caractérisée par un réel. On peut alors prendre le milieu de l'intervalle de l'exactitude. Ceci permet de comparer les exactitudes d'un modèle précis et d'un modèle imprécis.

IV.2.2.3 Normalisation de la mesure de la distance

On peut remarquer que la mesure de l'exactitude obtenue par l'équation (IV.5) est exprimée dans la même dimension que la variable de performance p_i. Nous proposons de normaliser cette mesure en la transformant en une grandeur adimensionné entre 0 et 1 traduisant le niveau de satisfaction de l'objectif d'exactitude. Une telle normalisation vise aussi à simplifier l'intégration de l'exactitude dans la prise de décision. Pour normaliser la mesure définie par l'équation (IV.5), nous fixons dans un premier temps une valeur seuil de distance, que nous notons $E_{i,s}$. Le respect de ce seuil constitue une condition nécessaire à l'utilisation du modèle de comportement. Le choix de $E_{i,s}$ varie d'un objectif à un autre et fait appel à l'expertise du concepteur : ce choix résulte d'une connaissance liée aux valeurs attendues de la variable de performance p_i. La mesure d'exactitude normalisée du modèle δ_i est obtenue par l'écart relatif entre la distance mesurée E_i, calculée par l'équation (IV.5), et la distance seuil $E_{i,s}$, tel qu'il est exprimé dans la relation suivante :

$$MOE_i = \begin{cases} \left|\dfrac{E_{i,s} - E_i}{E_{i,s}}\right| & \text{si} \quad E_i \leq E_{i,s} \\ 0 & \text{si} \quad E_i \geq E_{i,s} \end{cases} \tag{IV.9}$$

Cette étape de normalisation s'apparence à celle de l'interprétation présentée dans le chapitre précédent car elle permet aussi d'intégrer la préférence des concepteurs vis-à-vis de l'objectif d'exactitude. Ainsi, une exactitude MOE_i égale à 1 correspond au cas où le modèle de comportement δ_i est totalement exacte (cas le plus favorable) car la valeur de p_i qu'il fournit est identique à celle obtenue par l'expérimentation physique. Une exactitude égale à 0 signifie que le modèle de comportement δ_i est inutilisable (cas le plus défavorable) du fait du non-respect de la valeur seuil de distance $E_{i,s}$.

IV.2.2.4 Bilan

La mesure de l'exactitude que nous venons de proposer présente l'avantage d'être une mesure objective, ce qui diffère de certaines techniques de validation présentées par [Bal98], qui suggèrent, par exemple, de juger de l'exactitude d'un modèle sur la base des variations de ce modèle en fonction de certaines variables pour les comparer à des cinétiques ou à des valeurs de dérivées connues. En plus, grâce à l'arithmétique des intervalles, nous pouvons évaluer l'exactitude d'un modèle en contexte imprécis, en conservant la même définition que la

mesure en contexte précis. La mesure d'exactitude obtenue est un intervalle, elle permet de conserver l'aspect imprécis de toutes les valeurs d'exactitude du modèle imprécis.

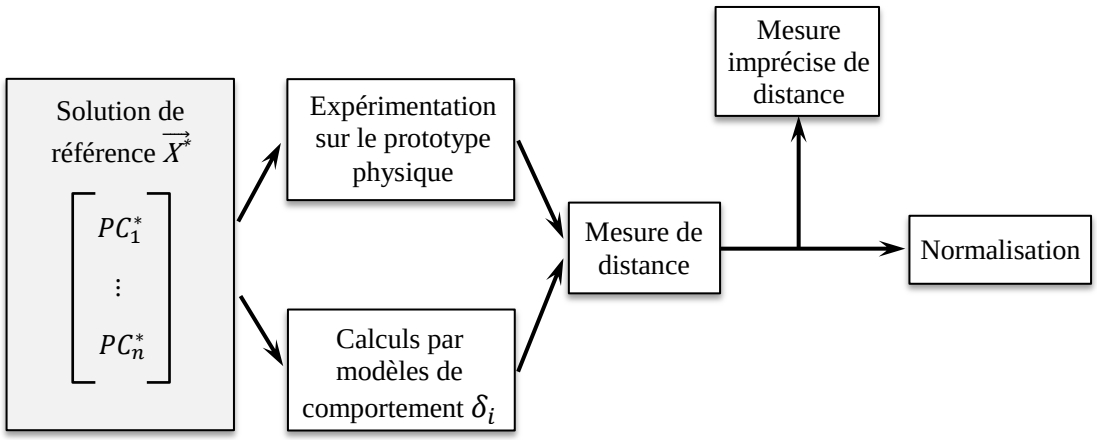


Figure IV-3 Evaluation objective de l'exactitude

Cependant, la mesure de l'exactitude MOE_i est valable en principe que pour la solution de référence $\overrightarrow{X^*}$ et il est difficile de justifier son utilisation pour une autre solution candidate dont les paramètres de conception différent de ceux de $\overrightarrow{X^*}$. En effet, rien ne nous garantit que l'exactitude du modèle de comportement δ_i ne se dégrade pas lorsque les paramètres de conception s'éloigne de ceux de la solution de référence $\overrightarrow{X^*}$. Or, nous visons à explorer un espace de conception assez vaste afin pour trouver la solution candidate qui répond le mieux aux objectif de conception.

IV.2.3. Evaluation subjective de l'exactitude

Après avoir proposé une première mesure objective de l'exactitude des modèles de comportement δ_i, nous souhaitons dans cette section proposer une méthode permettant de généraliser cette mesure à tout l'espace de conception $\overline{\Psi}$.

La mesure de distance qui a été proposée (MOE_i), bien qu'elle apporte une information précieuse sur l'exactitude du modèle, est loin de contenir toute les connaissances qui peuvent être générées dans la phase de prototypage et de l'expérimentation physique qui s'ensuit. En effet, le retour d'expérience lié à l'expérimentation physique est susceptible de fournir une grande quantité de connaissances non formalisées sur le produit. Le retour d'expérience contribue notamment à une meilleure compréhension des phénomènes physiques qui régissent le comportement du produit et contribue par la même occasion à comprendre l'écart qui existe entre le comportement modélisé et le comportement réel. Ces connaissances, qui sont souvent

de nature implicite (tacite) et donc difficiles à transmettre entre les intervenants du projet, peuvent être mal valorisées dans le processus de développement. Dans cette section, nous souhaitons exploiter ces connaissances pour définir une deuxième qualification du modèle, permettant d'étendre la mesure d'exactitude (présentée dans la section IV.2.2) à tout l'espace de conception.

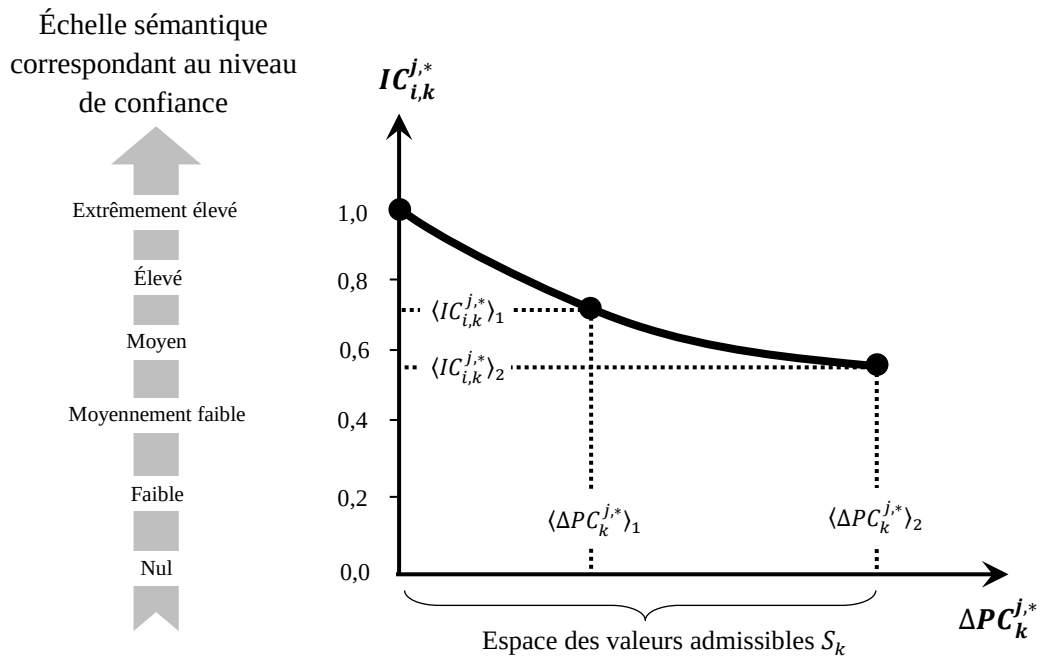
La qualification de l'exactitude que nous proposons dans cette section, et qui peut être qualifiée de subjective, se base sur l'utilisation de fonctions de confiance. Pour chaque modèle de comportement δ_i, nous associons une fonction de confiance notée $\theta_{i,k}$ à chaque paramètre de conception PC_k, avec $k \in \{1, \dots, n\}$. Cette fonction de confiance met en jeu deux grandeurs qui sont $\Delta PC_k^{j,*}$ et $IC_{i,k}^{j,*}$. Dans l'équation (IV.10), $\Delta PC_k^{j,*}$ représente la valeur absolue de l'écart entre le paramètre de conception PC_k^j de la solution candidate étudiée et le paramètre de conception PC_k^* de la solution de référence. L'équation (IV.11) traduit le vecteur de distance $\overrightarrow{D^{j,*}}$ qui est composé des différentes distances $\Delta PC_k^{j,*}$, correspondant à chacun des n paramètres de conception du concept retenu.

$$\Delta PC_k^{j,*} = \left| PC_k^j - PC_k^* \right| \tag{IV.10}$$

$$\overrightarrow{D^{j,*}} = \left[\Delta PC_1^{j,*}, \dots, \Delta PC_n^{j,*}\right] = \left[\left|PC_1^j - PC_1^*\right|, \dots, \left|PC_n^j - PC_n^*\right|\right] \tag{IV.11}$$

L'indice de confiance $IC_{i,k}^{j,*}$ traduit la confiance accordée à l'utilisation du modèle de comportement δ_i lorsqu'on s'éloigne de la solution de référence d'une distance de $\Delta PC_k^{j,*}$. Les fonctions de confiance $\theta_{i,k}$ permettent ainsi d'attribuer à chaque écart $\Delta PC_k^{j,*}$ un indice de confiance $IC_{i,k}^{j,*}$. Les $IC_{i,k}^{j,*}$ sont adimensionnés et sont compris entre 0 et 1. La valeur de 1 correspond à un niveau de confiance maximale. La structure de cette fonction est donnée dans la Figure IV-4.

Les fonctions de confiance sont établies par le concepteur. Elles permettent de formaliser une partie de la connaissance qu'il a acquise lors de la phase de prototypage et d'expérimentation physique. Elles font également appel à son expérience et à son savoir-faire. Le nombre de points d'estimation est au choix du concepteur. Si, par exemple, ce dernier estime que l'exactitude chute d'une manière linéaire, il peut se contenter de deux points d'estimation seulement par fonction. Si par contre l'exactitude change brusquement pour certaines valeurs (*e.g.* changement du mode de déformation d'une plaque à partir d'une certaine épaisseur), il peut utiliser plusieurs points d'estimation autour de cette valeur.



($\langle \Delta PC_k^{j,*}\rangle_1, \langle IC_{i,k}^{j,*}\rangle_1$) et ($\langle \Delta PC_k^{j,*}\rangle_2, \langle IC_{i,k}^{j,*}\rangle_2$) sont les points d'estimation (générés par le concepteur) permettant d'établir la fonction de confiance.

Figure IV-4 Les fonctions de confiance pour le modèle $\boldsymbol{\delta_i}$

Dans la Figure IV-4, une échelle sémantique est associée à chaque niveau de confiance retourné par la fonction de confiance. L'échelle sémantique constitue un outil qui peut aider le concepteur dans sa construction des fonctions de confiance car elle lui permet d'associer un niveau de confiance sémantique à une valeur d'écart donnée.

Pour un vecteur d'éloignement nul ($\Delta PC_k^{j,*} = 0 \ \forall \ k \in \{1, \dots, n\}$), l'indice de confiance est toujours égale à 1 car on considère que l'exactitude du modèle à ce point ne se dégrade pas par rapport à la mesure objective d'exactitude MOE_i, calculée initialement. Lorsque l'éloignement à la solution de référence ($\Delta PC_k^{j,*}$) correspond à un niveau de confiance nul ($IC_{i,k}^{j,*} = 0$), cela signifie que le modèle ne peut plus être utilisé (le niveau de confiance est au plus bas).

A partir des différents indices de confiance $IC_{i,k}^{j,*}$ (liés à chacun des paramètres de conception), nous définissons une mesure d'exactitude, appelée mesure subjective d'exactitude et notée MSE_i^j, qui traduit la dégradation totale du niveau d'exactitude du modèle δ_i à cause de l'éloignement entre la solution candidate étudiée et la solution de référence. Dans l'équation Figure IV-5, la mesure MSE_i^j est obtenue par le produit de tous les indices de confiance $IC_{i,k}^{j,*}$. La mesure obtenue est également comprise entre 0 et 1. Nous

utilisons le produit car il suffit qu'un seul indice $IC_{i,k}^{j,*}$ soit nul pour que le modèle de comportement soit inutilisable.

$$MSE_i^j = \prod_{k=1}^{n} \theta_{i,k}\left(\Delta PC_k^{j,*}\right) = \prod_{k=1}^{n} IC_{i,k}^{j,*} \tag{IV.12}$$

Contrairement à la mesure MOE_i, cette nouvelle qualification de l'exactitude intègre le jugement subjectif du concepteur et dépend de la solution candidate étudiée. La procédure globale de calcul de la mesure subjective d'exactitude est illustrée dans la Figure IV-5.

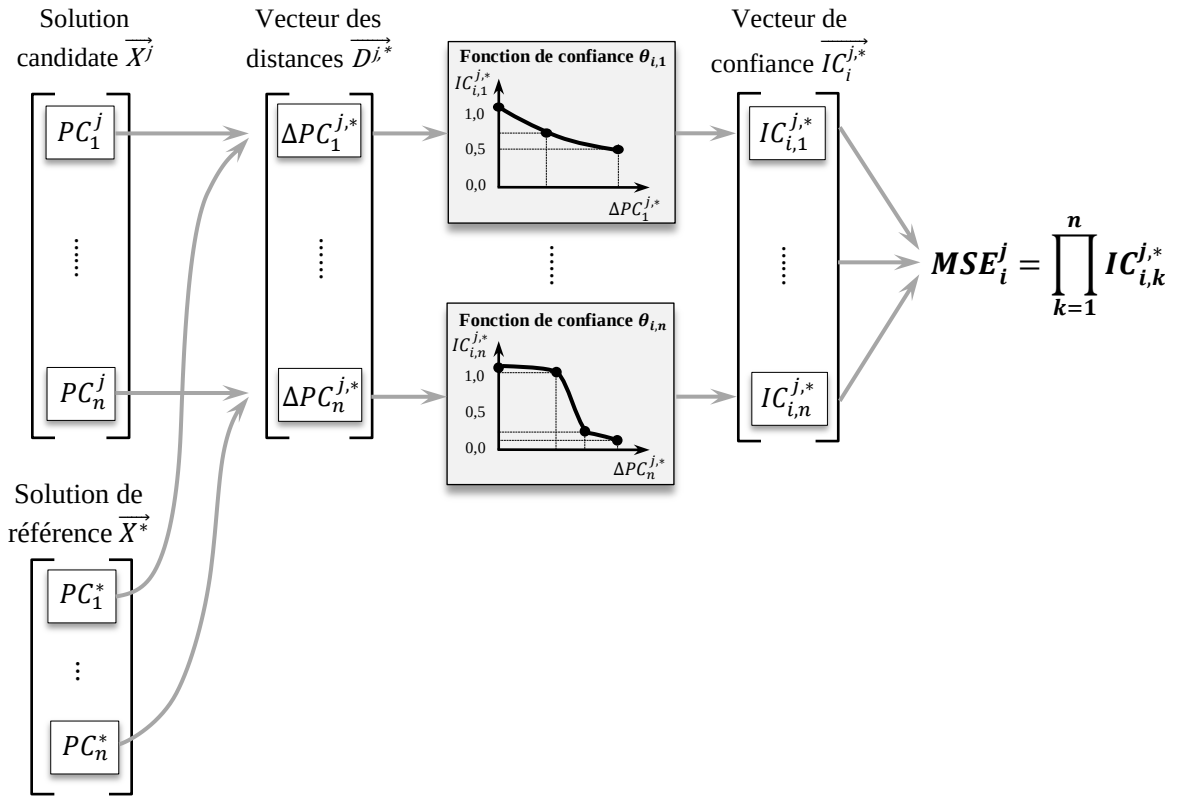


Figure IV-5 Procédure de calcul de la mesure subjective de l'exactitude du modèle δ_i

IV.2.4. Mesure d'exactitude généralisée

A ce stade de notre analyse, nous disposons d'une mesure objective et subjective de l'exactitude du modèle de comportement. L'étape suivante consiste à agréger ces deux mesures en vue d'obtenir un indicateur unique d'exactitude capable de couvrir l'intégralité de l'espace de conception. Pour ce faire, nous choisissons d'utiliser le produit comme l'exprime l'équation (IV.13).

$$MGE_i^j = MOE_i \times MSE_i^j \tag{IV.13}$$

L'utilisation du produit dans notre cas traduit une volonté d'être conservatif : si l'un des mesures (objective ou subjective) retourne une valeur nulle, la valeur d'exactitude globale doit également être nulle.

IV.2.5. Bilan

Nous avons proposé dans cette section une mesure d'exactitude intrinsèque au modèle de comportement et capable de couvrir l'espace de conception $\overline{\Psi}$ dans sa globalité. Une synthèse de la démarche permettant le calcul de la mesure globale de l'exactitude est donnée dans la Figure IV-6.

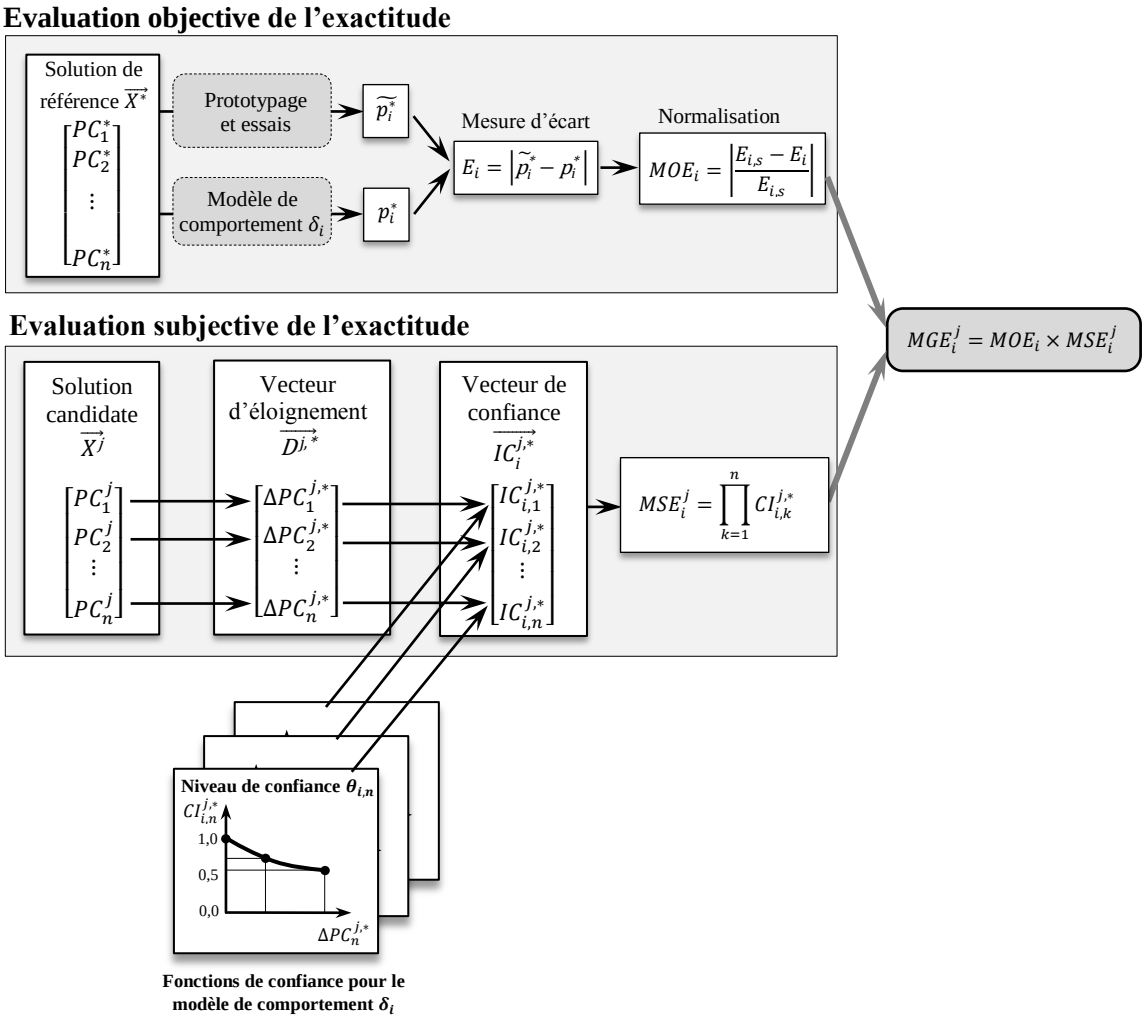


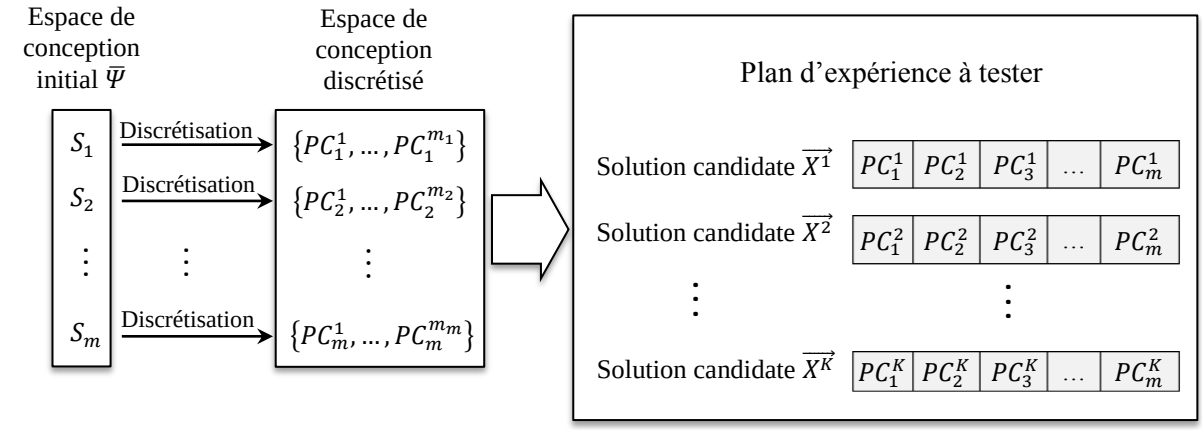
Figure IV-6 Synthèse de la démarche de calcul de la mesure globale de l'exactitude d'un modèle de comportement δ_i

La mesure obtenue s'avérera très utile dans notre démarche d'aide au choix des paramètres de conception car elle permettra au concepteur d'explorer un vaste domaine de conception en vue de trouver la solution candidate la plus appropriée en considérant l'inexactitude des

modèles de comportement utilisés. Dans la section IV.3, nous expliquons comment la mesure d'exactitude introduite dans la section IV.2 est intégrée dans notre démarche d'aide à la décision afin d'aiguiller le décideur sur une solution candidate satisfaisante, tout en intégrant ses préférences quant aux objectifs de conception à satisfaire.

IV.3 Proposition d'un modèle d'aide à la décision

Dans cette section, nous expliquons plus en détail le modèle d'aide à la décision qui a été introduit brièvement dans l'introduction (section IV.1.4). Ce modèle évalue, pour une solution candidate donnée, l'indice global de désirabilité et l'indice global de maitrise de risque. Ce dernier indice utilise la mesure globale de l'exactitude, qui a été proposée dans la section IV.2, dans le but d'évaluer le risque du non-respect des spécifications minimales de conception.



m : Nombre de paramètres de conception pour le concept étudié
S_k : Ensemble des valeurs possibles pour le paramètre de conception PC_k
m_k : Nombre de valeurs générées après discrétisation du paramètre PC_k

Figure IV-7 Constitution du plan d'expérience

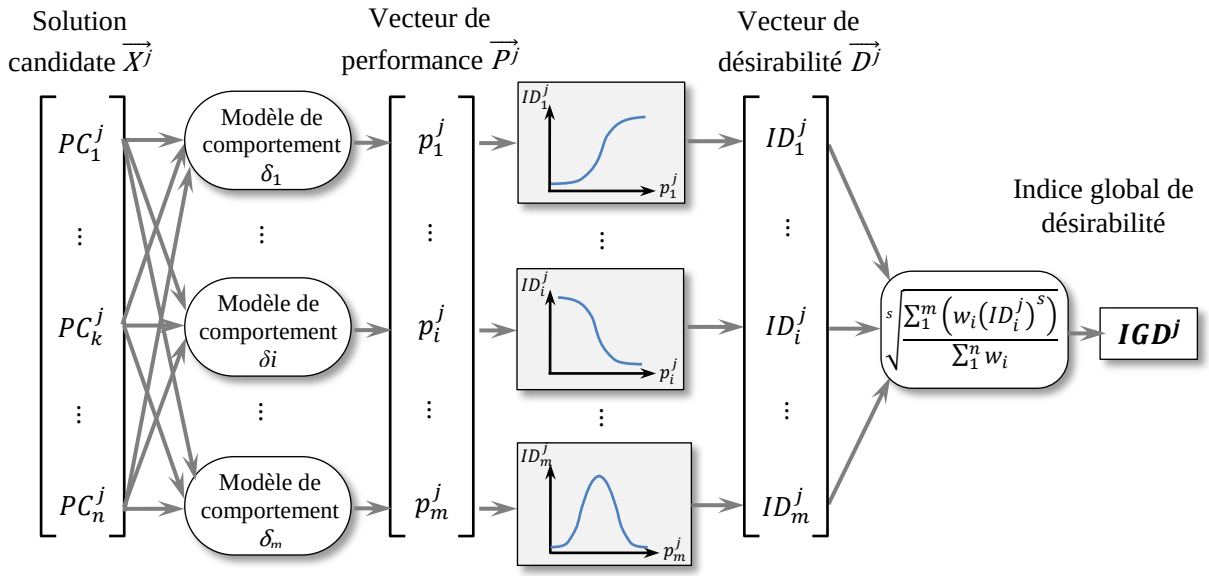
Comme le montre la Figure IV-7, la première étape consiste à constituer un plan d'expérience qui englobe toutes les solutions candidates $\overrightarrow{X^j}$ que l'on souhaite évaluer. Les résultats obtenus dans l'étape de calcul des indices de couplage (expliquée dans la section III.3.3.) peuvent être utilisés ici pour faciliter au concepteur la constitution du plan d'expérience. En effet, les paramètres de conception ayant un faible impact sur les variables de performance peuvent être figés à une valeur constante (par exemple la valeur jugée la plus pertinente par le concepteur) ou être discrétisés d'une manière grossière. Par contre, les paramètres de conception ayant un impact important sur les variables de performance doivent être discrétisés d'une manière plus

fine. Certains paramètres de conception ne nécessitent pas de discrétisation car ils sont déjà de nature discrète (*e.g.* le choix du matériau ou le nombre de points de fixation d'un composant).

Une fois la discrétisation faite, le concepteur peut établir le plan d'expérience en générant toutes les combinaisons possibles de paramètres de conception (Figure IV-7). Dans la suite de notre démarche, chacune des solutions candidates contenues dans le plan d'expérience va être évaluée en termes d'indice global de désirabilité et d'indice global de maitrise de risque.

IV.3.1. Indice global de désirabilité

L'objectif derrière l'utilisation de l'indice global de désirabilité est d'évaluer le degré d'adéquation entre les objectifs de conception établis initialement et les valeurs de performance obtenues (les p_i). L'évaluation de ces valeurs de performance est faite sur la base des modèles de comportement δ_i et sans tenir compte de leur niveau d'exactitude. Les préférences du décideur quant aux objectifs de conception à satisfaire sont intégrées via les modèles d'interprétation et d'agrégation qui ont été présentés et détaillés dans le chapitre précédent. Ainsi, nous associons à chaque solution candidate $\overrightarrow{X^j}$ du plan d'expérience un indice global de désirabilité IGD^j.



n : nombre de paramètres de conception pour le concept retenu.
m : nombre de variables de performance.

Figure IV-8 Modèle de calcul de l'indice global de désirabilité d'une solution candidate

Comparé à la démarche proposée dans le chapitre précédent, nous évaluons ici des solutions candidates dont les paramètres de conception sont définis d'une manière précise. En plus, le

milieu environnant est bien défini à ce stade de développement (les PE_i sont supposés précis). Ainsi, la grandeur obtenue à la sortie (IGD^j) sera également une grandeur précise. L'utilisation d'un tel modèle de formalisation de préférences (interprétation et agrégation) dans le contexte actuel s'avère être utile car, contrairement à la problématique de sélection de concepts, le nombre d'entités à comparer est ici très élevé et nécessite l'automatisation du processus de traitement. La structure du modèle global permettant de déterminer IGD^j est récapitulée dans la Figure IV-8.

IV.3.2. Indice de maitrise de risque

Dans la section IV.2, nous avons proposé une mesure de l'exactitude des modèles de comportement utilisés. Dans cette section, nous souhaitons intégrer cette mesure de l'exactitude dans la prise de décision. Comme nous l'avons expliqué dans l'état de l'art, l'axiome d'annihilation doit être respecté dans les problèmes de conception de produits [Bie91, Ott93, Vin83]. Au niveau des variables de performance p_i, cela se traduit par la nécessité de respecter le seuil d'acceptabilité AC_i (*accurate constraint*), propre à chaque variable p_i. Dans cette section, nous souhaitons évaluer le risque qu'engendre l'inexactitude des modèles de comportement utilisés sur le respect de ces seuils d'acceptabilité. En plus du niveau de l'exactitude du modèle, l'estimation de ce risque est dépendant de deux autres aspects qui sont :

- ✓ **La marge de sécurité par rapport au seuil d'acceptabilité**. Nous considérons que plus la marge de sécurité entre la valeur de p_i (fournie par le modèle) et le seuil d'acceptabilité AC_i est élevée, moins il y a de risque de voir ce seuil non respecté à cause de l'inexactitude du modèle de comportement utilisé. Dans la suite du manuscrit, cette marge de sécurité sera appelée *"occurrence du risque"* et sera notée O_i^j, où j représente l'indice de la solution candidate $\overrightarrow{X^j}$ étudiée et i l'indice de la variable de performance p_i considérée. Dans la relation (IV.14), nous définissons O_i^j comme l'écart relatif entre la valeur de p_i, obtenue par le modèle de comportement δ_i, et le seuil d'acceptabilité AC_i ;

$$O_i^j = \begin{cases} \left|\dfrac{p_i^j - AC_i}{AC_i}\right| & \text{si } p_i^j \text{ respecte le seuil d'acceptabilité} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \qquad \text{(IV.14)}$$

- ✓ **La sévérité du non-respect du seuil d'acceptabilité.** La prise en compte de cet aspect permet de donner plus de considération aux objectifs de conception dont le non-respect du seuil AC_i est le plus critique. Ce facteur de sévérité est noté S_i, où i représente l'indice de la variable de performance p_i considérée. S_i sera déterminé en utilisant une échelle de valeurs (allant de 0.2 à 1) associée à une échelle sémantique. Une valeur de S_i de 0.2 correspond au niveau le plus critique. L'échelle utilisée pour notre cas d'application est donnée dans le Tableau IV-1 ;

Valeur de sévérité S_i	Description sémantique associée
0.20	**Impact catastrophique** : le non-respect du seuil AC_i a des conséquences catastrophiques sur le sort du produit ; Le produit ne peut pas être accepté en l'état ; Le système global (dont fait partie le produit) est compromis ; Absence d'une alternative valable au produit développé ;
0.40	**Impact critique** : le non-respect du seuil AC_i entraine des répercussions indésirables très graves sur la qualité du produit. Le produit ne peut pas être accepté en l'état ; D'autres composants en liens avec le produit développé sont affectés ;
0.60	**Impact majeure** : le non-respect du seuil AC_i entraine des répercussions très importantes sur la qualité du produit ; le produit peut très difficilement être validé en l'état ;
0.80	**Impact significatif** : le non-respect du seuil AC_i entraine une répercussion assez importante sur la qualité de produit ;
1.00	**Impact mineur** : le non-respect du seuil AC_i n'a aucune conséquence significative sur qualité du produit ; est produit peut être validé sans problème ;

Tableau IV-1 Echelle utilisée pour l'évaluation de la sévérité S_i

L'indice de maitrise de risque IMR_i^j d'une solution candidate $\overrightarrow{X^j}$ et pour un modèle de comportement δ_i est déterminé en fonction de la mesure d'exactitude MGE_i^j, de l'occurrence O_i^j et de la sévérité S_i par la relation (IV.15).

$$IMR_i^j = MGE_i^j \times O_i^j \times S_i \qquad \text{(IV.15)}$$

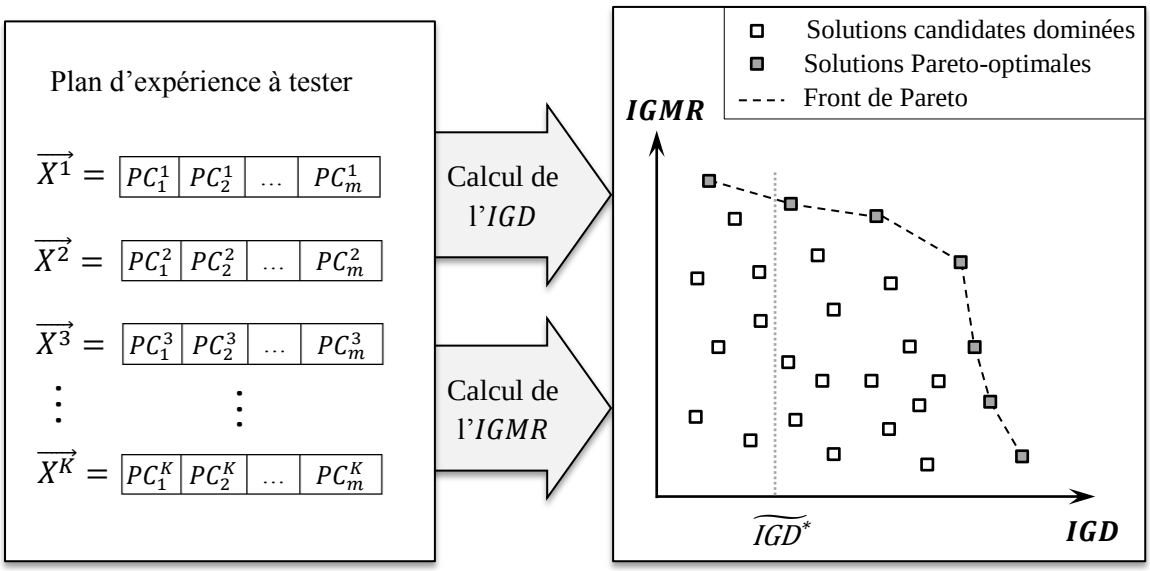
Une fois que l'indice IMR_i^j est calculé pour chacun des modèles de comportement δ_i, l'indice global de maitrise de risque pour la solution candidate $\overrightarrow{X^j}$ est calculé en prenant le minimum des indices IMR_i^j, comme l'exprime la relation (IV.16) :

$$IMR^j = \min_{i \in \{1,\dots,n\}} IMR_i^j \qquad \text{(IV.16)}$$

Avec n le nombre de variables de performance utilisées. Nous utilisons ici le minimum car nous souhaitons être conservatif dans l'évaluation du risque : nous considérons que la variable de performance la plus risquée renseigne sur le risque global lié à la solution $\overrightarrow{X^j}$.

IV.3.3. Utilisation dans le cadre de la conception itérative

Comme le montre la Figure IV-9, chacune des solutions candidate $\overrightarrow{X^j}$ du plan d'expérience est caractérisée par un indice global de désirabilité IGD^j et par un indice global de maitrise de risque $IGMR^j$.



$\widetilde{IGD^*}$: indice global de désirabilité de la solution de référence $\overrightarrow{X^*}$
m : nombre de paramètres de conception pour le concept étudié

Figure IV-9 Evaluation de l'indice global de désirabilité et de l'indice de maitrise de risque pour chaque solution candidate du plan d'expérience

A ce stade de notre analyse, le décideur se doit de faire un compromis entre ces deux grandeurs (IGD^j et $IGMR^j$) en vue de choisir la solution candidate appropriée. Il doit également décider du plan d'action (activités de développement à entreprendre) qui en découle. Ces choix doivent se faire en adéquation avec les circonstances du projet de développement et la stratégie de l'entreprise d'une manière plus générale (leur aversion au risque, cadre réglementaire, etc). Quelques lignes directrices peuvent cependant être recommandées. Dans le cas où la phase de conception architecturale est à son début (avec une bonne marge de manœuvre), le décideur sera probablement plus intéressé d'explorer des

solutions candidates dont l'indice global de désirabilité est élevé et ce, même au détriment du risque (faible $IGMR^j$). Cependant, ce choix implique davantage d'activités de développement dans les étapes ultérieures de développement pour diminuer le risque. Ces activités peuvent être :

- ✓ Améliorer les modèles de comportement existants en vue d'augmenter leur niveau d'exactitude (*e.g.* faire un maillage plus raffiné dans les régions de la structure à fort gradient de contrainte). Dans ce cas-là, la mesure de l'exactitude doit être recalculée, y compris les fonctions de confiance qui doivent être mises à jour ;
- ✓ Fabriquer un nouveau prototype correspondant à la nouvelle solution candidate choisie et faire les essais nécessaires pour vérifier l'exactitude des résultats de performance (p_i) prédits auparavant par les modèles de comportement ;

La deuxième option reste plus efficace que la première. Cependant, dans beaucoup de situations, le coût lié à l'amélioration les modèles de comportement reste moins important que celui lié au prototypage et à l'expérimentation physique. Notons que dans notre cas, nous nous focalisons essentiellement sur l'exactitude du modèle. En réalité, il existe d'autres critères à considérer dans le choix du modèle de comportement, ou le choix des aspects à améliorer dans un modèle existant. Comme évoqué dans la section II.5., ces critères peuvent être la parcimonie, la spécialisation ou la précision [Ver10, Red05]. Un modèle de comportement trop spécialisé peut être inadapté, soit parce que ce modèle, de par son domaine de validité, oriente déjà fortement les choix de conception, soit parce qu'il ne permet pas d'explorer une partie importante de l'espace de conception. Dans ce cas, on risque de passer à côté de solutions candidates intéressantes.

Dans le cas où la contrainte de temps se fait très pressante (à l'approche de la date limite de validation du produit), le décideur sera probablement plus intéressé par des solutions du front de Pareto qui ont un bon indice de maitrise de risque et ce, même au détriment de la performance (IGD). La marge de manœuvre dans ces circonstances est très faible pour entreprendre des actions visant à diminuer le risque (fabrication de prototypes, amélioration des modèles de comportement, etc.).

IV.3.4. Bilan de l'approche proposée

Une des limites de la démarche proposée est la non-prise en compte des effets de couplage entre les paramètres de conception. En effet, la fonction de confiance associée à un paramètre

de conception donné est construite en supposant que les autres paramètres de conception sont figés à leur valeur de référence (correspondant à la solution de référence). Cependant, lorsqu'il y a plus de deux paramètres de conception qui évoluent simultanément par rapport à aux valeurs de la solution de référence, rien ne nous garantit l'absence d'effets induits (positifs ou négatifs) par cette évolution simultanée sur la dégradation de l'exactitude du modèle (en plus de l'effet des variations prises individuellement que nous avons considéré dans notre démarche).

La construction des fonctions de confiance est très subjective et peut présenter quelques difficultés pour le concepteur. La construction de ces fonctions nécessite, d'une part, une connaissance assez solide du modèle de comportement utilisé (hypothèses du modèle, etc.) et, d'autre part, une observation fine du comportement du prototype lors des phases d'expérimentation.

IV.4 Conclusion

En vue de réduire les itérations essais/erreurs et éviter les remises en cause répétitives et pénalisantes en termes de temps et de ressources, il est important de pourvoir explorer un large espace de conception dès le début de la phase architecturale. Cette exploration doit prendre en considération le risque inhérent à l'utilisation de modèles de comportement utilisant un ensemble d'hypothèses et d'approximations. Une démarche a été proposée dans ce chapitre pour l'aide au choix des paramètres de conception en intégrant le niveau de l'exactitude des modèles de comportement utilisés. La démarche proposée se base, d'une part, sur la maximisation de la satisfaction des objectifs de conception en intégrant les préférences du décideur et, d'autre part, sur la minimisation du risque qu'engendre l'inexactitude des modèles de comportement utilisés sur le respect des spécifications minimales établies dans le CdCF (traduites par les AC_i).

Nous avons choisi dans notre démarche de ne pas agréger IGD et $IGMR$ en une seule grandeur. Etant donné que le nombre de grandeurs à analyser est faible (IGD et $IGMR$), l'utilisation d'une agrégation ne nous parait pas indispensable dans notre cas. Nous considérons que le décideur est à même d'analyser les solutions candidates du font de Pareto (Figure IV-9) et de choisir la solution candidate qui présente le compromis adéquat entre performance et risque. De plus, lorsqu'on choisit d'agréger, il y a toujours un risque d'utiliser un opérateur d'agrégation qui ne traduit pas correctement la volonté du décideur ou un risque

d’utiliser des pondérations qui ne représentent pas correctement les priorités relatives des indices agrégés.

CHAPITRE V

Application à la conception d'un système solaire

V.1 Avant-propos

Le cas d'application présenté dans ce chapitre a comme principal objectif l'illustration des démarches proposées. Pour éviter d'induire en erreur le lecteur, il convient de noter que les données présentées sur le cas d'application, ainsi que les descriptions des produits étudiés ou les choix de conception adoptés, peuvent ne pas correspondre au cas industriel réel pour des raisons de confidentialité.

V.2 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons d'appliquer l'ensemble des démarches d'aide à la décision développées dans cette thèse pour aider le concepteur à aboutir à un réflecteur solaire qui répond au mieux aux objectifs de conception. Le cas d'étude considéré dans ce chapitre est tiré du projet industriel SolR², qui vise à développer une centrale solaire thermodynamique à miroirs de Fresnel, ainsi que son usine de fabrication. Un travail de développement a déjà été effectué au sein de l'équipe de développement du projet. Ce premier travail nous a permis de développer des modèles de comportement adaptés à différents concepts de réflecteur et de collecter les informations relatives aux préférences du décideur. Ces informations seront formalisées dans la section V.4. Le développement au sein de l'entreprise nous a aussi permis de mettre en évidence les difficultés rencontrées chez l'industriel pour faire des choix de conception face à des problématiques comme la méconnaissance ou la faible exactitude des modèles de comportement utilisés. Cela a permis notamment de mettre en évidence les améliorations apportées sur les prises de décision grâce aux démarches développées dans cette thèse, que ce soit pour les décisions sur les choix de concepts ou pour celles sur la définition de l'architecture du produit.

V.3 Présentation du cas industriel

V.3.1. Centrale solaire thermodynamique à miroirs de Fresnel

Avant d'aborder plus en détail la conception du support réflecteur, qui fait l'objet de notre cas d'étude, il est important de comprendre d'abord le fonctionnement d'une centrale solaire à concentration (ou CSP pour *"Concentrated Solar Power"*) qui utilise des miroirs de Fresnel. Cela contribue notamment à la compréhension des objectifs de conception exigés dans la conception du support réflecteur (détaillés dans la section V.4).

Le CSP est une technologie qui permet de convertir l'énergie liée au rayonnement solaire en énergie électrique. Une centrale CSP utilise des panneaux réfléchissants pour concentrer et rediriger les rayons du soleil vers des tubes absorbeurs (appelées récepteurs). Cela permet à un fluide caloporteur, circulant à l'intérieur de ces tubes, d'être chauffé à des températures très élevées. Le fluide caloporteur à haute température est, soit utilisé directement dans un cycle thermodynamique pour générer de l'électricité, soit utilisé pour chauffer un autre fluide via des échangeurs thermiques pour être utilisé ensuite dans un cycle thermodynamique.

Comparé aux panneaux photovoltaïques, l'avantage majeur d'une centrale CSP est la possibilité de stocker de l'énergie thermique dans des réservoirs, ce qui permet de produire de l'électricité indépendamment du cycle du soleil. De plus, la chaleur générée peut être utilisée pour d'autres applications industrielles ou urbaines comme la désalinisation, le refroidissement, la climatisation, etc.

Des études ont montré que les systèmes CSP pourront combler jusqu'à 25% des besoins énergétiques de la planète d'ici 2050 [Jha09]. Ils représentent donc une contribution majeure dans la transition énergétique mondiale. Les systèmes CSP à miroirs de Fresnel sont l'une des quatre variantes de cette technologie. Les trois autres variantes sont : le CSP à tour, le CSP à miroirs cylindro-paraboliques et le CSP à miroirs paraboliques. Dans le Tableau V-1, un comparatif est donné entre les trois variantes du système CSP. D'après ce tableau, le système CSP à miroirs de Fresnel a un avantage économique par rapport aux trois autres variantes. Cependant, le rendement thermique nominal est moins élevé que les autres variantes.

Technologie	**Cylindro-parabolique**	**Tour**	**Parabole**	**Fresnel**
Rendement thermique nominal	70 %	73 %	75 %	60 %
Puissance des installations	80 à 300 MW_{th}	10 à 100 MW_{th}	1 à 100 kW_{th}	5 à 150 MW th
Température de travail	70 à 450℃	50 à 1 000℃	600 à 1 200℃	≈ 70 à 400℃
Prix du champ solaire	210 à 250 €/m²	140 à 220 €/m²	≈ 150 €/m²	≈ 130 à 200€/m²
Coût total d'investissement	2,8 à 3,5 €/We	3 à 4 €/We	10 à 14 €/We	≈ 1,6 à 2,6 €/We

Tableau V-1 Comparatif des principales caractéristiques des différentes variantes de centrales solaires à concentration [Gaz11, Ben10]

V.3.2. Une technologie peu mature

Malgré l'avantage économique qu'offre l'utilisation des centrales solaires thermodynamiques à miroirs de Fresnel, leur utilisation reste relativement limitée dans le monde. C'est une technologie naissante et peu mature mais qui présente un grand potentiel d'amélioration [Int10]. Cependant, le peu de centrales solaires commerciales qui existent à ce jour offrent très peu de retour d'expérience, ce qui constitue une difficulté pour les ingénieurs dans leurs choix de solutions de conception.

V.3.3. Le réflecteur solaire

Le composant étudié dans notre cas est le réflecteur solaire. Sa fonction principale est de se concentrer et de rediriger les rayons du soleil sur les tubes absorbeurs pour chauffer le fluide caloporteur. La chaleur récupérée est ensuite utilisée pour produire de la vapeur à haute pression qui actionne une turbine pour produire de l'électricité. Comme nous pouvons le voir sur la Figure V-1, un réflecteur solaire est composé d'un panneau réfléchissant et d'un support réflecteur dont la fonction est de maintenir la forme du panneau réfléchissant (une forme légèrement incurvée). Un dispositif de fixation est réalisé entre les panneaux réfléchissants et le support réflecteur pour assurer la liaison entre les deux (voir Figure V-1). Le réflecteur solaire est entraîné par un mouvement de rotation afin de s'adapter à la position du soleil dans la journée. Dans notre étude, seule la conception du support réflecteur est traitée.

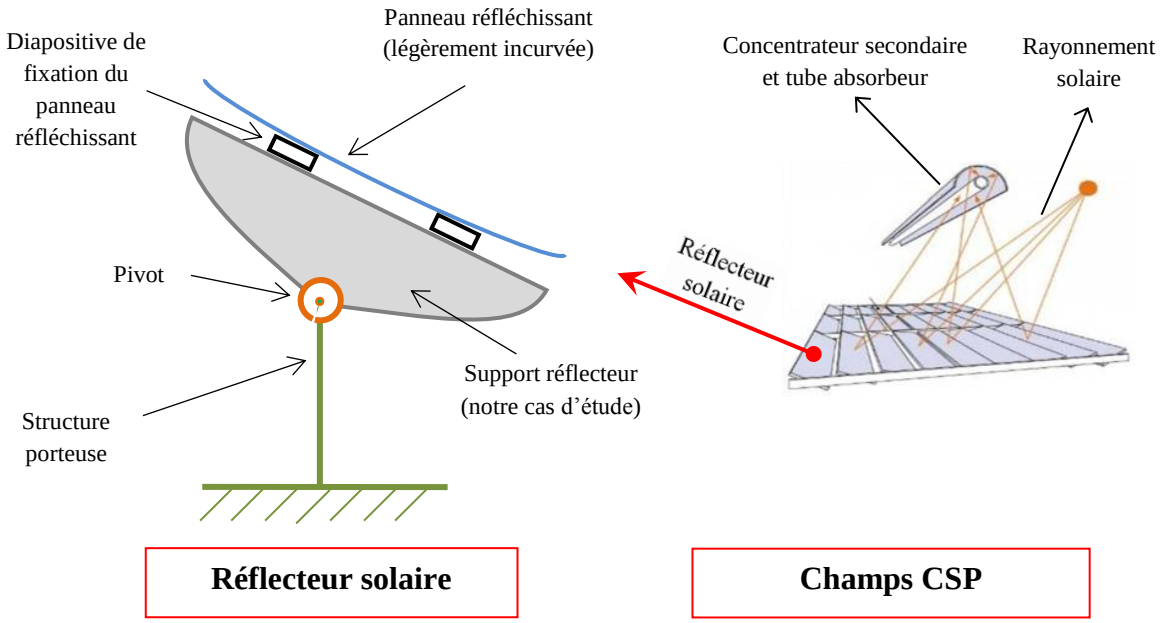


Figure V-1 Structure du réflecteur solaire

V.4 Formalisation des préférences du décideur

Comme nous l'avons évoqué auparavant, la formalisation des préférences du décideur constitue une étape de base dans nos démarches. Le modèle présenté dans cette section sera utilisé dans la phase de sélection préliminaire des concepts (section V.7) et dans la phase de conception architecturale (section V.8). Ces informations traduisent les préférences de conception qui ont été recueillies auprès des différents intervenants dans le projet de développement. Les principaux intervenants sont :

- ✓ Des ingénieurs d'étude qui ont des compétences en développement de systèmes mécaniques, et en particulier en solaire à concentration. Ils sont au nombre de trois ;
- ✓ Le responsable du projet SolR² (projet de développement de la centrale solaire) qui a une connaissance accrue des stratégies de l'entreprise et des objectifs globaux liés au développement de la centrale ;

V.4.1. Identification et structuration des objectifs de conception

Les objectifs de conception dans notre cas industriel sont structurés dans la Figure V-2. L'objectif global est d'assurer la concentration optimale des rayons solaires, d'une manière durable dans le temps, tout en étant compétitif. L'objectif global est ainsi décomposé en trois principaux objectifs de conception qui sont : « avoir un coût de fabrication faible », « avoir une performance optique élevée » et « bien résister à l'environnement extérieur ».

D'après l'étude de Kumara et al. [Kum15], le coût de fabrication des supports réflecteur représente 50 % environ du coût global d'investissement pour une centrale CSP à miroirs de Fresnel. Il est donc considéré par l'entreprise comme l'objectif de conception le plus important. Cela permet entre autres de maintenir l'avantage économique qui distingue le système CSP à miroirs de Fresnel des autres technologies CSP. Le coût de fabrication n'est pas lié uniquement au coût de la matière première mais à d'autres coûts comme le coût d'acquisition des machines de fabrication ou le coût de la main d'ouvre. Cependant, pour simplifier notre cas d'application, nous supposons que le coût de fabrication est lié uniquement au coût de la matière première (présenté en Figure V-2).

Dans notre cas d'étude, la performance optique désigne la capacité du réflecteur à concentrer et à réfléchir correctement les rayons du soleil sur les tubes absorbeurs. Cette dernière influe directement sur le rendement thermique de la centrale. Pour limiter le pourcentage des rayons déviés de leur cible, il faut limiter le plus possible les déformations

des miroirs réflecteurs et donc spécifiquement du support réflecteur. L'objectif de la performance optique est alors décomposé en deux sous-objectifs qui sont : « avoir une torsion faible de la structure » et « avoir une déflexion faible de la structure ».

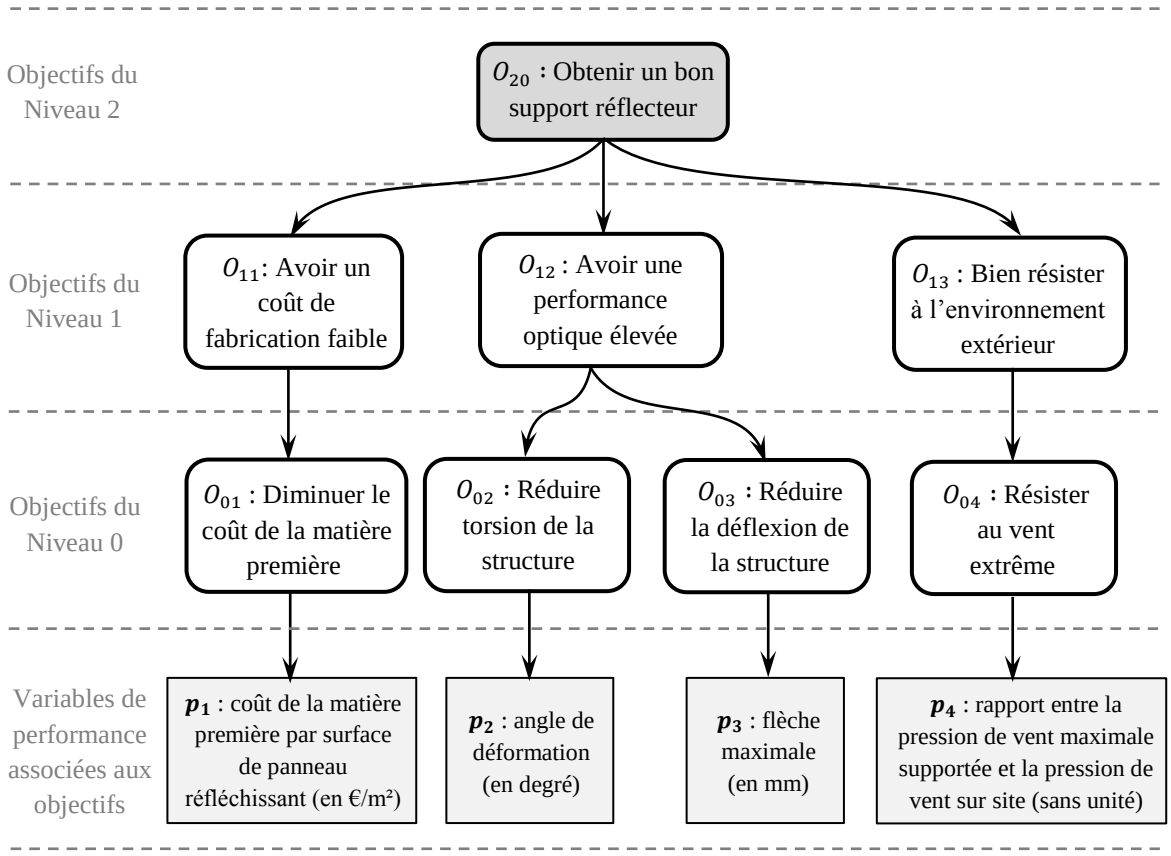


Figure V-2 Décomposition de l'objectif global de conception en plusieurs sous-objectifs de conception

Le support réflecteur doit résister aux conditions climatiques qui caractérisent le site d'implantation. Plus le support réflecteur sera résistant, plus les possibilités de sites d'implantation seront variées, ce qui constitue un avantage non négligeable pour l'entreprise qui souhaite développer ses solutions pour plusieurs sites d'implantation. Cependant, cet objectif (qui peut favoriser des épaisseurs plus importantes de la structure) peut être en opposition avec l'objectif de minimisation du coût de la matière première. Pour simplifier notre cas d'application, l'objectif « résister à l'environnement extérieur » est lié uniquement à la résistance au vent extrême (comme le montre la Figure V-2). En réalité, le support réflecteur doit résister à d'autres sources de dégradation comme la corrosion ou l'abrasion.

Comme nous pouvons constater sur la Figure V-2, chaque objectif du niveau 0 (niveau le plus bas notre décomposition) a été associé à une variable de performance qui permet de vérifier sa satisfaction. Ces variables de performance (p_1, p_2, p_3 et p_4) sont à déterminer sur

la solution du support réflecteur considérée. La section V.6 présente les modèles de comportement utilisés dans notre cas industriel pour déterminer ces variables. Les paramètres du milieu environnant PE_i qui interviennent dans le calcul des p_i seront également présentés dans la section V.6.

V.4.2. Modèle d'interprétation ϕ

Les préférences des concepteur vis-à-vis des variables de performance (introduits dans la section précédente) sont formalisées dans le modèle d'interprétation ϕ. Ce modèle est basé sur l'utilisation de fonctions de désirabilité de Harrington [Har65]. A Chaque variable de performance p_i correspond une fonction de désirabilité ϕ_i. L'allure de ces fonctions ainsi que les paramètres qui ont permis de les établir sont donnés dans le Tableau V-2. Ces paramètres ont été définis en collaboration avec différents intervenants du projet.

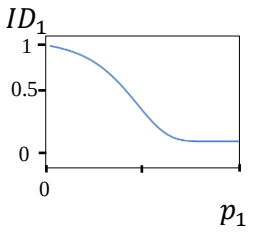
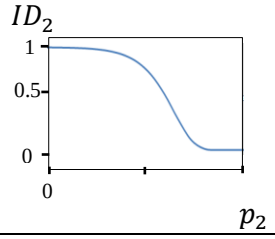
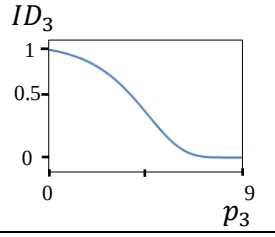
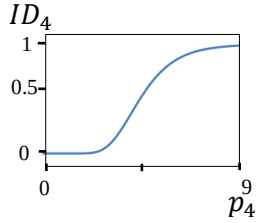
Variables de performance p_i	**Allure de la fonction de désirabilité ϕ_i**	AC_i	d_i^{AC}	SL_i	d_i^{SL}
Coût de la matière première p_1 (en €/m²)		_€/m²	_	_€/m²	_
Déformation angulaire p_2 (en degré)		_°	_	_°	_
Flèche maximale p_3 (en mm)		_mm	_	_mm	_
Résistance au vent p_4 (sans unité)		_	_	_	_

Tableau V-2 Paramètres des fonctions de désirabilité de Harrington pour le modèle d'interprétation

Les points de paramétrage AC_i ont un intérêt particulier dans notre étude. Ils définissent le seuil minimal d'acceptabilité du produit. Il suffit qu'un seul de ces seuils ne soit pas respecté pour que la validation du support réflecteur soit compromise. Ces seuils sont définis en adéquation avec la stratégie globale de l'entreprise. Par exemple, le coût de la matière première doit être en adéquation avec le budget maximal qui a été initialement fixé par l'entreprise. Pour les performances optiques, ils doivent respecter le rendement minimal de production électrique annoncé par l'entreprise.

V.4.3. Modèle d'agrégation φ

La satisfaction de l'objectif global de conception est formalisée par l'indice global de désirabilité IGD. Cet indice est déterminé à partir des indices ID_i (obtenus à la sortie du modèle d'interprétation ϕ) en utilisant des opérateurs d'agrégation. D'après la décomposition retenue des objectifs (Figure V-2), deux opérateurs d'agrégation sont nécessaires dans notre cas : un premier opérateur sert à déterminer l'indice de désirabilité lié à l'objectif intermédiaire « avoir une bonne performance optique » et un deuxième opérateur sert à déterminer l'IGD. Nous avons choisi la méthode des points équivalents [Sco99, Sco00] pour fixer les poids w_i et les degrés de compensation s_i en adéquation avec les préférences et les affinités du décideur. Les points équivalents établis par le décideur sont donnés dans le Tableau V-3 (en rouge les valeurs estimées). Les poids et les degrés de compensation obtenus à partir de ces points équivalents sont donnés dans le Tableau V-4.

	Agrégation niveau 1	
	ID_2	ID_3
Point de référence	0.5	0.5
Point équivalent 1	**0.23**	0.5
Point équivalent 2	0.5	**0.17**

	Agrégation niveau 0		
	ID_1	ID_{23}	ID_4
Point de référence	0.5	0.5	0.5
Point équivalent 1	**0.17**	0.5	0.5
Point équivalent 2	0.5	**0.28**	0.5
Point équivalent 3	0.5	0.5	**0.30**

ID_{23} : indice de désirabilité correspondant à l'objectif "Performance optique"
ID_1, ID_2, ID_3 et ID_4 sont définis dans le Tableau V-2

Tableau V-3 Les points équivalents utilisés pour déterminer les opérateurs d'agrégation

Agrégation niveau 1

	Objectifs	
	Avoir une torsion faible de la structure	Avoir une déflexion faible de la structure
Poids	0.58	0.42

Degré de compensation : $s_1 = -0.22$

Agrégation niveau 0

	Objectifs		
	Avoir un coût de fabrication faible	Avoir une bonne performance optique	Bien résister à l'environnement extérieur
Poids	0.55	0.21	0.24

Degré de compensation : $s_0 = -0.12$

Tableau V-4 Paramètres des opérateurs d'agrégation utilisés (poids et degrés de compensation)

V.5 Concepts du support réflecteur proposés initialement

L'étape de formalisation des préférences présentée dans la section précédente permet de mettre au clair, et d'une manière structurée, les préférences et intentions du décideur. Cela contribue, non seulement à faciliter les choix de solutions de conception, mais aussi à proposer des concepts plus pertinents vis-à-vis des objectifs de conception. Dans notre cas industriel, plusieurs structures ont été proposées initialement. Une présélection rapide a été faite au tout début du projet de développement. Elle s'est soldée par le choix de trois concepts jugés faisables par les concepteurs. Ces concepts sont : la structure treillis, la structure sandwich et la structure tube. Ils sont tous schématisés dans la Figure V-3 avec les paramètres de conception qui leurs correspondent.

Comme on peut le voir sur la Figure V-3, la structure treillis est composée de barres diagonales supérieures, de barres diagonales inférieures, de membrures supérieures et de la membrure inférieure. La structure sandwich est composée d'une âme qui est constituée de plusieurs poutres en I et de peaux sous forme de tôle métallique. Enfin, la structure en tube est composée d'un tube central qui longe toute la structure et sur lequel sont fixées des traverses pour porter les panneaux réfléchissants. Le choix du matériau et du revêtement anticorrosion est fixé dès le début du projet et il est le même pour les trois concepts. Ce choix n'est pas communiqué dans ce document pour des raisons de confidentialité. Même chose pour le choix

du procédé d'assemblage (fixation entre composants). La longueur du réflecteur (L) et sa largeur (l) ont été également fixées dès le début du projet et sont les mêmes pour les trois concepts. La hauteur du réflecteur (h) est quant à elle considérée comme un paramètre de conception et elle doit être fixée pour chacun des concepts en adéquation avec les objectifs de conception. Dans la suite de ce chapitre, l'ajout de l'acronyme *"tr"*, *"sd"*, ou *"tb"* en tant qu'exposant dans une grandeur quelconque (variable de performance, paramètre de conception, etc) signifie que cette grandeur est liée respectivement aux concepts treillis (*"tr"*), sandwich (*"sd"*) ou tube (*"tb"*).

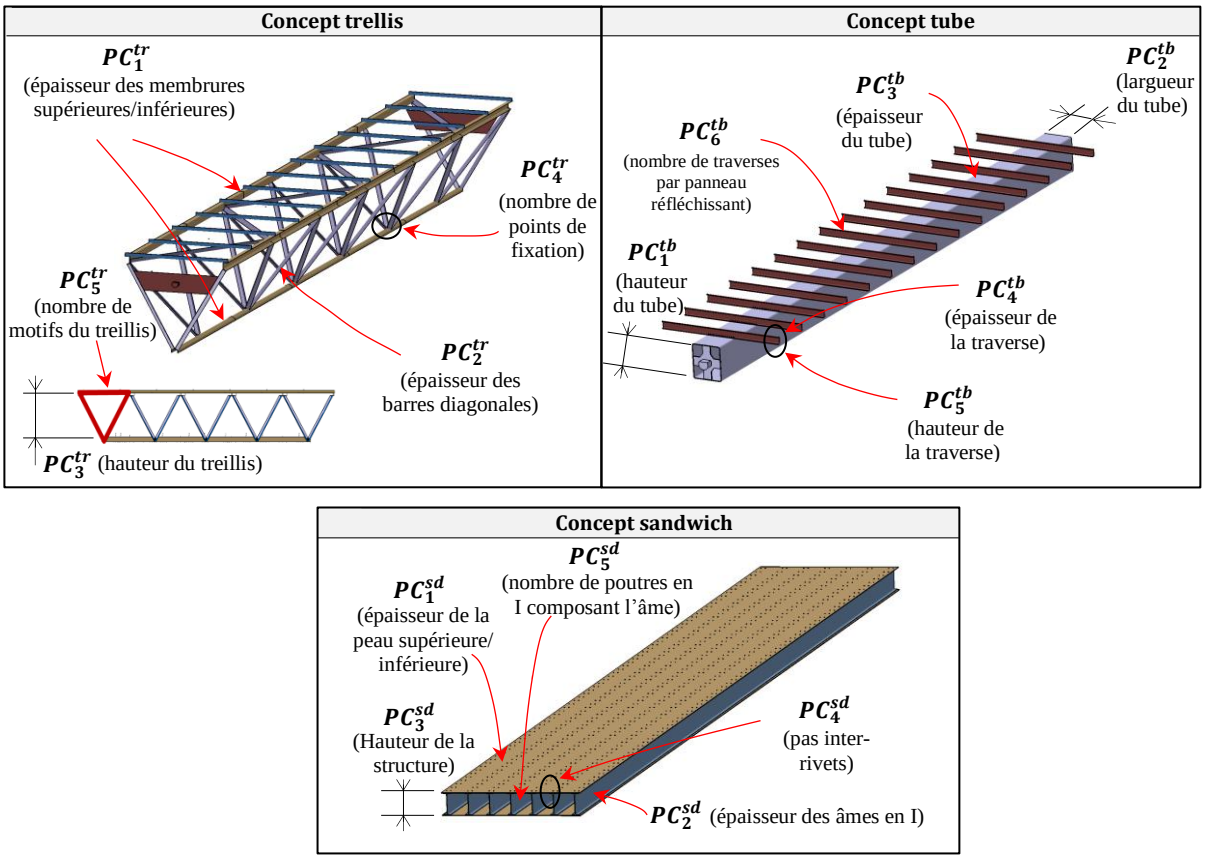


Figure V-3 Concepts de support réflecteur proposés initialement et les paramètres de conception qui leur sont associés

V.6 Modèles de comportement utilisés

Dans le chapitre III, nous avons abordé la notion de modèle de comportement comme étant une composante indissociable du processus global d'aide à la décision. Le modèle de comportement reçoit en entrée les paramètres de conception et les paramètres du milieu environnant. En sortie, il fournit des informations qui décrivent le comportement du produit et qui permettent ainsi de vérifier la satisfaction des objectifs de conception. Le travail de

formalisation et de structuration des préférences, présenté dans la section V.4, nous a permis de mettre en évidence les variables de performance qu'il faudra déterminer sur le support réflecteur. Dans cette section, nous détaillons les modèles de comportement permettant d'évaluer ces variables pour les trois concepts de support réflecteur.

Il est important de noter que les modèles de comportement utilisés dans notre cas industriel évoluent au fur et à mesure que le projet avance et que le produit est affiné. Dans la section V.6.1, nous présentons des modèles préliminaires qui ont été utilisés dans les toutes premières phases d'étude (pour les trois concepts). Ces modèles utilisent beaucoup d'hypothèses de simplifications et sont, pour la plupart, très approximatifs. Ils seront principalement utilisés pour faciliter le choix des concepts les plus pertinents (section V.7). Pour la phase de conception architecturale, nous étudierons uniquement le cas du concept treillis et nous présenterons des modèles de comportement plus développés et plus représentatifs de la réalité que ceux utilisés dans les phases préliminaires d'étude.

Etant donné que nous comparons trois concepts différents dans la phase préliminaire, il est important que les conditions de calcul utilisées (conditions aux limites, état de chargement, paramètres du milieu environnant) soient les mêmes pour les trois concepts. Nous commencerons ainsi par présenter ces conditions de calcul, pour chacune des variables de performance, avant de présenter les modèles de comportement spécifiques à chaque concept. Pour une variable de performance p_i donnée, les modèles de comportement correspondant aux concepts treillis, sandwich et tube seront respectivement notés δ_i^{tr}, δ_i^{sd} et δ_i^{tb}. Les variables de performance fournies par ces trois modèles seront respectivement notées p_i^{tr}, p_i^{sd} et p_i^{tb}.

V.6.1. Modèles de comportement préliminaires

V.6.1.1 Coût de la matière première

Nous avons besoin de connaitre le coût de la matière première par unité de surface de panneaux réfléchissant. La variable coût de la matière première, notée p_1^X (X désigne le concept considéré), est donc en *euro/m²*. Le calcul de p_1^X dépend de la masse surfacique du support réflecteur (en Kg/m²), du prix du matériau utilisé (en euro/Kg) et du prix du revêtement utilisé (en euro/Kg également). Ces deux derniers paramètres sont considérés dans notre étude comme des paramètres du milieu environnant et sont notés respectivement PE_1 et PE_2. Ils sont dépendants du site d'implantation choisi ainsi que d'autres facteurs. Leur valeur ne peut pas être déterminée précisément car le choix du site dans les premières phases du

projet n'est pas figé. La variable p_1^X est calculée en fonction de PE_1, PE_2, de la masse surfacique de la structure M^X par l'expression suivante :

$$p_4^X = M^X \times (PE_1 + PE_2) \tag{V.1}$$

En faisant abstraction de la difficulté d'estimer les paramètres PE_1 et PE_2, l'estimation du coût de la matière première est relativement simple pour les trois concepts : nous utilisons des modèles géométriques pour estimer la masse surfacique de la structure (M^X) en fonction des paramètres de conception. Nous ne détaillerons pas ces modèles dans ce chapitre.

V.6.1.2 Performance optique

a. Conditions générales de calcul : cas de la rigidité en torsion

Le modèle de rigidité en torsion permet de déterminer l'angle de torsion (variable de performance p_2^X) du support réflecteur lorsqu'il est entrainé en rotation et soumis au couple de frottement dans les liaisons pivot. Il s'agit plus exactement de l'angle formé entre les deux sections extrêmes du support réflecteur (sections adjacentes aux deux liaisons pivot). Ce modèle est noté δ_2^X, où X désigne le concept considéré. Avant de présenter les trois modèles δ_2^{tr}, δ_2^{sd} et δ_2^{tb}, nous présentons d'abord les conditions aux limites et l'état de chargement qui seront communs aux trois modèles.

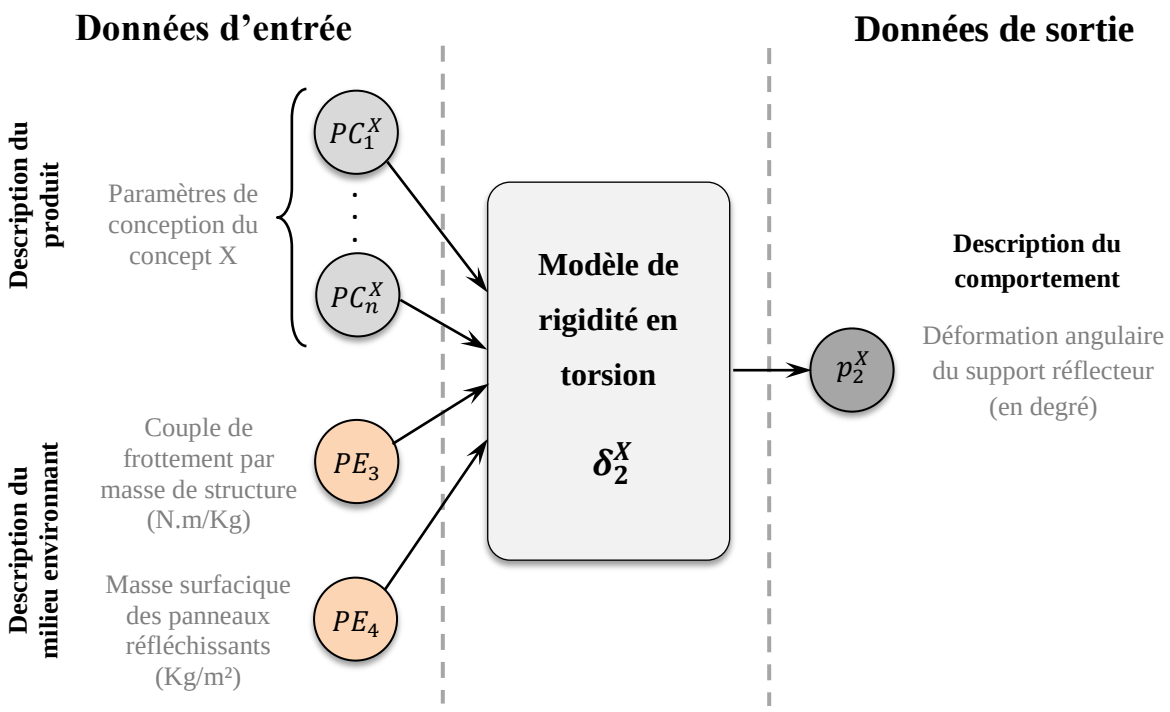


Figure V-4 Structure du modèle de rigidité en torsion

La Figure V-4 montre la structure du modèle δ_2^X avec ses entrées et ses sorties. Les conditions aux limites et l'état de chargement sont illustrés dans la Figure V-5. Les conditions aux limites utilisées sont : une extrémité des sections (adjacentes aux liaisons pivot) est encastrée et l'autre est libre. Le couple de frottement est appliqué au niveau de la section libre du support réflecteur. Ce couple de frottement généré au niveau des liaisons pivot n'est pas dépendant uniquement de la solution utilisée pour les liaisons pivot, mais aussi de la masse du support réflecteur car il s'agit dans notre cas de frottements solides. Ce couple de frottement (noté C_t) qui est appliqué sur la section libre du support réflecteur est calculé par la relation suivante :

$$C_t = PE_3 \times (PE_4 + M^X).L.l \tag{V.2}$$

PE_3 est un paramètre qui caractérise la résistance au frottement dans les liaisons pivot. Il est exprimé en N.m/Kg. Le paramètre PE_4 correspond à la masse surfacique des panneaux réfléchissants (en Kg/m²). Les deux paramètres PE_3 et PE_4 sont dépendants respectivement du choix de la solution de liaison pivot et du choix des panneaux réfléchissants. Etant donné que ces deux éléments ne font pas partie de notre périmètre d'étude, PE_3 et PE_4 sont considérés comme des paramètres du milieu environnant. M^X est la masse surfacique du support réflecteur.

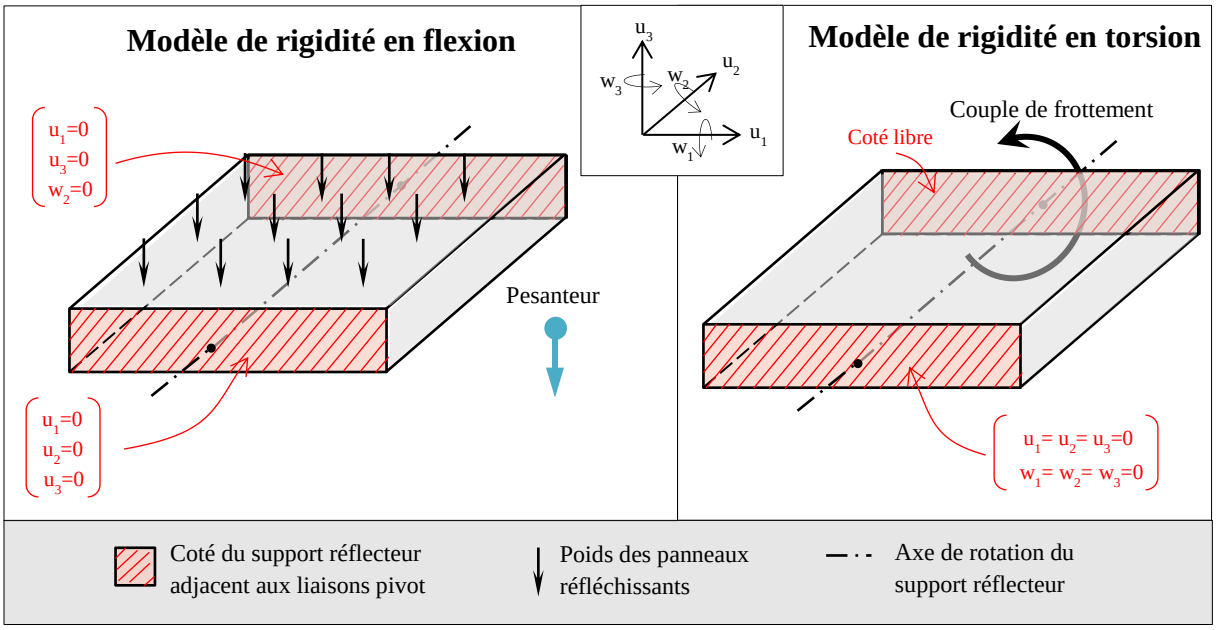


Figure V-5 Conditions aux limites et état de chargement pour le modèle de rigidité en torsion et le modèle de rigidité en flexion

b. Conditions générales de calcul : cas de la rigidité en flexion

Afin de garantir une bonne performance optique, le support réflecteur doit également avoir une déflexion faible. Le modèle de rigidité en flexion permet d'évaluer la flèche maximale du support réflecteur (variable p_2) lorsque ce dernier supporte les panneaux réfléchissants. Avant de présenter les trois modèles δ_3^{tr}, δ_3^{sd} et δ_3^{tb}, nous présentons les conditions aux limites et l'état de chargement communs à ces trois modèles.

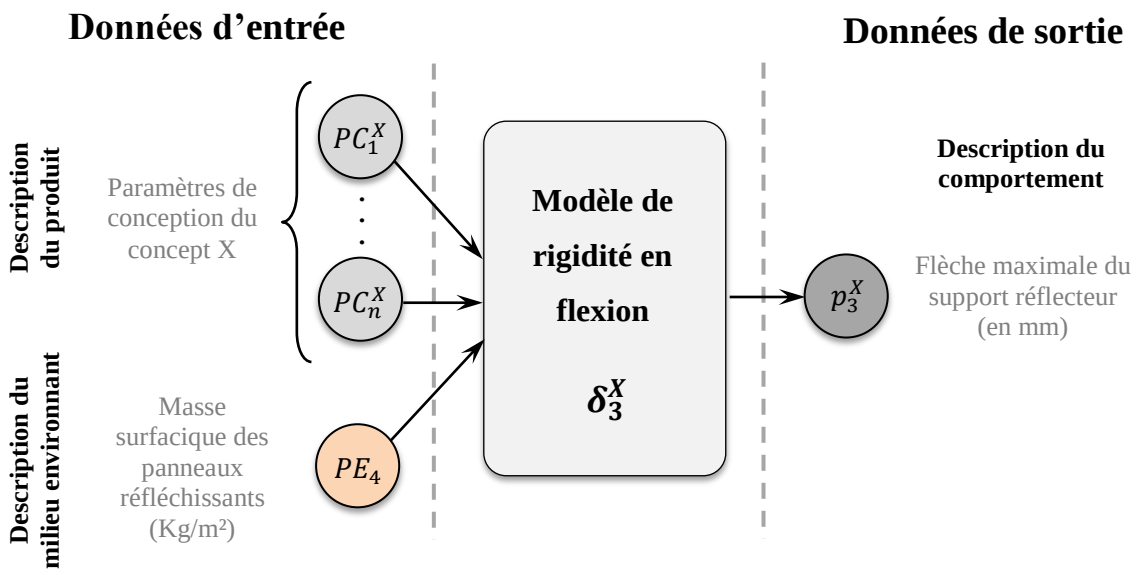


Figure V-6 Structure du modèle de rigidité en flexion

Les conditions aux limites et l'état de chargement sont illustrés dans la Figure V-5. Les seules sollicitations considérées dans le calcul de la flèche maximale sont le poids des panneaux réfléchissants et le poids propre de la structure de support. Nous négligeons l'effet du vent régulier sur la flèche et nous supposons que les panneaux réfléchissants et le dispositif d'accroche ne participent pas à la rigidité en flexion du réflecteur. La Figure V-6 montre la structure du modèle δ_3^X avec ses entrées et ses sorties.

V.6.1.2.1 Concept treillis

Pour le cas de la performance optique, la structure treillis est modélisée par des barres qui sont connectées entre elles par des nœuds, centres des liaisons rotules. Le comportement du matériau est supposé élastique linéaire isotrope. La théorie des poutres est employée dans ce modèle. Nous utilisons la méthode des éléments finis, avec des éléments de type *"barre"*, pour faire le calcul. Le modèle utilisé est schématisé dans la Figure V-7. Les articulations dans ce modèle sont supposées parfaites. Il en résulte que les barres ne sont sollicitées qu'en

traction ou compression (efforts normaux). Cette simplification permet de résoudre le problème d'une manière relativement simple. Dans la structure réelle, les barres diagonales de la structure ne sont pas concourantes aux nœuds et les liaisons ne sont pas réellement des rotules mais des liaisons assemblées (voir Figure V-3). Cela induit des moments de flexion dans les membrures supérieures, inférieures et dans les barres diagonales du treillis. Ce premier modèle de comportement reste peu représentatif du comportement réel de la structure et plusieurs phénomènes phtisiques sont négligés. Cependant, son avantage principal est qu'il est simple et permet de faire des calculs rapides.

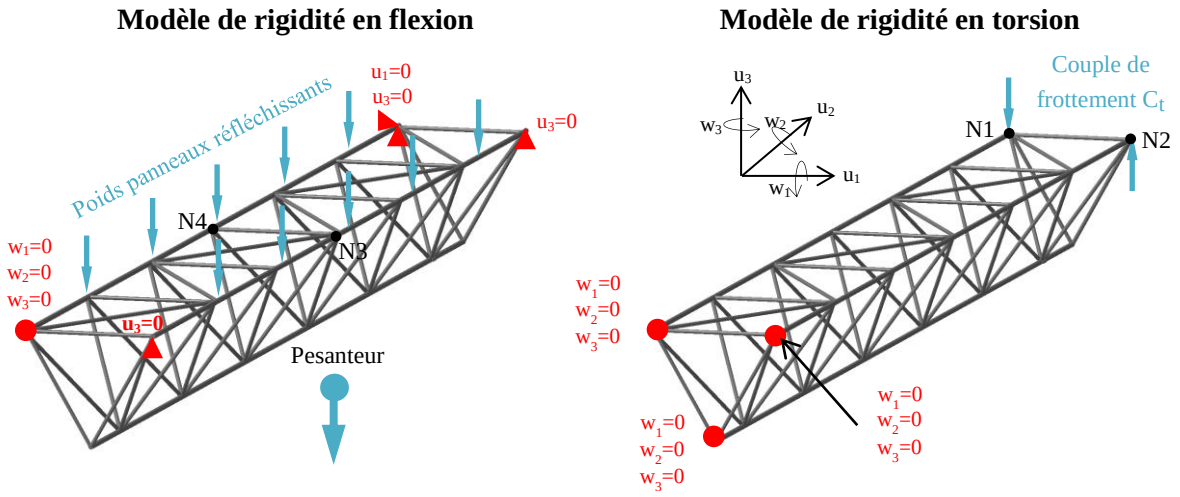


Figure V-7 : Configuration géométrique, conditions aux limites et état de chargement pour le modèle de rigidité en torsion et le modèle de rigidité en flexion du concept treillis

Le modèle illustré à la Figure V-7 permet d'obtenir les déplacements des différents nœuds du treillis mais ne permet pas de calculer directement l'angle de torsion de la structure. L'angle de torsion (en degré) est calculé en fonction des déplacements en z des nœuds $N1$ et $N2$ (voir Figure V-7) et de la largeur du support réflecteur (l) en utilisant la relation suivante :

$$p_2^{tr} = sin^{-1}\left(\frac{|d_1 - d_2|}{l}\right) \tag{V.3}$$

d_1 et d_2 correspondent respectivement aux déplacements dans les nœuds $N1$ et $N2$.

Le même modèle est utilisé pour calculer la flèche maximale de la structure treillis. Seules les conditions aux limites et l'état de chargement sont différents comme nous pouvons le voir sur la Figure V-7. La flèche maximale (variable p_3^{tr}) est égale à la moyenne des déplacements en z dans les deux nœuds $N3$ et $N4$.

V.6.1.2.2 Concept sandwich

Nous appliquons ici la théorie des poutres pour calculer l'angle de torsion et la flèche maximale de la structure sandwich. Le comportement du matériau est supposé élastique linéaire isotrope. La structure sandwich est modélisée par une poutre à section uniforme sur toute sa longueur L. Nous supposons que l'âme et les peaux sont parfaitement solidaires (liaison d'encastrement parfaite). La Figure V-8 montre les conditions aux limites et l'état de chargement utilisés pour le modèle de rigidité en torsion et le modèle de rigidité en flexion.

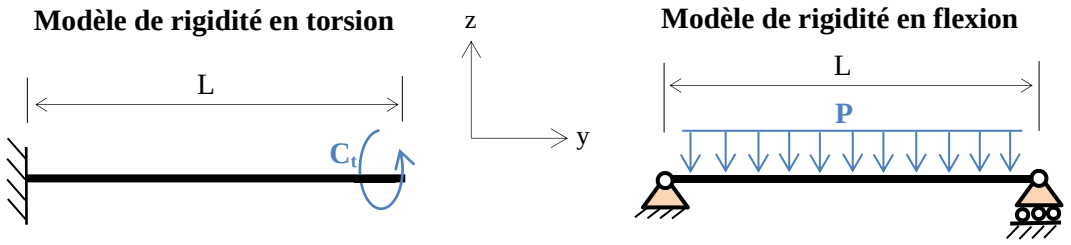


Figure V-8 Conditions aux limites et état de chargement utilisés pour le modèle de rigidité en torsion et le modèle de rigidité en flexion du concept sandwich

En se basant sur la théorie des poutres, l'angle de torsion p_2^{sd} et la flèche maximale p_3^{sd} de la structure sandwich sont respectivement déterminés par les relations (V.4) et (V.5).

$$p_2^{sd} = \frac{C_t \times L}{G \times I_{xz}} \tag{V.4}$$

$$p_3^{sd} = -\frac{5.P.L^2}{384.E.I_x} \tag{V.5}$$

Avec P la charge linéaire équivalente appliquée sur la poutre (incluant le poids propre de la structure et le poids des panneaux réfléchissants), I_{xz} et I_x les moments quadratiques du plan (x, z) et de l'axe x respectivement (ils dépendent de la forme de la section), E le module d'Young du matériau utilisé et G son module de Coulomb. Pour calculer les moments quadratiques I_{xz} et I_x, nous décomposons dans un premier temps la structure en plusieurs éléments de formes usuelles : des sections en I (qui constituent l'âme) et des sections rectangulaires (qui constituent les peaux). Les moments quadratiques de ces deux formes sont bien connus dans la littérature. Les moments quadratiques (I_{xz} et I_x) correspondant à la structure sandwich sont alors obtenus en faisant la somme des moments quadratiques de chaque élément et en utilisant le théorème de transport de Huygens.

V.6.1.2.3 Concept tube

Dans le cas du concept tube, nous appliquons aussi la théorie des poutres pour calculer l'angle de torsion et la flèche maximale de la structure. Le modèle de comportement est le même que celui utilisé pour le cas de la structure sandwich. Le calcul des moments quadratiques I_{xz} et I_x est beaucoup plus simple dans le cas du concept tube. Ils sont calculés directement en fonction de la hauteur du tube central PC_1^{sd}, de sa largueur PC_2^{sd} et de son épaisseur PC_3^{sd}.

V.6.1.3 Résistance au vent extrême

Le support réflecteur doit résister au vent extrême sur le site d'implantation. Pour chacun des trois concepts, nous décrivons dans cette section le modèle de comportement permettant de calculer la pression de vent maximale qui peut être supportée par le support réflecteur. Les données d'entrée et de sortie qu'utilise ce modèle sont présentées à la Figure V-9. La Figure V-10 montre les conditions aux limites et l'état de chargement utilisés. Il convient de noter que la résistance du support réflecteur au vent varie selon sa position angulaire autour de son axe de rotation. Dans notre étude, nous considérons la position dans laquelle le support réflecteur est le plus vulnérable au vent. Elle correspond au cas où les panneaux réfléchissants forment un angle de $\alpha = 45°$ avec le plan horizontal (position illustrée dans la Figure V-10). Bien que les sollicitations mécaniques liées au vent extrême soient prépondérantes par rapport à celles liées à la masse propre du support réflecteur ou à la masse des panneaux réfléchissants, ces trois sources de sollicitation sont prises en compte comme on peut le constater sur la Figure V-10.

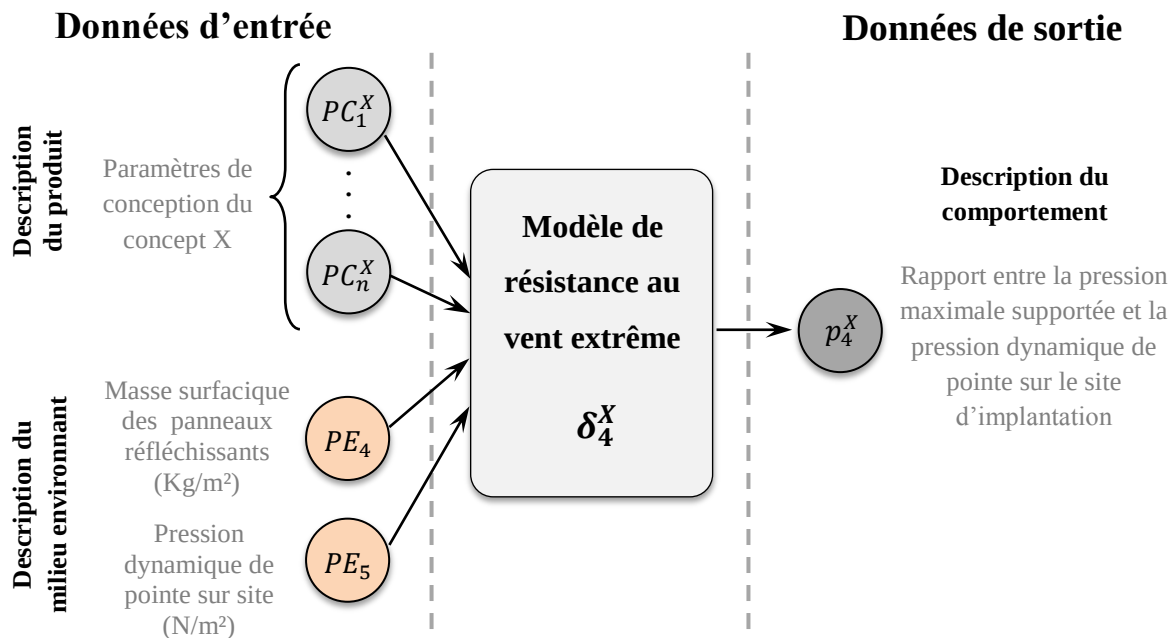


Figure V-9 Structure du modèle de résistance au vent extrême

Pour un choix donné de site d'implantation, il faut trouver la pression surfacique maximale appliquée sur les panneaux réfléchissants à cause du vent extrême. Cette pression, exprimée en N/m^2, est appelée dans la littérature "*pression dynamique de pointe*". Elle est notée PE_5 dans notre étude. Le calcul de PE_5 prend en compte la vitesse maximale du vent $V_{b,0}$ sur le site d'implantation ainsi que d'autres paramètres en lien avec le site d'implantation comme le coefficient d'orographie C_0, le coefficient de rugosité du terrain C_r, la valeur de turbulence du vent I_v, le coefficient de force C_f et la masse volumique de l'aire ρ. La pression dynamique de pointe PE_5 est calculée en fonction de ces coefficients à l'aide de la relation (V.6) [Bsi10]. Cette pression est toujours dans la direction perpendiculaire aux panneaux réfléchissants (voir Figure V-10). Les méthodes pour déterminer les différents coefficients mis en jeu pour le calcul de PE_5 sont données dans l'annexe A. Des méthodes sont issues de la norme Eurocode 1. Etant donné que le choix du site d'implantation n'est pas encore figé au début du projet, le paramètre PE_5 ne peut pas être défini d'une manière précise.

$$PE_5 = \left(C_r . C_0 . V_{b,0}\right)^2 . [1 + 7 . I_v] . 0{,}5 . \rho . C_f \tag{V.6}$$

La variable recherchée à la sortie du modèle de comportement, que nous notons p_4^X, est le rapport entre la pression maximale supportée par la structure et la pression dynamique de pointe PE_5 sur le site d'implantation. Ces deux grandeurs ont la même unité, ce qui fait que p_4^X est une variable adimensionnée.

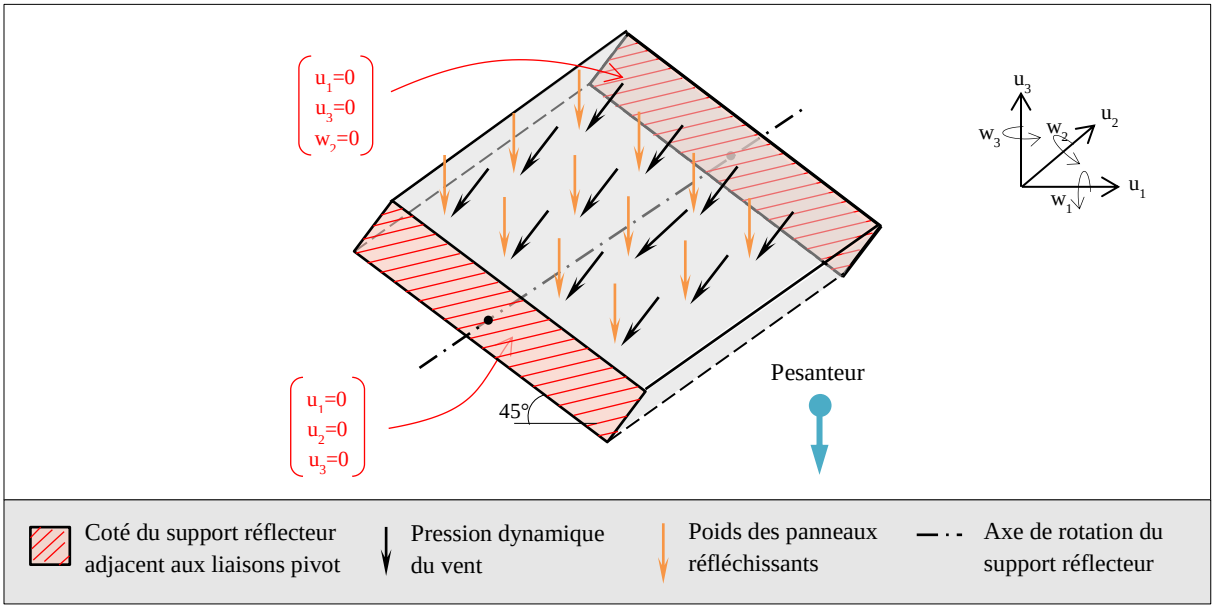


Figure V-10 Conditions aux limites et état de chargement pour le modèle de résistance au vent extrême

V.6.1.3.1 Concept treillis

Dans un premier temps, un modèle de calcul basé la théorie des poutres est utilisé pour déterminer les efforts normaux dans les barres de la structure. La méthode des éléments finis est utilisée pour faire le calcul. Ce modèle est similaire à celui utilisé pour le calcul de la flèche maximale (schématisé dans la Figure V-7). Les seuls points de différence sont *(i)* l'ajout de la pression dynamique engendrée par le vent (notée Q_p) et *(ii)* l'utilisation de la position $\alpha = 45°$ (vulnérabilité maximale au vent) au lieu de la position $\alpha = 0°$. Une fois que les efforts normaux dans les barres sont calculés par ce modèle, les critères de défaillance sont vérifiés dans la structure. Les modes de défaillance considérés dans notre étude sont *(i)* le flambement des barres par compression et *(ii)* l'arrachement par traction des points de fixation dans les nœuds. Nous supposons que la défaillance d'au moins une barre ou un point de fixation provoque la ruine de la structure. Pour le premier mode de défaillance, la norme Eurocode 3 est utilisée pour calculer la charge critique de flambement en fonction de l'effort normal et des caractéristiques des barres. Les étapes de calcul prescrites par la norme Eurocode 3 sont détaillées dans l'annexe B. Concernant le deuxième mode de défaillance, l'effort de traction appliqué sur un point de fixation (noté F_t) est calculé à l'aide des formules (V.7) et (V.8) et en se basant sur la configuration géométrique donnée dans la Figure V-11. Le calcul est basé sur le principe fondamental de la statique. Une fois que cet effort de traction est calculé, il est comparé avec l'effort de traction critique fourni par les catalogues du fournisseur pour vérifier la tenue du point de fixation.

$$F_t = \frac{b.F_2.cos\beta}{2.PC_2^{tr}} \tag{V.7}$$

$$cos\beta = \tan^{-1}\left(\frac{L/(2.PC_5^{tr})}{\sqrt{(PC_3^{tr})^2 + l^2/4}}\right) \tag{V.8}$$

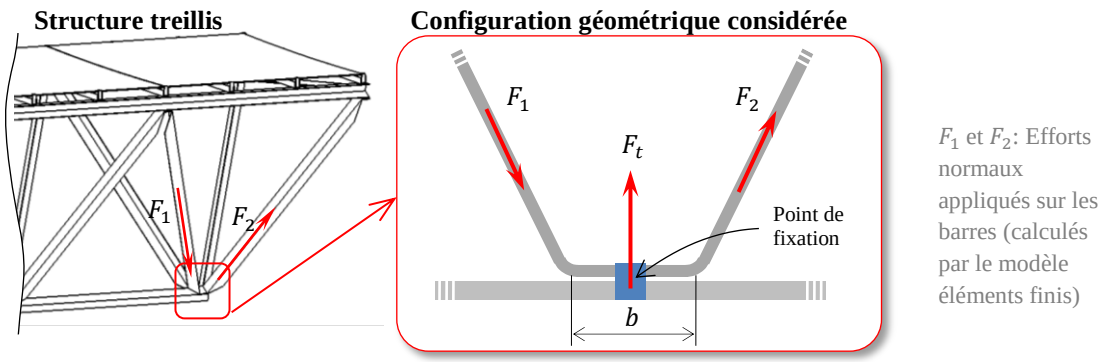


Figure V-11 Configuration géométrique, conditions aux limites et état de chargement considérés pour le calcul de l'effort de traction dans les points de fixation

La Figure V-12 montre la structure de l'algorithme qui permet de trouver la pression dynamique de pointe Q_p^r que peut supporter la structure treillis. Comme le montre cette figure, plusieurs itérations de calcul sont effectuées pour trouver Q_p^r. A chaque itération, le niveau de la pression dynamique Q_p appliquée sur la structure est incrémenté et les deux critères de défaillance sont ensuite vérifiés. Le calcul s'arrête lorsque l'un des deux critères de défaillance est vérifié.

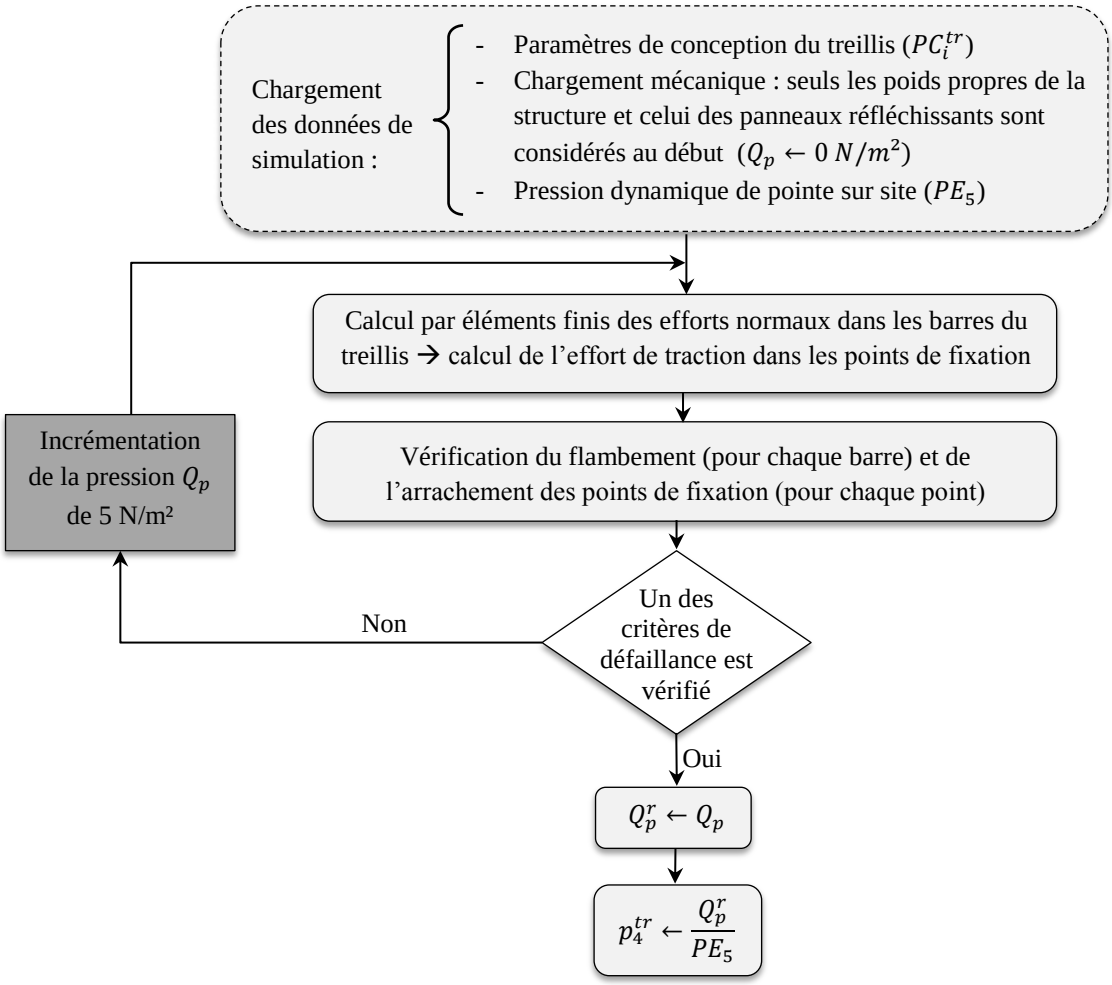


Figure V-12 Structure de l'algorithme utilisé pour le calcul de la pression dynamique de pointe $\boldsymbol{Q_p^r}$ que peut supporter la structure treillis

V.6.1.3.2 Concept Sandwich

Dans le cas de la structure sandwich, nous considérons deux modes de défaillance qui sont *(i)* la déformation plastique de la peau par contrainte normale due à la flexion de la structure et *(ii)* la déformation plastique des rivets par cisaillement dû à l'effort rasant. L'effort rasant est l'effort de cisaillement longitudinal que les points de fixation doivent transférer à l'interface entre l'âme et la peau. Cet effort est illustré dans la Figure V-13. La ruine de la structure est

conditionnée par l'apparition d'au moins un de ces modes de défaillance. La non-prise en compte du risque de voilement de la peau est justifiée par l'utilisation de tôles ondulées résistantes à ce phénomène.

Pour le premier mode de défaillance, la méthode consiste à calculer la contrainte normale maximale (notée σ_{xx}^{max}) dans la structure et de la comparer ensuite avec la limite élastique du matériau choisi pour la peau. Nous nous basons sur la théorie des poutres pour calculer la contrainte σ_{xx}^{max}. La structure est soumise à deux sollicitations mécaniques dans deux directions différentes : la pression dynamique du vent dans la direction $\alpha = 45°$ et la solicitation liée à son poids propre et celui des panneaux réfléchissants dans la direction $\alpha = 0°$ (direction verticale). La structure subit ainsi une flexion déviée (moments de flexion appliqués dans les deux axes principaux). Dans ce cas, la contrainte normale maximale dans la peau est déterminée par la relation suivante :

$$\sigma_{xx}^{max} = -\frac{M_{f_x}^{max}}{I_{G_x}} \times z' + -\frac{M_{f_z}^{max}}{I_{G_z}} \times x' \tag{V.9}$$

Avec z' la distance entre la fibre neutre et la surface de la peau (plan $z = PC_1^{sd}/2$) et x' la distance entre la fibre neutre et le plan $x = l/2$. Dans la section V.6.1.2.2, nous avons expliqué comment nous déterminons le moment quadratique $I_{G_{zx}}$ de la structure. La même méthode est valable pour le calcul du moment I_{G_z}. Les moments de flexion maximale $M_{f_x}^{max}$ et $M_{f_z}^{max}$, par rapport aux axes x et z respectivement, sont calculés en fonction de la pression dynamique de pointe Q_p appliquée sur la structure, de la masse surfacique des panneaux réfléchissants PE_4, de la masse surfacique de la structure M^{sd}, de la longueur de la structure L, et de sa largeur l par les relations (V.10) et (V.11) respectivement.

$$M_{f_x}^{max} = \frac{\left(PE_2.\cos\alpha + Q_p + M^{sd}.\cos\alpha\right).L^2}{8.l} \tag{V.10}$$

$$M_{f_z}^{max} = \frac{(PE_2.\sin\alpha + M^{sd}.\sin\alpha).L^2}{8.l} \tag{V.11}$$

Le deuxième critère de défaillance considéré dans le cas de la structure sandwich est celui de l'endommagement plastique des rivets par cisaillement dû à l'effort rasant. Comme le montre la Figure V-13, les rivets doivent transmettre les efforts rasants (noté R) et empêcher ainsi le glissement entre la peau et les âmes.

L'effort rasant par unité de longueur, noté dR, est calculé par la relation suivante :

$$dR = \frac{(-V^{max}).S_x}{I_{G_x}}.dx \tag{V.12}$$

Avec V^{max} l'effort tranchant maximal dans la structure et S_x le moment statique de la section de la peau par rapport au centre de gravité. Etant donné que la section de la peau a une densité homogène, son moment statique S_x par rapport à l'axe x est égal au produit de l'aire de cette section par la distance de son centre de gravité à l'axe :

$$S_x = \frac{PC_1^{sd}.PC_2^{sd}.l}{2} \tag{V.13}$$

Une fois que nous avons dR, l'effort maximal appliqué sur les rivets est donné par la relation :

$$R_{rivet}^{max} = \frac{(-V^{max}).S}{I_{G_x}}.PC_2^{sd}.PC_2^{sd} \tag{V.14}$$

la contrainte de cisaillement maximale dans les rivets (notée σ_{rivet}^{max}) est calculée en fonction de R_{rivet}^{max} et de la section S_{rivet} du rivet par la relation suivante :

$$\sigma_{rivet}^{max} = \frac{R_{rivet}^{max}}{S_{rivet}} \tag{V.15}$$

Avec S_{rivet} la section des rivets. La contrainte maximale de cisaillement σ_{rivet}^{max} est comparée ensuite avec la limite élastique R_e du matériau du rivet pour vérifier la tenue mécanique de ce dernier.

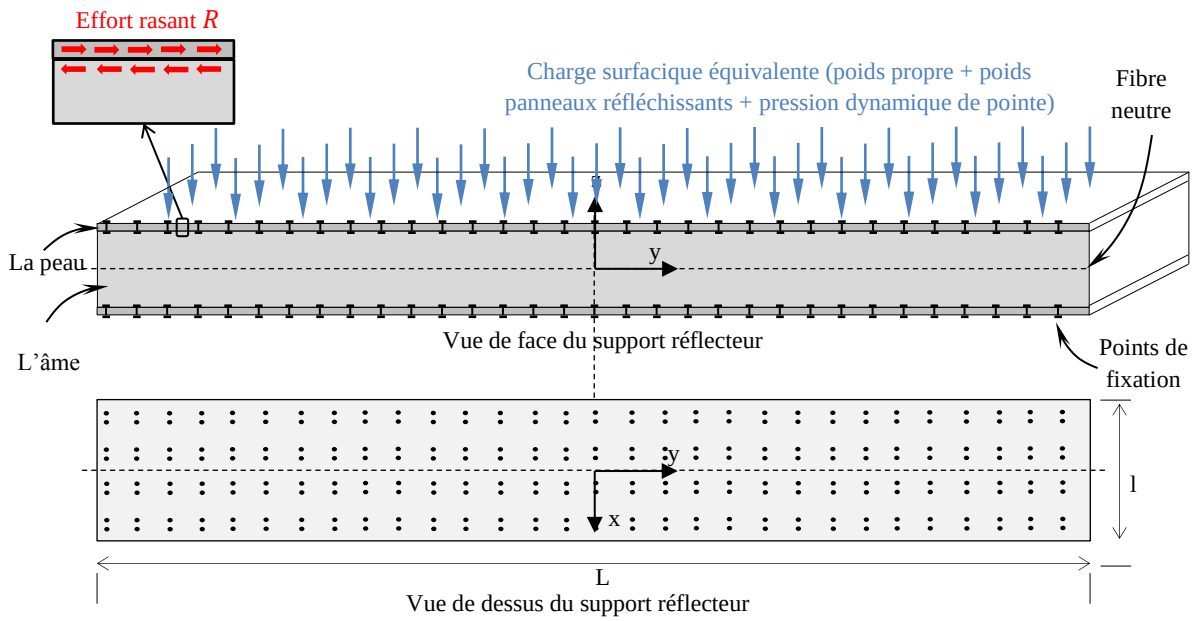


Figure V-13 Illustration de l'effort rasant

La Figure V-14 montre la structure de l'algorithme qui permet de calculer la pression dynamique de pointe maximale Q_p^r que peut supporter la structure sandwich. Comme le montre cette figure, plusieurs itérations sont effectuées pour trouver Q_p^r. A chaque itération, le niveau de pression Q_p appliqué sur la structure est incrémenté et les deux critères de défaillance sont vérifiés. Le calcul s'arrête lorsque l'un des deux critères de défaillance est vérifié.

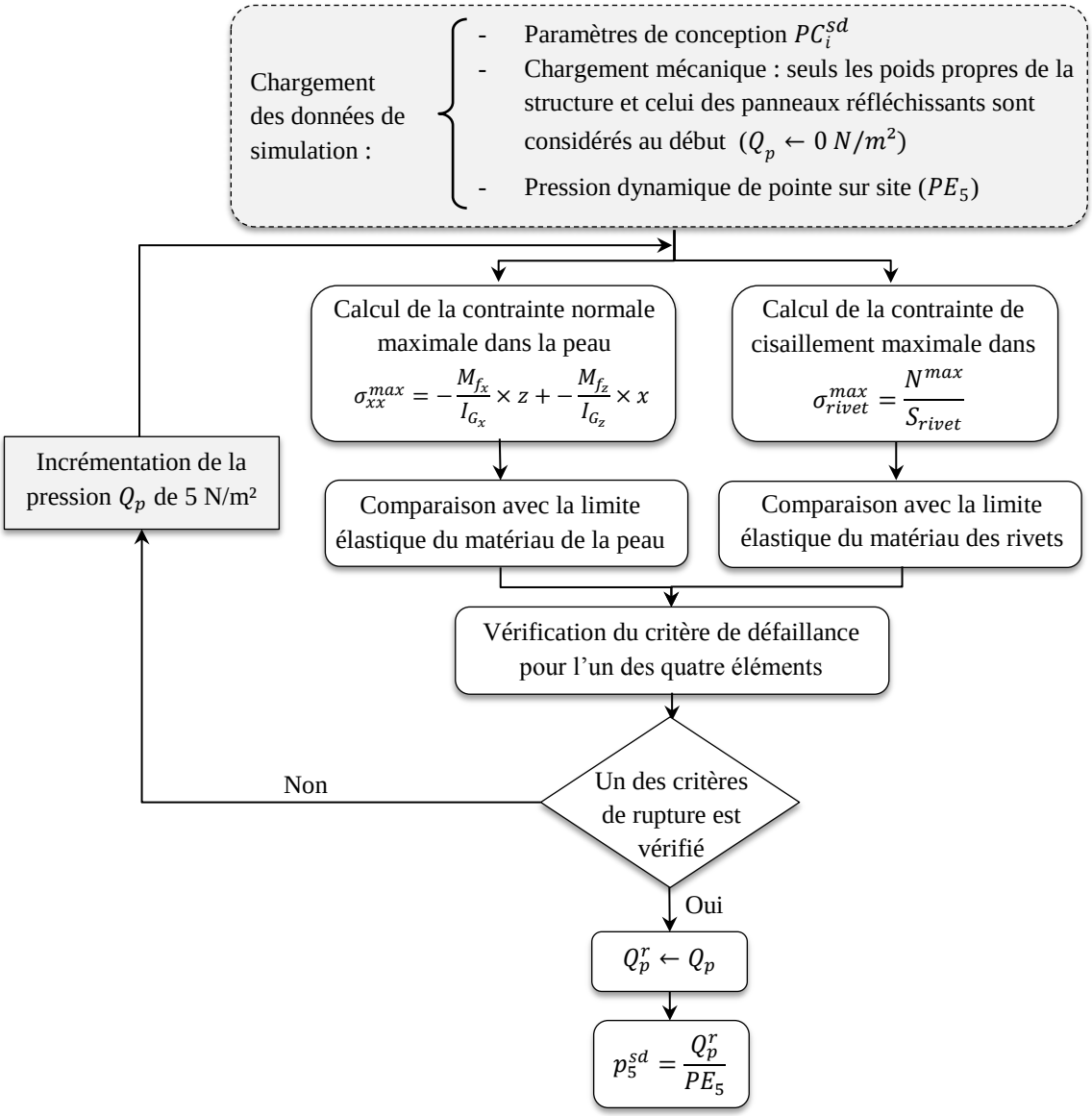


Figure V-14 Structure de l'algorithme utilisé pour le calcul de la pression dynamique de pointe supportée par la structure sandwich

V.6.1.3.3 Concept tube

Dans le cas de la structure tube, nous considérons deux modes de défaillance qui sont *(i)* la déformation plastique du tube central par contrainte normale due à la flexion et *(ii)* la déformation plastique des traverses par contrainte normale due à la flexion. Nous considérons que l'apparition d'au moins une de ces défaillances est suffisante pour provoquer la ruine de la structure.

Pour la défaillance du tube central, nous suivons la même démarche utilisée pour le cas de la structure sandwich (rupture de l'âme par déformation plastique). Nous calculons dans un premier temps la contrainte normale maximale σ_{xx}^{max} dans le tube central en se basant sur la théorie des poutres et nous la comparons ensuite avec la limite élastique du matériau choisi pour vérifier la tenue mécanique du tube central. Comme pour le cas pour la structure sandwich, la contrainte maximale due à la flexion est déterminée en utilisant les relations (V.9), (V.10) et (V.11).

Contrairement au tube central, qui doit transmettre l'effort du vent sur toute la longueur de la structure, les traverses ne transmettent que les efforts de vent appliqués localement sur les panneaux réfléchissants. Ainsi, nous raisonnons par la suite à l'échelle d'un panneau réfléchissant seulement. Un panneau réfléchissant est supporté par des traverses dont le nombre est aussi un paramètres de conception (noté PC_3^{tb}) qui doit être fixé. La Figure V-15 montre le modèle simplifié pour calculer la contrainte maximale dans une traverse.

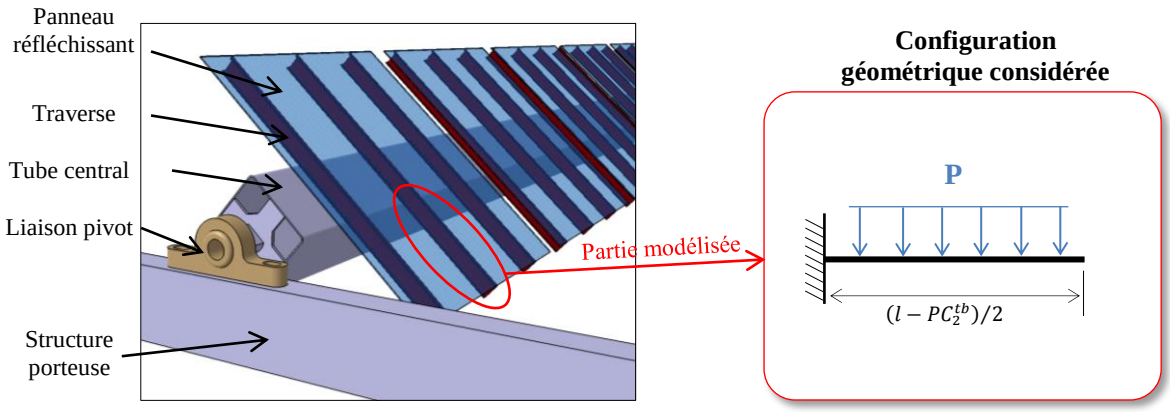


Figure V-15 Configuration simplifiée pour le calculer la contrainte maximale dans les traverses

En considérant cette configuration, le moment maximal dans la traverse est déterminé en se basant sur la théorie des poutres par la relation suivante :

$$\sigma_{xx}^{max} = -\frac{M_{f_x}}{I_{G_x}} \times z' \qquad \text{(V.16)}$$

Avec I_{G_x} le moment quadratique de la traverse, z' la distance entre la fibre neutre de la traverse et le bord supérieur et M_{f_x} le moment de flexion maximale appliqué sur la traverse. En se basant sur la configuration simplifiée de la figure, le moment M_{f_x} est déterminé par la relation suivante :

$$M_{f_x} = -\frac{P.\left(1 - PC_3^{tb}\right)}{2} \tag{V.17}$$

La charge linéaire P est déterminée en fonction de la pression dynamique de pointe Q_p, du nombre de traverses par panneau réfléchissant PC_2^{tb}, et de la longueur d'un panneau par la relation (V.18). Le poids propre des traverses est négligé.

$$P = -\frac{\left(PE_2.\cos\alpha + Q_p\right).l_p}{PC_2^{tb}} \tag{V.18}$$

La contrainte maximale de cisaillement σ_{xx}^{max} est comparée ensuite avec la limite élastique R_e du matériau choisi pour les traverses.

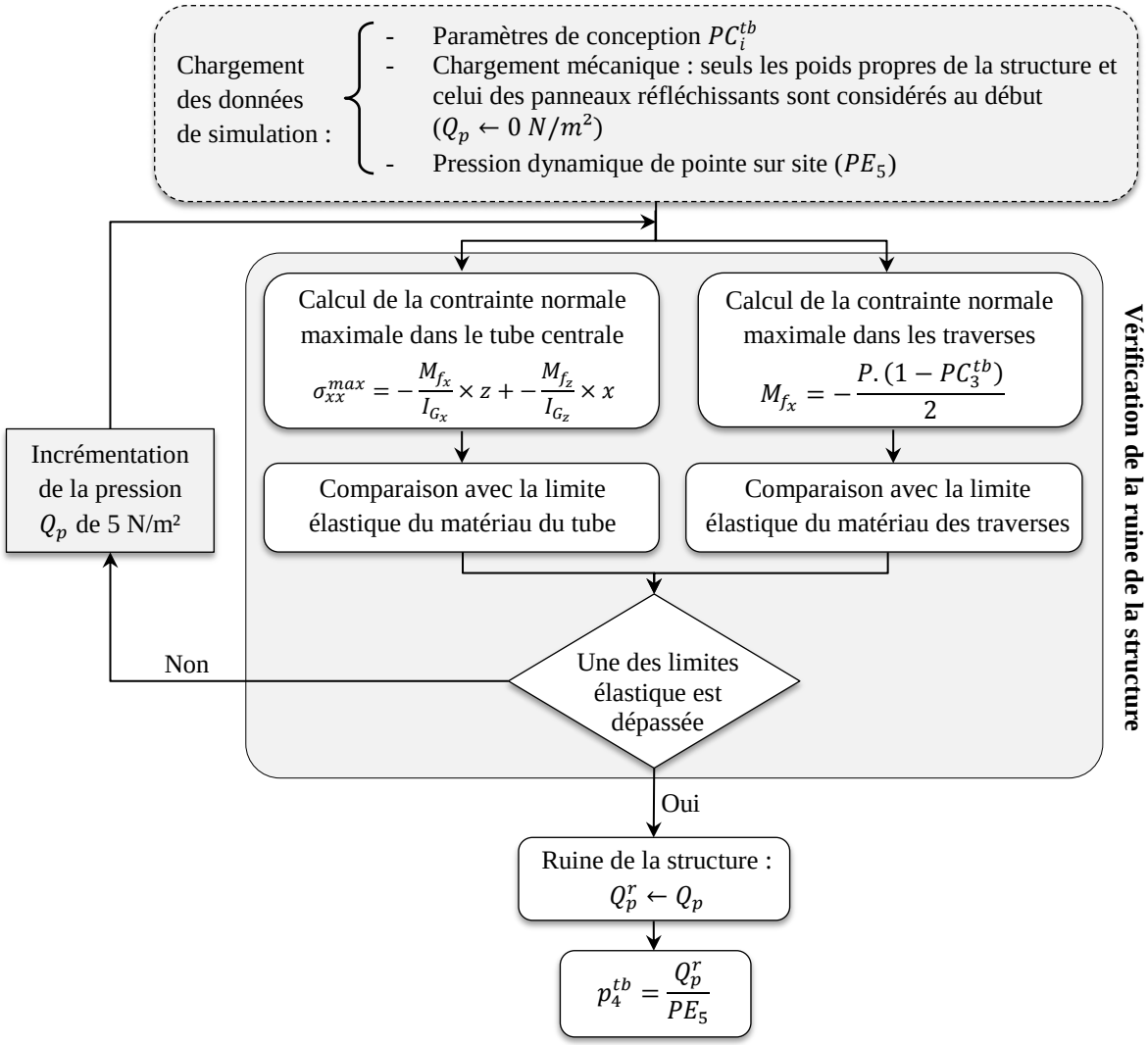


Figure V-16 Structure de l'algorithme utilisé pour le calcul de la pression dynamique de pointe Q_p^r que peut supporter la structure tube

La Figure V-16 montre la structure de l'algorithme qui permet de calculer la pression dynamique de pointe maximale Q_p^r que peut supporter la structure tube. Comme le montre cette figure, plusieurs itérations sont effectuées pour trouver Q_p^r. A chaque itération, le niveau de pression Q_p appliqué sur la structure est incrémenté et les deux critères de défaillance sont vérifiés. Le calcul s'arrête lorsque l'un des deux critères de défaillance est vérifié.

V.6.2. Modèles de comportement avancés : cas du treillis

Dans cette section, nous nous positionnons dans une phase d'étude beaucoup plus avancée que celle considérée dans la section V.6.1. Nous supposons dans cette phase que le concept treillis a été retenu parmi les trois concepts. Nous traitons donc la phase de conception architecturale dont laquelle le but est de fixer tous les paramètres de conception de la structure

treillis pour aboutir au produit final. Ces modèles de comportement, bien qu'ils soient différents de ceux présentés dans la section V.6.1, ont les mêmes données d'entrée et de sortie. Le modèle présenté dans la section V.6.1.1 pour l'estimation du coût de la matière première ne change pas et donc il ne sera pas abordé dans la section actuelle.

a. Performance optique

Le prototypage physique et l'expérimentation qui s'ensuit nous ont permis, d'une part, de mettre en évidence des écarts importants entre les performances prédites par les modèles de comportement préliminaires et les performances réelles et, d'autre part, de mettre en évidence les phénomènes physiques pertinents au comportement que nous souhaitons observer (comportement en torsion et en flexion dans notre cas). Ces écarts seront présentés et analysés plus en détail dans la section V.8.2 lorsque nous qualifierons l'exactitude des modèles de comportement utilisés. Les écarts observés sont dus aux hypothèses adoptées dans ces modèles de comportement préliminaires et qui rendent le modèle peu représentatif des phénomènes physiques pertinents. Pour une meilleure prise en compte de ces phénomènes physiques, et donc une prédiction plus exacte du comportement, un nouveau modèle de comportement est proposé pour évaluer l'angle de déformation et la flèche maximale de la structure treillis. Nous modélisons le comportement du matériau par un modèle élastique linéaire isotrope. La structure est modélisée par des éléments surfaciques de type *"coque"* cette fois-ci, et non pas avec des éléments linéaires (barres). L'utilisation de ce type d'éléments permet de modéliser d'une manière plus fidèle et plus précise les formes de la structure. Il devient alors possible de prendre en compte des phénomènes physiques plus complexes, en particulier les phénomènes de déformation au niveau des nœuds du treillis (*e.g.* les phénomènes de concentration de contraintes). A partir du modèle CAO (modèle volumique) de la structure, un modèle coque (pas encore maillé) est directement extrait dans un premier temps. Ce modèle est ensuite maillé avec des éléments *"coque"* de type triangle à 6 nœuds. Comme nous pouvons le voir sur la Figure V-17, les régions à fort gradient de contrainte ont été maillées avec des éléments beaucoup plus fins. Ces régions correspondent aux liaisons mécaniques entre barres diagonales et membrures (les nœuds du treillis). Les phénomènes ayant lieu au niveau de ces liaisons sont reproduits d'une manière plus fidèle que l'ancien modèle.

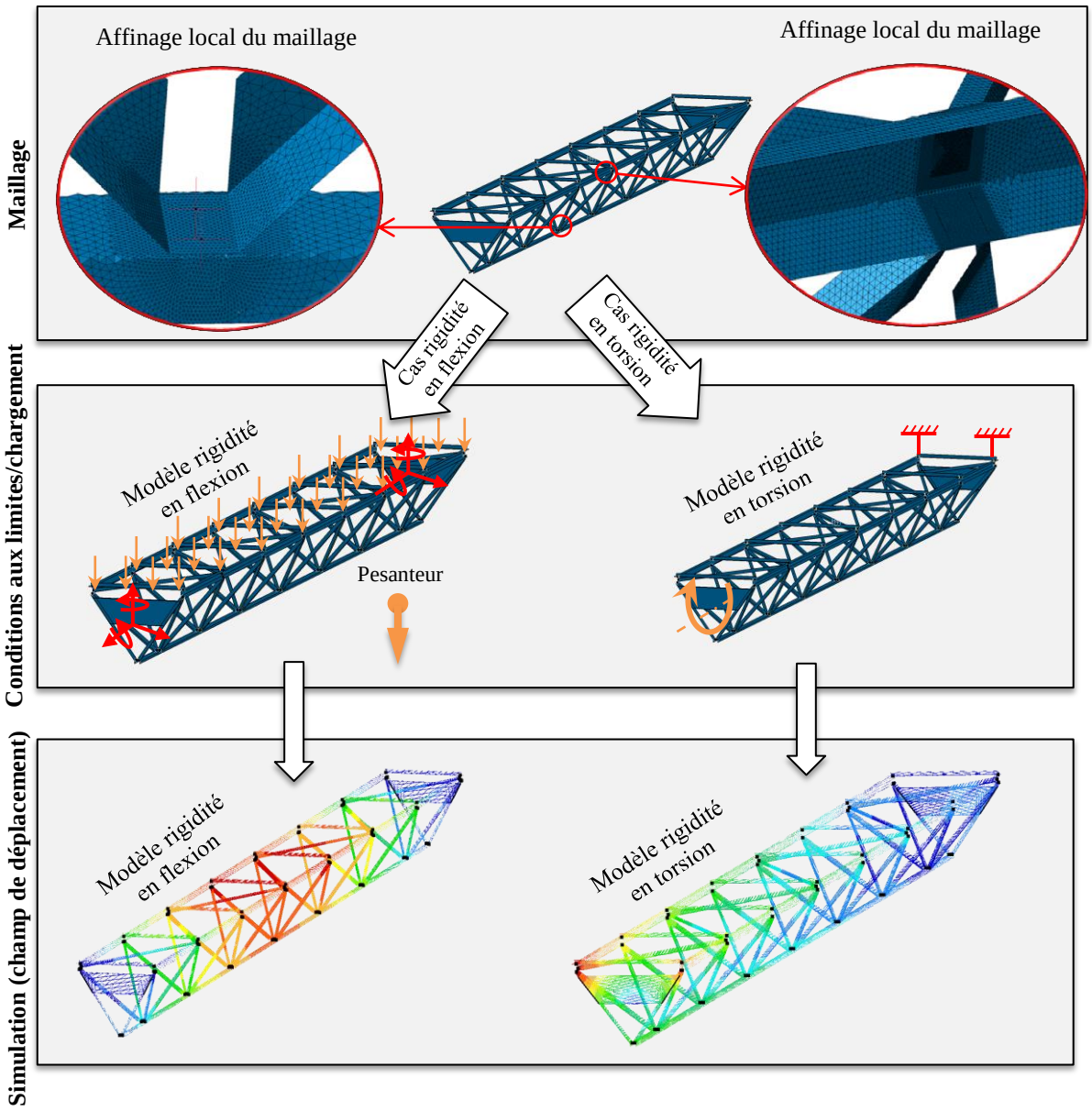


Figure V-17 Etapes de la construction du modèle éléments finis avec des éléments de type *"coque"*

La Figure V-17 montre la configuration d'étude, les conditions aux limites et l'état de chargement. Elle montre aussi les champs de déplacement obtenus. La déformation angulaire et la flèche maximale sont déterminées à partir du champ de déplacement obtenu après simulation.

b. Résistance au vent extrême

Le modèle préliminaire de calcul de la charge critique de flambement repose sur l'hypothèse que les éléments du treillis sont articulés et, par conséquent, ils sont soumis uniquement à des efforts normaux. Dans la structure réelle, les éléments du treillis ne sont pas articulés. Il en résulte des sollicitations de flexion *"parasites"* dans ces éléments. Afin prendre en compte

ces phénomènes, nous utilisons des éléments de type *"poutre"* (au lieu des barres) car ils sont plus proches de la réalité et plus adaptés pour prendre en compte les sollicitations de flexion parasites. Ces sollicitations de flexion sont alors intégrées (en plus des efforts de compression) dans le calcul de la charge critique de flambement. Les détails de calcul de la charge critique de flambement en intégrant les flexions parasites sont donnés dans l'annexe B. La charge critique de flambement diminue lorsqu'on prend en compte ces sollicitations parasites. En ce qui concerne le deuxième mode de défaillance pris en compte, qui est l'arrachement des points de fixation par traction dans les nœuds, aucune modification n'a été apportée dans cette phase d'étude avancée.

V.7 Sélection préliminaire de concepts

Dans cette section, l'objectif est de réduire le nombre de concepts proposés initialement en éliminant les concepts les moins pertinents. Les efforts et les ressources de l'entreprise pourront ainsi être concentrés sur les concepts les plus prometteurs. Pour atteindre cet objectif, nous appliquons la démarche proposée dans le chapitre III. Les étapes de formalisation des préférences du décideur et de construction des modèles de comportement δ_i, nécessaires pour appliquer la démarche du chapitre III, ont été présentées dans les sections précédentes. Il nous reste l'étape de caractérisation des données d'entrée qui sera abordée dans la section V.7.1. Dès lors, il sera possible de calculer les deux principaux indicateurs $IGCR$ et IGD pour aider le décideur à choisir les concepts les plus pertinents. Les résultats concernant ces deux indicateurs seront présentés dans la section V.7.2. En fin, ces résultats seront discutés dans la section V.7.3.

Dans la phase préliminaire du projet, deux difficultés principales sont rencontrées sur notre cas industriel. D'une part, l'espace de conception est assez vaste car nous disposons de plusieurs concepts dont les caractéristiques (paramètres de conception) sont définis d'une manière très incomplète. D'autre part, les modèles de comportement à notre disposition, qui traduisent une connaissance de nature explicite, sont très approximatifs comme nous avons pu le constater dans la section V.6.1. Etant donné les enjeux liés au choix du support réflecteur (coût de la centrale, rendement énergétique, etc.), il est risqué de se baser uniquement sur ces modèles pour faire des choix de concepts. Cela pourrait conduire à l'élimination de concepts potentiellement intéressants. Pour remédier à cette difficulté, nous nous orientons dans notre étude vers la connaissance implicite (ou tacite), obtenue au travers de l'expérience et du

savoir-faire inné des concepteurs. Cette connaissance est formalisée dans la phase de caractérisation des données d'entrée (section V.7.1).

V.7.1. Caractérisation des données d'entrée

Les données d'entrée, qui sont les paramètres de conception et les paramètres du milieu environnant, sont caractérisées dans notre cas d'étude par les fonctions de préférence, les indices de variation et les indices de couplage selon la démarche décrite dans la section III.3. Comme cela a été évoqué auparavant, les fonctions de préférence permettent de formaliser les préférences subjectives des concepteurs vis-à-vis des données d'entrée. Ces fonctions sont établies en se basant sur l'expérience des concepteurs, leur savoir-faire, et la connaissance qu'ils ont pu acquérir durant les activités antérieures de développement (calculs numériques, expérimentation physique, etc.). Ces fonctions de préférence sont présentées à la Figure V-18 pour le cas du concept treillis. Les fonctions correspondantes aux autres données d'entrée sont données dans l'annexe C. Les différents concepteurs peuvent avoir des points de vue différents vis-à-vis des données d'entrée. Les fonctions de préférence sont alors établies dans notre étude en collaboration avec les différents concepteurs participant au projet de développement. Il demeure cependant difficile d'établir ces fonctions de préférence à cause des divergences de certains points de vue. Une fois ces fonctions établies, les indices de couplage peuvent être calculés en utilisant ces fonctions ainsi que les modèles de comportement préliminaires. Le Tableau V-5 présente les indices de variation et les indices de couplage pour le cas des paramètres de conception du concept treillis et le cas des paramètres du milieu environnant. Les résultats concernant les autres paramètres de conception (sandwich et tube) sont donnés en annexe C.

Bien que nous nous focalisions sur les phases préliminaires du projet dans cette partie du chapitre, nous avons présenté à la Figure V-18 les fonctions de préférence pour la phase avancée du projet également. Il est ainsi possible d'observer à la Figure V-18 la convergence dans les préférences des concepteurs vis-à-vis des paramètres de conception du treillis. Cela montre que la description du produit devient de plus en plus complète au fur et à mesure que le projet avance.

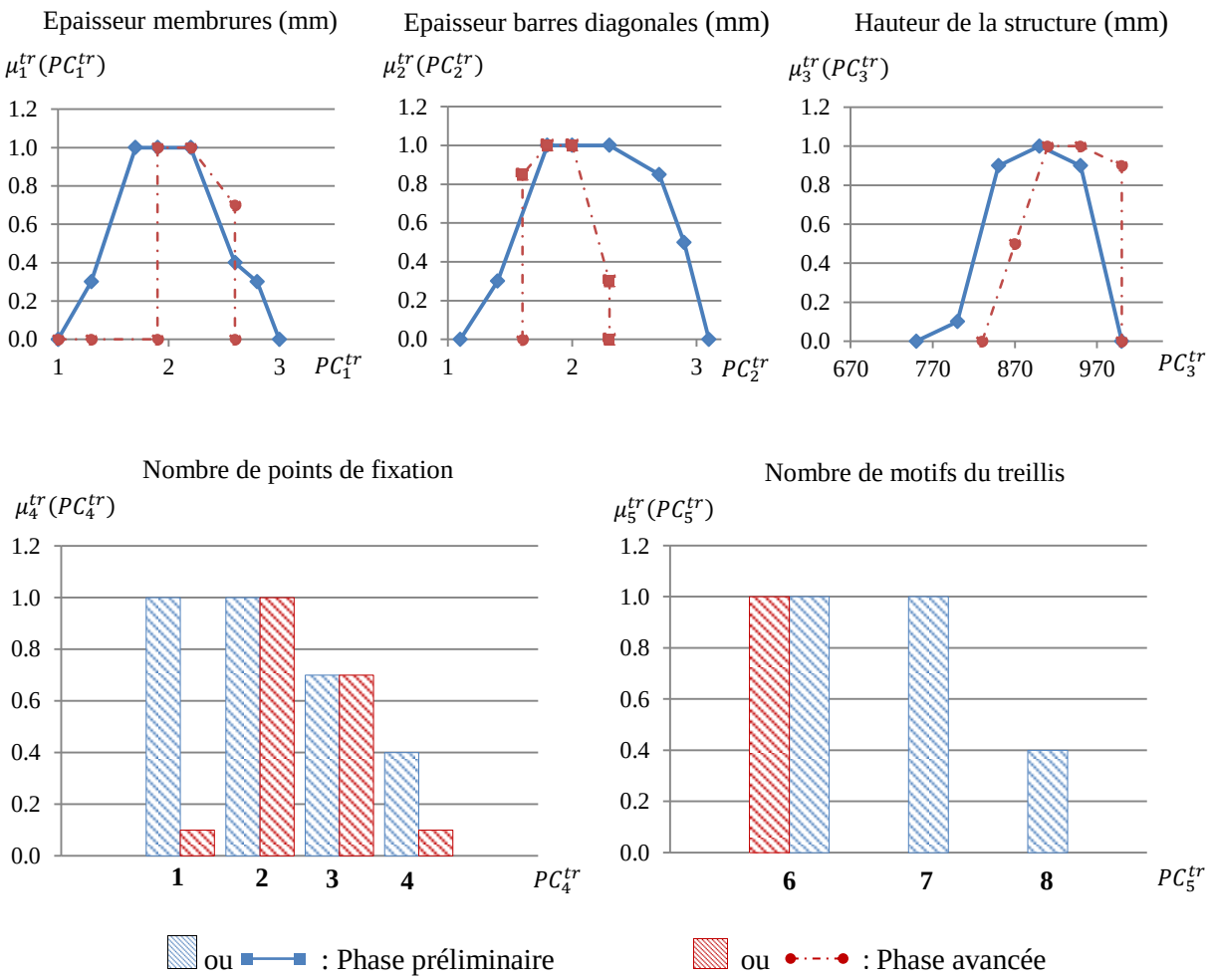


Figure V-18 Fonctions de préférence des paramètres de conception du concept treillis

Les indices de variation permettent d'exprimer le taux avec lequel un paramètre approche sa valeur finale. Ainsi, pour le paramètre PE_5 (pression dynamique de pointe) par exemple, beaucoup d'études sont menées en parallèle au développement du produit pour définir la région exacte où seront installés les champs solaires. Cela explique le taux de variation relativement élevé de ce paramètre (voir Tableau V-5). Par contre, nous remarquons dans le Tableau V-5 un faible taux de variation pour le paramètre PE_1 (prix de la matière première). Ce résultat s'explique par l'instabilité du marché de la matière première utilisée. Il est difficile de donner une estimation précise du prix de la matière première dans les années à venir, mêmes avec des études très poussées.

	Données d'entrée	Indice de variation	Indice de couplage											
			Concept treillis				Concept sandwich				Concept tube			
			p_1^{tr}	p_2^{tr}	p_3^{tr}	p_4^{tr}	p_1^{sd}	p_2^{sd}	p_3^{sd}	p_4^{sd}	p_1^{tb}	p_2^{tb}	p_3^{tb}	p_4^{tb}
Concept treillis	PC_1^{tr}	0.7	0.25	0.2	0.82	0.21	-	-	-	-	-	-	-	-
	PC_2^{tr}	0.7	0.7	0.8	0.4	0.36	-	-	-	-	-	-	-	-
	PC_3^{tr}	0.85	0.45	0.37	1	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
	PC_4^{tr}	0.6	0	0.67	0.12	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	PC_5^{tr}	0.67	0.28	0.55	0.23	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-
Milieu environnant	PE_1	0.21	0.15	0	0	0	0.21	0	0	0	0.12	0.00	0.00	0.00
	PE_2	0.3	0.11	0	0	0	0.15	0	0	0	0.07	0.00	0.00	0.00
	PE_3	0.8	0	0.8	0	0	0	0.32	0	0	0.00	0.19	0.00	0.00
	PE_4	0.75	0	0	0.5	0.1	0	0	0.25	0.04	0.00	0.00	0.17	0.01
	PE_5	0.75	0	0	0	0.8	0	0	0	0.29	0.00	0.00	0.00	0.12

Tableau V-5 Indices de variation et indices de couplage pour les paramètres de conception (du treillis) et les paramètres du milieu environnant

La procédure utilisée pour le calcul des indices de couplage permet aussi de fournir les espaces de performance possibles pour chacun des trois concepts. Ces espaces de performance sont présentés sur la Figure V-19. Sur la même figure, nous avons également représenté le seuil d'acceptabilité correspondant à chaque variable de performance. Ainsi, il est possible de comparer l'espace des performances admissibles (délimité par les seuils d'acceptabilité) avec l'espace des performances possibles.

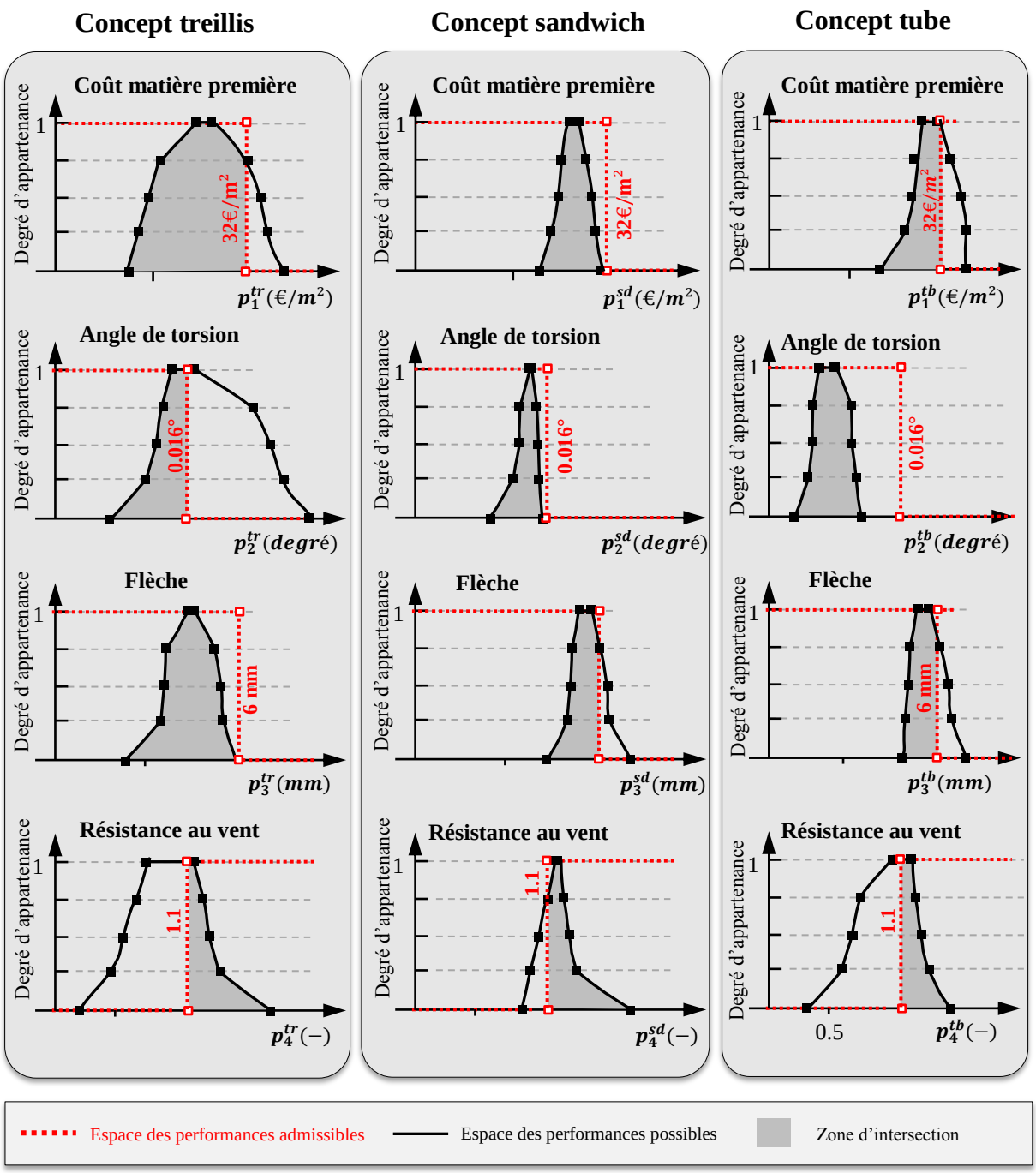


Figure V-19 Espaces des performances possibles pour chacun des trois concepts

V.7.2. Résultats des calculs

A ce stade de notre étude, toutes les informations sont réunies pour déterminer les indicateurs $IGCR$ et IGD pour les trois concepts étudiés. L'indice de criticité de risque ICR_i^X correspondant à une variable de performance p_i^X est, pour rappel, le produit de l'occurrence O_i^X et de la détectabilité D_i^X. L'occurrence est définie en utilisant les résultats présentés sur la

Figure V-19. Les résultats détaillés concernant le calcul des indices ICR_i^X pour les trois concepts sont présentés dans le Tableau V-6.

	p_1^X			p_2^X			p_3^X			p_4^X			
	O_1^X	D_1^X	ICR_1^X	O_2^X	D_2^X	ICR_2^X	O_3^X	D_3^X	ICR_3^X	O_4^X	D_4^X	ICR_4^X	$IGCR^X$
Concept treillis	0.91	0.75	0.68	0.31	0.42	0.13	1.00	0.82	0.82	0.28	0.67	0.19	**0.13**
Concept tube	0.70	0.78	0.55	1.00	0.62	0.62	0.71	0.59	0.42	0.38	0.61	0.23	**0.23**
Concept sandwich	1.00	0.69	0.69	1.00	0.70	0.70	0.91	0.69	0.63	0.78	0.71	0.55	**0.55**

Tableau V-**6** Résultats détaillés pour les indices de criticité de risque

Nous avons à ce stade une estimation du risque d'insuccès (traduit par l'indicateur $IGCR$) lié à chacun des trois concepts. C'est une information d'une grande importance pour la prise de décision. Les résultats de l'indicateur $IGCR$ (Tableau V-6) sont différents pour les trois concepts. D'après ces résultats, le concept sandwich est le moins risqué des trois concepts, suivi du concept tube et du concept treillis. Malgré que ces résultats soient largement en faveur du concept sandwich, le jugement global ne se fera qu'après le calcul de l'indice global de désirabilité IGD. A partir des espaces de performance présentés à la Figure V-19, les espaces de désirabilité (IGD) sont obtenus en utilisant le modèle $\varphi \circ \phi$ (association du modèle d'interprétation et d'agrégation). Les résultats des deux indicateurs $IGCR$ et IGD pour chaque concept sont réunis dans la Figure V-20.

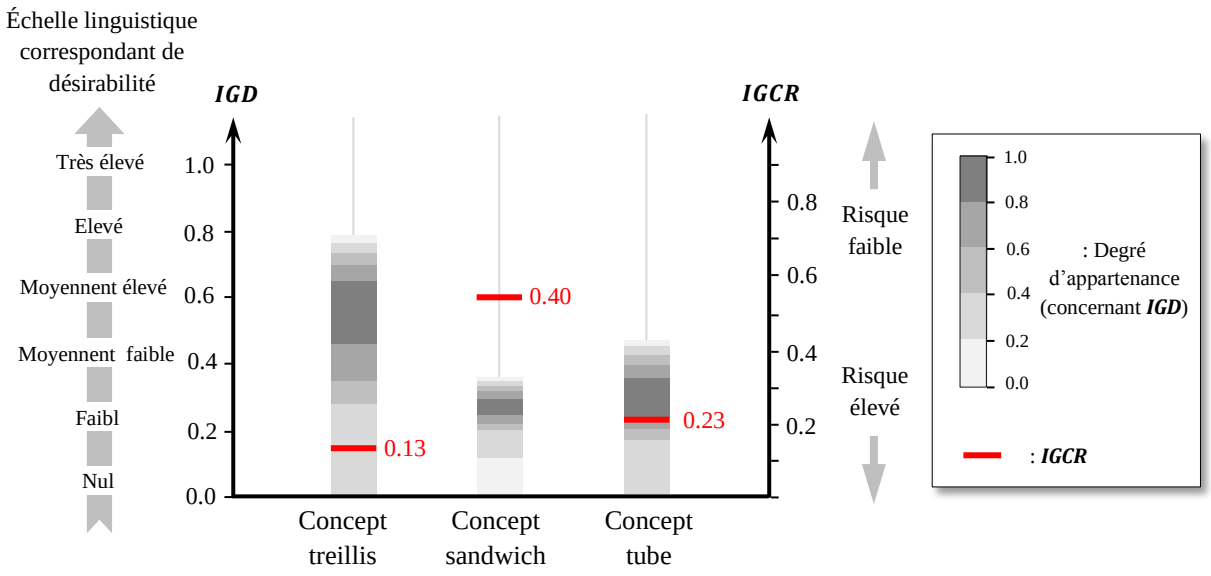


Figure V-20 Résultats des deux indicateurs ICR et IGD pour les trois concepts étudiés

V.7.3. Interprétation des résultats

Dans notre cas industriel, le support réflecteur constitue un composant indispensable du système de centrale solaire à concentration. L'échec du développement du support réflecteur, ou même un important retard dans sa validation, auraient alors des répercussions sévères sur le projet global de développement de la centrale. Par conséquent, la première et principale préoccupation de l'entreprise est d'obtenir un produit qui respecte les exigences minimales de validation (traduites dans notre étude par les seuils d'acceptabilité AC_i) tout en respectant le délai de développement. De ce point de vue, le concept sandwich est particulièrement intéressant car il présente l'$IGCR$ le moins élevé (Figure V-20). Il a le plus de chances d'aboutir à la fin du projet à un produit respectant les exigences minimales de validation. La décision de poursuivre le développement de la structure sandwich jusqu'au bout (définition complète et précise de tous les paramètres de conception) confère donc une sûreté au projet de développement dans sa globalité.

En termes d'indice global de désirabilité, nous remarquons à la Figure V-20 que le concept treillis présente un réel avantage. Son IGD peut atteindre jusqu'à 0.78. Cela peut être expliqué par la masse très faible de la structure treillis et donc son avantage en termes de coût de la matière première, qui reste l'objectif prépondérant pour l'entreprise. Cependant, il peut être remarqué dans le Tableau V-6 qu'il existe encore des variables de performance dont le respect des seuils d'acceptabilité est loin d'être garanti (du fait de leur faible ICR_i^{tr}). En plus du concept sandwich, le concept treillis est également choisi pour être développé dans la suite du projet.

Pour le concept tube, nous remarquons qu'il présente un indice global de criticité de risque proche de celui de la structure en treillis. Cependant, en termes d'indice global de désirabilité, il présente un avantage beaucoup moins important que celui du treillis. Nous considérons donc qu'il y a peu d'intérêt pour l'entreprise de continuer son développement. La décision d'abandonner le développement du concept tube est encouragée aussi par la volonté de l'entreprise de réduire le coût de développement. En permettant d'anticiper la mise à l'écart du concept tube, jugé très peu pertinent, l'utilisation de la démarche permet ainsi un gain de temps et de ressources pour l'entreprise.

Pour récapituler, deux concepts sont jugés pertinents sur la base des résultats des deux indicateurs (présentés à la Figure V-20). Un premier concept (structure sandwich) a été retenu car il présente très peu de risque et apporte donc une sûreté dans le projet de développement.

Un deuxième concept (structure treillis) a été choisi parce qu'il présente un potentiel important en termes d'IGD.

V.8 Conception architecturale

Les études faites auparavant nous ont permis de mettre en évidence l'intérêt de développer le concept treillis, notamment grâce à son avantage au niveau du coût de la matière première. Nous nous focalisons dans cette section sur la conception architecturale de ce concept (nous supposons que le choix du concept est figé). A ce stade de développement, l'espace de conception a été réduit car, grâce aux études effectuées auparavant, beaucoup de possibilités ont été éliminées au niveau des paramètres de conception. Cependant, un certain nombre de ces paramètres reste à fixer pour permettre la définition du produit final. Les paramètres du milieu environnant ($PE_1, \dots, PE_4$) sont, quant à eux, supposés figés à ce stade de développement. Le Tableau V-7 montre les paramètres de conception à fixer et leurs intervalles de valeurs possibles (S_i^{tr}). Nous remarquons que seuls les quatre premiers paramètres restent à fixer.

Paramètre de conception du treillis PC_i^{tr}	Ensemble de valeurs possibles S_i^{tr}	
	Phase préliminaire	Phase avancée
PC_1^{tr} : Epaisseur des membrures (mm)	[2.0, 5.2]	[3, 5.0]
PC_2^{tr} : Epaisseur des barres diagonales (mm)	[2.0, 5.0]	[2.5, 4]
PC_3^{tr} : Hauteur de la structure (mm)	[900.0, 1500.0]	[950.0, 1200.0]
PC_4^{tr} : Nombre de points de fixation dans les liaisons	{3, 4, 5}	{3, 4, 5}
PC_5^{tr} : Nombre de motifs du treillis	**{8, 9, 10}**	**{8}**

Tableau V-7 Paramètres de conception à fixer et les intervalles possibles

V.8.1. Solution de référence

Plusieurs prototypes physiques du concept treillis ont été fabriqués le long du projet de développement. Nous considérons dans notre étude le dernier des prototypes fabriqués. Il est désigné dans l'entreprise par *"treillis V3.0"*. Le choix de ses paramètres de conception, qui forment notre solution de référence $\overrightarrow{X^*}$, sont présentés dans le Tableau V-8. Le même tableau présente les performances de $\overrightarrow{X^*}$ fournies par les modèles de comportement (présentés dans la section V.6.2) et par l'expérimentation physique sur le prototype *treillis V3.0*. Nous

remarquons sur ce tableau que cette solution de référence n'est pas conforme car elle ne respecte pas le seuil d'acceptabilité pour la variable angle de torsion et résistance au vent extrême (résultats marqués en rouge). Elle va cependant nous être utile pour qualifier l'exactitude de nos modèles de comportement.

Solution de référence $\overrightarrow{X^*}$	
PC_1^{tr}	4 mm
PC_2^{tr}	3 mm
PC_3^{tr}	930 mm
PC_4^{tr}	3

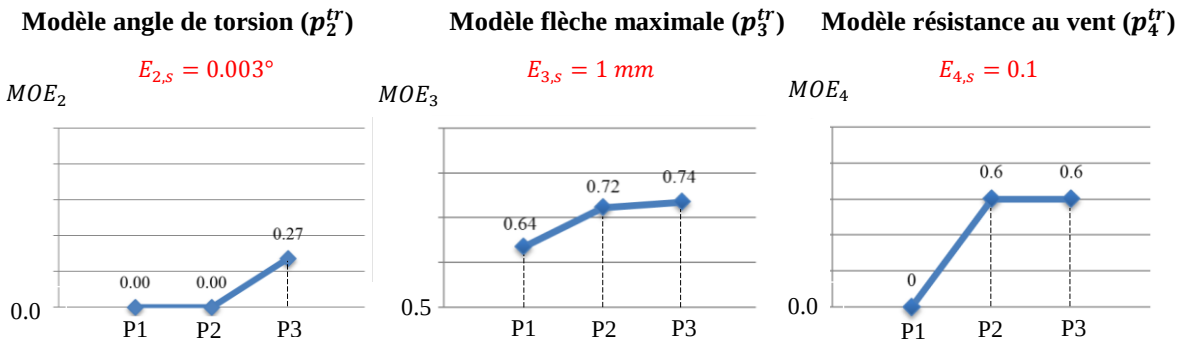
Performances fournies par expérimentation physique	
$\tilde{p}_1^*$	2,91 Kg/m²
$\tilde{p}_2^*$	0,030 degré
$\tilde{p}_3^*$	2.54 mm
$\tilde{p}_4^*$	0.72

Performances fournies par modèles de comportement	
p_1^*	2,91 Kg/m²
p_2^*	0,0286 degré
p_3^*	2.34 mm
p_4^*	0.689

Tableau V-8 Solution de référence et évaluation de ses performances par modèles de comportement et expérimentation physique sur le prototype V3.0

V.8.2. Mesure de l'exactitude des modèles de comportement

La démarche proposée dans la section IV.2 est employée ici pour mesurer l'exactitude de nos modèles de comportement. Cette démarche est, pour rappel, basée sur une mesure objective et sur une mesure subjective de l'exactitude. Concernant la mesure objective, nous présentons les résultats (MOE_i correspondante à chaque p_i^{tr}) pour trois phases différentes du processus de développement : phase préliminaire (modèles présentés dans la section V.6.1), phase intermédiaire et phase avancée (modèles présentés dans la section V.6.2). Bien que nous nous focalisons sur la phase avancée dans cette partie, nous souhaitons observer comment évolue l'exactitude des modèles de comportement utilisés le long du projet de développement. Les MOE_i correspondantes aux trois phases sont données à la Figure V-21. Les $E_{i,s}$ (valeurs seuil de distance) sont mentionnées sur la même figure.



P1 : Phase préliminaire (section V.6.1)	P2 : Phase intermédiaire	P3 : Phase avancée (section V.6.2)

Figure V-21 Exactitude des modèles de comportement utilisés dans différentes phases du projet de développement

A ce stade d'avancement, le modèle géométrique CAO du concept treillis représente la géométrie de la structure dans ses moindres détails. La masse estimée par le logiciel CAO est donc supposée exacte. Ainsi, pour simplifier notre étude, nous ne considérons pas d'indice de maitrise de risque IMR_1^{tr} pour la variable de performance p_1^{tr}.

La Figure V-21 illustre bien l'évolution du niveau d'exactitude le long des phases du projet. L'obtention d'une valeur nulle d'exactitude dans certains cas est due au dépassement du seuil $E_{i,s}$. L'exactitude MOE_4 du modèle de résistance au vent est constante sur les deux dernières phases car aucune modification n'a été apportée à ce modèle entre ces deux phases.

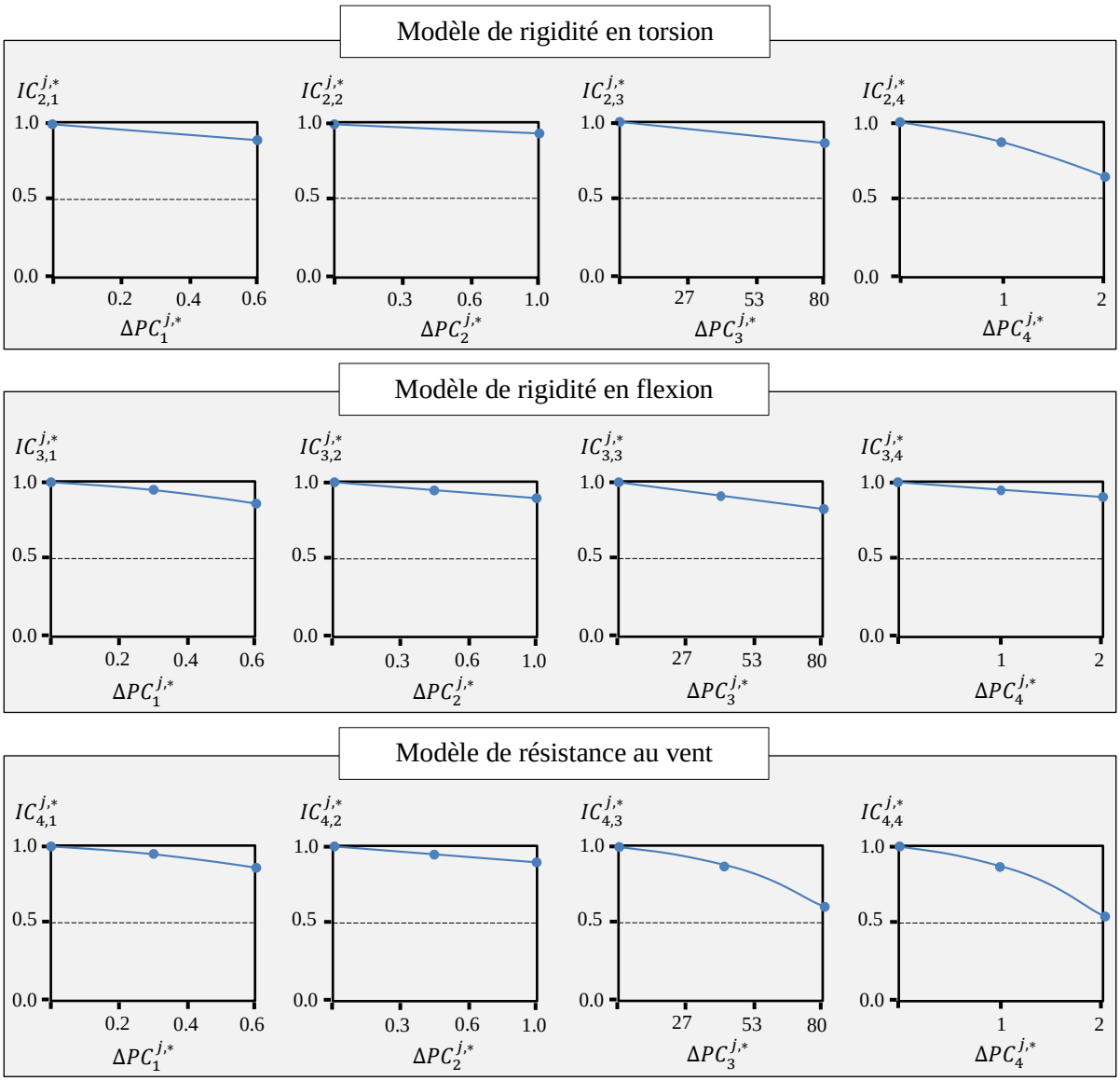


Figure V-22 Fonctions de confiance pour les différents paramètres de conception du treillis

Concernant la mesure subjective de l'exactitude, elle est dépendante de la solution candidate étudiée car elle est fonction des paramètres de conception. Les fonctions de confiance permettant de déterminer cette mesure sont définies par l'équipe des concepteurs du projet. Elles sont présentées à la Figure V-22.

V.8.3. Résultats et interprétation

Un plan d'expérience comportant 240 solutions candidates a été établi pour explorer l'espace de conception. Chacune de ces solutions est une combinaison particulière de paramètres de conception. Chaque solution candidate est évaluée en terme d'indice global de désirabilité IGD et d'indice global de maitrise de risque $IGMR$ en se basant sur la démarche décrite dans le chapitre IV. Les résultats sont présentés sur la Figure V-23.

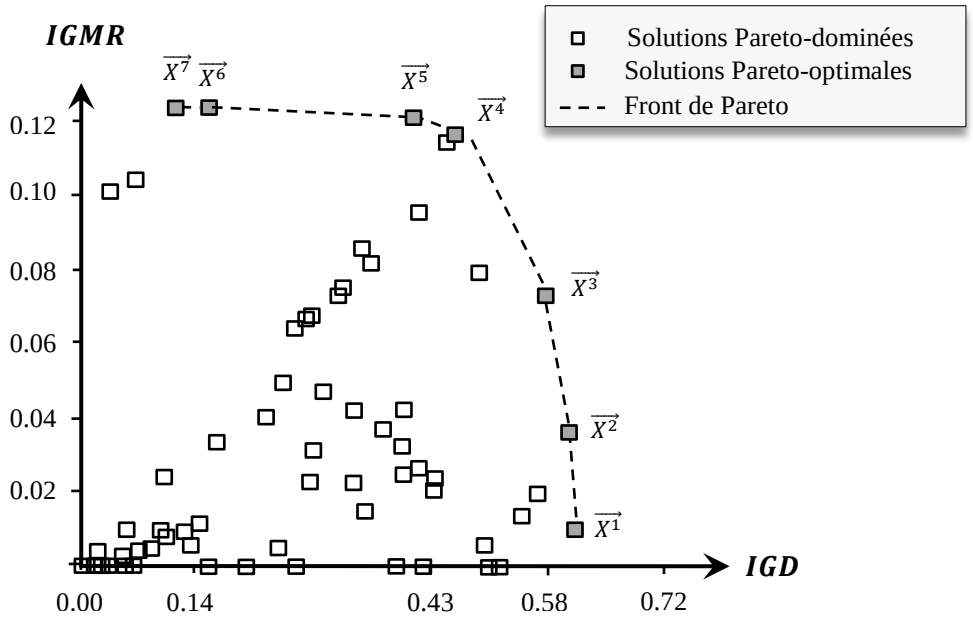


Figure V-23 Résultats pour les indicateurs $\boldsymbol{IGD}$ et $\boldsymbol{IGMR}$

Parmi les 240 solutions candidates évaluées, seulement 50 sont conformes aux exigences minimales de validation (respect des seuils d'acceptabilité AC_i). Sur la Figure V-23, nous remarquons que parmi ces 50 solutions candidates, il y a sept solutions Pareto-optimales (solutions non dominées). Dans le reste de cette section, nous nous intéressons de plus près à ces sept solutions formant le front de Pareto. Nous commençons par les plus performantes (IGD élevé) pour terminer avec les plus sûres ($IGMR$ élevé). Les résultats détaillés concernant ces sept solutions sont donnés dans le Tableau V-9 (pour le calcul de IGD) et dans le Tableau V-10 (pour le calcul de $IGMR$).

	Paramètres de conception				Variables de performance				Indices de désirabilité				
	PC_1^{tr} (mm)	PC_2^{tr} (mm)	PC_3^{tr} (mm)	PC_4^{tr} (_)	p_1^{tr} (Kg/m²)	p_2^{tr} (degré)	p_3^{tr} (mm)	p_4^{tr} (_)	ID_{01}^{tr}	ID_{02}^{tr}	ID_{03}^{tr}	ID_{04}^{tr}	IGD
$\overrightarrow{X_1}$	1.8	1.5	950	3	0.71	0.35	0.73	0.69	0.71	0.35	0.73	0.69	0.61
$\overrightarrow{X_2}$	1.7	1.7	950	3	0.70	0.28	0.78	0.75	0.70	0.28	0.78	0.75	0.59
$\overrightarrow{X_3}$	1.9	1.7	900	3	0.62	0.35	0.66	0.73	0.62	0.35	0.66	0.73	0.58
$\overrightarrow{X_4}$	1.9	1.9	900	3	0.41	0.24	0.53	0.58	0.41	0.24	0.53	0.58	0.41
$\overrightarrow{X_5}$	2.3	1.7	900	2	0.36	0.28	0.70	0.96	0.36	0.28	0.70	0.96	0.47
$\overrightarrow{X_6}$	1.9	2.3	871	1	0.13	0.07	0.17	0.58	0.13	0.07	0.17	0.58	0.17
$\overrightarrow{X_7}$	2.3	2.3	871	1	0.12	0.03	0.13	0.60	0.12	0.03	0.13	0.60	0.12

Tableau V-9 Informations détaillées sur les solutions candidates du front de Pareto : cas de l'indice global de désirabilité

	Une distance au seuil (occurrence)				Rigidité à la torsion					Rigidité à la flexion					Résistance au vent				
					MSE_2^j					MSE_3^j					MSE_4^j				
	$\Delta PC_1^{j,*}$	$\Delta PC_2^{j,*}$	$\Delta PC_3^{j,*}$	$\Delta PC_4^{j,*}$	$IC_{2,i}^{j,*}$	$IC_{2,i}^{j,*}$	$IC_{2,i}^{j,*}$	$IC_{2,i}^{j,*}$	MSE_i^j	$IC_{3,i}^{j,*}$	$IC_{3,i}^{j,*}$	$IC_{3,i}^{j,*}$	$IC_{3,i}^{j,*}$	MSE_i^j	$IC_{4,i}^{j,*}$	$IC_{4,i}^{j,*}$	$IC_{4,i}^{j,*}$	$IC_{4,i}^{j,*}$	MSE_i^j
$\overrightarrow{X^1}$	0.2	0	79	2	0.94	0.98	0.84	0.6	0.46	0.94	0.98	0.84	0.6	0.46	0.94	0.98	0.84	0.6	0.46
$\overrightarrow{X^2}$	0.3	0.2	79	2	0.96	0.98	0.84	0.6	0.47	0.96	0.98	0.84	0.6	0.47	0.96	0.85	0.84	0.6	0.47
$\overrightarrow{X^3}$	0.1	0.2	29	2	0.96	0.96	0.94	0.6	0.52	0.96	0.96	0.94	0.6	0.52	0.96	0.96	0.94	0.6	0.52
$\overrightarrow{X^4}$	0.1	0.4	29	2	0.96	0.98	0.54	0.6	0.53	0.96	0.98	0.24	0.6	0.53	0.96	0.98	0.94	0.6	0.53
$\overrightarrow{X^5}$	0.3	0.2	29	1	0.96	0.93	0.94	0.8	0.65	0.93	0.93	0.94	0.8	0.67	0.96	0.93	0.94	0.8	0.67
$\overrightarrow{X^6}$	0.1	0.8	0	0	0.88	0.97	0.94	0.8	0.64	0.88	0.97	0.94	0.8	0.64	0.85	0.97	0.94	0.8	0.64
$\overrightarrow{X^7}$	0.3	0.8	0	0	0.88	0.93	0.94	0.8	0.62	0.88	0.93	0.94	0.8	0.62	0.85	0.93	0.94	0.8	0.62

Tableau V-10 Informations détaillées sur les solutions candidates du front de Pareto : cas de l'indice global de maitrise de risque

La solution candidate la plus performante est la solution $\overrightarrow{X^1}$ suivi de très près par la solution $\overrightarrow{X^2}$. Ces deux solutions candidates ont deux points communs qui sont, d'une part, le nombre élevé de points de fixation et, d'autre part, la hauteur élevée de la structure. Le nombre élevé des points de fixation conduit à une bonne rigidité des liaisons barres/membrures, ce qui confère à la structure une bonne rigidité en torsion. De plus, la répartition des efforts de traction dans les points de fixation est meilleure, ce qui améliore leur tenue mécanique. La hauteur élevée de la structure, quant à elle, permet de diminuer sensiblement les efforts normaux que subissent les barres diagonales et les membrures de la structure, ce qui rend ces dernières plus résistantes aux conditions de vent extrême. Cependant, l'inconvénient des solutions $\overrightarrow{X^1}$ et $\overrightarrow{X^2}$ est leur faible niveau de sureté qui se traduit par des $IGMR$ faibles. D'après

les informations données dans le Tableau V-10, ce sont les résultats fournis par le modèle de résistance au vent qui représentent la plus grande source de risque. La raison à cela est l'éloignement des deux solutions $\overrightarrow{X^1}$ et $\overrightarrow{X^2}$ de la solution de référence (donnant lieu à des indices de confiance faibles), en plus d'une marge de sécurité faible par rapport au seuil d'acceptabilité (traduite par l'occurrence de risque).

La solution candidate $\overrightarrow{X^4}$ est moins performante que les solutions $\overrightarrow{X^1}$ et $\overrightarrow{X^2}$ (différence de l'ordre de 16%) mais elle présente une très grande amélioration au niveau de l'indicateur $IGMR$ (différence de l'ordre de 550%). Nous rappelons tout d'abord que l'$IGMR$ est fonction de la mesure objective d'exactitude, de la mesure subjective d'exactitude, de l'occurrence de risque et de la sévérité du non-respect du seuil d'acceptabilité. Même si les mesures objectives d'exactitude restent les mêmes pour toutes les solutions candidates, les mesures subjectives d'exactitude sont quant à elles très dépendantes des valeurs données aux paramètres de conception et donc de la solution candidate. En analysant les résultats donnés dans le Tableau V-10, nous pouvons déduire que l'amélioration de l'$IGMR$ est liée, d'une part, à l'amélioration de la mesure subjective d'exactitude, dû à un écart moins important entre la solution $\overrightarrow{X^4}$ et la solution de référence et, d'autre part, à une amélioration dans l'occurrence de risque (marge de sécurité plus élevée par rapport au seuil d'acceptabilité).

$\overrightarrow{X^6}$ et $\overrightarrow{X^7}$ sont les solutions candidates les plus sûres car elles ont les $IGMR$ les plus élevés. Cependant, l'amélioration dans les $IGMR$ est peu notable par rapport à la solution candidate $\overrightarrow{X_4}$. La dégradation de la performance est, quant à elle, très importante. Nous considérons alors que les deux solutions candidates $\overrightarrow{X^6}$ et $\overrightarrow{X^7}$ ont peu d'intérêt dans notre cas.

La solution candidate $\overrightarrow{X_4}$ nous semble être parmi les solutions les plus intéressantes car elle présente un bon compromis performance/sureté. Cependant, le décideur doit proposer des actions afin d'améliorer la sûreté de cette solution avant de la valider définitivement. Nous avons identifié deux actions possibles. La première serait de réaliser des modèles plus développés pour évaluer la résistance au vent. Il existe aujourd'hui des codes éléments finis capable de simuler les phénomènes d'instabilité (tel que le flambement) d'une manière très fidèle à la réalité. Le faible nombre de solutions candidates à tester fait que le coût de calcul serait relativement faible. Une fois le modèle de comportement modifié, la mesure objective de l'exactitude et les fonctions de confiance correspondant à ce modèle devront être redéfinies. L'autre action possible pour rendre la solution $\overrightarrow{X_4}$ plus sûre consisterait à fabriquer un prototype physique et réaliser les essais mécaniques pour être sûr de la tenue mécanique de

la structure et du respect des exigences en performance optique. Bien que cette action soit la plus efficace, nous estimons qu'elle reste couteuse en temps et en ressources dans notre cas.

V.8.4. Etude de différents scénarios de conception

Dans cette section, nous analysons les résultats obtenus pour différents scénarios de conception. Ces scénarios correspondent à des poids w_i différents, formalisant des importances relatives différentes dans la satisfaction des objectifs de conception. Généralement, il peut être intéressant pour le décideur de connaître l'effet de la mise en avant de certains objectifs de conception par rapport à d'autres. Dans certaines situations industrielles, il est possible que le choix de scénario de conception (répartition des poids) ne soit pas fondé sur des bases assez solides. Cette problématique est assez fréquente dans les premières phases d'un projet de développement ou lorsque plusieurs décideurs ont des points de vue différents sur les priorités des objectifs. Dans ce cas, il peut être utile pour les décideurs de voir les différentes performances (traduites par les IGD) qui peuvent être atteintes pour différents scénarios. Par exemple, qu'est-il possible d'obtenir pour une solution moins couteuse et plus résistante au vent ?

Nous supposons que le scénario présenté dans la section V.4 (désigné par *"scénario 1"* dans cette section) est celui qui correspond le mieux à notre cas industriel. En plus de ce scénario, nous imaginons deux autres scénarios. La description détaillée de ces deux scénarios est donnée à Figure V-24. Dans le scénario 2, nous donnons plus d'importance à la l'objectif de réduction du coût de la matière première. Pour le scénario 3, nous donnons plus d'importance à l'objectif d'amélioration de la performance optique.

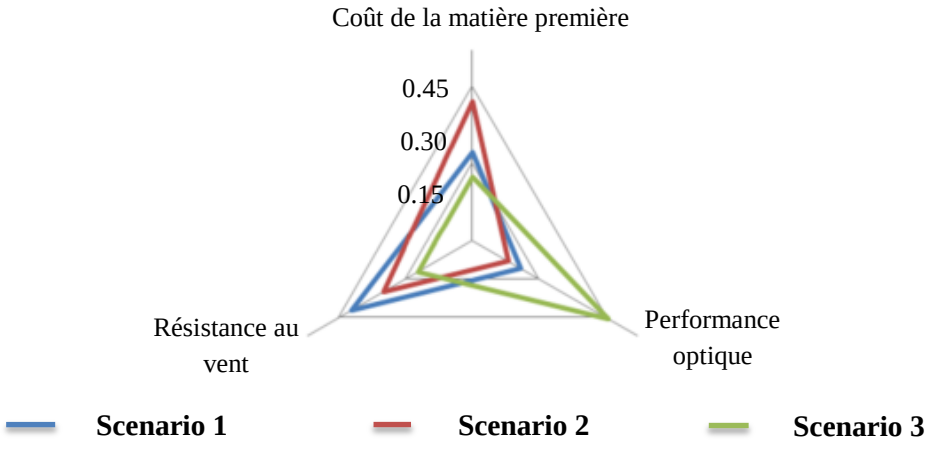


Figure V-24 Répartition des poids pour trois scénarios d'étude

L'évolution des IGD liée au changement du scénario de base (scénario 1) est donnée à la Figure V-25. Nous pouvons voir que lorsqu'on donne plus d'importance à l'objectif lié au coût de la matière première, la plupart des solutions candidates voient leur performantes augmenter. Cette augmentation atteint la valeur maximale de 21%.

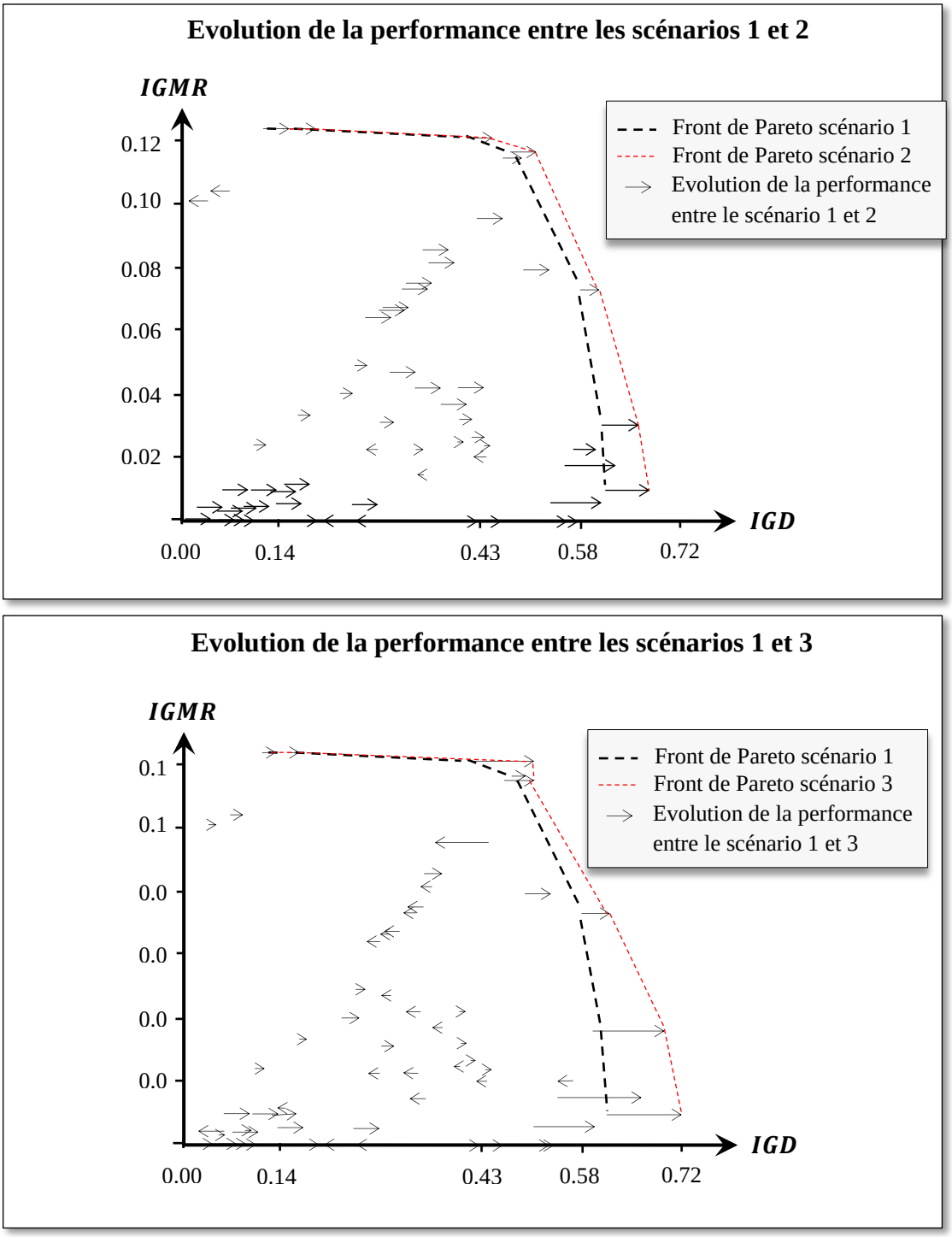


Figure V-25 Evolution de la valeur de l'indicateur IGD entre le scénario de base (scénario 1) et les scénarios 2 et 3 imaginés

V.9 Conclusion

Les démarches d'aide à la décision proposées dans ce manuscrit ont été appliquées sur le cas d'un support réflecteur afin de mettre en évidence leurs apports dans un contexte industriel. Les méthodes proposées sont basées sur un modèle qui permet de formaliser les préférences du décideur. Ce modèle de formalisation nous a été d'une grande utilité pour traiter de nombreuses solutions candidates.

Dans les premières phases de développement, nous avons pu mettre en évidence les concepts les plus pertinents par rapport aux objectifs de l'entreprise. Ainsi, il a été possible de mettre en évidence les concepts les plus risqués pour pouvoir apporter plus de sûreté au projet de développement.

Dans la phase de conception architecturale, il nous a été possible d'explorer l'espace de conception en recherchant les solutions candidates les plus performantes et les moins risquées.

CHAPITRE VI

Conclusion et perspectives

VI.1 Conclusion

Dans ce travail de thèse a été proposée une approche d'aide à la décision pour accompagner le décideur dans ces choix de conception à des niveaux de développement de produits différents. Nous avons abordé les deux phases distinctes et consécutives du processus de développement : la phase de sélection de concepts et la phase de conception architecturale. L'évolution de l'état des connaissances entre ces deux phases a par essence des natures différentes des décisions à prendre. Ceci nous conduit à adopter des approches différentes pour les deux phases de développement étudiées.

La première étape de notre travail a été d'établir un modèle permettant de formaliser et de capitaliser les préférences subjectives du décideur en suivant le principe du cheminement du raisonnement humain. Ainsi, le modèle proposé est subdivisé en trois parties qui sont : (i) l'observation, qui permet de formaliser le comportement de l'alternative de conception étudiée, (ii) l'interprétation, qui permet de vérifier l'adéquation du comportement observé avec les attentes et les préférences du décideur, et (iii) l'agrégation, qui permet d'agréger plusieurs résultats d'interprétation pour obtenir une grandeur numérique unique (IGD), traduisant la satisfaction globale liée à l'alternative de conception étudiée. Le modèle obtenu est utilisé pour les deux phases de conception étudiées.

La première démarche proposée a pour objectif de faciliter la sélection des concepts dans les phases amont du projet. Ces phases sont caractérisées par une description incomplète du produit et des données imprécises du problème. Les risques découlent principalement d'une situation où il est nécessaire de décider avec des données imprécises. Ce constat nous a conduit à proposer une première étape qui consiste à caractériser les données utilisées en conception. Cette étape présente l'avantage d'intégrer des connaissances de nature implicite, obtenues au travers de l'expérience et du savoir-faire des concepteurs. Le formalisme utilisé pour représenter les résultats de cette caractérisation permet de les capitaliser plus facilement, permettant ainsi un meilleur partage entre intervenants du projet. A l'issue de la caractérisation des données, la dernière étape de la démarche vise à répondre aux deux questions suivantes :

- ✓ Quel risque encourt le décideur en utilisant ces données ?
- ✓ Quel est le potentiel de performance réalisable par chaque concept ?

Ces deux considérations sont traduites par deux indicateurs : l'indice global de criticité de risque, qui évalue les chances d'insuccès liées à un concept et, l'indice global de désirabilité, qui permet d'évaluer le potentiel de performance qui peut être atteint par un concept. Les deux indicateurs permettent au décideur de choisir les concepts qu'il juge pertinents selon son aversion au risque, ainsi que la culture et le cadre réglementaire de l'entreprise.

La deuxième démarche proposée a pour objectif de faciliter la définition de l'architecture du produit, une fois le choix de concept figé. Alors que la connaissance sur le produit développé évolue, les modèles de comportement évoluent également et deviennent plus représentatifs des phénomènes physiques pertinents du comportement réel du produit. Ces modèles restent cependant basés sur un certain nombre d'hypothèses, qui conduisent parfois à une remise en question de leur exactitude, surtout pour certaines régions de l'espace de conception. Le choix de fixer les paramètres de conception en se basant sur les résultats de modèles de comportement nécessite la prise en compte de leur niveau d'exactitude. Ainsi, nous avons été amenés, dans un premier temps, à développer une procédure pour mesurer l'exactitude des modèles de comportement utilisés. L'intérêt de cette procédure est qu'elle permet d'exploiter le retour d'expérience obtenu à l'issue de l'expérimentation physique sur des prototypes déjà fabriqués. Ce retour d'expérience est valorisé dans un premier temps, d'une manière objective, en calculant l'écart entre les performances prédites par les modèles de comportement et les performances réelles observées sur le prototype physique. Le retour d'expérience est valorisé une seconde fois, d'une manière plus subjective, en utilisant des fonctions de confiance qui expriment la dégradation de l'exactitude des modèles en fonction de la similarité entre la solution candidate étudiée et la solution de référence, qui correspond au prototype testé. La mesure d'exactitude obtenue au final est le résultat de l'association des deux évaluations, objective et subjective. L'originalité principale de la mesure obtenue est son aptitude à couvrir l'intégralité de l'espace de conception. Dans la dernière étape de la démarche, cette mesure d'exactitude est exploitée pour évaluer le risque du non-respect des seuils minimaux d'acceptabilité. Comme c'est le cas pour la première démarche, l'indice global de désirabilité est également calculé pour chaque solution candidate afin d'évaluer le niveau global de satisfaction vis-à-vis des objectifs de conception. Le décideur a ainsi la possibilité d'explorer l'intégralité de l'espace de conception à la recherche de solutions candidates qui offrent le meilleur compromis entre performance d'une part, et risque lié à l'inexactitude des modèles de comportement d'autre part. En participant à améliorer la fiabilité des choix réalisés sur la base de résultats de modèles, la démarche proposée permet à

terme de réduire le recours au prototypage physique, très consommateur en temps et en ressources.

Ces deux démarches proposées ont été appliquées dans le cadre d'un projet de développement d'une centrale solaire à concentration. L'objectif étant d'aider le concepteur à aboutir à un support réflecteur qui répond le mieux aux objectifs de conception. L'application de notre première démarche dans les phases amont du projet a permis de mettre en évidence deux choix de concepts pertinents : le sandwich, car il permet d'apporter une sûreté au projet de développement grâce à son aptitude à respecter les exigences minimales de validation et, le treillis grâce à un potentiel de se démarquer de la concurrence par un faible coût de la matière première. De plus, en permettant d'anticiper la mise à l'écart du concept tube, jugé très peu pertinent, l'utilisation de la démarche a permis un gain de temps et de ressources pour l'entreprise. La deuxième démarche proposée a été appliquée sur le cas du concept treillis dans le but de fixer ses paramètres de conception. En explorant un large espace de conception, il a été possible d'identifier des solutions candidates offrant un bon compromis entre performance et risque lié à l'inexactitude des modèles de comportement utilisés.

VI.2 Perspectives

Dans la plupart des situations, le produit fait l'objet de développement dans un contexte où il représente un composant d'un système plus complet (centrale solaire à concentration dans notre cas). Dans ce cas, les choix de conception associés à l'objet développé peuvent avoir un impact sur d'autres composants ou d'autres activités de développement associés au système global. Dans notre cas d'application, par exemple, les choix de conception liés au support réflecteur ont un impact sur le dimensionnement d'autres composants dans la centrale (*eg.* solution d'accroche des panneaux réfléchissants). Ces considérations n'ont pas été intégrées dans les démarches d'aide à la décision développées dans cette thèse. Une perspective intéressante serait d'adapter nos démarches pour intégrer les interactions inhérentes aux projets de développement complets. Pour cela, il faut être capable, d'une part, de mettre en évidence les interactions entre les différentes parties du système et, d'autre part, d'évaluer l'impact des décisions menées localement sur l'atteinte des objectifs globaux du projet.

Dans notre travail, nous avons supposé qu'il existe un seul décideur qui dicte toutes les préférences liées à la conception. Il est alors facile pour lui de définir une stratégie d'agrégation ou de paramétrer une fonction de désirabilité en suivant ses propres intentions et préférences. Cependant, dans un projet industriel réel, les décisions sont généralement des

compromis entre différents services (*e.g.* matériaux, fabrication, commercial, etc.) dans lesquelles chacun peut avoir un point de vue différent des autres. Un travail doit donc être mené sur des méthodes de recueil des préférences pour différents acteurs de la conception. La prise en compte de groupes *"pluri-disciplinaire"*, et donc *"pluri-préférentiel"*, comme acteurs dans la formalisation des préférences constitue une perspective pertinente. Cela peut inclure la constitution de questionnaire, sa perception par les concepteurs, ainsi que la notion d'échantillon représentatif, à titre d'exemples. Il serait également intéressant d'intégrer des méthodes de compromis ou d'aide à la convergence dans l'expression des préférences.

Pour la phase de conception architecturale, nous avons choisi d'évaluer les solutions candidates en termes de performance (IGD) et de risque lié à l'utilisation de modèles de comportement ($IGMR$). Une perspective intéressante serait la prise en compte de la robustesse dans l'évaluation des solutions candidates. Cette troisième évaluation permettrait de prendre en compte l'impact des variabilités dans les données d'entrée (paramètres de conception et paramètres du milieu environnant) dans la fluctuation de la performance de la solution candidate. La gestion et l'interprétation de plus de deux indices de qualification constituent actuellement un véritable verrou scientifique (déjà souligné dans les travaux de Saaty) : quel compromis peut être réalisé ? L'emploi d'un front de Pareto sera-t-il indispensable pour visualiser les solutions (bien que celui-ci semble inutilisable au-delà de 3 indices) ?

ANNEXES

ANNEXE A : Actions du vent sur les réflecteurs

Le calcul de la pression dynamique de pointe PE_5 prend en compte la vitesse maximale du vent $V_{b,0}$ sur le site d'implantation ainsi que d'autres paramètres en lien avec le site d'implantation comme le coefficient d'orographie C_0, le coefficient de rugosité du terrain C_r, la valeur de turbulence du vent I_v, le coefficient de force C_f et la masse volumique de l'aire ρ. La pression dynamique de pointe PE_5 est calculée en fonction de ces coefficients à l'aide de la relation (A.1) [Bsi10]. Cette pression est toujours dans la direction perpendiculaire aux panneaux réfléchissants. Les méthodes pour déterminer les différents coefficients mis en jeu pour le calcul de PE_5 sont données dans cet annexe. Ces méthodes sont issues de la norme Eurocode 1.

$$PE_5 = \left(C_r . C_0 . V_{b,0}\right)^2 . [1 + 7 . I_v] . 0{,}5 . \rho . C_f \tag{A.1}$$

a. Calcul le coefficient de rugosité du terrain C_r

$$C_r(Z) = K_r . ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \text{ pour } Z_{min} \leq Z \leq Z_{max} \tag{A.2}$$

$$C_r(Z) = C_r(Z_{min}) \text{ pour } Z \leq Z_{min} \tag{A.3}$$

Avec :

Z_0 : La longueur de rugosité ;

K_r : Le facteur de terrain dépendant de la longueur de rugosité Z_0, calculé à l'aide de la formule suivante :

$$K_r = 0.19 \times \left(\frac{Z_0}{Z_{0,II}}\right)^{0.07} \tag{A.4}$$

Avec :

$Z_{0,II}$: égale à la valeur de $0.05m$

Z_{min} : La hauteur minimale définie dans le Tableau A-1

Z_{max} : doit être considérée comme étant égale à une valeur de $200m$

Catégories de terrains	$\boldsymbol{Z_0}$ $[\boldsymbol{m}]$	$\boldsymbol{Z_{min}}$ $[\boldsymbol{m}]$
Mer, lac ou plan d'eau parcourus par le vent sur une distance d'au moins $5Km$	0.005	1.0
Rase compagne, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments,…), aéroports	0.05	2.0
Compagne avec des haies, vergers, petits bois, bocage, habitat dispersé	0.2	5.0
Zone industrialisée, urbaine ou forestière	0.5	9.0
Zones urbaines dans lesquelles les bâtiments occupent au moins 15% de la surface et ont une hauteur moyenne supérieure à $15m$	1.00	15.0

Tableau A-1 Indices de variation et indices de couplage pour les paramètres de conception et les paramètres du milieu environnant

b. Calcul du coefficient d'orographie C_0

L'altitude moyenne locale de terrain environnant la construction, notée A_m, est définie par :

$$A_m = \frac{2.A_C + A_{N1} + A_{N2} + A_{E1} + A_{E2} + A_{S1} + A_{S2} + A_{O1} + A_{O2}}{10} \tag{A.5}$$

Avec :

A_{N1}, A_{E1}, A_{S1}, A_{O1} : L'altitude aux points situés, dans les quatre directions cardinales (nord, est, surd, ouest) à une distance de $500m$ du lieu de construction ;

A_{N2}, A_{E2}, A_{S2}, A_{O2} : L'altitude aux points situés, dans les quatre directions à une distance de 1 000m du lieu de construction ;

L'altitude relative du lieu de construction ΔA_C est définie par :

$$\Delta A_C = A_C - A_m \tag{A.6}$$

Le coefficient d'orographie C_0 est terrain complexe est défini par :

$$C_0(Z) = 1 + 0.004 \times \Delta A_C \times e^{-0.014\times(z-10)} \quad \text{pour} \quad Z \geq 10\ m \tag{A.7}$$

$$C_0(Z) = C_0(10) \quad \text{pour} \quad Z < 10\ m \tag{A.8}$$

Lorsque $C_0 \geq 1$ et si on trouve $C_0 > 1.15$ alors il convient de déterminer le coefficient d'orographie par une étude spécifique comme le montre la figure suivante :

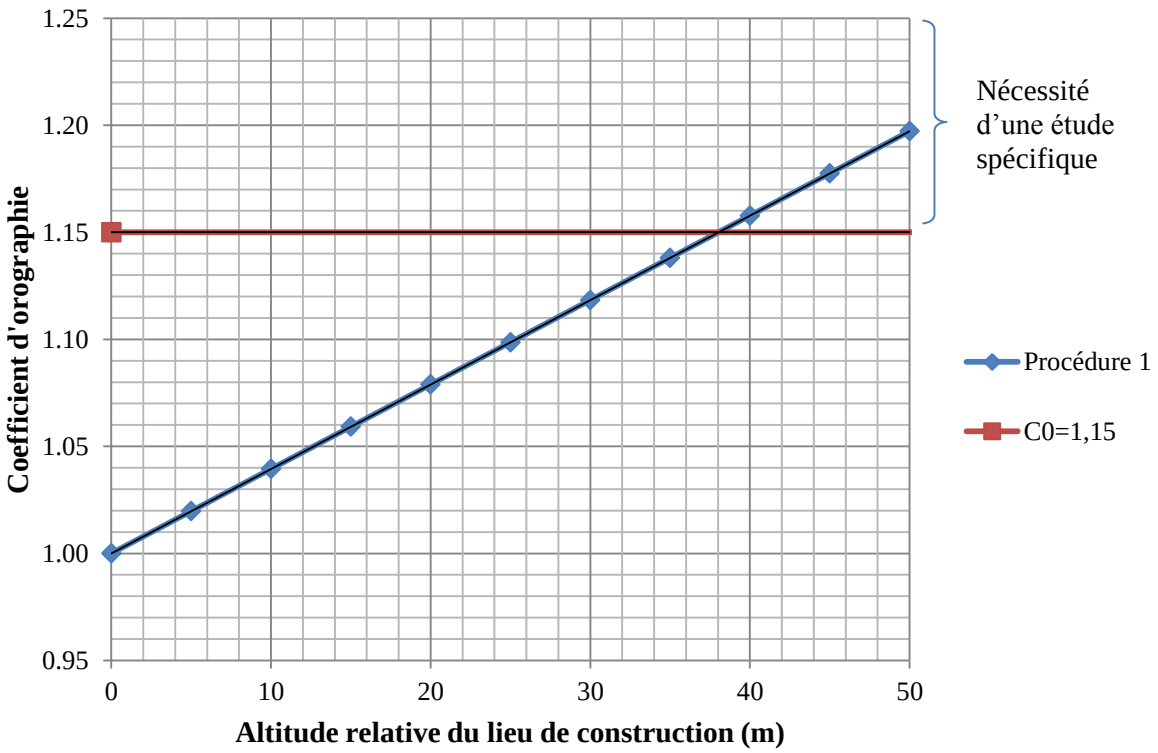


Figure A-1 Domaine dans lequel il devient nécessaire de déterminer le coefficient d'orographie par une étude spécifique

Il convient de noter que cette procédure n'est utilisable que si l'altitude relative du lieu de construction n'excède pas 40 m dans un rayon de 1 km. Dans le cas contraire, C_0 est déterminé par l'équation suivante :

$$C_0 = \begin{cases} 1 \quad \text{pour} \quad \phi < 0.05 \\ 1 + S_{max} \times \left(1 - \frac{|X|}{K_{red} \times L}\right) \times e^{-\alpha \times Z/L} \quad \text{pour} \quad \phi \geq 0.05 \end{cases} \tag{A.9}$$

Avec :

S_{max} : un coefficient donné dans le Tableau A-2 en fonction de la forme de l'obstacle et du rapport H/L

ϕ : Le pente du versant au vent, en suivant la direction du vent ($\phi = H/L_u$)

L_u : La longueur du versant au vent, en suivant la direction du vent

H : Une longueur caractérisant le versant au vent et prenant la valeur :

$$L = L_u/2 \quad \text{pour} \quad \phi < 0.05 \tag{A.10}$$

$$L = 2 \times L \quad \text{pour} \quad \phi \geq 0.05$$

X : La distance horizontale entre le lieu de construction considéré et le sommet de l'obstacle (voir figures et)

X : La distance verticale mesurée à partir du niveau du sol au lieu considéré

α et K_{red} : Les coefficients définis dans le tableau

Forme de l'obstacle	S_{max}	α	K_{red}	
			$X < 0$	$X > 0$
Collines en chaîne	2.2 H/L	3	1.5	1.5
Falaises et escarpements	1.3 H/L	2.5	1.5	4
Collines isolées	1.6 H/L	4	1.5	1.5

Tableau A-2 Définition de coefficients caractérisant les obstacles dans le site d'implantation

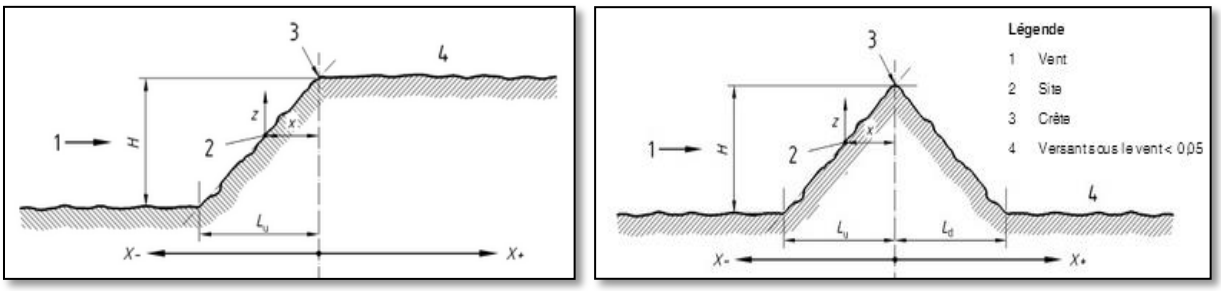


Figure A-2 Définition des dimensions associées au terrain

Si la pente du versant au vent est inférieure à 5% alors $C_0 = 1$. Sur les graphes ci-dessus, on montre la distance minimum à laisser entre l'obstacle et le lieu de construction pour obtenir C0=1.

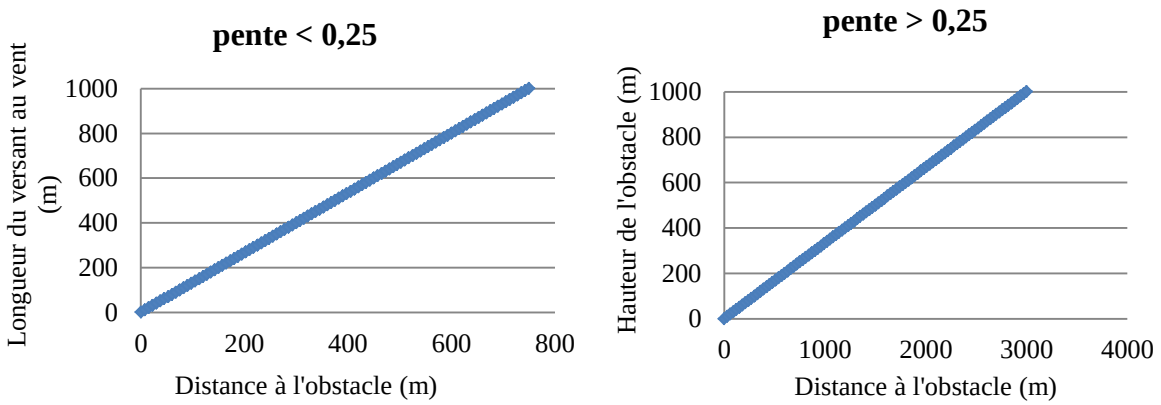


Figure A-3 Distance minimum à laisser entre l'obstacle et le lieu de construction pour obtenir C0=1

c. Valeur de turbulence du vent I_v

La valeur de la turbulence du vent est déterminée par la relation suivante :

$$I_v(Z) = \frac{\sigma_v}{V_m(Z)} = \frac{K_l}{C_o(Z) \times ln(Z/Z_0)} \quad \text{pour} \quad Z_{min} \leq Z \leq Z_{max} \tag{A.11}$$

$$I_v(Z) = I_v(Z_{min}) \quad \text{pour} \quad Z \leq Z_{max} \tag{A.12}$$

Avec :

$$\sigma_v = K_r \times V_b \times K_l \tag{A.13}$$

Et :

K_l : Le coefficient de turbulence

Pour les obstacles de formes et de hauteurs variées :

$$K_l = C_o(Z)[1 - 2 \times 10^{-4} \times (log_{10}(Z_0) + 3)^6] \quad \text{(A.14)}$$

Pour les obstacles bien individualités :

$$K_l = 1 - 2 \times 10^{-4} \times (log_{10}(Z_0) + 3)^6 \quad \text{(A.15)}$$

d. Le coefficient de force C_f

Le coefficient de force est déterminé par la relation suivante :

$$C_f = C_{f,0} \times \psi_\lambda \quad \text{(A.16)}$$

Alors :

ψ_λ : Le facteur d'effet d'extrémités

$C_{f,0}$: Le coefficient de force des éléments structuraux sans écoulement de contournement aux extrémités

ANNEXE B : Calcul des charges critiques de flambement

La méthode Eurocode 3 propose une méthode qui introduit un paramètre d'imperfection alpha qui est fonction du type de profilé

$$e_0 = 0.3 \times \frac{Wel}{A} \times \alpha \times \left(\bar{\lambda} - 2\right) \tag{A.17}$$

L'effort de résistance à la compression est :

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \times A_1 \times f_y}{\gamma_{M1}} \tag{A.18}$$

Avec :

f_y : Limite élastique de l'acier ($MPa = N.mm^{-2}$)

γ_{M1} : Coefficient partiel pour résistance des barres aux instabilités, évaluée par vérification de barres

A_1: Section comprimée

$A_1 = A$: Aire de la section pour les sections transversales de classes 1, 2 et 3

$A_1 = A_{eff}$: Aire de la section pour les sections transversales de classe 4

Le coefficient de réduction pour le mode de flambement approprié :

$$\chi = \frac{1}{\phi^2 + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad , \chi \leq 1 \tag{A.19}$$

$$\phi = 0.5 \times \left(1 + \alpha \times \left(\bar{\lambda} - 0.2\right) + \bar{\lambda}^2\right) \tag{A.20}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_1 \times f_y}{N_{cr}}} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \tag{A.21}$$

$$\lambda_1 = \pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} \tag{A.22}$$

$$\lambda = \frac{l_k}{r_k} \quad , r_k = \sqrt{\frac{l_k}{A}} \tag{A.23}$$

Les courbes de flambement Chi en fonction du facteur d'imperfection Alpha sont représentées ci-dessous:

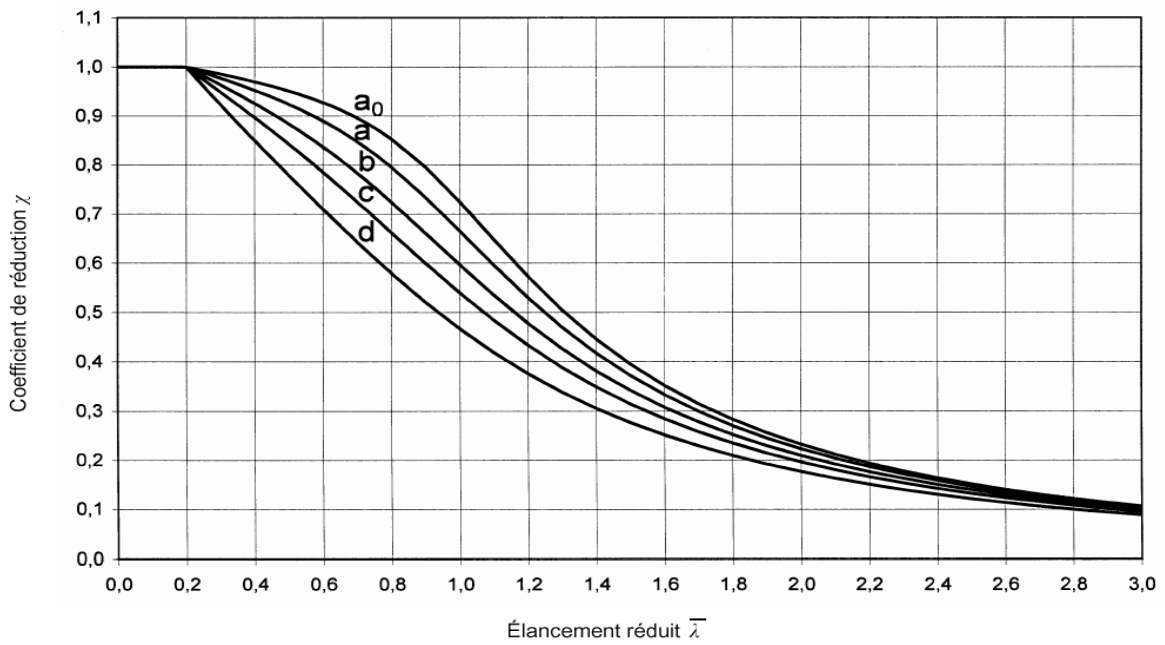


Figure A-4 Courbes de flambement Chi en fonction du facteur d'imperfection α

Facteur d'imperfection Alpha

- $a_0 = 0.13$
- $a = 0.21$
- $b = 0.34$
- $c = 0.49$
- $d = 0.76$

ANNEXE C : Fonctions de préférence, indices de variation et indices de couplage pour les concepts sandwich et tube

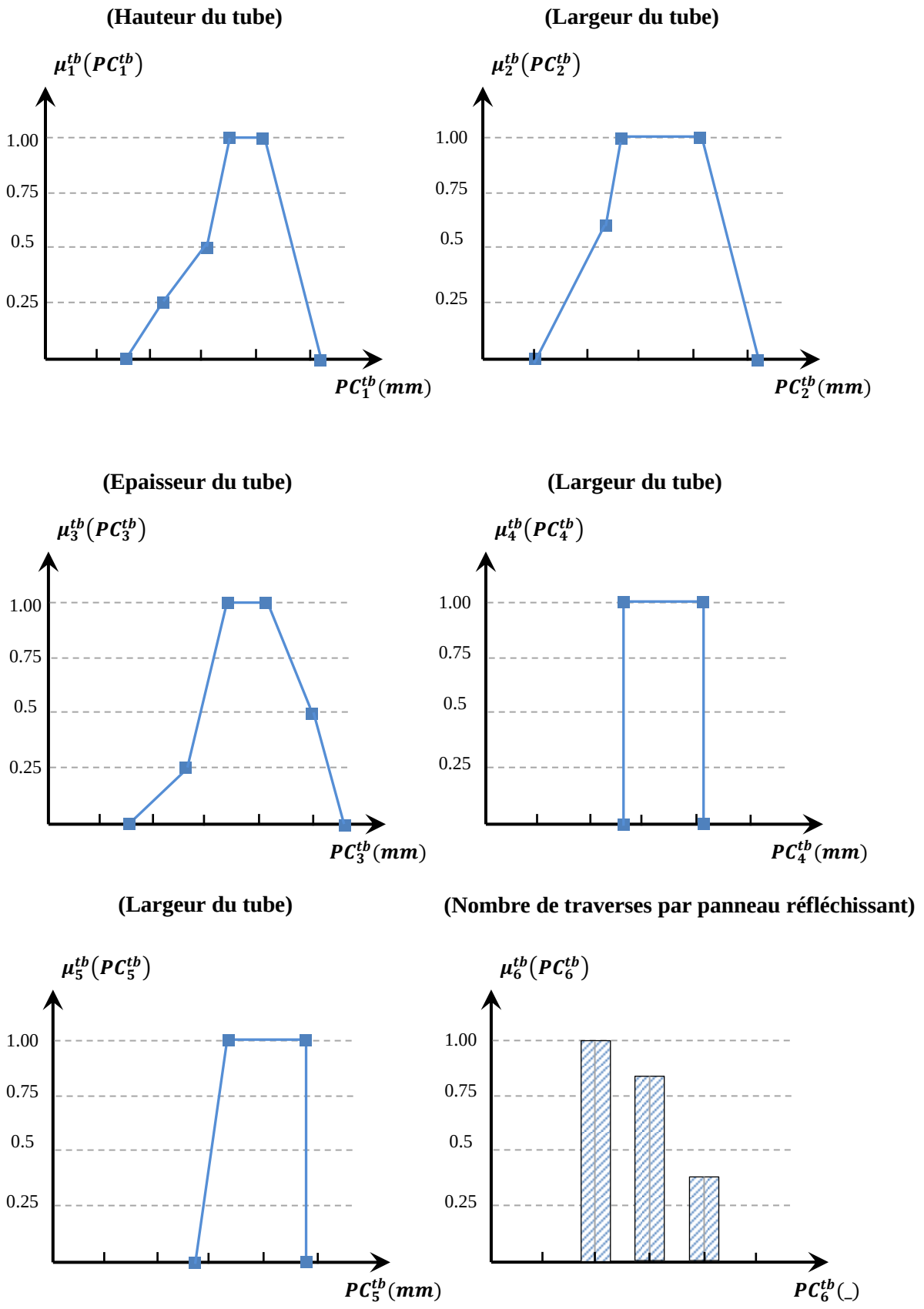


Figure A-5 Fonctions de préférence pour le concept tube

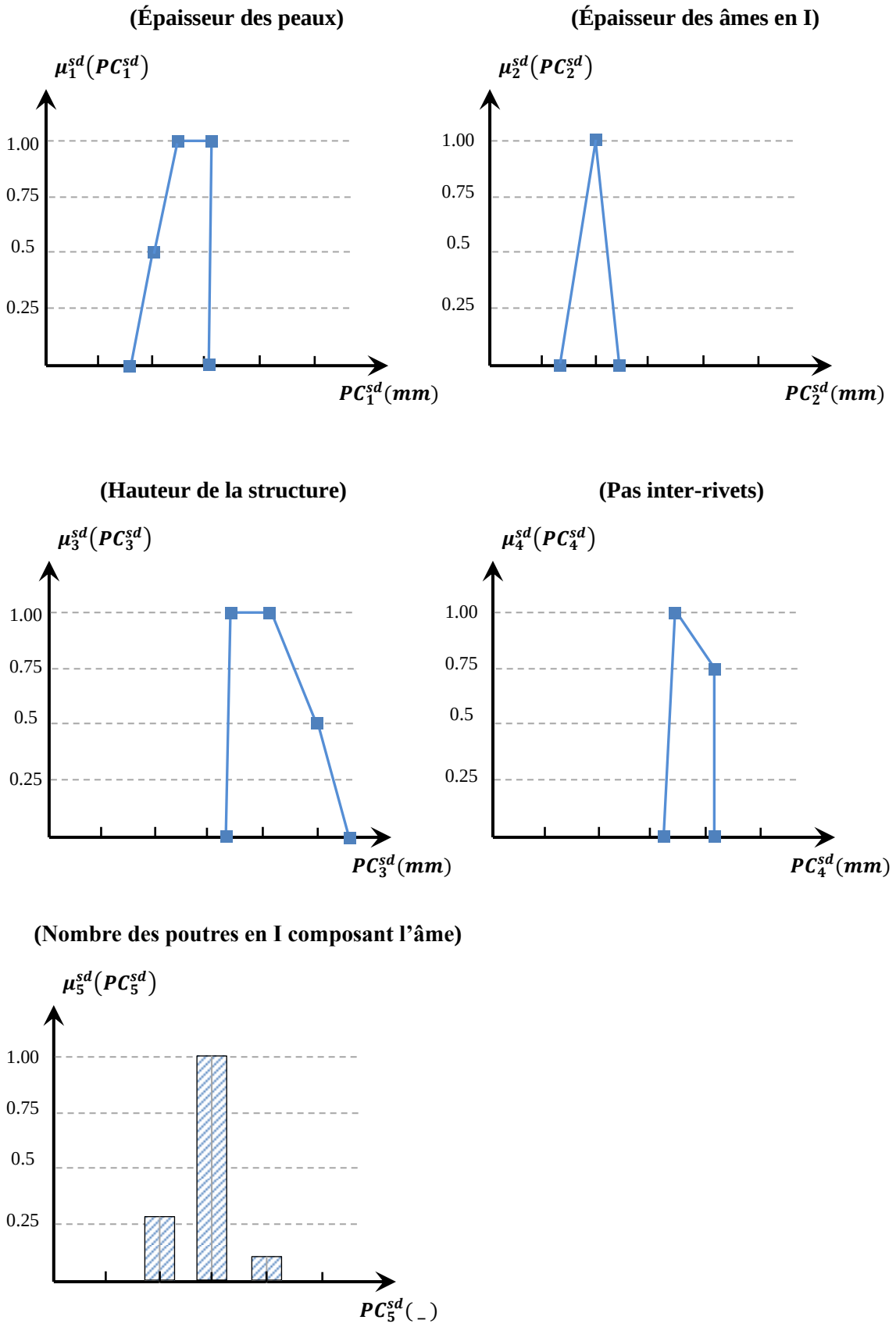


Figure A-6 Fonctions de préférence pour le concept sandwich

	Données d'entrée	Indice de variation	Indice de couplage											
			Concept treillis				Concept sandwich				Concept tube			
			p_1^{tr}	p_2^{tr}	p_3^{tr}	p_4^{tr}	p_1^{sd}	p_2^{sd}	p_3^{sd}	p_4^{sd}	p_1^{tb}	p_2^{tb}	p_3^{tb}	p_4^{tb}
Concept sandwich	PC_1^{tr}	0.65	-	-	-	-	0.15	0.2	0.94	0.23	-	-	-	-
	PC_2^{tr}	0.75	-	-	-	-	0.64	0.8	0.5	0.32	-	-	-	-
	PC_3^{tr}	0.8	-	-	-	-	0.13	0.37	0.5	0.12	-	-	-	-
	PC_4^{tr}	0.63	-	-	-	-	0.1	0.67	0.2	1	-	-	-	-
	PC_5^{tr}	0.69	-	-	-	-	0.11	0.25	0.21	0.25	-	-	-	-
Concept tube	PE_1	0.81	-	-	-	-	-	-	-		0.63	0.37	0.21	0.32
	PE_2	0.75	-	-	-	-	-	-	-		0.51	0.67	0.13	1
	PE_3	0.21	-	-	-	-	-	-	-		0.42	0.22	0.15	0.25
	PE_4	0.75	-	-	-	-	-	-	-		0.32	0.8	0.64	0.22
	PE_5	0.29	-	-	-	-	-	-	-		0.60	0.15	0.11	0.32

Tableau A-3 Indices de variation et indices de couplage pour les paramètres de conception du concept sandwich et concept tube

NOMENCLATURE

δ_i	Modèle d'observation associé à la variable de performance p_i
δ	Modèle d'observation global
μ_i	Fonction de préférence
ϕ_i	Modèle d'interprétation associé à la variable de performance p_i
ϕ	Modèle d'interprétation global
φ	Modèle d'agrégation
ρ	Masse volumique de l'aire (Kg/m^3)
σ_x^{max}	Contrainte maximale dans la direction x (MPa)
$\overline{\Psi}$	Espace de conception
θ_j	Fonction de confiance
AC_i	Accurate constraint : Seuil au-delà de laquelle le concepteur est insatisfait
C_{j,α_i}	Ordonnée associée à la coupe α_i
D_i	Détectabilité du risque
dR	Effort rasant par unité de longueur (N/m)
E_i	Ecart entre le résultat prédit par le modèle de comportement et le résultat réel
$E_{i,s}$	Valeur seuil de l'écart
F_t	Force appliquée sur les points de fixation (N)
I_v	turbulence du vent sur site d'implantation
I_{xz}	Moments quadratiques associé au plan (x, y) (m^4)
IC	Indice de couplage
ICR_i	Indice de criticité de risque

ID_i	Indice de désirabilité
$IGCR_i$	Indice global de criticité de risque
IGD_i	Indice global de désirabilité
$IGMR_i$	Indice global de maitrise de risque
IMR_i	Indice de maitrise de risque
IV_i	Indice de variation
l	Largueur du réflecteur (m)
L	Longueur du réflecteur (m)
M_{f_x}	Moment de flexion dans la direction x ($N.m$)
MGE_i	Mesure globale de l'exactitude
MOE_i	Mesure objective de l'exactitude
MSE_i	Mesure subjective de l'exactitude
M^X	Masse par unité de surface pour à un concept X (Kg/m^2)
O_i	Occurrence du risque
O_{ij}	Objectif de conception appartenant au i-ème niveau de décomposition
PC_i	Paramètre de conception
PE_i	Paramètre du milieu environnant
p_i	Variable de performance
p_i^X	Variable de performance associée à un concept X
Q_p^r	Pression dynamique de pointe sur le site d'implantation (N/m^2)
Q_p	Pression dynamique appliquée sur la surface réfléchissante (N/m^2)

R	Effort rasant (N)
RC	Ratio de cohérence
R_{revet}^{max}	Effort maximal appliqué sur un rivet (N)
s	Variable de paramétrage de la stratégie dans la fonction de Yager (continuum d'agrégation)
S_i	Ensemble de valeurs possible pour un paramètre
SC_i	Soft limit : valeur au-delà de laquelle le concepteur est complétement satisfait
S_{rivet}	Section d'un rivet (m^2)
UAC_i	Upper accurate constraint : AC supérieure
USL_i	Upper soft limit : SL supérieure
$V_{b,0}$	Vitesse maximale du vent sur le site d'implantation (m/s)
w_i	Poids d'un objectif de conception
$\overrightarrow{X^*}$	Solution de référence
$\overrightarrow{X^j}$	Solution candidate

REFERENCES

[Abb15] Abbas R., Martínez-Val J.M. (2015) Analytic optical design of linear Fresnel collectors with variable widths and shifts of mirrors, *Renewable Energy*, 75:81-92.

[Afn90] AFNOR (1990-1991) *NF X50-150/151, analyse de la valeur, analyse fonctionnelle : vocabulaire NF, X50-152, analyse de la valeur, caractéristiques fondamentales*, Association Française de NORmalisation, Paris.

[Ant01] Antonsson E.K. (2001) Imprecision in Engineering Design, *Engineering Design Research Laboratory*, California Institute of Technology, Pasadena.

[Ant95] Antonsson E.K., Otto K.N. (1995) Imprecision in engineering design, *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the ASME, 117(B):25-32.

[Bal98] Balci O. (1998) Verification, Validation and Testing, *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, Jerry Banks, John Wiley & Sons, pp.335-393.

[Ben10] Benmarraze S., Lecuillier P., Olivés R., Benmarraze M. (2010) Life cycle assessment of solar collector Fresnel module and parabolic trough assemblies.

[Ber05] Bernard A. (2005) Virtual Engineering: Methods and Tools, *Proceedings of the IMechE Part B Journal of Engineering Manufacture*, 219(5):413-421.

[Ber07] Bernard A, Ammar-Khodja S, Perry N, Laroche F (2007) Virtual Engineering BasedonKnowledge Integration, *Virtual and Physical Prototyping*, 2(3):137–154.

[Ber88] Berliner C., Brimson J.A. (1988) Cost Management for Today's Advanced Manufacturing, *The CAM-I Conceptual Design*, Harvard Business School Press.

[Bev02] Bevington P., Robinson D.K. (2002) *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, 2ème édition, McGraw-Hill Science.

[Bie91] Biegel P., Pecht M. (1991) Design trade-offs made easy, *Concurrent Engineering 1*, 3:29-40.

[Bog05] Bogus S., Molenaar K., Diekmann J. (2005) Concurrent Engineering Approach to Reducing Design Delivery Time, *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(11):1179-1185.

[Bra82] Brans J.P. (1982) L'ingénierie de la décision; Elaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE, *L'aide à la décision : Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir,* Presses de l'Université Laval, Québec, Canada, pp.183-213.

[Bsi10] BSI. BS EN 1991-1-4:2005+A1:2010 Eurocode 1: actions on structures – Part 1–4: General actions – wind actions, British Standards Institution; 2005.

[Cha99] Chapman C.B., Pinfold M. (1999) Design engineering- a need to rethink the solution using knowledge based engineering, *Knowledge-Based Systems*, 12(5-6):257-267.

[Cho08] Choo E.U., Wedley W.C. (2008) Comparing Fundamentals of Additive and Multiplicative Aggregation in Ratio Scale Multi-Criteria Decision Making, *The Open Operational Research Journal*, 2:1-7.

[Cho85] Choo E.U., Wedley W.C. (1985) Optimal criteria weights in repetitive multicriteria decision making, *Journal of Operational Research Society*, 36:983-92.

[Cho99] Choo E.U., Schoner B., Wedley W.C. (1999) Interpretation of criteria weights in multicriteria decision making, *Computers & Industrial Engineering*, 37:527-541.

[Cla91] Clark K.B., Fujimoto T. (1991) *Product development performance: strategy, organization, and management in the world auto industry*, Harvard Business Press.

[Col12] Collignan A., Sebastian P., Pailhes J., Ledoux Y. (2012) Arc-elasticity and hierarchical exploration of the neighborhood of solutions in mechanical design, *Advanced Engineering Informatics*, 26:603-617.

[Coo01] Cooper R.G. (2001) *Winning at New Products: Accelerating the Process from Idea to Launch*, Reading, MA: Perseus Books.

[Dar91] Darmon R.Y., Rouzies D. (1991) Internal validity assessment of conjoint estimated attribute importance weights, *Journal of the Academy of Marketing Science*, 19:315-22.

[Der80] Derringer R., Suich R. (1980) Simultaneous optimization of several response variables, *Journal of Quality Technology*, 12(4):214-219.

[Der89] Der Kiureghian A. (1989) Measures of Structural Safety under Imperfect States of Knowledge, *Journal of Structural Engineering*, 115:1119-1139.

[Der94] Derringer R. (1994) A Balancing Act: Optimizing a Product's Properties, *Quality Progress*, 27(6)51-58.

[Det96] De Terssac G. (1996) *Le travail de conception : de quoi parle-t-on ? in coopération et conception*, Octares.

[Don87] Dong W., Shah H.C. (1987) Vertex method for computing functions of fuzzy variables, *Fuzzy Sets and Systems*, 24(1):65-78.

[Dré13] Nicolas D., Nadège T., Alex D. (2013) A metric to qualify data maturity in preliminary collaborative design of mechanical systems, *QUALITA 2013*, Compiègne, France.

[Dub00] Dubois D., Nguyen H.T., Prade H. (2000) Possibility Theory, Probability and Fuzzy Sets Misunderstandings, Bridges and Gaps, *Fundamentals of Fuzzy Sets*, 7:343-438.

[Dun90] Dunn J. (1990) Simultaneous engineering side-by-side to success, *Engineer*, 271(7020):51 53.

[Dye79] Dyer J.S., Sarin R.K. (1979) Measurable multiattribute functions, *Operations Research*, 27:810-22.

[Fer96] Ferson S., Ginzburg L. (1996) Different Methods are Needed to Propagate Ignorance and Variability, *Reliability Engineering and System Safety*, 54:133-144.

[Fin97] Finch W.W. (1997) Predicate Logic Representations for Design Constraints on Uncertainty Supporting the set-based Design Paradigm, Thèse de doctorat, University of Michigan.

[Fod94] Fodor J.C., Roubens M. (1994) *Fuzzy Preference Modeling and Multi-Criteria Decision Aid*, Kluwer, Dordrecht.

[Jan90] Jansen P. (1990) Aide à la conception : Une approche basée sur la satisfaction de contraintes, Thèse de doctorat, Université de Montpellier.

[Jha09] Jha A. (2009) Concentrated Solar Power Could Generate ‘quarter of World’s Energy’, *The guardian publishing website*, www.guardian.co.uk [consulté le 5 Aout, 2015].

[Hab02] Haberle A., Zahler C., Lerchenmuller H., Mertins M., Wittwer C., Trieb F. (2002) The Solarmundo line focussing Fresnel collector. Optical and thermal performance and cost calculations, *11th International SolarPACES Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies*, Zurich, Switzerland.

[Han97] Hanssen R.W. (1997) Reducing Delivery Times in Engineer-To-Order Firms by Using the Concepts of Concurrent Engineering, *Proceedings of the 4th International Conference on Concurrent Enterprising (ICE'97)*, The University of Nottingham, pp.495-508.

[Har65] Harrington E.C. (1965) The desirability function, *Industrial Quality Control*, 21(10):494-498.

[Hub01] Hubka V., Eder E. (2001) *Design Science*, SALUSTRI, 2001.

[Ino12] Inoue M., Lindow K., Stark R., Tanaka K., Nahmd Y.E., Ishikawa H. (2012) Decision-making support for sustainable product creation, *Advanced Engineering Informatics*, 26(4):782-792.

[Int10] International Energy Agency (2010) Technology roadmap concentrating solar power, www.iea.org [consulté le 11 Mai, 2015].

[Gas96] Gass S.I., Harris C.M. (1996) *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Kluwer Academic Publishers.

[Gau00] Gautier F., Giard V. (2000) Vers une meilleure maîtrise des coûts engagés sur le cycle de vie, lors de la conception de produits nouveaux, *Comptabilité, Contrôle, Audit*, tome 6, 2:43-75.

[Gaz11] Gazzo A., Kost C., Ragwitz M. (2011) Middle East and North Africa Region Assessment of the Local Manufacturing Potential for Concentrated Solar Power (CSP) Projects, Ernst Young Association, World Bank Wash. DC.

[Ger04] Gero J.S., Kannengiesser U. (2004) The situated Function-Behaviour-Structure framework, *Design Studies*, 25(4):373-391.

[Goh05] Goh Y.M., Booker J.D., McMahon C.A. (2005) A framework for the handling of uncertainty in engineering knowledge management to aid product development, *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design*, Melbourne.

[Gra98] Grabowski H., Rude S., Grein G., Meis E., El-Mejbir E. (1998) Universal Design Theory: Elements and Applicability to Computers, *Universal Design Theory*, Shaker Verlag, Aachen , pp.209-220.

[Gre06] Grebici K., Ouertani M.Z, Blanco E., Gzara-Yesilbas L., Rieu D. (2006) Conflict management in design process: focus on change impact, *CE06, International Conference on Concurrent Engineering*.

[Gre07] Grebici K. (2007) La Maturité de l'Information et le Processus de Conception Collaborative, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

[Gua14] Zhu G., Wendelin T., Wagner M.J., Kutscher C. (2014) History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors, *Solar Energy*, 103:639-652.

[Gui93] Guidat C., Boly V., Noel-Arnould C. (1993) L'analyse de la valeur : outil de base pour une nouvelle démarche d'amélioration de produits intégrant technique, marketing, ergonomie, design, sécurité et normalisation, *Congrès international Valeur & Design*, Paris.

[Gui98] Guitouni A., Martel J.M. (1998) Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method, *European Journal of Operational Research*, 109:501-521.

[Kak01] Kakuda Y., Kikuchi M. (2001) Abstract Design Theory, *Annals of Japan Association of Philosophical Science*, 10(3):19-35.

[Kat14] Katz D.R., Sarkani S., Mazzuchi T., Conrow E.H. (2015) The Relationship of Technology and Design Maturity to DoD Weapon System Cost Change and Schedule Change During Engineering and Manufacturing Development, *Systems Engineering*, 18(1):1-15.

[Kay07] Kayis B., Arndt G., Zhou M. (2007) A Risk Mitigation Methodology for New Product and Process Design in Concurrent Engineering Projects, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1):167-170.

[Kea96] Kearfott R.B. (1996) Interval Computations: Introduction, Uses, and Resources, *Euromath Bulletin*, volume 2(1):95-112.

[Kee94] Keeney R.L., Raiffa H. (1994). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*, Cambridge University Press.

[Kim00] Kim K., Lin D. (2000) Simultaneous optimization of mechanical properties of steel by maximizing exponential desirability functions, *Journal of the Royal Statistical Society Series C-Applied Statistics*, 49(3):311-325.

[Kra71] Krantz D., Luce R., Suppes P., Tversky A. (1971) *Foundations of Measurement*, volume I, Academic Press, New York.

[Kri06] Krishnamurty S. (2006) Normative Decision Analysis in Engineering Design. In K. Lewis, W. Chen and L. Schmidt (Eds), *Decision Making in Engineering Design*, ASME Press, Chapter 4, pp.21-35.

[Kri96] Krishnan V. (1996) Managing the simultaneous execution of coupled phases in concurrent product development, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 43(2):210-217.

[Kri97] Krishnan V., Eppinger S.D., Whitney D.E. (1997) A model-based framework to overlap product development activities, *Management Science*, 43(4):437-451.

[Kum15] Kumara V., Shrivastavaa R.L., Untawaleb S.P. (2015) Fresnel lens: A promising alternative of reflectors in concentrated solar power, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4:376-390.

[Lan11] Langeveld L.H. (2011) *Product Design with Embodiment Design as a New Perspective*, Delft University of Technology, The Netherlands.

[Leb09] LeBel L. (2009) Prise de décision Multi critères, *Prise de décision Multi critères*, Université Laval.

[Lem14] Lemaire M. (2014) *Mécanique et incertain*, ISTE Editions.

[Lu07] Lu S.C.Y., Elmaraghy W., Schuh G., Wilhelm R. (2007) A Scientific Foundation of Collaborative Engineering, *Annals of CIRP*, 56(2):605-634.

[Mal09] Malak Jr. R.J., Aughenbaugh J.M., Paredis C.J.J. (2009) Multi-attribute utility analysis in set-based conceptual design, *Computer-Aided Design*, 41:214-227.

[Mar98] Marston M., Mistree F. (1998) An implementation of expected utility theory in decision based design, *ASME Design Engineering and Technical Conferences*, DETC98/DTM-5670, Atlanta, GA.

[Mat02] Matthews P.C., Blessing L.T.M., Wallace K.M. (2002) The introduction of a design heuristics extraction method, *Advanced Engineering Informatics*, 16:3-19.

[Mec01] Meckesheimer M. (2001) A framework for metamodel-based design : subsystem metamodel assessment and implementation issues, Thèse de Doctorat, Pennsylvania State University.

[Mor06] Morgan J.M., Liker J.K. (2006) *The Toyota Product Development System: Integrating People, Process and Technology*, Productivity Press, Seattle, WA.

[Neu44] Neumann J.V., Morgenstern O. (1944) Theory of games and economic behaviour, *Science editions, J. Wiley*.

[Nut80] Nutt P.C. (1980) Comparing methods for weighting decision criteria, *Omega*, 8:163-72.

[Obe99] Oberkampf W., DeLand S., Rutherford B., Diegert K., Alvin K. (1999) A new methodology for the estimation of total uncertainty in computational simulation, *AIAA Paper*, 4:3061-3083.

[Obr95] O'Brien C., Smith S.J.E. (1995) Design maturity assessment for concurrent engineering co-ordination, *International Journal of Production Economics*, 41(1-3):311-320.

[Oku08] Okudan G.E., Tauhid S. (2008) Concept selection methods – a literature review from 1980 to 2008, *International Journal of Design Engineering*, 1(3):243-277.

[Ott93] Otto K. N., Antonsson E. K. (1993) The Method of Imprecision Compared to Utility Theory for Design Selection Problems, *American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division (Publication) DE*, 53:167-173.

[Ott95] Otto K.N., Wood K.L. (1995) Estimating errors in concept selection, *9th International Conference on Design Theory and Methodology*, 2:397-411.

[Oze88] Ozernoy V.M. (1988) Some issues in designing an expert system for multiple criteria decision making, *Acta Psychologica*, 68:237-253.

[Pah06] Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.H. (2006) *Engineering Design: A Systematic Approach*, 3ème edition, Springer, London.

[Pah96] Pahl G., Beitz W. (1996) Engineering design; A systematic approach, 2nd edition, *Springer-Verlag*, London.

[Pas06] Pasandideh S.H.R., Niaki S.T.A. (2006) Multi-response simulation optimization using genetic algorithm within desirability function framework, *Applied Mathematics and Computation*, 175(1):366-382.

[Pek74] Pekelman D., Sen S. (1974) Mathematical programming models for determination of attribute weights, *Management Science*, 20:1217-29.

[Qui12] Quirante T., Ledoux Y., Sebastian P. (2012) Multiobjective optimization including design robustness objectives for the embodiment design of a two-stage flash evaporator, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 6(1):29-39.

[Red05] Rajesh R., McAdams D.A. (2005) A Methodology for Model Selection in Engineering Design, *Transactions of the ASME*, Volume 127.

[Rei10] Reich Y. (2010) My method is better!, *Research in Engineering Design*, 21(3):137-142.

[Roy13] Roy B. Slowinski R. (2013) Questions guiding the choice of a multicriteria decision aiding method. *EURO Journal on Decision Processes*, 1: 69-97.

[Roy68] Roy B. (1968) Classement et choix en présence de points de vue multiples, *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle*, 2:57-75.

[Saa06] Saari D.G. (2006) Fundamentals and implications of Decision-Making, *Decision Making in Engineering Design*, ASME Press, Chapitre 5, pp.35-42.

[Saa77] Saaty T.L., (1977) A scaling method for priorities in hierarchical structures, *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3):234-281.

[Saa80] Saaty T.L. (1980) The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation, McGraw-Hill International Book Co., New York.

[Saa90] Saaty T.L. (1990) How to make a decision: The analytic hierarchy process, European Journal of Operational Research, 48(1):9-26.

[Saw02] Sawada H. (2002) Computer support for insightful engineering design based on generic and rigorous principles of symbolic algebra, *Proceedings of Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Clermont-Ferrand.

[Sca04] Scaravetti D. (2004) Formulation préalable d'un problème de conception, en vue de l'aide à la décision en conception architecturale, Thèse de Doctorat, ENSAM Bordeaux.

[Sch91] Schenkerman S. (1991) Use and abuse of weights in multiple objective decision support models, *Decision Sciences*, 22:369-78.

[Sco00] Scott M.J., Antonsson E.K. (2000) Using Indifference Points in Engineering Decisions, *Proceedings of the 11th International Conference on Design Theory and Methodology*, Baltimore.

[Sco05] Scott M.J., Antonsson E.K. (2005) Compensation and Weights for Trade-offs in Engineering Design: Beyond the Weighted Sum, *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the ASME, 127(6):1045-1055.

[Sco98] Scott M., Antonsson E. (1998) Aggregation functions for engineering design trade-offs, *Fuzzy sets and systems*, 99(3):253-264.

[Sco99] Scott M.J. (1999) Formalizing negotiation in engineering design, Thèse de doctorat, California Institute of Technology, Pasadena, California.

[Seb11] Sebastian P., Yann L., Collignan A., Pailhes P. (2011) Linking objective and subjective modelling in engineering design through arc-elastic dominance, *Expert Systems with Applications*, 39(9):7743-7756

[Sha12] Sharif N., Huang C. (2012) Innovation strategy, firm survival and relocation: The case of Hong Kong-owned manufacturing in Guangdong Province, China, *Research Policy* , 41(1):69-78

[Sim60] Simon H.A. (1960) *The New Science of Management Decision*, HarperCollins.

[Sol86] Solymosi T., Dombi J. (1986) A method for determining the weights of criteria: the centralized weights, *European Journal of Operational Research*, 26:35-41.

[Ste92] Stewart T.J. (1992) A critical survey on the status of multiple criteria decision making theory and practice, *Omega*, 20(5-6): 569–586.

[Suh90] Suh N.P. (1990) *The Principles of Design*, Oxford University Press, Oxford.

[Ter99] Terwiesch C., Loch C.H. (1999) Measuring the effectiveness of overlapping development activities, *Management Science*, 45(4): 455-465.

[Thu91] Thurston D.L. (1991) A formal method for subjective design evaluation with multiple attributes, *Research in Engineering Design*, 3(2):105-122.

[Tom07] Tomiyama T., D'Amelio V., Urbanic J., ElMaraghy W. (2007) Complexity of Multi-disciplinary Design. *Annals of CIRP*, 56(1):185-188.

[Tom09] Tomiyamaa T., Gub P., Jind Y., Lutterse D., Kindf Ch., Kimurag F. (2009) Design methodologies: Industrial and educational applications, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2):543-565.

[Tom87] Tomiyama T., Yoshikawa H. (1987) Extended General Design Theory, *Design Theory for CAD*, North-Holland, Amsterdam, pp.29-34.

[Tra97] Travé-Massuyès L., Dague P., Guerrin F. (1997) Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur, Hermès.

[Ull06] Ullman D.G. (2006) Trade Studies with Uncertain Information, *Proceeding of the Sixteenth Annual International Symposium of the International Council On Systems Engineering (INCOSE)*, 2006.

[Ull13] Ulloa C.V. (2013) Exploitation et réhabilitation de bâtiments tertiaires : une démarche énergétique d'amélioration environnementale, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux.

[Ver04] Vernat Y. (2004) Formalisation et qualification de modèles par contraintes en conception préliminaire, Thèse de doctorat, ENSAM Bordeaux.

[Ver10] Vernat Y., Nadeau J.P., Sebastian P. (2010) Formalisation and qualification of models adapted to preliminary design, *Internationnal Journal of Interactive Design and Manufacturing*, 4(1):11-24.

[Vin82] Vincke P.H. (1982) Preference modelling: a survey and an experiment, Brans JP (ed) Operational Research '81, North-Holland, Amsterdam, pp.341-353.

[Vin83] Vincent T. (1983) Game theory as a design tool, *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 105:165-170.

[Woo89] Wood K.L., Antonsson E.K. (1989) Computations with Imprecise Parameters in Engineering Design: Background and Theory, *Journal of Mechanical Design*, 111(4):616-625.

[Yag88] Yager R.R., (1988) On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 18(1):183-190.

[Yan01] Yannou B., (2001) Préconception des produits, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, ECP-Paris.

[Yas03] Yassine A., Braha D. (2003) Complex Concurrent Engineering and the Design Structure Matrix Method, *Concurrent Engineering Research and Applications*, 11(3):165-176.

[Yas99] Yassine A., Falkenburg D., Chelst K. (1999) Engineering design management: an information structure approach, *International Journal of Production Research*, 37(13):2957-2975.

[Yos81] Yoshikawa H. (1981). General design theory and a CAD system. In Sata, T., Warman, E.A. (Eds.), *Man- Machine Communication in CAD/CAM*, North-Holland, Amsterdam, pp.35-57.

[Yos85] Yoshikawa, H., & Uehara, K. (1985). Design theory for CAD/CAM Integration, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 34(1):173-178.

[Zad65] Zadeh L.A. (1965) Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8:338-353.

[Zad78] Zadeh L.A. (1978) Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility, *Fuzzy Sets and Systems*, 1:3-28.

[Zan98] Zanakis S.H., Solomon A., Wishart N., Dublish S. (1998) Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods, *European Journal of Operational Research*, 107:507-529.

[Zha92] Zhang D., Yu P.L., Wang P.Z. (1992) State-dependent weights in multicriteria value functions, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 74:1-21.

[Zhi06] Zhihuang D., Michael J.S. (2006) Effective Product Family Design Using Preference Aggregation, *Journal of Mechanical Design*, 128(4):659-667.

[Zim01] Zimmer L., Zablit P. (2001) Global aircraft predesign based on contraint propagation and interval analysis, *proceedings of CEAS Conference on multidisciplinary Aircraft design and Optimisation*, Köln, Germany.

PUBLICATIONS PERSONNELLES

Revues internationales à comité de lecture

[Ela16] El Amine M., Pailhes J., Perry N. (2016) Integration of product maturity in decision making for conceptual engineering design: An application to a solar collector development, *Research in engineering design*, Accepté avec révisions.

[Ela15a] El Amine M., Pailhes J., Perry N. (2015) Selection and use of a multi-criteria decision aiding method in the context of conceptual design with imprecise information: Application to a solar collector development, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Accepté.

[Per15a] Perry N., El Amine M., Pailhes J. (2015) Exploring design space in embodiment design with consideration of models accuracy, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64(1):181-184.

Congrès nationaux et internationaux avec actes

[Ela13] El Amine M., Perry N., Pailhes J. (2013) Conception pilotée par la fabrication et l'industrialisation sous contrainte de coûts : application à un système réflecteur solaire et à son support, *Congrès Français de Mécanique*, Bordeaux, France.

[Ela14a] El Amine M., Pailhes J., Perry N. (2014) Critical review of multi-criteria decision aid methods in conceptual design phases: application to the development of a solar collector structure, *Procedia CIRP*, 21:497-502.

[Ela14c] El Amine M., Pailhes J., Perry N. (2014) Comparison of different Multiple-criteria decision analysis methods in the context of conceptual design: application to the development of a solar collector structure, *Joint Conference on Mechanical, Design Engineering and Advanced Manufacturing*, Toulouse, France.

[Per15b] Perry N., El Amine M., Pailhes J. (2015) Exploring design space in embodiment design with consideration of models accuracy, *65th CIRP General Assembly*, Cape Town, Afrique du sud.

[Rod14] Rodney E., El Amine M., Piegay N., Benama Y. (2014) Management de la complexité dans les projets d'innovation : application au développement d'un champ solaire à miroirs de Fresnel, *XIXth Conference on Projectics*, Bidard, France.

Congrès nationaux et internationaux sans actes

[Ela15b] El Amine M., Pailhes J., Perry N. (2015) Eléments de qualification des modèles pour la prise de décision en conception, *GDR Macs*, Troyes, France.

[Ela13] El Amine M. (2013) Analyse critique des méthodes de prise de décision multicritère en conception à travers un cas industriel de développement d'un réflecteur solaire, *Journées IODE*, Agen, France.

[Ela15c] El Amine M. (2015) Approche d'intégration de la maturité du produit dans la prise de décision en conception mécanique, *Journées IODE*, Tarbes, France.

INTEGRATION DE LA MATURITE DES CONNAISSANCES DANS LA PRISE DE DECISION EN CONCEPTION MECANIQUE - APPLICATION A UN SYSTEME SOLAIRE -

RESUME : Les décisions préliminaires en conception impactent considérablement le coût global du cycle de vie du produit et doivent être encadrées par les démarches appropriées. Une première démarche est proposée en amont du projet de développement pour choisir les concepts les plus pertinents. A ce stade du développement, les caractéristiques du produit sont incomplètement définies et peu d'informations existent sur les concepts. Dans ces conditions, il devient nécessaire d'exploiter des connaissances de nature implicite, liées à l'expérience et au savoir-faire des concepteurs. Afin d'intégrer efficacement ce type de connaissances dans la prise de décision, nous proposons de les formaliser d'abord à travers des outils comme les fonctions de préférence ou les indices de variation. Ensuite, la démarche d'aide à la décision proposée permet de combiner à la fois ces connaissances implicites et les connaissances explicites, traduites par les modèles de comportement, pour évaluer chaque concept en termes d'aptitude à respecter les exigences minimales de validation et du potentiel de performance qu'il peut atteindre. La démarche prend en considération les préférences du décideur en les formalisant via la méthode OIA (Observation-Interprétation-Agrégation). Une deuxième démarche a été proposée pour définir les éléments d'architecture du produit, une fois le concept choisi. La fiabilité des modèles de comportement utilisés habituellement pour explorer l'espace de conception est remise en question à cause des hypothèses adoptées. Fixer l'architecture du produit en se basant sur ces modèles nécessite la prise en compte de leur niveau d'exactitude. Nous avons ainsi développé un indicateur d'exactitude qui intègre, d'une part, une évaluation objective qui est la mesure d'écart entre le modèle et un comportement de référence (supposé exact) et, d'autre part, sur une évaluation subjective basée sur l'utilisation de fonctions de confiance établies par les concepteurs. Le décideur peut ainsi explorer l'espace de conception à la recherche d'architectures offrant le meilleur compromis entre performance et risque lié à l'inexactitude des modèles de comportement utilisés. Les deux démarches proposées sont appliquées au développement d'un composant solaire.

Mots clés : aide à la décision, modélisation des préférences, conception préliminaire, méconnaissance, exactitude des modèles, risque.

INTEGRATION OF KNOWLEDGE MATURITY IN DECISION MAKING FOR MECHANICAL DESIGN - APPLICATION TO A SOLAR SYSTEM -

ABSTRACT : Preliminary design decisions significantly impact the overall life cycle cost of the product and must be structured by appropriate approaches. A first approach is proposed at early design phases to select the most relevant concepts. At this stage of development, product characteristics are incompletely defined and there is little information on the concepts. Under these circumstances, it becomes necessary to exploit tacit knowledge, related to the designers' experience and know-how. In order to effectively integrate such knowledge in decision making, we propose first of all to formalize this knowledge through several tools such as preference functions and variation indexes. Then, the proposed decision-support approach allows combining this tacit knowledge with explicit knowledge (represented by behavior models) to assess each concept in terms of ability to fulfill the minimum design requirements and performance potential that can be achieved. The approach takes into account the preferences of the decision maker by formalizing them via OIA method (Observation-Interpretation-aggregation). A second approach was proposed to determine the product embodiment variables, once the concept is chosen. The reliability of behavior models usually used to explore the design space is being questioned because of the assumptions adopted. In order to define the product embodiment variables based on these models, it is necessary to take into account their level of accuracy. We have developed an accuracy measure that integrates, on the one hand, an objective assessment based on the measurement of difference between the model and a reference behavior (assumed accurate) and, on the other hand, a subjective assessment based on the use of confidence functions established by the designers. Therefore, the decision maker can explore the design space to look for architectures offering the best trade-off between performance and risk associated with the low accuracy of behavior models. The two proposed approaches are applied to the development of a solar component.

Keywords : decision support, preference modeling, preliminary design, lack of knowledge, model accuracy, risk.

ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY