
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...).

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

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 maîtrisés 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).

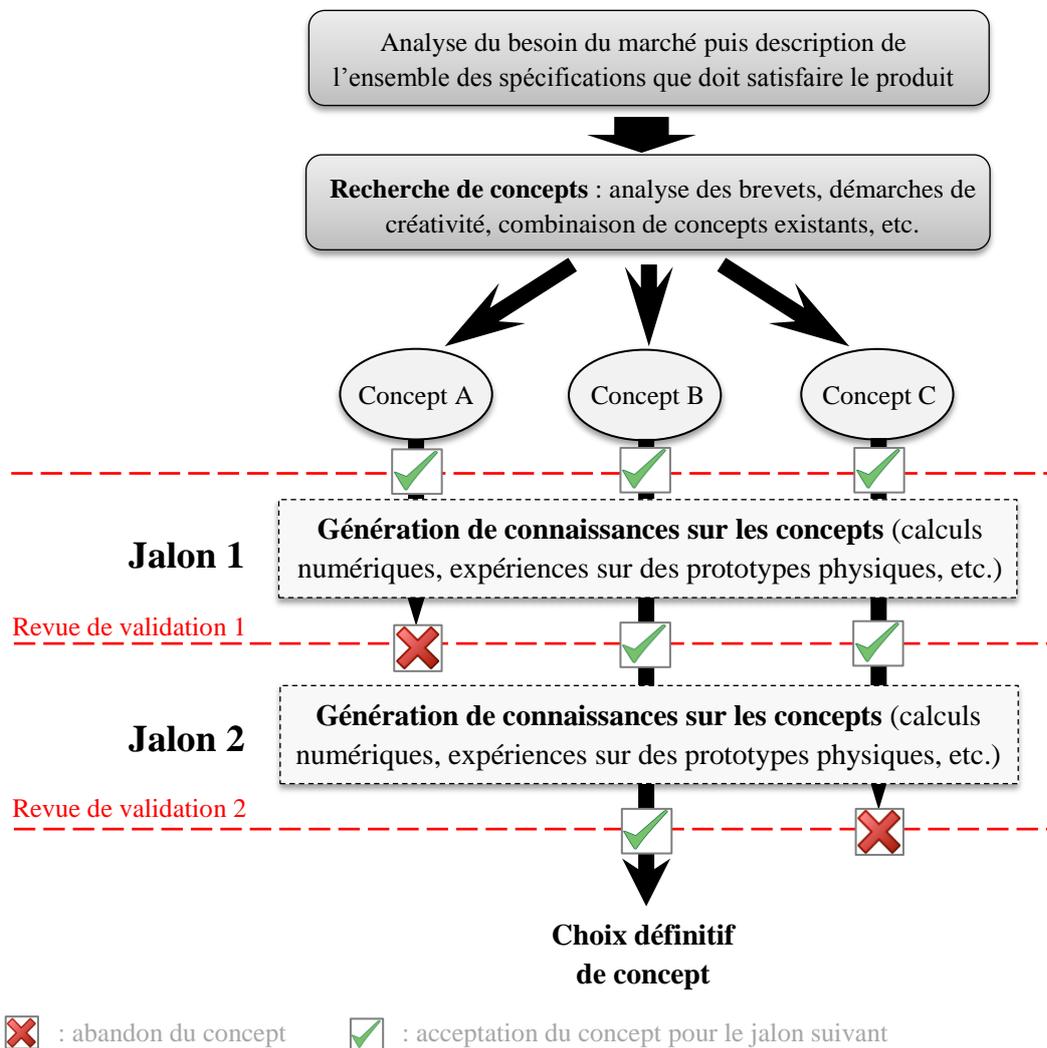


Figure III-1 Développement de plusieurs concepts en parallèle

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 des 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 maîtrisé [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 conservatrice (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 dépend 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.

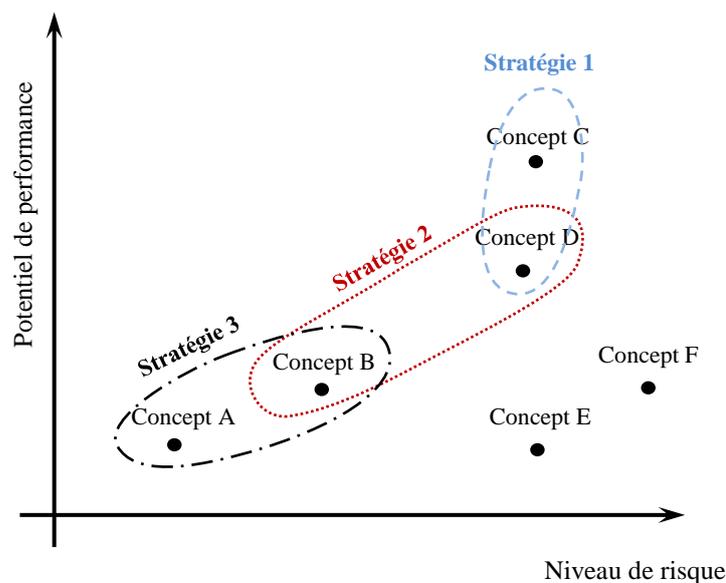


Figure III-2 Exemple illustrant trois choix de développement

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 $\overline{X}^{j,A}$ (relation ci-dessous), dont les paramètres de conception sont définis précisément.

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

Avec A le concept considéré, n^A le nombre des paramètres de conception du concept A , j l'indice de l'alternative de conception étudiée et 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.

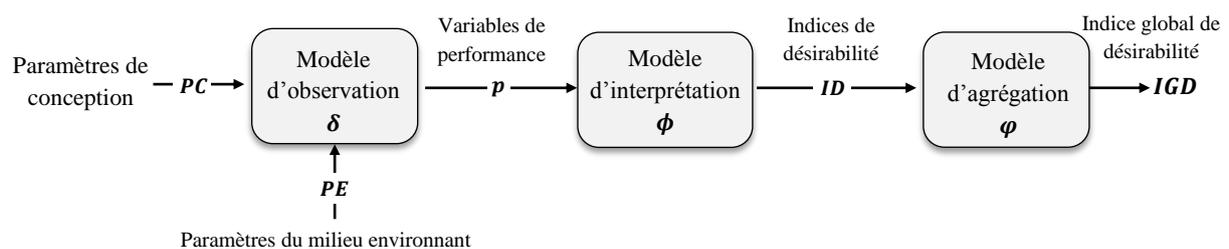


Figure III-3 Modèle global utilisé pour la formalisation des préférences du décideur

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 p_i^A pour un concept 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 $\overline{X}^{j,A}$. 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 $PC_i^{j,A}$ ni dans les paramètres du milieu environnant (notés 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.

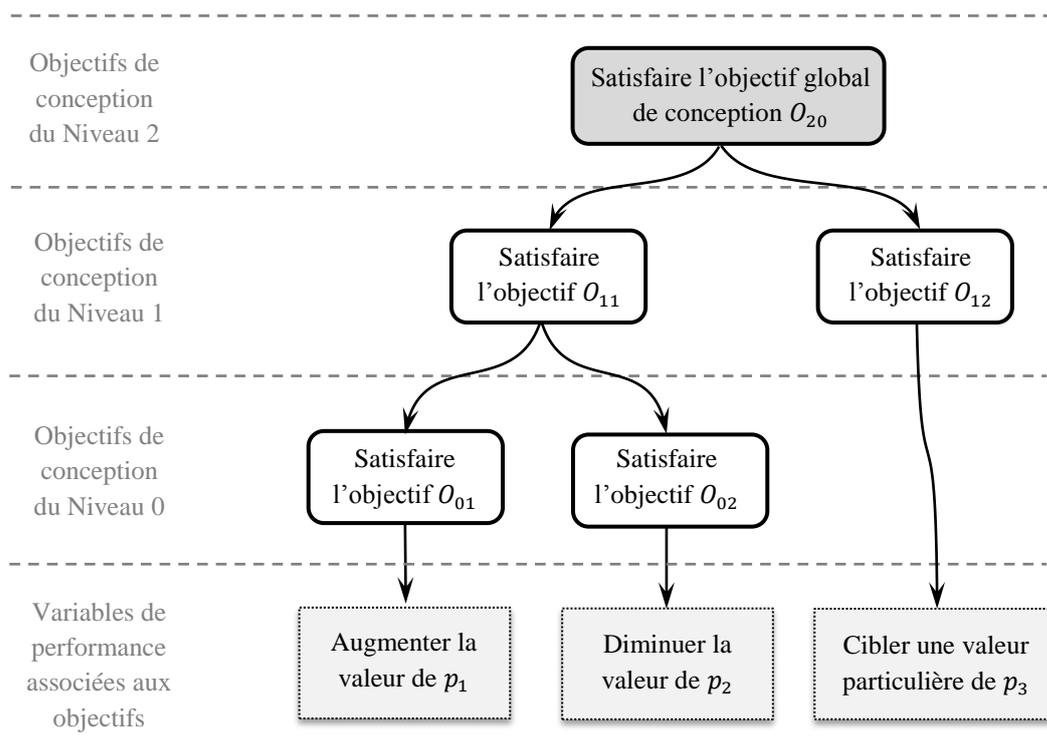


Figure III-4 Décomposition de l'objectif global de conception en plusieurs sous-objectifs de conception

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 O_{ij} , où i indique le niveau de décomposition et 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.

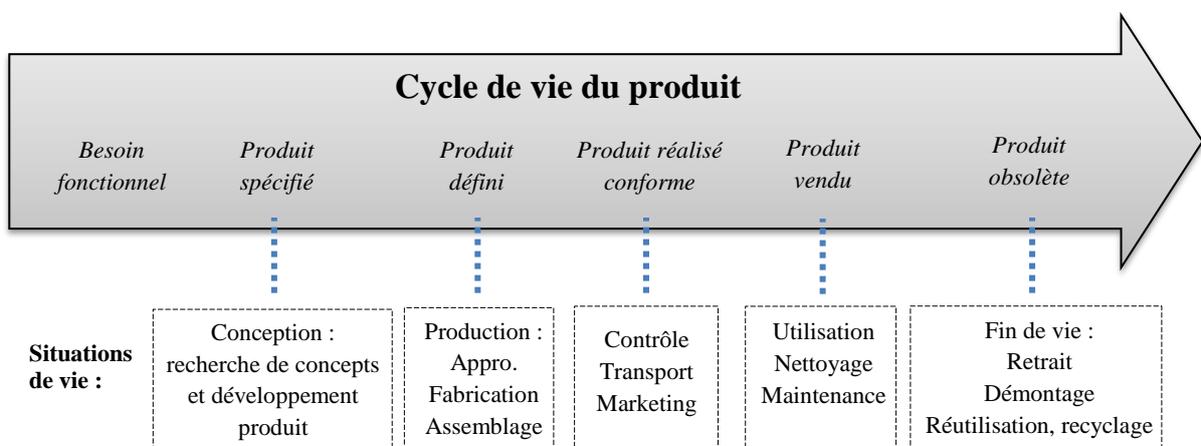


Figure III-5 Cycle de vie du produit et situations de vie correspondantes [Sca04]

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.

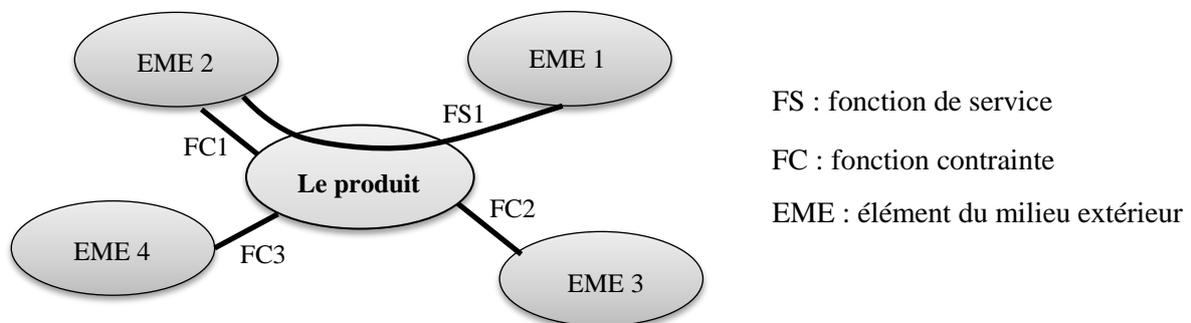


Figure III-6 Diagramme pieuvre (APTE[®])

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 $\overline{X}^{j,A}$. 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 traités. 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 aux 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 $\overline{X^{j,A}}$). 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.

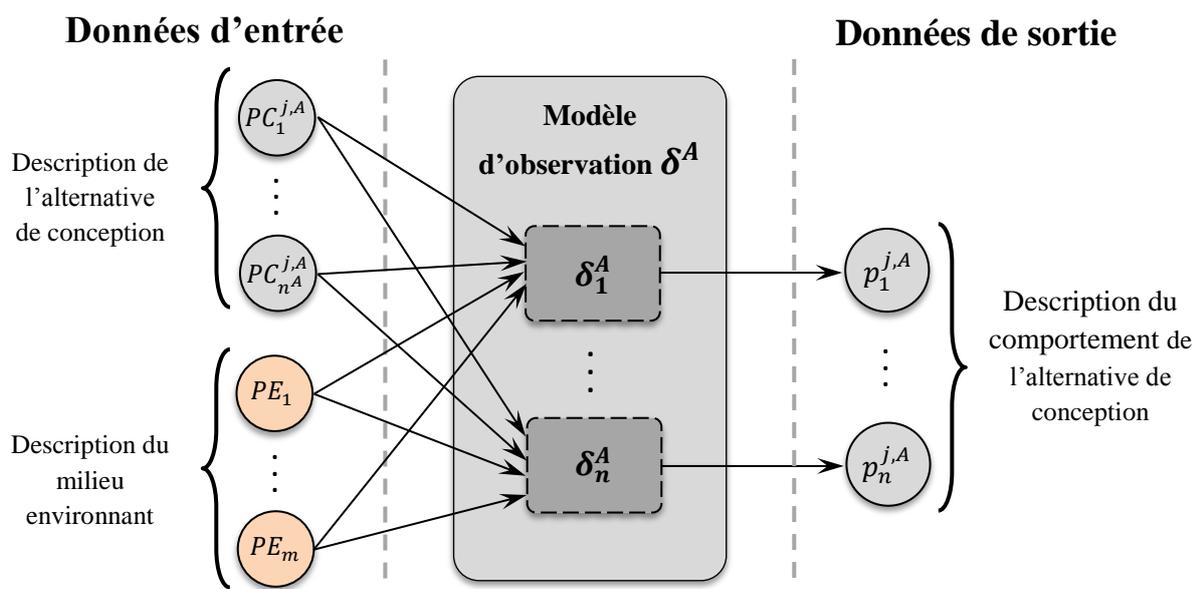


Figure III-7 Structure du modèle d'observation pour un concept A

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).

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

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 $p_i^{j,A}$;

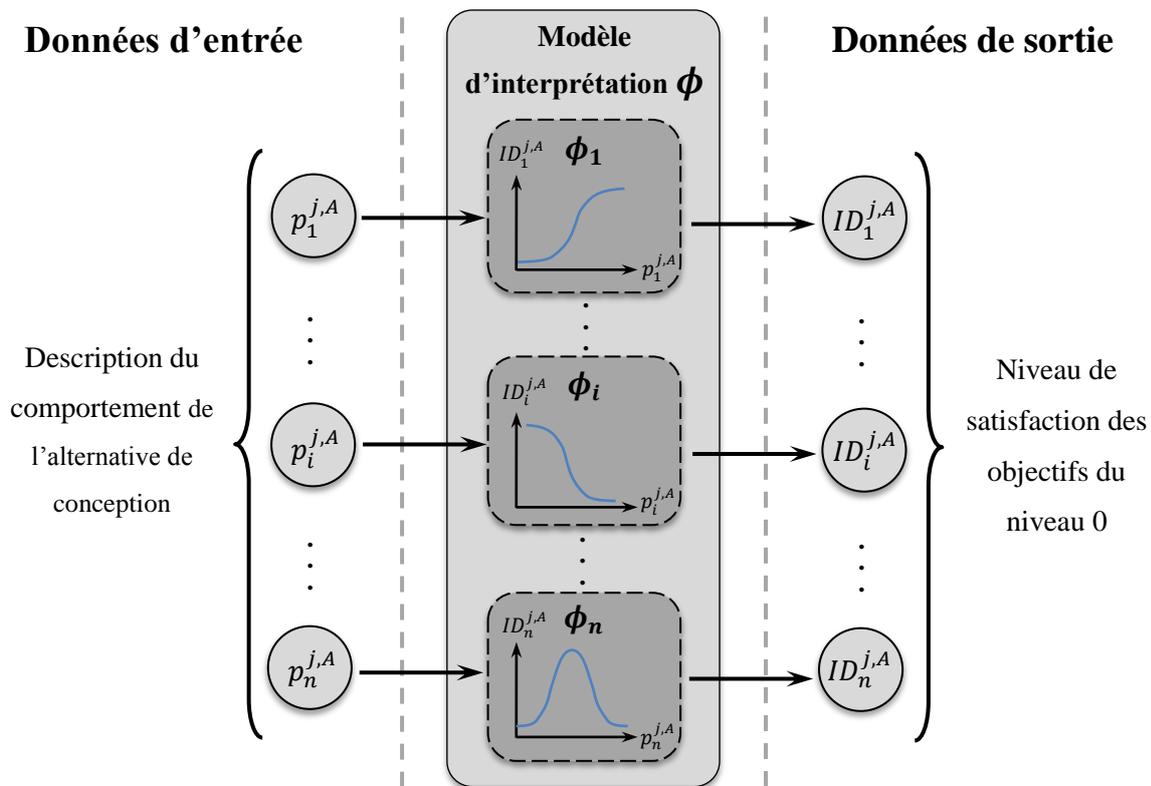


Figure III-8 Structure du modèle d'interprétation

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 $\overline{D}^{j,A}$ 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 :

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

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].

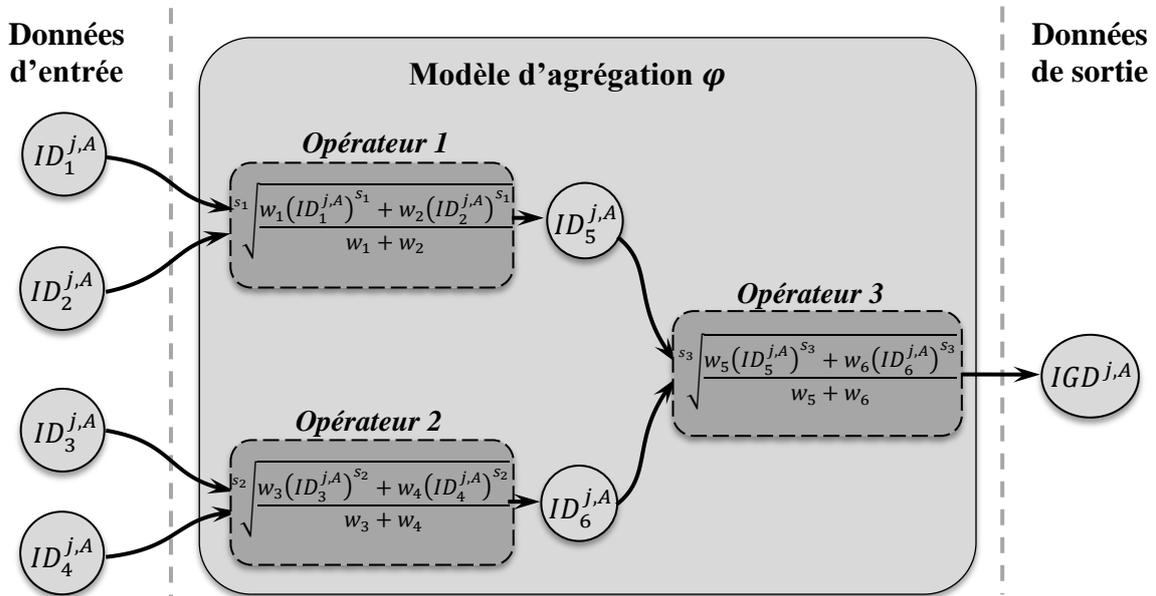


Figure III-9 Structure du modèle d'agrégation

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'agrégation 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 :

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

III.2.5. Bilan sur le modèle proposé

Avec des produits de plus en plus complexes, il apparaît le besoin de décomposer le problème de conception en sous problèmes facilement maîtrisable 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 $\overrightarrow{X^{j,A}} = [PC_1^{j,A}, \dots, PC_n^{j,A}]$ 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 :

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

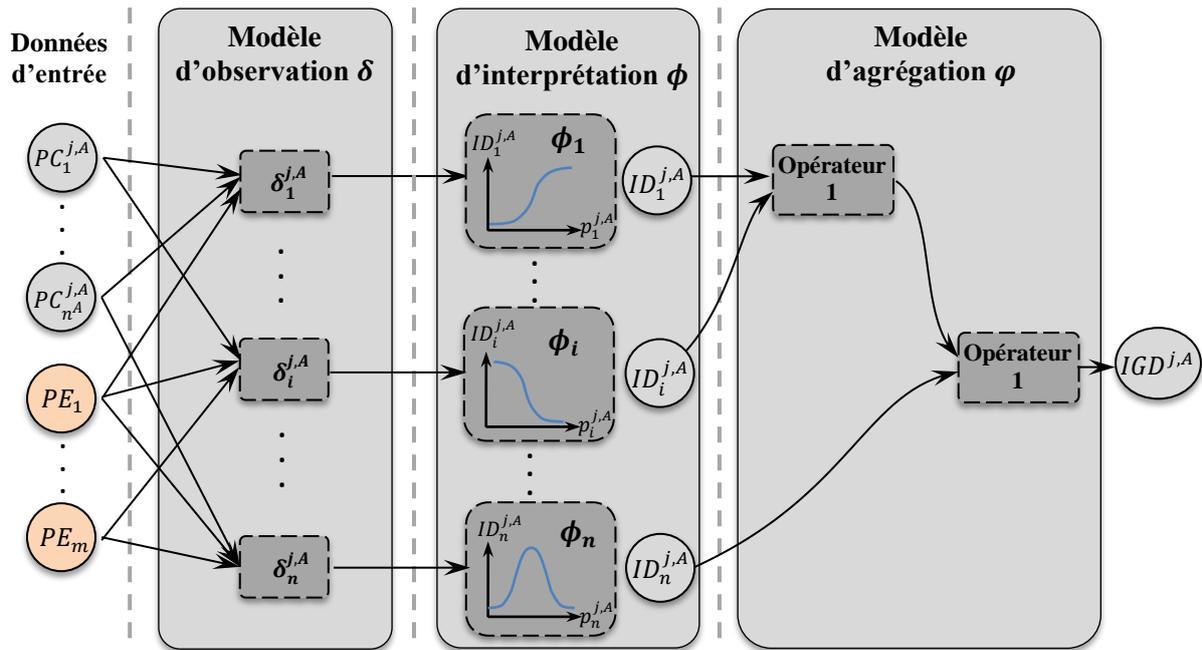


Figure III-10 Modèle global de formalisation des préférences du décideur

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 accroît 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.

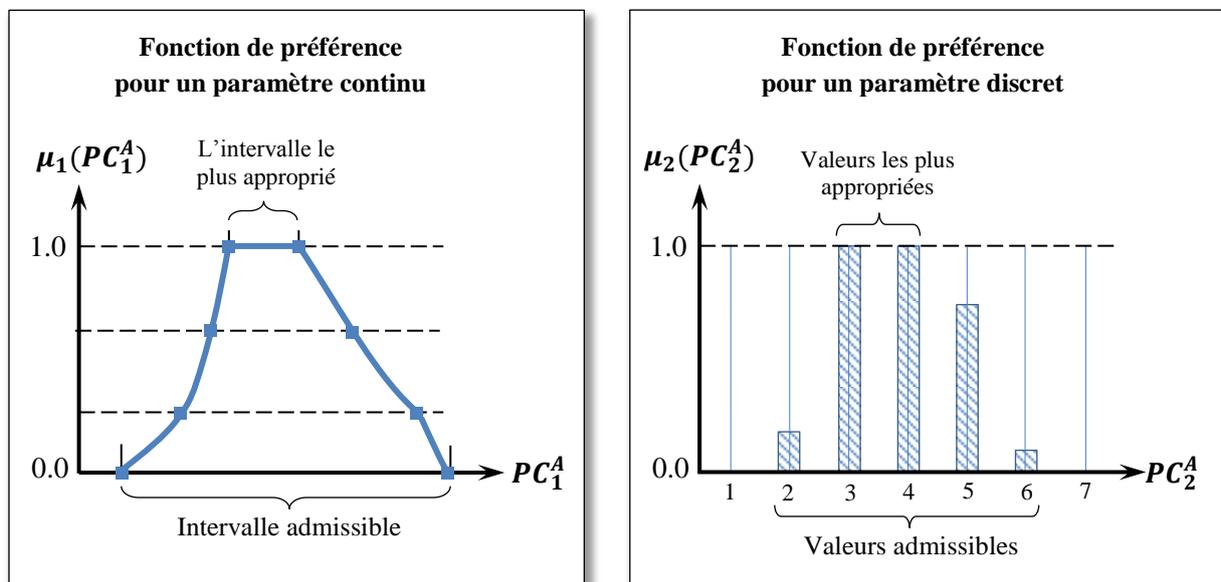


Figure III-11 Représentation de la préférence du concepteur sur les paramètres conception

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.

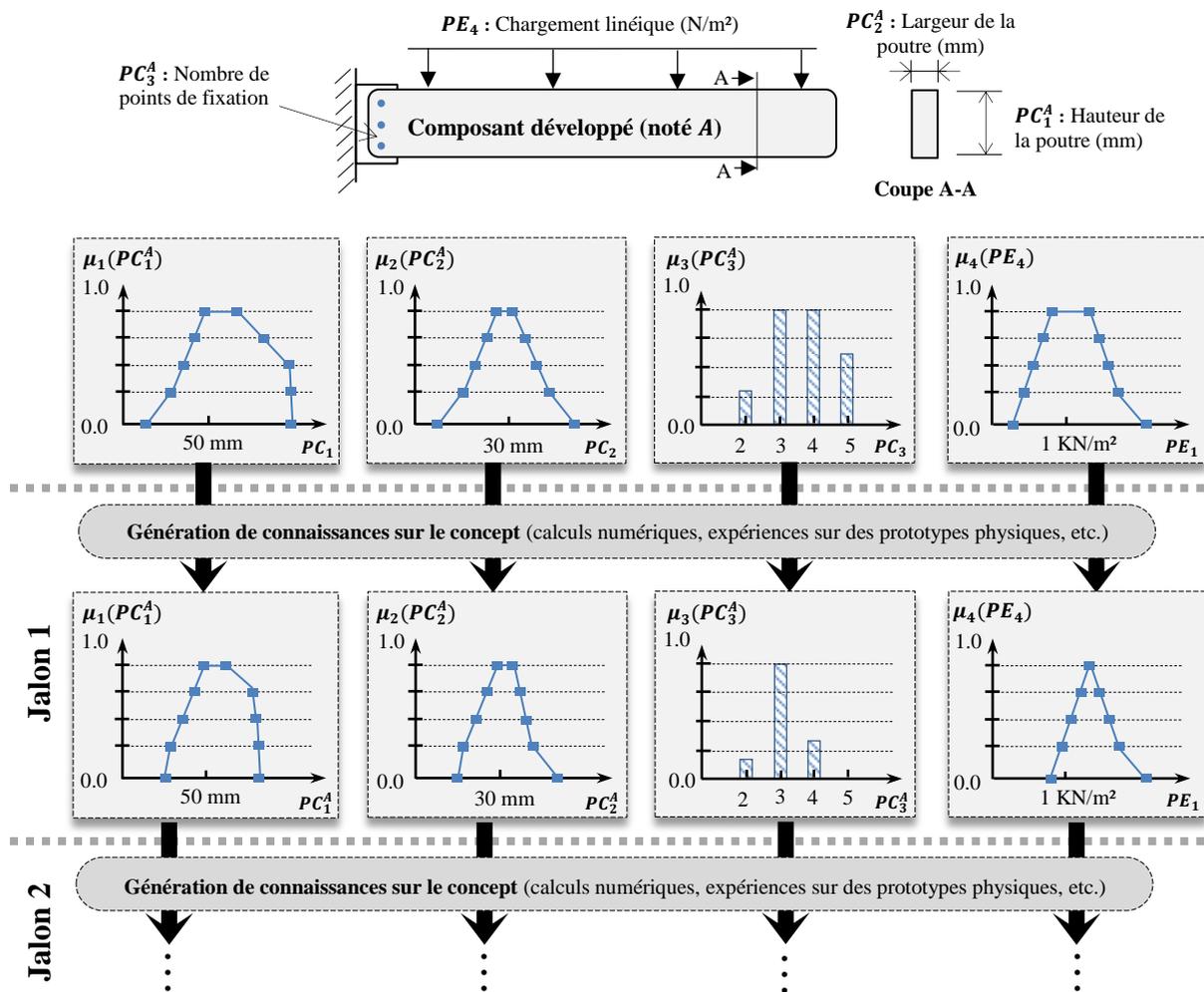


Figure III-12 Réduction de l'état d'imprécision sur les paramètres de conception.

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 $IV(PX_i)$	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 dépend 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 $\alpha_k = \{k/N\}$ 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 $[PX_{1,\alpha_k}^{inf}, PX_{1,\alpha_k}^{sup}]$, $[PX_{2,\alpha_k}^{inf}, PX_{2,\alpha_k}^{sup}]$ et $[PX_{3,\alpha_k}^{inf}, PX_{3,\alpha_k}^{sup}]$. La première étape consiste à définir, pour chaque valeur α_k , toutes les combinaisons possibles $C_{j,\alpha_k} = \{PX_{1,\alpha_k}, PX_{2,\alpha_k}, PX_{3,\alpha_k}\}$ avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} PX_{1,\alpha_k} \in \{PX_{1,\alpha_k}^{inf}, PX_{1,\alpha_k}^n, PX_{1,\alpha_k}^{sup}\} \\ PX_{2,\alpha_k} \in \{PX_{2,\alpha_k}^{inf}, PX_{2,\alpha_k}^n, PX_{2,\alpha_k}^{sup}\} \\ PX_{3,\alpha_k} \in \{PX_{3,\alpha_k}^{inf}, PX_{3,\alpha_k}^n, PX_{3,\alpha_k}^{sup}\} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(III.7)} \\ \text{(III.8)} \\ \text{(III.9)} \end{array}$$

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)**

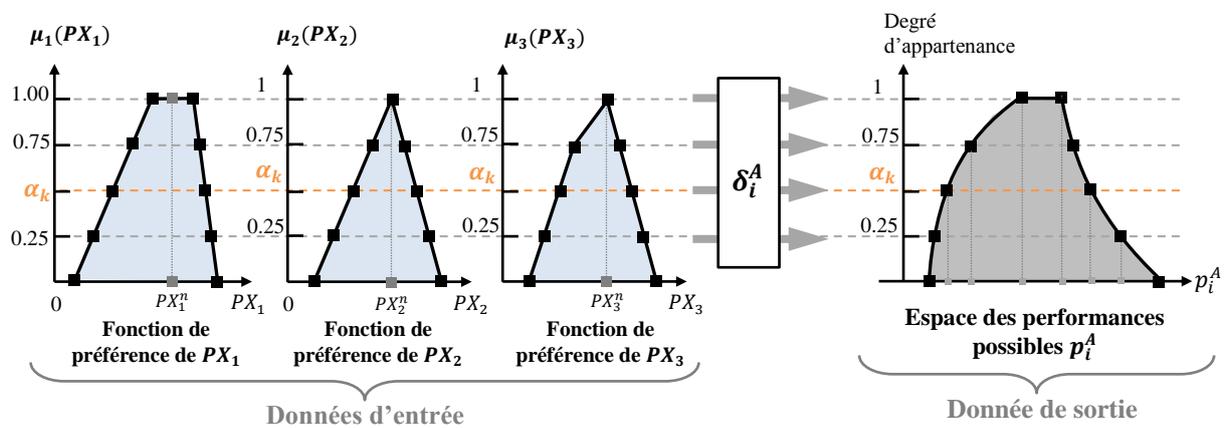
Cette étape consiste à déterminer l'espace des performances possibles (atteignables). Pour cela, la méthode du vertex proposée par Dong et Shah [Don87] est utilisée. Selon cette méthode, pour chaque valeur de α_k , l'intervalle $[p_{i,\alpha_k}^{A,inf}, p_{i,\alpha_k}^{A,sup}]$, qui est la coupe α_k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

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{i,\alpha_k}^{A,inf} = \min_l(p_{i,\alpha_k}^{A,l}) = \min_l(\delta_i^A(C_{l,\alpha_k})) \end{array} \right. \quad (\text{III.11})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{i,\alpha_k}^{A,sup} = \max_l(p_{i,\alpha_k}^{A,l}) = \max_l(\delta_i^A(C_{l,\alpha_k})) \end{array} \right. \quad (\text{III.12})$$

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'autres 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 $IC_{PX_1 \rightarrow p_i^A}$, $IC_{PX_2 \rightarrow p_i^A}$ et $IC_{PX_3 \rightarrow p_i^A}$. Une fois les étapes précédentes réalisées, ces indices de couplage sont directement calculés par les équations suivantes :

$$IC_{PX_1 \rightarrow p_i^A} = \sum_{k=1}^N \frac{|\widehat{C}_{1,\alpha_k}^{sup} - \widehat{C}_{1,\alpha_k}^{inf}|}{|p_{i,\alpha_k}^{A,inf} - p_{i,\alpha_k}^{A,sup}|} \quad (III.13)$$

$$IC_{PX_2 \rightarrow p_i^A} = \sum_{k=1}^N \frac{|\widehat{C}_{2,\alpha_k}^{sup} - \widehat{C}_{2,\alpha_k}^{inf}|}{|p_{i,\alpha_k}^{A,inf} - p_{i,\alpha_k}^{A,sup}|} \quad (III.14)$$

$$IC_{PX_3 \rightarrow p_i^A} = \sum_{k=1}^N \frac{|\widehat{C}_{3,\alpha_k}^{sup} - \widehat{C}_{3,\alpha_k}^{inf}|}{|p_{i,\alpha_k}^{A,inf} - p_{i,\alpha_k}^{A,sup}|} \quad (III.15)$$

Avec $\widehat{C}_{j,\alpha_k}^{sup}$ 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 $\widehat{C}_{j,\alpha_k}^{inf}$ 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 entraîne 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, entraîne 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 coûteuses, 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).

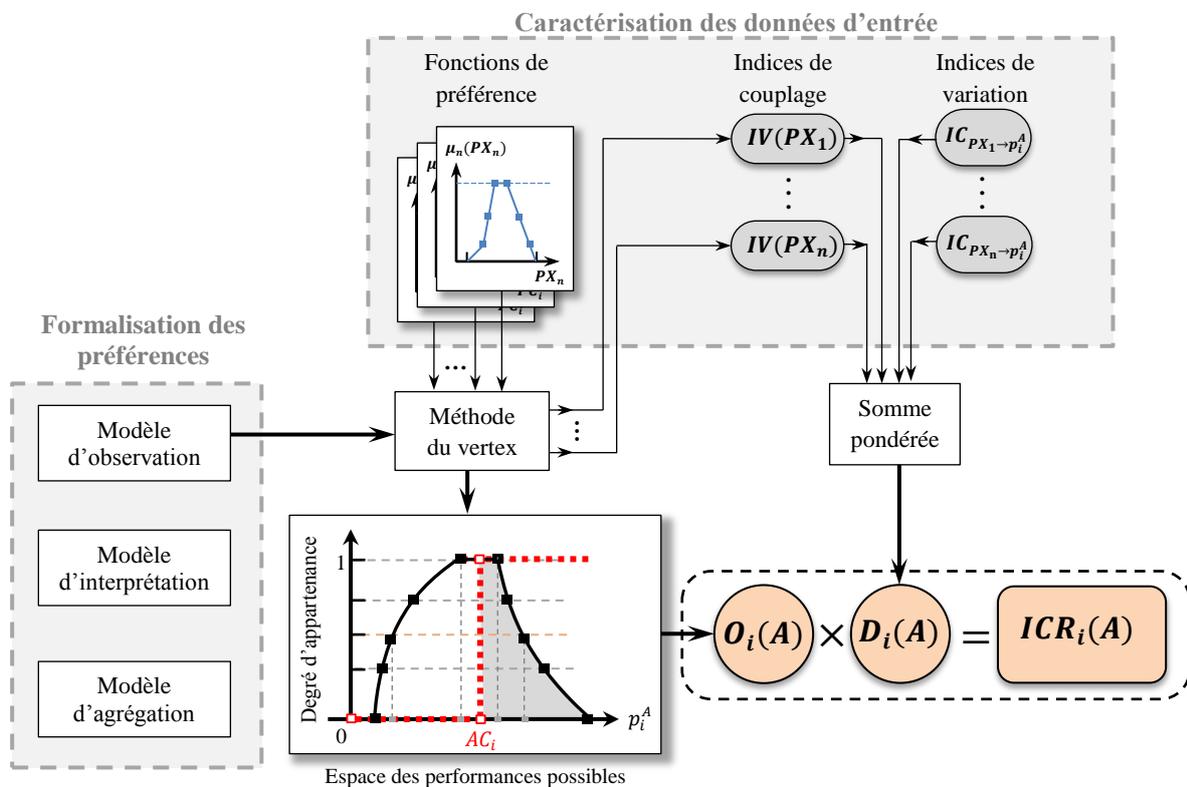
$$ICR_i(A) = O_i(A) \times D_i(A) \tag{III.16}$$

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 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.

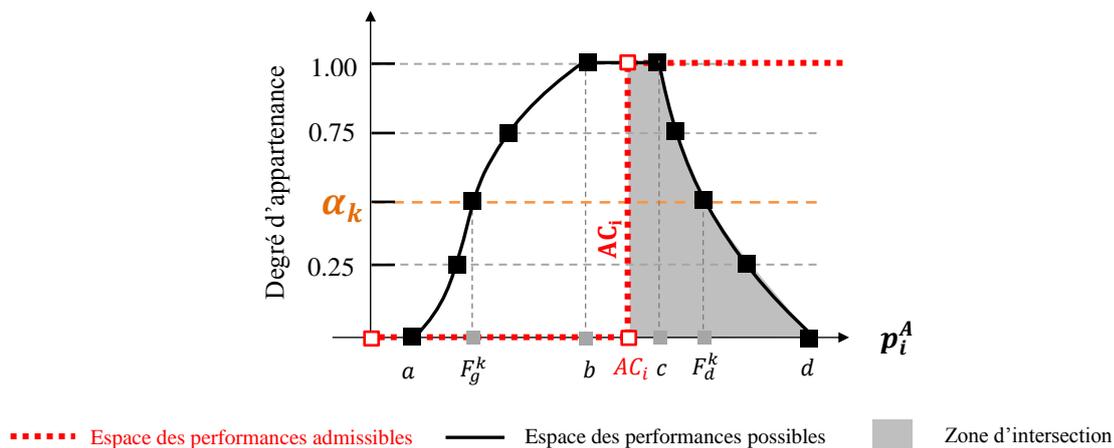


Figure III-15 Comparaison de l'espace des performances possibles et l'espaces des performances admissibles

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).

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

Avec :

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

Et :

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

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.

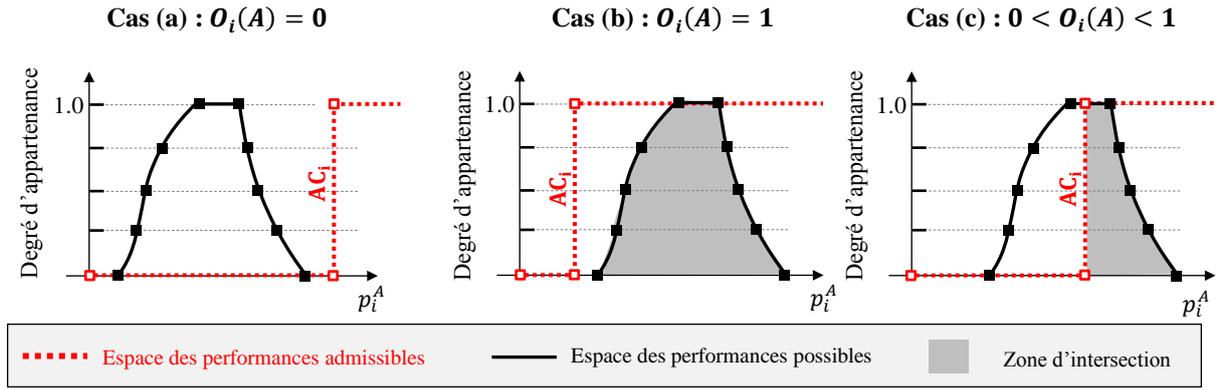


Figure III-16 Illustration des trois cas possibles dans le calcul de l'occurrence

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_j^A et PE_j) : 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 :

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

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

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 $IC_{PC_j^A \rightarrow p_i^A}$ 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.

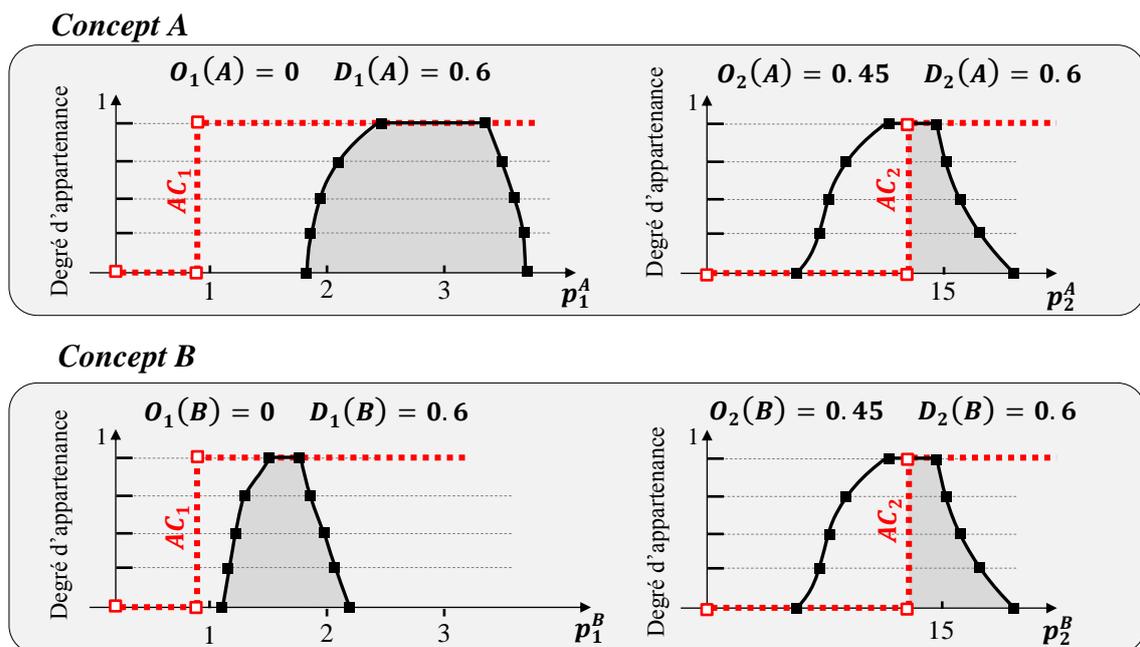


Figure III-17 Exemple illustrant la limite de l'utilisation de l'indice global de criticité de risque seul

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 $p_{l,\alpha_k}^{A,l}$ 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 $[IGD_{\alpha_k}^{A,inf}, IGD_{\alpha_k}^{A,sup}]$, qui représente la coupe α_k correspondante à notre grandeur de sortie IGD^A , est calculée par les équations (III.22) et (III.23).

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

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

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

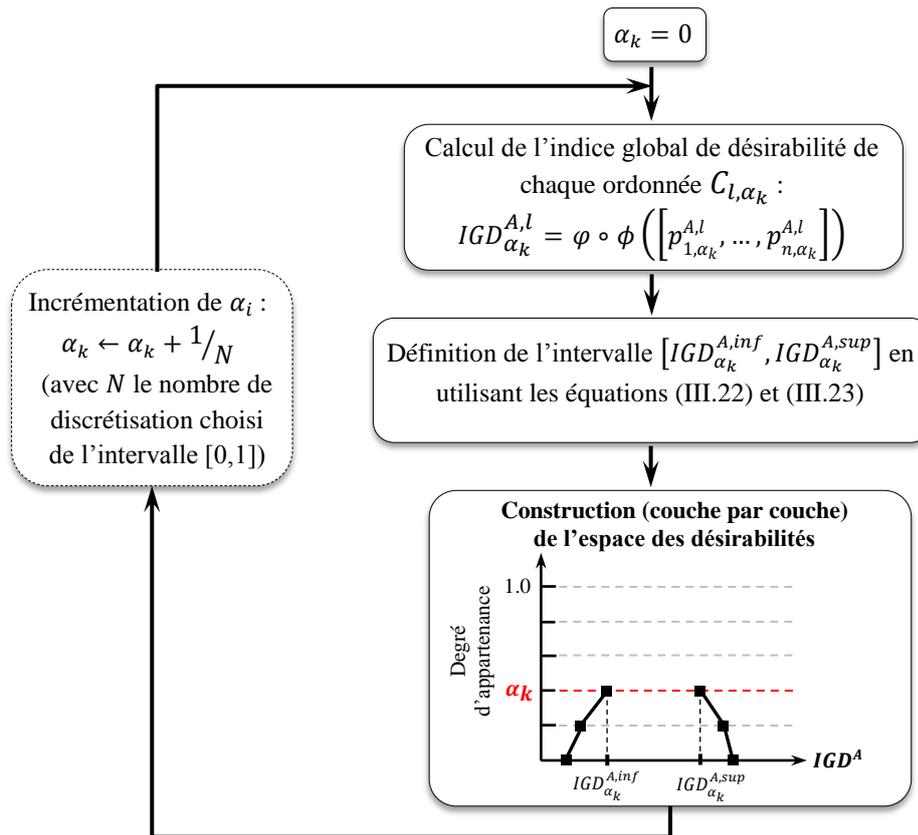


Figure III-18 Etapes de calcul de l'espace de désirabilités possibles

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.

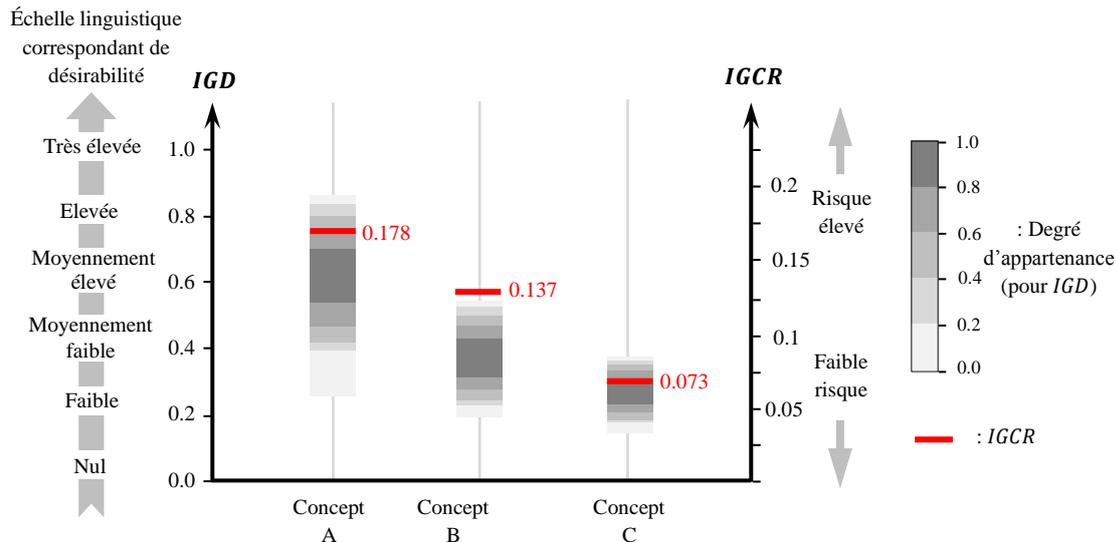


Figure III-19 Exemple de résultats obtenus par l'utilisation des deux indices

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 tâches 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.

