

# **Etat de l'art Ingénierie de conception**

## 2. Etat de l'art : Ingénierie de conception

---

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

### 2.1 Introduction

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

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

## 2.2 Activité de conception de produit

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

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

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

## 2.3 Typologies de la conception

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

### 2.3.1 Conception routinière

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

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

### 2.3.2 Conception innovante

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

### 2.3.3 Conception créative

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

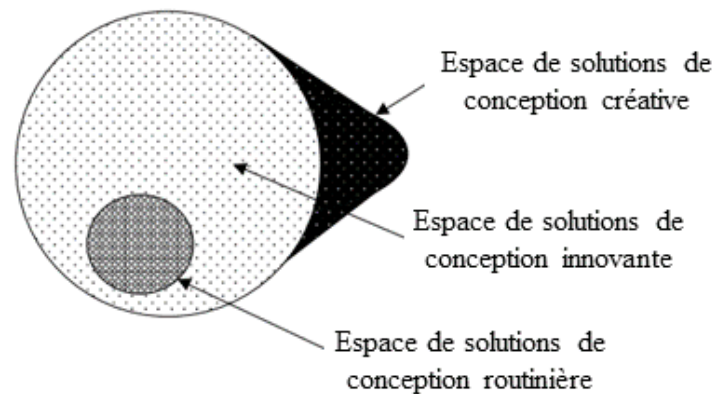


Figure 2.1 : Espaces des solutions des trois types de conception (Dieter, 2000)

## 2.4 Processus de conception

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

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

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

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

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

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

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

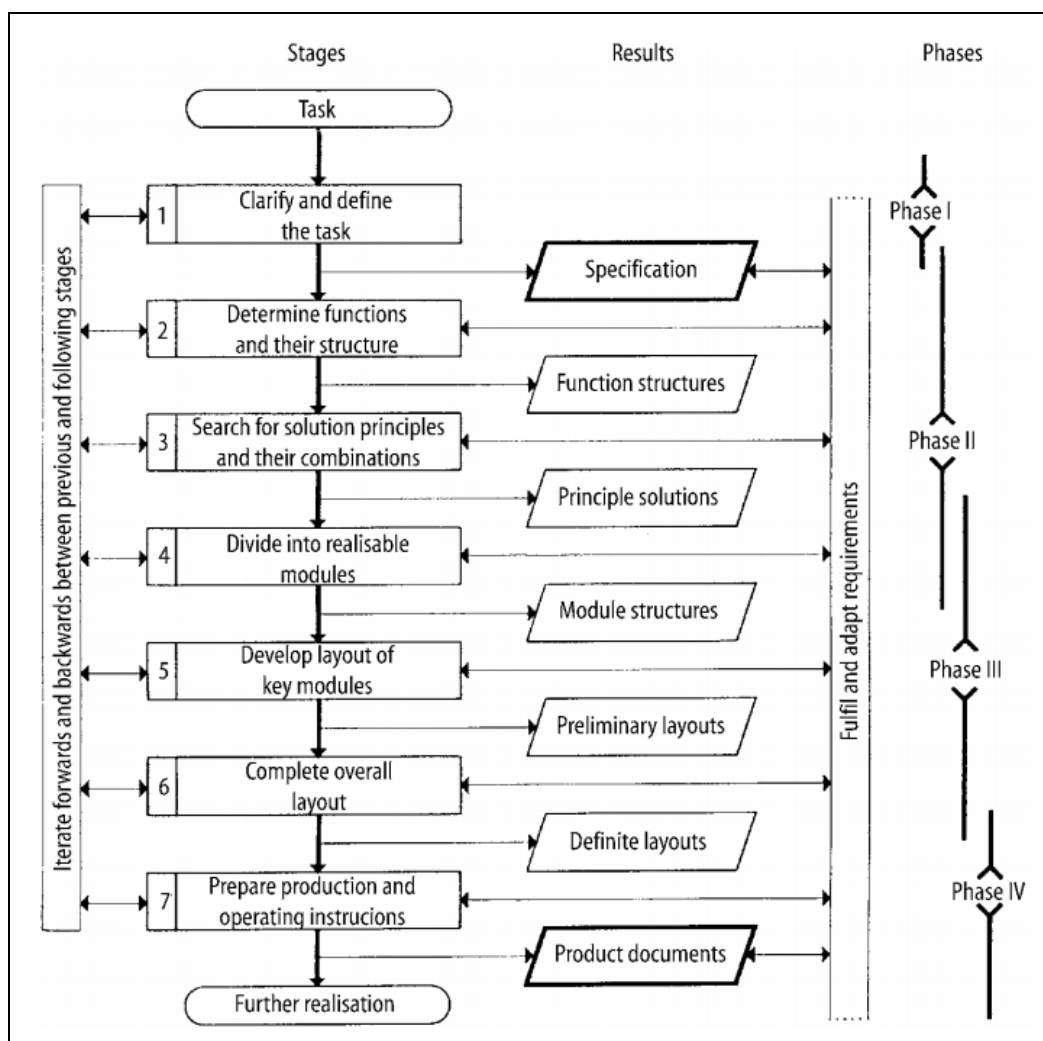


Figure 2.2: Processus de conception systématique de Pahl et Beitz (Pahl et al., 2007)

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

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

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

## **2.5 Les méthodes associées à la phase de conception préliminaire**

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

## 2.5.1 Méthodes qualitatives

### 2.5.1.1 L'Analyse Fonctionnelle (AF)

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

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

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

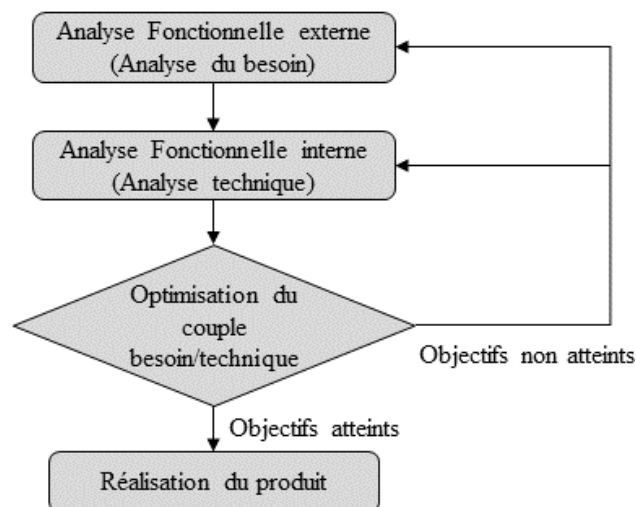


Figure 2.3 : Démarche générale de l'analyse fonctionnelle



### 2.5.1.2 La méthode TRIZ

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

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

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

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

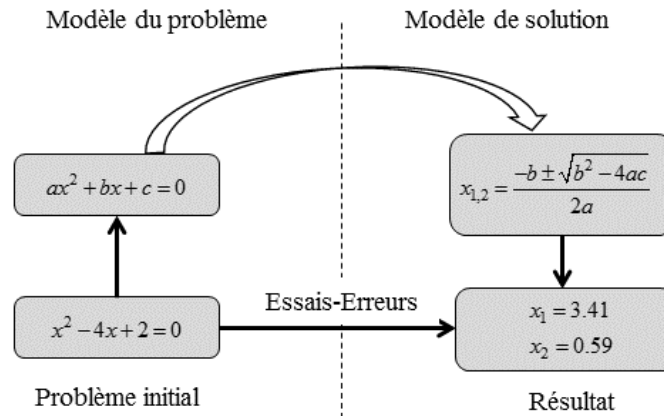


Figure 2.4 : Analogie Mathématique tirée de (Khomenko and Kucharavy, 2002)

### 2.5.1.3 La méthode AMDEC

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

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

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

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

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

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

#### 2.5.1.4 La méthode QFD

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

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

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

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

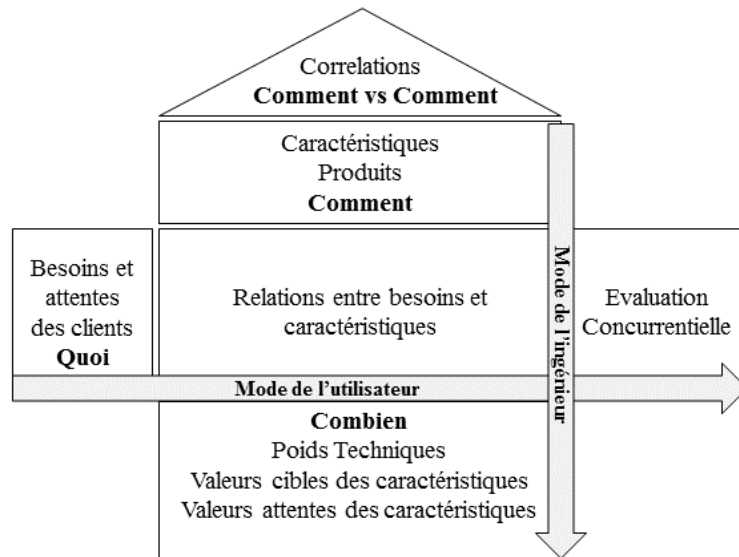


Figure 2.5 : La maison de la qualité

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

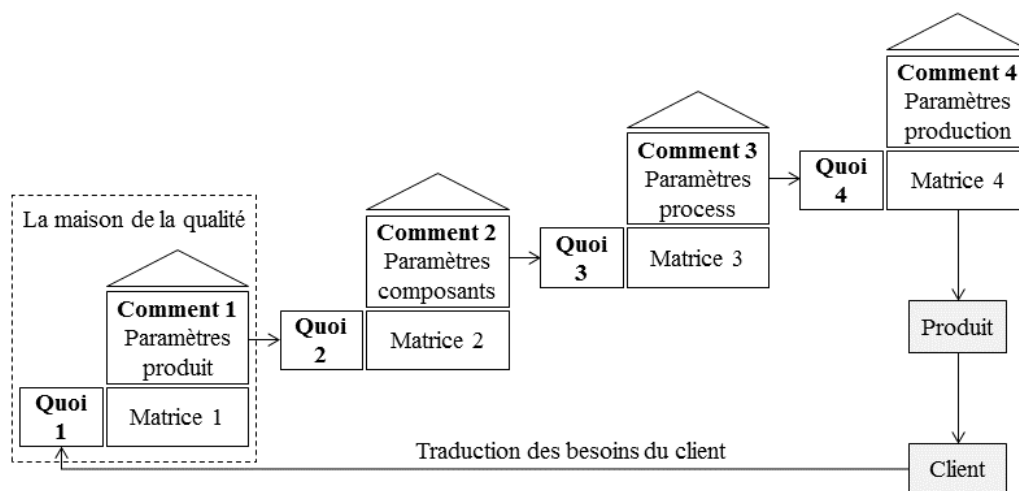


Figure 2.6 : Déploiement de la maison de la qualité

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

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

#### 2.5.1.5 Design for X

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

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

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

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

## 2.5.2 Méthodes quantitatives

### 2.5.2.1 Simulation numérique

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

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

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

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

### 2.5.2.2 Optimisation

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

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

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

## 2.6 Pratique et difficultés de la conception préliminaire

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

### 2.6.1 Les itérations

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

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

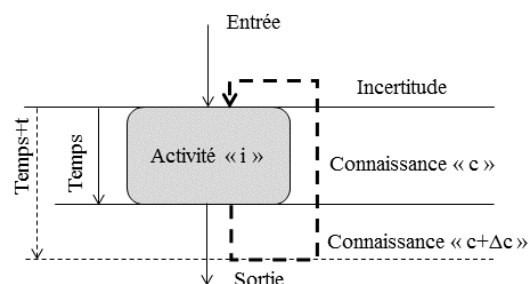


Figure 2.7 : Itération et construction de connaissances (Anghel, 2007)

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

### 2.6.2 Les décisions

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

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

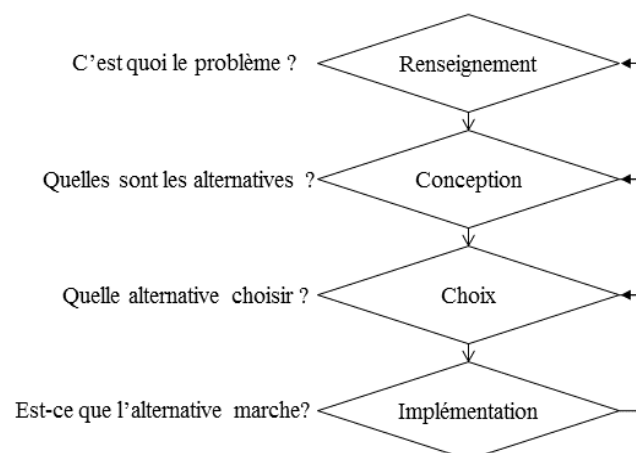


Figure 2.8 : Le processus de conception proposé par Simon (Simon, 60)



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

### 2.6.3 Incertitude

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

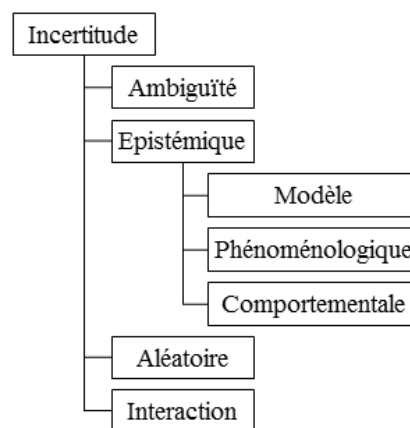


Figure 2.9 : Taxonomie de l'incertitude selon Thunnissen (Thunnissen, 2005)

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

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

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

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

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

#### 2.6.4 Connaissances

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

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

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

## 2.7 Le produit

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

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

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

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

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

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

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

### 2.7.1 Performances de produit

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

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

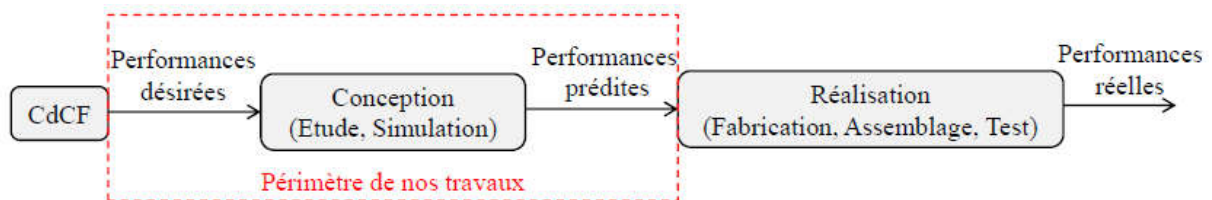


Figure 2.10 : Différentes performances d’un produit durant son cycle de vie(Osteras et al., 2006)

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

## 2.8 Cycle de vie d’un produit

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

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

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

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

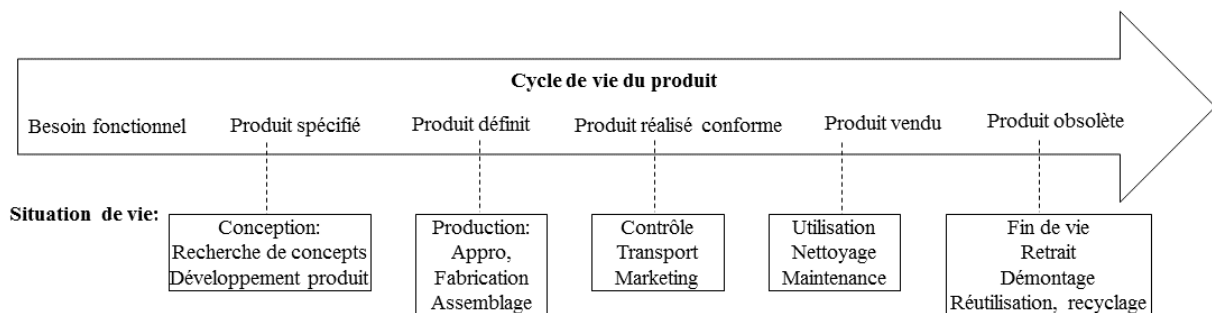


Figure 2.11 : Cycle de vie du produit et situations de vie correspondantes (Scaravetti, 2004)

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

## 2.9 Modèles de produit

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

### 2.9.1 Les modèles descriptifs

#### 2.9.1.1 Le modèle Caractéristiques - Propriétés

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

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

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

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

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

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

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

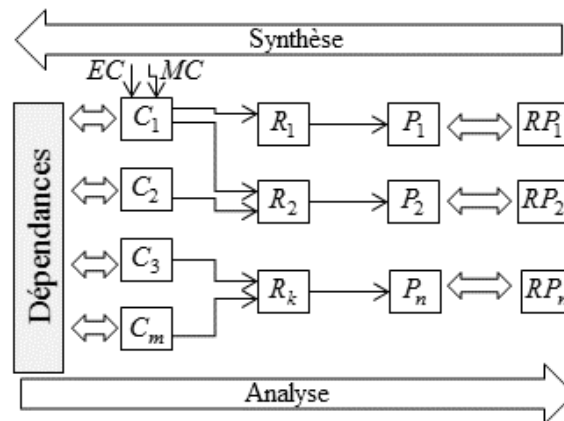


Figure 2.12 : Modèle Caractéristiques-Propriétés (Weber et al., 2003)

### 2.9.1.2 Le modèle Fonction-Comportement-Structure

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

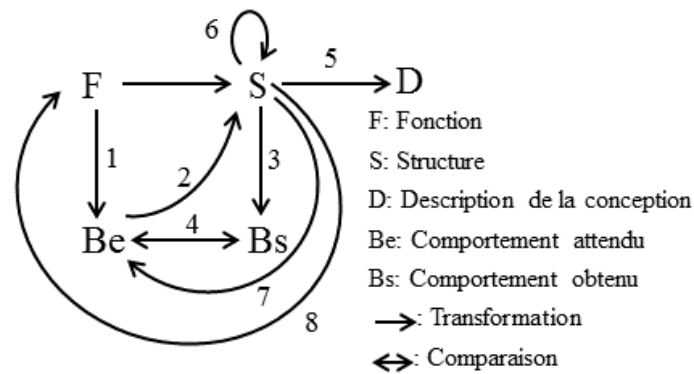


Figure 2.13 : Modèle FBS de Gero (Gero, 2001)

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



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

### 2.9.2 Les modèles prédictifs

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

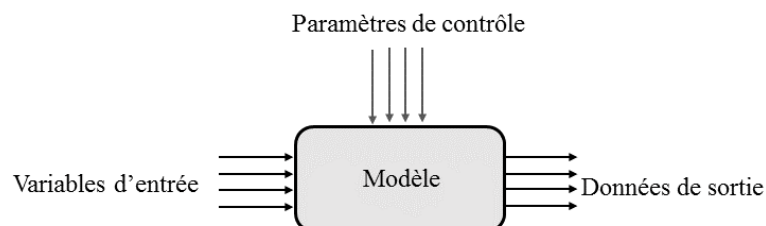


Figure 2.14 : Modèle, variables, paramètres et données

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

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

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

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

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

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

### 2.9.2.1 Le modèle analytique

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

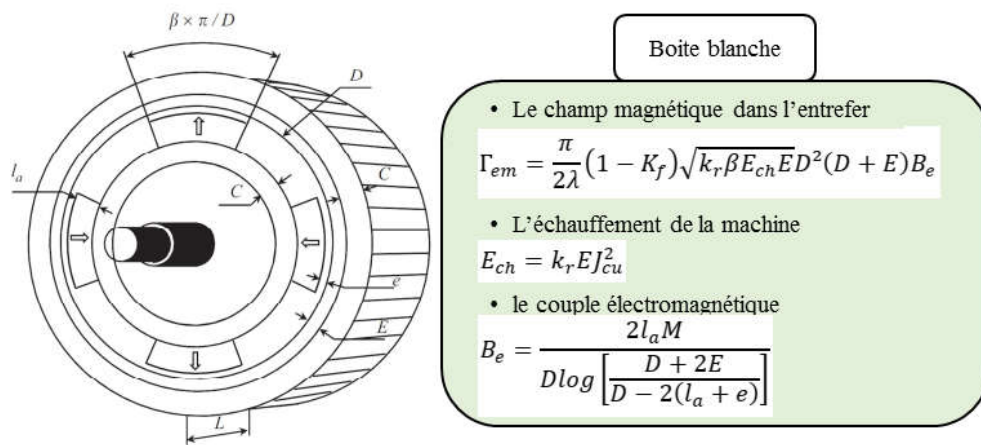


Figure 2.15 : Un produit (Machine électrique) et son modèle analytique (Mazhoud, 2014)

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

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

### 2.9.2.2 Le modèle numérique

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

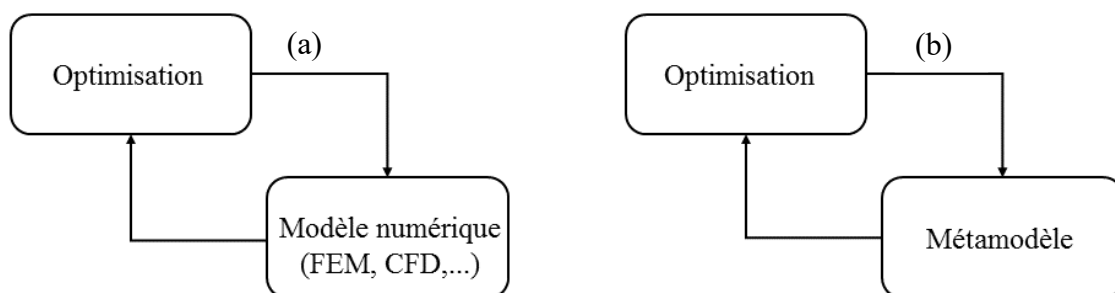


Figure 2.16 : Modes d’intégration de la simulation dans le processus d’optimisation.

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

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

### 2.9.2.3 La construction des modèles de substitution

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

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

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

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

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

#### a. Plan d’expériences

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

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

**b. Plan hypercube latin simpling**

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

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

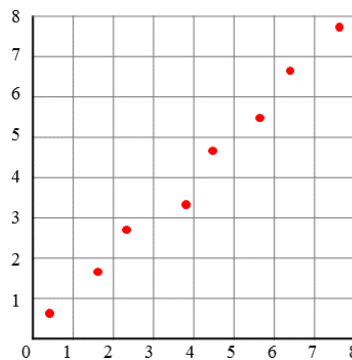


Figure 2.17 : LHS avec une mauvaise couverture de paramètres de conception

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

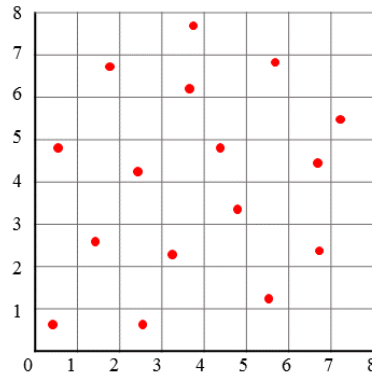


Figure 2.18 : Exemple d'OLHS de 16 points dans l'espace de recherche

### c. Krigage

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### d. Fonctions à base radiale (RBF)

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



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

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

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

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

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

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

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

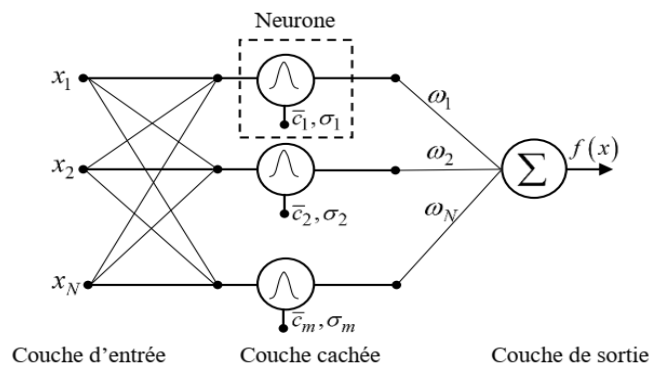


Figure 2.19 : Réseau de neurones de fonctions à base radiale

### 2.9.3 La technique de Space Mapping

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

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

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

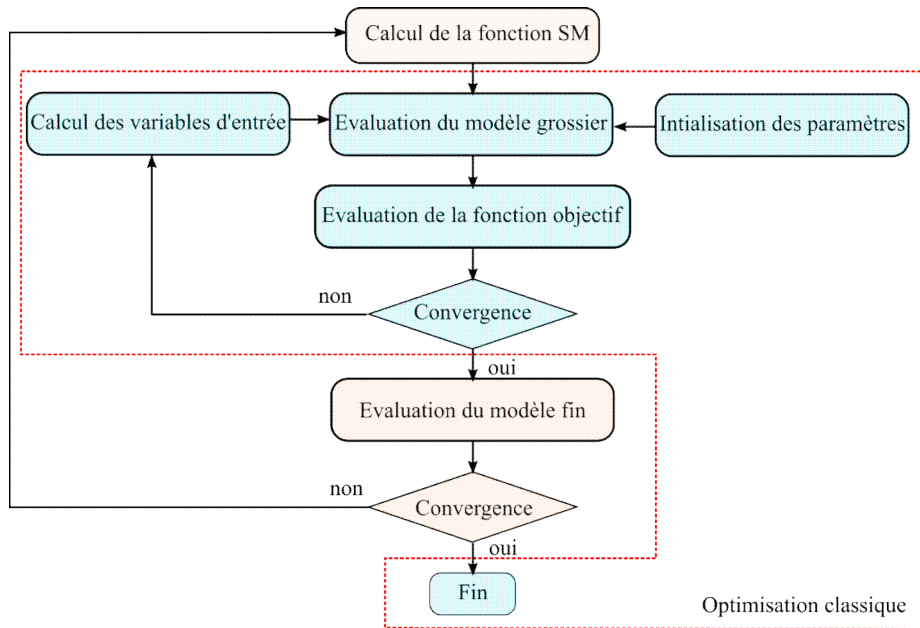


Figure 2.20 : Boucle d’optimisation classique et le Space Mapping

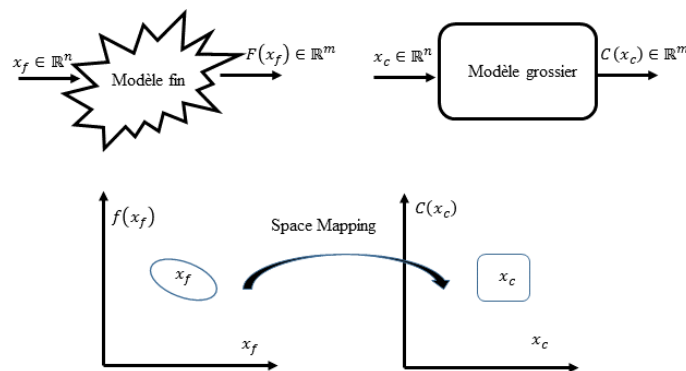


Figure 2.21 : Définition du modèle fin et grossier

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

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

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