

Modélisation de l'incertitude des données en conception

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

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

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

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

II.4.1. Classification des incertitudes en conception

II.4.1.1 Incertitude épistémique et aléatoire

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

II.4.2.1 Pérennité

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

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

Tableau II-4 Niveaux de pérennité [Gre07]

II.4.2.2 Variation

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

Niveaux de	Qualification
------------	---------------

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

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

II.4.2.3 Sensibilité

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

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

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

II.4.2.4 Complétude

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

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

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

II.4.2.5 Caractérisation et qualification de l'information

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

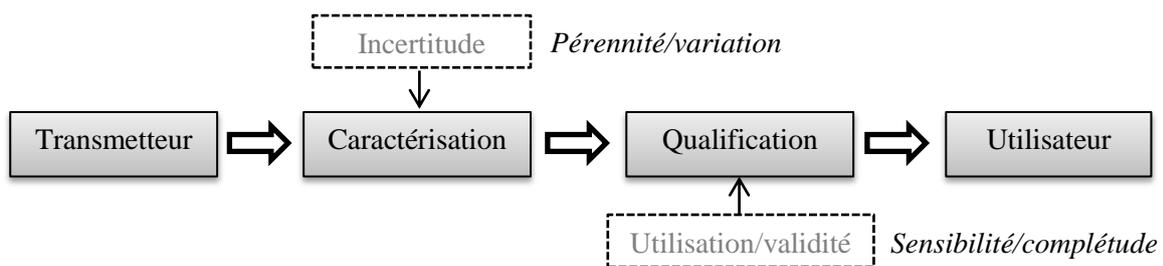


Figure II-12 Incertitude de l'information de l'émetteur au récepteur

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

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

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

II.4.3.1 Ensembles flous

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

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

II.4.3.2 Théorie des possibilités

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

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

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

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

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

II.5 Qualification des modèles de comportement en conception

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

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

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

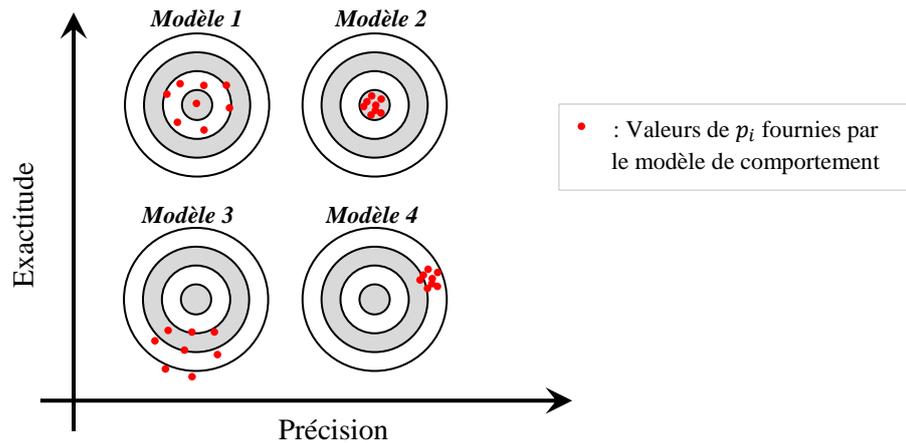


Figure II-13 Distinction entre précision et exactitude d'un modèle de comportement

II.5.2. Parcimonie

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

$$P_a = \frac{1}{n_{rel} + n_{var}} \quad (\text{II.16})$$

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

II.5.3. Exactitude

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

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

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

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

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

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

II.5.4. Précision

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

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

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

II.5.5. Spécialisation

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

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

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

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

II.6.1. Théorie de l'utilité

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

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

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

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

II.6.2. Méthode de l'imprécision

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

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

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

II.7 Conclusion

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

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

