

# THESE

présentée par

CLIVILLÉ Vincent

**Agrégé de Génie Mécanique**

**Ancien élève de l'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN**

pour obtenir le grade de **DOCTEUR**

**de l'UNIVERSITE DE SAVOIE**

(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

**Spécialité : GENIE INDUSTRIEL**

---

## **Approche systémique et méthode multicritère pour la définition d'un système d'indicateurs de performance**

---

Soutenue le 9 septembre 2004 devant le jury composé de Madame et Messieurs :

<b>Y. FREIN</b>	Président de jury	Professeur à l'INP Grenoble
<b>B. GRABOT</b>	Rapporteur	Professeur à l'ENI de Tarbes
<b>F. VERNADAT</b>	Rapporteur	Professeur à l'Université de Metz
<b>V. GIARD</b>	Examineur	Professeur à l'Université Paris-Dauphine
<b>C. FARAT</b>	Invité	Directeur Qualité Société Fournier
<b>L. BERRAH</b>	Co-Directrice de thèse	Maître de Conférences à l'Université de Savoie
<b>A. HAURAT</b>	Directeur de thèse	Professeur à l'Université de Savoie

Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance – Ecole Supérieure d'Ingénieurs d'Annecy – Université de Savoie.





*A ceux qui venus de Catalogne et d'ailleurs m'ont ouvert ce chemin*

*A celle qui le parcourt aujourd'hui avec moi*

*A mes enfants qui choisiront le leur*

## REMERCIEMENTS

Cette thèse n'a pas toujours été un long fleuve tranquille... Pour la mener à bien, j'ai eu la chance de découvrir de très nombreux acteurs et d'échanger avec eux de multiples façons. Dans ces quelques lignes, je tiens à remercier nommément les premiers rôles en sachant que ma gratitude va également vers tous ceux qui m'ont aidé à préciser mes objectifs, à écarter les obstacles ou qui ont assuré quelques portages dans les passages difficiles...

Je remercie :

Monsieur Y. FREIN, Professeur à l'INP Grenoble, pour avoir suivi régulièrement ces travaux depuis leurs prémises, il y a déjà quelques années, jusqu'à cet aboutissement en me faisant l'honneur de présider ce jury.

Monsieur V. GIARD, Professeur à l'Université de Paris Dauphine, pour avoir examiné ces travaux et enrichi ma réflexion par ses commentaires, porteurs d'une vision élargie des outils de gestion.

Monsieur F. VERNADAT, Professeur à l'Université de Metz qui a inspiré les aspects modélisation de ce mémoire, et qui plus, globalement, m'a transmis son souci de qualité dans la production scientifique ; je lui exprime ma gratitude pour avoir accepté d'être rapporteur sur ce travail et de lui avoir ainsi donné tout son sens dans le domaine du Génie Industriel.

Monsieur B. GRABOT, Professeur à l'ENI de Tarbes qui a si bien compris l'objet et la matière de ce travail que ses questions en offrent de façon naturelle les perspectives ; je suis très honoré qu'il ait accepté d'être rapporteur de ce mémoire et qu'il l'ait fait avec autant de soin et d'intérêt.

Monsieur Alain HAURAT, Professeur à l'Université de Savoie, qui a accepté de diriger ce travail et en a assuré la rigueur tout au long de son avancement tout en respectant son originalité.

Ma gratitude envers Madame L. BERRAH, Maître de Conférences à l'Université de Savoie va bien au-delà des remerciements d'usage. Me communiquant son souci constant d'honnêteté, Lamia a initié, irrigué et permis l'aboutissement de ce travail, en veillant à sa qualité tant sur les idées défendues que dans leur présentation, tout en trouvant l'énergie amicale de motiver son « vieux » thésard quand cela était nécessaire. J'associe dans ces remerciements, Monsieur G. MAURIS, Maître de Conférences à l'Université de Savoie, qui m'a apporté toute l'expertise de l'équipe *fusion d'informations* du LISTIC et qui a participé à cet encadrement avec détermination et constance. A tous les deux, très sincèrement, merci.

Je tiens à manifester toute ma reconnaissance à Monsieur C. FARAT, Directeur Qualité de la Société Fournier qui m'a ouvert toutes grandes les portes de l'entreprise et m'a fait ainsi bénéficiaire depuis de longues années de son expertise dans un esprit d'ouverture et de franchise, permettant des échanges fructueux et réciproques. Cette reconnaissance s'étend naturellement à l'ensemble des personnels que j'ai rencontrés et en particulier aux dirigeants de la Société Fournier et au Directeur de Production, Monsieur P. MEJEAN.

Cette thèse a été réalisée au sein du LISTIC, Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance. Je remercie son Directeur, Ph. BOLON Professeur à l'Université de Savoie, pour m'avoir accueilli au sein de ce laboratoire et avoir suivi ces travaux avec intérêt tout en les resituant dans la problématique plus générale du traitement et de la fusion d'informations. J'associe à ces remerciements tous les membres du laboratoire, « haut » ou « bas » LISTIC. Sans pouvoir tous les citer, je veux distinguer Maurice, Georges, Jacques, Ilham, Lionel... pour leur soutien et leur disponibilité, sans oublier la cordialité de Valérie, supporter inconditionnel des thésards, en particulier lorsque le moral menace de chanceler.

Durant ces quelques années, j'ai assuré mon enseignement auprès d'une équipe de collègues de l'ESIA qui m'ont toujours aidé et soutenu. Je citerai en particulier toute la filière Productique emmenée par Max, Serge, Bernard et tous les autres que je remercie sincèrement.

Enfin que ma chère épouse, Claudie, et mes trois enfants, Florian, Clément et Marianne, sachent que leur mari et papa n'a pu aller au bout de cette aventure que parce qu'ils étaient là, qu'elle n'aurait eu aucun sens sans eux. Rien n'est plus précieux que ceux sur qui l'on peut savoir compter quelles que soient les circonstances. Mon vœu le plus cher est de pouvoir vous offrir à mon tour, ce que vous m'avez donné tous les quatre.

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE .....	11
-----------------------------	----

<b>CHAPITRE I : L'EVOLUTION DE LA PERFORMANCE INDUSTRIELLE.....</b>	<b>13</b>
---	-----------

1	INTRODUCTION.....	13
2	L'EVOLUTION DU CONTEXTE INDUSTRIEL .....	14
2.1	<i>La phase I : la demande est supérieure à l'offre (45-75).....</i>	<i>14</i>
2.1.1	Un marché de pénurie et des objectifs de réduction de la Main d'Oeuvre Directe	14
2.1.2	Les évolutions de l'entreprise : un système productif.....	14
2.1.3	Les modes de pilotage et les indicateurs mis en place : des indicateurs de productivité pour le contrôle de gestion.....	15
2.2	<i>La phase II : l'offre équilibre puis dépasse la demande (75-fin des années 80) .</i>	<i>17</i>
2.2.1	Un marché concurrentiel et des objectifs de coût, qualité et délai .....	17
2.2.2	Les évolutions de l'entreprise : un système flexible .....	17
2.2.3	Les modes de pilotage et indicateurs mis en place : les limites du contrôle de gestion et l'apparition de l'indicateur technique .....	19
2.3	<i>La phase III : l'offre est très supérieure à la demande (des années 90 à aujourd'hui) .....</i>	<i>20</i>
2.3.1	Un marché saturé et des objectifs toujours multiples.....	20
2.3.2	Les évolutions de l'entreprise : un système réactif .....	21
2.3.3	Les modes de pilotage et indicateurs mis en place : le système d'indicateurs pour le pilotage d'un système pris dans sa globalité.....	23
3	DES INDICATEURS DE PERFORMANCE POUR L'AIDE AU PILOTAGE INDUSTRIEL .....	27
3.1	<i>Le concept de pilotage industriel .....</i>	<i>28</i>
3.1.1	Les fondements du pilotage industriel .....	28
3.1.2	Quelques définitions du pilotage industriel.....	31
3.1.3	La structure de pilotage .....	32
3.1.4	Bilan .....	34
3.2	<i>Le système d'indicateurs pour le pilotage industriel .....</i>	<i>35</i>
3.2.1	L'indicateur de performance .....	35
3.2.2	Les indicateurs dans le cadre du pilotage : vers un cahier des charges du système d'indicateurs .....	37
3.2.2.1	La conception du système d'indicateurs .....	37
3.2.2.1.1	L'identification des liens entre les indicateurs.....	38
3.2.2.1.2	La caractérisation des liens entre indicateurs.....	39
3.2.2.2	L'exploitation du système d'indicateurs .....	40
3.2.2.3	La révision du système d'indicateurs .....	41
3.2.3	Bilan .....	42
4	CONCLUSION .....	42

## **CHAPITRE II : UN MODELE SYSTEMIQUE POUR LE SYSTEME D'INDICATEURS DE PERFORMANCE ..... 43**

1	INTRODUCTION.....	43
2	REVUE BIBLIOGRAPHIQUE CONCERNANT LES SYSTEMES D'INDICATEURS DE PERFORMANCE .....	43
2.1	<i>Les précurseurs</i> .....	44
2.1.1	L'expression d'une performance multicritère .....	44
2.1.2	Une expression de performance sur plusieurs niveaux .....	45
2.1.3	Des critères dépendants .....	45
2.1.4	Les contributions méthodologiques .....	47
2.2	<i>Les « Performance Measurement Systems »</i> .....	48
2.2.1	La méthode ECOGRAI (1990) .....	48
2.2.2	Les méthodologies directement liées de ABC/ABM (1991) .....	49
2.2.3	Le « <i>Balanced ScoreCard</i> », BSC (1992) .....	50
2.2.4	Le « <i>Quantitative Model for Performance Measurement System</i> », QMPMS (1995).....	50
2.2.5	Le « <i>Process Based Approach</i> », PBA (1995).....	52
2.2.6	Le « <i>Integrated Dynamic Performance Measurement System</i> » IDPMS (1997) .....	52
2.2.7	Le « <i>Process Performance Measurement System</i> » PPMS (1999) .....	53
2.2.8	L'approche ENAPS (1999) .....	54
2.2.9	Le système de management de la qualité de la norme ISO 9000 (2000).....	54
2.2.10	La mise en place des indicateurs dans le modèle SCOR (2000).....	55
2.3	<i>Synthèse de l'analyse bibliographique</i> .....	56
3	RAPPELS SUR LA THEORIE DES SYSTEMES.....	57
3.1	<i>La notion de système</i> .....	57
3.2	<i>Les caractéristiques d'un système</i> .....	58
3.2.1	Finalités d'un système .....	58
3.2.1.1	Définition .....	58
3.2.1.2	Propriétés.....	58
3.2.1.3	Exemple.....	59
3.2.2	Environnement d'un système .....	59
3.2.2.1	Définition .....	59
3.2.2.2	Propriétés.....	59
3.2.2.3	Exemple.....	59
3.2.3	Organisation d'un système .....	59
3.2.3.1	Définitions .....	59
3.2.3.2	Propriétés.....	60
3.2.3.3	Exemple.....	60
3.2.4	Buts et objectifs d'un système.....	61
3.2.4.1	Définitions .....	61
3.2.4.2	Propriétés.....	61
3.2.4.3	Exemple.....	61
3.2.5	Comportement d'un système.....	62
3.2.5.1	Définitions .....	62
3.2.5.2	Propriétés.....	62
3.2.5.3	Exemple.....	63
3.2.6	Récapitulatif des caractéristiques d'un système.....	63
4	UN MODELE SYSTEMIQUE POUR LE SYSTEME D'INDICATEURS .....	64

4.1	<i>Finalités du système d'indicateurs</i> .....	64
4.2	<i>Environnement du système d'indicateurs</i> .....	64
4.3	<i>Organisation du système d'indicateurs</i> .....	65
4.3.1	Entités du système d'indicateurs.....	65
4.3.2	Interactions du système d'indicateurs.....	67
4.3.3	Sous-systèmes du système d'indicateurs.....	68
4.4	<i>Objectifs exogènes et endogènes du système d'indicateurs</i> .....	69
4.5	<i>Comportement du système d'indicateurs</i> .....	69
4.5.1	Conception du système d'indicateurs.....	70
4.5.1.1	Décomposition des objectifs.....	70
4.5.1.2	Définition des indicateurs.....	72
4.5.1.3	Elaboration des expressions de performance.....	73
4.5.1.4	Agrégation des expressions de performance.....	74
4.5.2	Révision et suppression du système d'indicateurs.....	76
4.6	<i>Récapitulatif concernant le système d'indicateurs</i> .....	77
5	RETOUR SUR LA LITTÉRATURE.....	78
6	CONCLUSION.....	79

## **CHAPITRE III : UN CADRE METHODOLOGIQUE POUR LA CONCEPTION DU SYSTEME D'INDICATEURS DE PERFORMANCE**

1	PROBLEMATIQUE.....	81
2	CHOIX MULTICRITERE POUR LA CONCEPTION DU SYSTEME D'INDICATEURS.....	82
2.1	<i>Les principes du choix multicritère</i> .....	82
2.1.1	Les méthodes basées sur les relations de surclassement.....	82
2.1.2	Les méthodes basées sur l'agrégation des satisfactions.....	83
2.1.3	Un exemple de méthode de choix multicritère : la méthode AHP.....	84
2.1.4	La terminologie multicritère pour le système d'indicateurs.....	84
2.2	<i>La décomposition des objectifs globaux</i> .....	85
2.2.1	Les prérequis.....	86
2.2.2	La quantification des objectifs.....	86
2.2.2.1	La quantification des objectifs par le système d'indicateurs.....	86
2.2.2.2	La quantification des objectifs par étalonnage externe.....	87
2.3	<i>L'élaboration des expressions de performance</i> .....	87
2.3.1	Commensurabilité des expressions de performance.....	87
2.3.2	Signifiante des relations pour les expressions de performance.....	88
2.3.3	Définition des types d'échelle.....	89
2.3.3.1	Echelle ordinale.....	89
2.3.3.2	Echelle d'intervalle.....	90
2.3.3.3	Echelle de ratio.....	90
2.3.3.4	Le choix de l'échelle d'élaboration des expressions de performance.....	91
2.3.4	Problématique de construction d'une échelle.....	91
2.3.4.1	Approche analytique.....	91
2.3.4.2	Approche qualitative.....	91
2.3.4.3	Procédure de construction d'une échelle ordinale.....	92
2.3.4.4	Procédure de construction d'une échelle d'intervalle.....	93
2.3.4.5	Procédure de construction d'une échelle pré-cardinale.....	94
2.3.5	Bilan sur l'élaboration des expressions de performance.....	96
2.4	<i>L'agrégation des expressions de performance</i> .....	96

2.4.1	Problématique.....	96
2.4.2	Propriétés des opérateurs d'agrégation .....	96
2.4.3	L'exemple de l'intégrale de Choquet 2-additive.....	97
2.4.3.1	Définition .....	97
2.4.3.2	Détermination des paramètres de l'intégrale de Choquet 2-additive .....	99
3	UNE METHODOLOGIE POUR LA CONCEPTION DU SYSTEME D'INDICATEURS .....	99
3.1	<i>La méthode AHP</i> .....	100
3.2	<i>La méthode MACBETH</i> .....	100
4	MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE MACBETH POUR LA CONCEPTION DE NOTRE MODELE DE SYSTEME D'INDICATEURS .....	101
4.1.1	Etape préliminaire – La phase de structuration.....	102
4.1.2	Etape 1 – L'acquisition des informations de préférence .....	103
4.1.3	Etape2 – La proposition d'une échelle.....	104
4.1.4	Etape 3 – L'ajustement de l'échelle .....	105
4.1.5	Etape 4 – La détermination des poids .....	106
4.1.6	Etape 5 – L'agrégation des performances .....	107
4.1.7	Analyse de sensibilité.....	108
4.2	<i>Bilan sur l'utilisation de MACBETH pour la conception du système d'indicateurs</i> 108	
5	UNE PROPOSITION D'EVOLUTION DE MACBETH POUR LA CONCEPTION DU SYSTEME D'INDICATEURS .....	109
5.1	<i>Une variante pour la pondération</i> .....	109
5.1.1	Le cas d'intensités de préférence précises.....	110
5.1.2	Le cas d'intensités de préférence imprécises .....	111
5.2	<i>Prise en compte de certaines interactions mutuelles du système d'indicateurs</i> 111	
5.2.1	Introduction .....	111
5.2.2	Adaptation de MACBETH à l'intégrale de Choquet 2-additive .....	111
5.2.2.1	Problématique.....	111
5.2.2.2	Proposition .....	112
5.2.2.3	Conséquences sur la procédure de MACBETH.....	114
6	CONCLUSION .....	115

## **CHAPITRE IV : LE SYSTEME D'INDICATEURS DE LA SOCIETE FOURNIER..... 117**

1	INTRODUCTION.....	117
2	LES DONNEES DE L'ENTREPRISE .....	118
2.1	<i>Présentation de la Société Fournier</i> .....	118
2.2	<i>Le pilotage</i> .....	119
2.2.1	La structure de pilotage .....	119
2.2.2	Les objectifs stratégiques .....	120
2.2.3	Les plans d'action.....	121
2.3	<i>Les indicateurs de performance</i> .....	122
3	UNE LECTURE SYSTEMIQUE DES INDICATEURS DE LA SOCIETE FOURNIER.....	122
3.1	<i>L'organisation</i> .....	123
3.1.1	Les entités.....	123
3.1.2	Les interactions .....	125
3.1.3	L'organisation .....	125
3.1.3.1	L'organisation du système d'indicateurs au niveau métapolitique .....	125

3.1.3.2	L'organisation du système au niveau stratégique : le cas de l'organisation rattachée à la <i>satisfaction_clients</i> .....	125
3.1.3.3	L'organisation du système au niveau tactique : le cas de l'organisation rattachée à la <i>satisfaction_clients</i> .....	126
3.1.3.4	Exemple : l'organisation du sous-système OSIP <sub>Production</sub> aux niveaux stratégique et tactique .....	126
3.2	<i>Le comportement</i> .....	127
3.2.1	La conception .....	127
3.2.1.1	La décomposition des objectifs .....	127
3.2.1.2	L'élaboration des expressions de performance .....	128
3.2.1.3	L'agrégation des expressions de performance .....	128
3.2.2	L'exploitation .....	128
3.2.3	La révision .....	129
3.3	<i>Bilan</i> .....	129
4	UNE NOUVELLE APPROCHE DE CONCEPTION DU SIP <sub>SATISFACTION_CLIENTS</sub> .....	130
4.1	<i>Etape préliminaire - Les prérequis</i> .....	130
4.1.1	Les variables et les objectifs du niveau stratégique .....	130
4.1.2	Les plans d'action générés .....	130
4.2	<i>Etape 1 - L'élaboration des expressions de performance</i> .....	131
4.3	<i>Etape 2 - La détermination des poids</i> .....	133
4.4	<i>Etape 3 - L'agrégation des expressions de performance</i> .....	135
4.5	<i>Analyse des résultats</i> .....	135
4.5.1	La mise en œuvre successive ou simultanée de plusieurs plans d'action ..	135
4.5.2	La génération de plans d'action .....	136
5	LA CONCEPTION DU SIP <sub>TAUX_SERVICE</sub> .....	137
5.1	<i>Etape préliminaire - Les prérequis</i> .....	137
5.1.1	Les plans d'action générés .....	137
5.1.2	Les variables et les objectifs du niveau tactique .....	138
5.2	<i>Etape 1 - L'élaboration des expressions de performance</i> .....	139
5.3	<i>Etape 2 - Une première détermination des poids</i> .....	139
5.4	<i>Etape 3 - L'agrégation des expressions de performance</i> .....	140
5.5	<i>Vers la prise en compte des interactions mutuelles</i> .....	141
6	BILAN DE LA MODELISATION DU SYSTEME D'INDICATEURS .....	143
6.1	<i>Les apports pour l'industriel</i> .....	143
6.2	<i>Les difficultés rencontrées</i> .....	143
6.3	<i>Retour sur la pratique de MACBETH</i> .....	144
7	CONCLUSION .....	144

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES ..... 147**

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 149**

## **ANNEXES ..... 163**

## **ANNEXE DU CHAPITRE II..... 163**

ANNEXE II-A :	LA METHODE ECOGRAI (1990) (§ 2.2.1).....	163
ANNEXE II-B :	LES APPROCHES ISSUES DE LA METHODE ABC/ABM (§ 2.2.2).....	168
ANNEXE II-C :	LE <i>BALANCED SCORECARD BSC</i> (§ 2.2.3).....	170
ANNEXE II-D :	LE <i>QUANTITATIVE MODEL FOR PERFORMANCE MEASUREMENT SYSTEM, QMPMS</i> (§ 2.2.4).....	173
ANNEXE II-E :	LE <i>PROCESS BASED APPROACH, PBA</i> (§ 2.2.5).....	176
ANNEXE II-F :	LE <i>INTEGRATED DYNAMIC PERFORMANCE MEASUREMENT SYSTEM, IDPMS</i> (§ 2.2.6).....	178
ANNEXE II-G :	LE <i>PROCESS PERFORMANCE MEASUREMENT SYSTEM, PPMS</i> (§ 2.2.7).....	182
ANNEXE II-H :	L'APPROCHE <i>EUROPEAN NETWORK FOR ADVANCED PERFORMANCE STUDIES, ENAPS</i> (§ 2.2.8).....	185
ANNEXE II-I :	LE SYSTEME DE MANAGEMENT DE LA QUALITE SMQ DE LA NORME ISO 9000 (§ 2.2.9).....	188
ANNEXE II-J :	LA MISE EN PLACE DES INDICATEURS DANS LE MODELE <i>SUPPLY CHAIN OPERATIONS REFERENCE, SCOR</i> (§ 2.2.10).....	190

## **ANNEXE DU CHAPITRE III ..... 193**

ANNEXE III-A :	NOTION D'ECHELLE (§ 2.3.3).....	193
ANNEXE III-B :	PROPRIETES DES OPERATEURS D'AGREGATION (§ 2.4.2).....	194
ANNEXE III-C :	LES OPERATEURS D'AGREGATION (§ 2.4.2).....	195
ANNEXE III-D :	CALCULS COMPLEMENTAIRES A MACBETH (§ 4.1.3).....	198
ANNEXE III-E :	CALCULS RELATIFS A LA PRISE EN COMPTE DE DIFFERENTS TYPES DE VECTEURS D'EXPRESSIONS DE PERFORMANCE (§ 5.1).....	200
ANNEXE III-F :	CALCULS RELATIFS A LA DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE L'INTEGRALE DE CHOQUET (§ 5.2.2).....	204
ANNEXE III-G :	CALCULS RELATIFS A L'ERREUR DUE A L'APPROXIMATION DE L'INTEGRALE DE CHOQUET 2-ADDITIVE PAR LA MOYENNE PONDEREE, (§ 5.2.2).....	206

## **ANNEXE DU CHAPITRE IV..... 210**

ANNEXE IV-A :	CARTOGRAPHIE DES PROCESSUS DE LA SOCIETE FOURNIER (§ 2.2).....	210
ANNEXE IV-B :	GUIDE POUR L'ELABORATION DES INDICATEURS, <i>INSPIRE DE LA NORME FDX 50-171</i> (§ 3.1.1).....	211
ANNEXE IV-C :	L'INDICATEUR DELAI COMMERCIAL (§ 3.1.1).....	212
ANNEXE IV-D :	INTERVIEW DU DIRECTEUR DES ACHATS (§ 3.2.2).....	213
ANNEXE IV-E :	SOMMAIRE RAPPORT PQE 2002 (§ 4.5.2).....	214
ANNEXE IV-F :	CALCUL SIMPLIFIE DES POIDS DANS MACBETH (§ 5.3).....	215

## Introduction Générale

Depuis le début de l'ère industrielle, toute action menée dans l'entreprise est justifiée par une vocation ultime de pérennité. Dans ce sens, l'entreprise se fixe des objectifs, met en œuvre des plans d'action pour les atteindre et évalue la performance réalisée, c'est-à-dire le degré d'atteinte de ces objectifs. Dans un environnement très concurrentiel, les objectifs industriels, tout d'abord financiers, concernent aujourd'hui également la qualité, le délai, la flexibilité, l'innovation... En conséquence, le pilotage, qui n'agissait initialement que sur la productivité de la main d'œuvre directe au niveau opérationnel, s'est enrichi et agit désormais sur de multiples variables telles que les méthodes, les machines... et ce, du niveau stratégique au niveau opérationnel.

Dans ces conditions de globalité, qu'en est-il des indicateurs qui expriment la performance de l'entreprise ? Aujourd'hui, il est bien établi que l'indicateur exprime la performance par une comparaison d'une mesure à un objectif donné, pour aider le pilotage à agir sur une variable donnée. Des indicateurs conçus, dans leur triplet constitutif (variable, objectif, mesure), indépendamment les uns des autres, répondaient aux besoins d'un pilotage local et cloisonné. Dans l'entreprise complexe du début du XXI<sup>ème</sup> siècle, cette approche ne correspond plus aux besoins d'un pilotage : la diversification des objectifs et les interactions entre les variables et les indicateurs de performance associés imposent une vision globale des indicateurs, dans leur conception et leur exploitation.

Dans ces conditions, il est naturel de considérer comme un système, l'ensemble des indicateurs, définis suivant de multiples critères, à de multiples niveaux et présentant des interactions. Une telle perception est aujourd'hui bien acceptée et donne lieu à une littérature abondante qui aborde plusieurs aspects de ce système. En effet, bon nombre de propositions portent sur la prise en compte de la diversité des indicateurs, aussi bien suivant les critères (indicateur technique ou financier), les niveaux, ou le rapport à l'action (indicateurs de résultats ou de processus, maîtrise ou de progrès...). D'autres auteurs traitent de la conception d'un système d'indicateurs et donnent des réponses en termes de décomposition des objectifs ou d'agrégation des performances.

Pour autant, à notre sens, si les contributions actuelles inscrivent les indicateurs dans un système, le caractère global inhérent à tout système est peu considéré. En effet, les indicateurs ne sont pas suffisamment positionnés dans leur environnement. De même, leurs interactions ne sont que partiellement traitées. C'est pourquoi, dans ce mémoire, nous proposons de prolonger les travaux existants par un modèle de système d'indicateurs qui :

- positionne le système d'indicateurs par rapport au système de pilotage et au système piloté,
- définit son organisation et son comportement.

L'entité de base de ce modèle est l'indicateur de performance. Les indicateurs en interaction sont regroupés en systèmes, conformément aux besoins des pilotes. Dans son comportement, le système d'indicateurs élabore des expressions de performance, relatives à un objectif global.

Ces expressions de performance étant définies suivant de multiples objectifs et de multiples niveaux, le système d'indicateurs doit alors effectuer un traitement de l'information permettant d'assurer une cohérence entre l'élaboration et l'agrégation des expressions de performance.

Le **chapitre I** permet d'introduire le système d'indicateurs de performance. Reposant sur une approche historique, il justifie l'évolution de l'instrumentation de la performance comme une réponse aux changements survenus dans l'entreprise et son environnement. Pour assurer la nécessaire vision globale de l'entreprise et l'atteinte des nombreux objectifs définis, ce chapitre conclut sur la nécessité d'une définition cohérente des indicateurs, que nous choisissons d'aborder par une approche systémique.

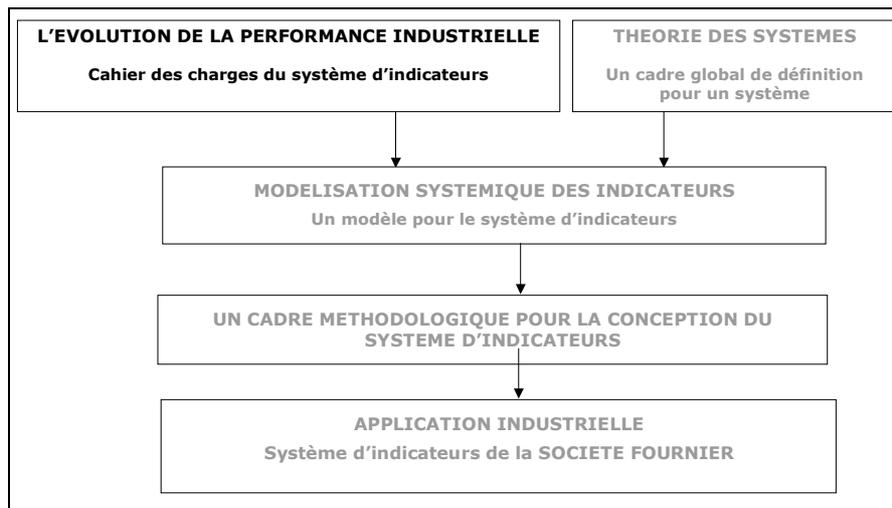
Dans le **chapitre II**, les propositions actuelles concernant le système d'indicateurs sont examinées. Constatant l'absence de cadre global qui prenne en compte tous les aspects d'un tel système, nous proposons un modèle de système d'indicateurs conformément à la théorie des systèmes. Défini relativement à un objectif global que se fixe l'entreprise, ce système est positionné dans son environnement. Son organisation est définie ainsi que son comportement.

La phase de conception, particulièrement importante, est naturellement préalable à sa mise en œuvre. Elle fournit surtout une aide au pilotage dans la génération et le choix d'un plan d'action. Cette phase de conception passe par trois étapes. Les objectifs sont dans un premier temps décomposés. Les expressions de performance sont alors élaborées et l'agrégation de ces expressions est considérée.

Le **chapitre III** fournit une réponse opérationnelle pour la conception du système d'indicateurs. La problématique est alors de fournir au système de pilotage, à partir des expressions de performance délivrées par les indicateurs, des informations synthétiques qui aident au choix d'un plan d'action parmi les plans générés. Des opérateurs d'agrégation sont envisagés à cette fin. En outre, pour que l'agrégation ait un sens, l'élaboration des expressions de performance doit être conjointe à la décomposition des objectifs.

La décomposition des objectifs est abordée sur la base du savoir-faire des pilotes. La définition d'une élaboration des expressions de performance, en cohérence avec leur agrégation, repose sur les préceptes de la théorie du mesurage. Par ailleurs, le traitement des expressions de performance étant fondé sur une expertise humaine, nous utilisons la méthode MACBETH, qui établit à partir de cette expertise, les relations entre les expressions de performance sous forme d'une moyenne pondérée. Cette méthode a été adaptée pour une utilisation plus aisée par les pilotes et pour prendre en compte les interactions mutuelles du système d'indicateurs.

Le **chapitre IV** présente une application des idées avancées dans ce mémoire à la conception du système d'indicateurs de la Société Fournier, connue sous son enseigne phare MOBALPA. Le problème de l'introduction de la politique qualité et environnement dans l'entreprise est abordé, à partir des modèles et outils présentés dans les chapitres II et III. Nous traitons plus précisément du système d'indicateurs relatif à la satisfaction clients.



*Positionnement du contenu du chapitre I dans notre plan de thèse*

## **Chapitre I : L'évolution de la performance industrielle**

### **1 Introduction**

La performance est la motivation essentielle de toute entreprise. En effet, toute action menée est dictée par une volonté de performance, soit une finalité de pérennité [Marmuse 97]. En revanche, si la performance continue d'être exprimée en termes de rentabilité, elle ne se décline plus seulement en fonction du coût comme à l'époque taylorienne, mais aussi en fonction de critères supplémentaires tels que la qualité, le délai, l'innovation, etc. [Bescos 99] [Dixon 90] [Lebas 95].

Ainsi, l'entreprise se définit des objectifs qui permettent de garantir la performance et pilote son système pour les atteindre. Mais au-delà du caractère multidimensionnel inhérent à la performance industrielle, il est une contrainte que les entreprises doivent satisfaire, l'amélioration permanente de cette performance. Ce n'est plus seulement d'être performante qu'il s'agit, mais d'être de plus en plus performante. La condition qui apparaît alors nécessaire est la réactivité, qui se traduit notamment par un besoin de traçabilité de la performance.

Ce chapitre aborde cette problématique sous l'angle de l'expression de la performance, principalement au moyen des indicateurs et des systèmes d'indicateurs de performance. En effet, pour piloter aujourd'hui les systèmes industriels, les indicateurs sont souvent conçus pour des besoins locaux d'optimisation, sans une explicitation systématique de leur lien avec la stratégie. Aussi, la mise en place d'un système d'indicateurs qui permette la traçabilité de la performance, c'est-à-dire relier à la stratégie les résultats des actions de toutes natures mises en place à tous les niveaux, est-elle une condition bien admise aujourd'hui.

Nous allons, dans ce chapitre, tenter de comprendre en quoi le système d'indicateurs, tel qu'il est actuellement utilisé, reste héritier de la logique taylorienne et de son contrôle de gestion et

en quoi, de ce fait, il est inadapté à ce besoin de déploiement de la stratégie. Pour ce faire, nous abordons, dans un premier temps, l'évolution historique de l'entreprise dans son contexte, au travers :

- des objectifs qu'elle doit atteindre,
- de son évolution interne, ainsi que des transformations qu'elle met en œuvre au niveau de ses ressources, de l'information qui y circule et de son organisation,
- de son pilotage et des indicateurs qu'elle utilise.

Nous constaterons alors les insuffisances de la pratique actuelle basée sur un ensemble d'indicateurs indépendants et nous conclurons sur les besoins concernant la structure d'un tel système et les spécifications associées.

## 2 L'évolution du contexte industriel

Le découpage adopté pour décrire les évolutions du contexte est classiquement basé sur l'inversion du rapport de l'offre et de la demande et comprend trois phases [Berrah 97] [Dupont 98] [Gallois 00] [Giard 03] :

- phase I - les trente glorieuses de 1945 à 1975, la demande excède l'offre,
- phase II - une période qui s'étend de 1975 à la fin des années 80, l'offre équilibre la demande puis la dépasse,
- phase III - des années 90 à aujourd'hui, l'offre est très supérieure à la demande.

### 2.1 La phase I : la demande est supérieure à l'offre (45-75)

#### 2.1.1 Un marché de pénurie et des objectifs de réduction de la Main d'Oeuvre Directe

Au début de cette période, marquée par un contexte de forte pénurie, de forte croissance et de localisation des marchés, la demande est supérieure à l'offre, le client (client final ou autre entreprise) a un choix restreint. L'entreprise propose des produits qui présentent une faible variété, réalisés en grande quantité et dont la durée de vie est élevée. La rentabilité identifie les critères de performance de l'entreprise à la productivité de la Main d'Oeuvre Directe MOD [Taylor 11] [Pouget 98], dont la maximisation passe par la réalisation d'économies d'échelle.

Mais à partir des années 65, les gains de productivité rendent la pénurie moins forte. Un client peut donc changer de fournisseur s'il n'est pas satisfait : c'est le début de la **concurrence**. L'entreprise continue de réduire ses coûts et se fixe comme objectif supplémentaire d'augmenter la **variété** de ses produits.

#### 2.1.2 Les évolutions de l'entreprise : un système productif

Dans l'immédiat après guerre, les ressources consistent en des équipements mécanisés où l'homme réalise une grande partie des tâches de production. Ces équipements sont rigides et adaptés à la production en série de lots importants, dimensionnés par la formule de Wilson [Wilson 1934]. La demande est régulière. On fabrique ou commande pour réapprovisionner un stock d'articles (produits finis, sous-ensembles, composants, matière première) dont on a

l'assurance qu'ils seront utilisés, la demande excédant de beaucoup l'offre [Within 66]. L'entreprise est centrée autour de l'activité de production qui est standardisée selon les principes de l'Organisation Scientifique du Travail (chaque opération est modélisée par un enchaînement de tâches élémentaires dont la durée est préétablie par la maîtrise).

A partir des années 65, la technologie permet à l'automatisation, née dans les années 50 pour réduire la MOD, d'améliorer progressivement la productivité, bien que les changements de production restent longs et coûteux. La demande variée des clients induit une diminution de la taille des lots, ce qui augmente le nombre de stocks de produits différents. Pour limiter la croissance des coûts de gestion de stock, l'entreprise tente d'ajuster sa production à une consommation irrégulière ; ce que les méthodes classiques (point de commande, programme d'approvisionnement) sont incapables de réaliser [Giard 03]. A partir de la définition des différents horizons de la production stratégique (de l'ordre de l'année), tactique (de quelques mois à quelques semaines), opérationnel (de quelques jours à quelques heures) [Anthony 65], les travaux sur la planification aboutissent à la fin des années 60 à la méthode MRP (*Material Requirement Planning*) [Orlicky 75] [Plossl 67]. En supposant les capacités de production infinies, cette méthode permet de planifier, du long terme au court terme, la production ainsi que les approvisionnements, dont le volume croît pour faire face au besoin de variété.

Par ailleurs, dans les années 45-65, les besoins en traitement de l'information pour fabriquer des produits à variété réduite sont faibles (contrôle des quantités et des consommations), l'homme suffit à les assurer. Mais à partir des années 65, ces besoins augmentent et bénéficient de l'apparition des premiers ordinateurs dans l'entreprise. Les données techniques sont standardisées grâce à la création des premières normes ASCII [Mackenzie 80]. Dans la logique taylorienne, les programmes développés s'adressent en priorité aux tâches de gestion des coûts et des quantités [Orlicky 1975]. Cependant, les délais de traitement, les faibles possibilités de stockage de l'information, le temps d'installation des applications, restreignent l'utilisation de cet outil. A partir des années 70, pour appréhender les différentes fonctions à mettre en œuvre pour saisir, traiter, stocker, échanger l'information dans l'entreprise, le concept de **système d'information** émerge progressivement [Le Moigne 73]. Très rapidement, la méthode MERISE permet de modéliser en partie ce système pour ce qui concerne le traitement des données [Lussato 74] [Tardieu 85].

Durant toute cette phase, l'organisation de l'entreprise reste fonctionnelle. Les métiers tels que l'industrialisation, la conception et la vente sont subordonnés à la production et communiquent peu entre eux. La structure organisationnelle s'identifie à l'organigramme d'une entreprise hiérarchisée, centralisée et cloisonnée [Mintzberg 82]. Mais une telle structure ne peut intégrer les nouveaux métiers apparus à partir des années 65 (prévision des ventes, planification de la production, logistique, informatique...). Ils induisent en effet des besoins de coordination et de communication entre les fonctions d'un même niveau que le recours à la voie hiérarchique ralentit (montée puis descente d'information) [Mesarovic 80].

### **2.1.3 Les modes de pilotage et les indicateurs mis en place : des indicateurs de productivité pour le contrôle de gestion**

Dans ces conditions, l'entreprise est pilotée selon les principes du contrôle de gestion [Bouquin 01] dont le but est de « décrire la performance et proposer les moyens de son amélioration » [Savall 92]. Le contrôle de gestion est un dispositif qui utilise un certain nombre d'outils (comptabilité générale, comptabilité analytique, tableaux de bord, etc.) pour planifier, budgétiser, enclencher et suivre des plans d'action mis en œuvre pour atteindre les objectifs de l'entreprise, exprimés dans un univers monocritère : les coûts [Ardoin 86]. Le

suivi consiste en l'analyse des écarts entre le comportement réel de l'entreprise et un comportement décrit selon des standards préétablis : quantité produite au niveau local, coûts au niveau global. Les objectifs prioritaires sont de réduire les coûts de MOD ainsi que les investissements pour un niveau de production donné. Mais au milieu des années 70, il devient nécessaire de prendre en compte la distorsion croissante entre les coûts réels et les coûts théoriques. En effet, la répartition subjective des charges indirectes rend ces coûts calculés moins justes et en conséquence le contrôle de gestion moins pertinent [Gervais 94]. Ceci a pour conséquence le développement parallèle de la gestion industrielle circonscrite aux stocks. Durant toute cette phase, les indicateurs de performance définis mesurent et comparent des coûts (indicateurs financiers) ainsi que des quantités (volume de production). Ils sont utilisés dans une logique de contrôle et de vérification *a posteriori*. L'indicateur financier fétiche est le ROI (*return on investment*) au sommet de la pyramide de Dupont conçue par Brown au début du siècle [Johnson 75]. En effet, celle-ci mesure la performance de toutes les fonctions de l'entreprise en termes financiers puis les agrège progressivement pour calculer le ROI [Chandler 77] (fig. 1).

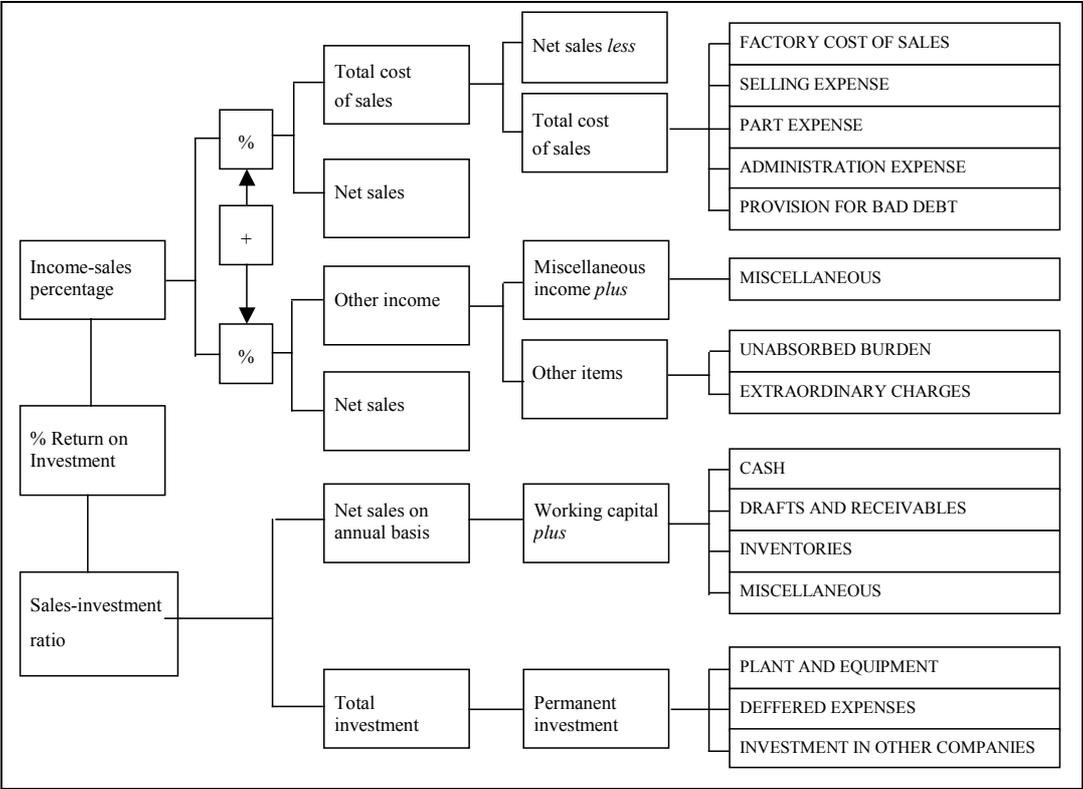


Figure 1 : La pyramide Dupont des ratios financiers [Chandler 77]

Le système d'indicateurs se matérialise à travers un tableau de bord qui affiche des indicateurs financiers de charges et de recettes. Les indicateurs de productivité fournissent la performance des postes de production. Ils sont ensuite agrégés pour obtenir les coûts globaux de production (*factory cost of sales*). Sans formaliser sa mesure, l'entreprise évalue également sa performance en termes de variété. La performance globale est la somme des performances locales, ce qui, dans un contexte de prépondérance du coût de la MOD est conforme à la réalité. En effet, les gains réalisés sur un poste (ou un atelier, un site) n'ont aucun effet sur les autres postes. Il suffit donc d'optimiser les différentes productions locales pour optimiser la performance globale.

## 2.2 La phase II : l'offre équilibre puis dépasse la demande (75-fin des années 80)

### 2.2.1 Un marché concurrentiel et des objectifs de coût, qualité et délai

A partir des années 75, l'offre excède la demande, la croissance ralentit, les barrières qui rendaient certains marchés captifs tombent progressivement. La stratégie basée sur des marchés protégés et des ventes assurées est révolue, il faut affronter et battre les concurrents. Les critères de coût et de variété ne sont plus suffisants. Pour être performante, l'entreprise doit garantir que le produit vendu corresponde au produit demandé et qu'il soit rapidement fourni au client. Les objectifs sont alors décomposés en termes de :

- qualité, identifiée tout d'abord à la conformité du produit réalisé par rapport à ses spécifications (fin des années 70) [Deming 82], puis de façon plus générale à la satisfaction du client [Schneidermann 88],
- puis de délai identifié à la durée qui s'écoule entre l'instant où le client formule son besoin et l'instant où celui-ci est satisfait (milieu des années 80) [Sullivan 86].

On parle désormais de performance **multicritère** [Roy 85]. La notion de **valeur** est utilisée pour rendre compte de la performance hors coût de l'entreprise [Porter 86]. Pour être performante, l'entreprise doit donc réaliser des produits dont le rapport **valeur/coût** lui permet de réaliser des marges suffisantes.

### 2.2.2 Les évolutions de l'entreprise : un système flexible

L'entreprise s'adapte à ces nouvelles exigences en devenant flexible [Eppink 78]. La **flexibilité** est définie comme étant « la capacité d'adaptation sous la double contrainte de l'incertitude (les prévisions peuvent se révéler erronées, le client peut modifier sa commande...) et de l'urgence (il faut pouvoir s'adapter très vite aux changements de l'environnement) » [Eveaere 97]. Cette flexibilité concerne aussi bien les ressources, les fonctions que l'organisation de l'entreprise.

Les équipements automatisés spécialisés évoluent pour devenir polyvalents grâce à l'arrivée des automates programmables [Blanchard 79], des robots ainsi que des machines outils à commande numérique MOCN [Froment 84]. Les changements de série sont optimisés en agissant sur les outillages (magasins d'outils, palettiseurs) et l'organisation (méthode SMED *single minit exchange die* [Shingo 85]). Les fonctions conception et industrialisation qui interviennent en amont de la production apparaissent désormais comme déterminantes pour la performance du produit et se développent en conséquence [Burdbridge 75]. Ce développement, conjugué à l'apparition de fonctions support telles que la maintenance, entraîne une augmentation de la part de main d'œuvre indirecte MOI. Elle représentait 50% de la MOD au début des années 50 et s'élève à deux fois la part de MOD à la fin des années 80 [Berliner 88]. Dans ce contexte, l'opérateur ne peut rester exécutant sous peine de voir la productivité de son poste décroître à cause de problèmes d'approvisionnement, de non-qualité, de pannes et autres. Il utilise alors des outils de conduite de poste [Nakajima 86] [X 60-011 88] tels que les cartes de contrôle, et s'inscrit dans les débuts du pilotage collectif en participant aux premiers cercles de qualité [Monteil 85].

La méthode MRP est enrichie à la fin des années 70 par la méthode MRP II (*Manufacturing Resource Planning*) qui intègre la capacité de l'entreprise pour planifier la production [Vollman 92]. Mais cette gestion en flux poussé, basée sur une demande jusqu'ici prévisible,

montre ses limites pour répondre aux besoins des clients. En effet, toute variation par rapport aux prévisions se traduit aussitôt soit par une rupture, soit par une augmentation du stock. Pour remédier à l'inadaptation de la planification dans le cas d'une demande imprévisible, le **juste à temps**, qui a vu le jour au milieu des années 70 au Japon, se diffuse en Europe à partir des années 80 [Shingo 85] [Hutchins 89]. Cette philosophie a pour objectif de supprimer tous les gaspillages et affiche des objectifs radicaux (zéro stock, délai, défaut, panne, papier). Les outils mis en place sont tous basés sur le principe de l'amélioration continue illustré par la roue de Deming (*Plan, Do, Check, Act*). [Deming 82]. Les résultats des actions conçues (*Plan*) puis mises en œuvre (*Do*) sont évalués (*Check*) et donnent lieu à une réaction (*Act*) qui engendre un nouveau plan d'action et ce, de façon continue. La gestion par *Kanban* (étiquettes) permet de « tirer » les flux et de produire au bon moment la bonne quantité pour satisfaire les commandes de clients externes à l'entreprise (donneur d'ordres, distributeur, client final) ou internes (ateliers, services...). Ces nombreux outils utilisés pour atteindre les objectifs en terme de stocks, délai, qualité, etc. sont regroupés dans le parapluie KAIZEN [Imai 92].

Dans le même temps, la méthode OPT (*Optimized Production Technology*) se fixe des objectifs de maximisation du « *throughput* » (valeur générée dans l'entreprise) et de minimisation des coûts de production et de stockage [Goldratt 86]. La méthode, basée sur la théorie des contraintes, propose de gérer la production à partir des équipements goulets qui limitent le *throughput*. Les flux sont synchronisés sur le débit des goulets, ce qui évite les stocks en amont et les périodes sans production en aval. Devant choisir sa méthode de gestion des flux, l'entreprise expérimente avec quelques difficultés ces différentes approches, MRPII, Kanban, OPT, ressenties comme concurrentes.

Dans cette recherche de flexibilité, le système d'information désormais bien en place, joue un rôle central [Reix 02]. Les systèmes de gestion de bases de données SGBD [Fargette 85] permettent d'organiser et d'exploiter rapidement des quantités croissantes d'information pour les besoins des nouvelles fonctions xAO (GPAO, CAO, CFAO, etc.). Les SGBD sont synchrones des évolutions réalisées sur les équipements grâce aux technologies numériques. Cette complémentarité entre les équipements numérisés et les logiciels qui permettent de les exploiter pleinement, donne le départ de la démarche **productique** au début des années 80 [Doumeingts 83]. Plus précisément, ce besoin d'intégration entre des îlots automatisés indépendants initie le CIM *Computer Integrated Manufacturing* [Doumeingts 87] [AMICE 89]. Il s'agit de rompre les barrières organisationnelles pour mettre en synergie les différentes entités de l'entreprise, en employant de façon prioritaire mais non exclusive les technologies de l'information. La nouvelle tendance est ainsi d'intégrer les trois types de flux de l'entreprise (physiques, information et décision) (fig. 2).

Les deux premiers niveaux du CIM sont « l'intégration des systèmes physiques » dès le milieu des années 70, puis « l'intégration des applications logicielles » (interopérabilité et partage des données) durant la décennie 80 [Vernadat 96].

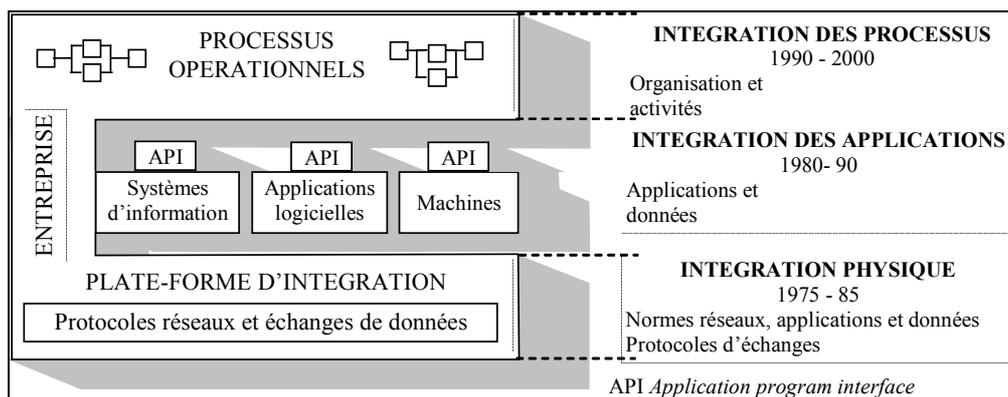


Figure 2 : Les niveaux d'intégration de l'entreprise selon [Vernadat 96 p. 326]

Cette intégration engendre le besoin d'une vision transversale de l'entreprise, mieux adaptée à la maîtrise des flux de produit et d'information qui la traversent. Pour maîtriser la valeur apportée au client, c'est tout autant l'enchaînement des activités réalisées qui est important que leur liste ou leur contenu [Giard 03]. Pour M. Porter, la « chaîne de la valeur » est obtenue par un enchaînement d'activités primaires (qui créent cette valeur) et d'activités de soutien (qui permettent aux activités principales de se réaliser) [Porter 86]. En occident, ce sont les prémices de la vision processus, initiée dans le développement logiciel. Un processus relie toutes les activités mises en œuvre pour réaliser un objectif [Humphrey 88]. Ce concept s'était déjà imposé au Japon dans le domaine industriel au travers du *Continuous Improvement Process* inhérent à la philosophie KAIZEN [Imaï 92].

L'évolution de l'entreprise, durant cette phase, a multiplié les interactions entre les entités (fonctions, activités, ressources humaines et matérielles) qui la constituent. Pour en améliorer la performance, il est maintenant indispensable de l'appréhender dans sa **globalité**. Il est donc naturel de considérer l'entreprise en tant que système et de la modéliser en tant que tel pour la comprendre et la piloter [Mélèse 90]. D'abord focalisée sur le système d'information, la problématique de modélisation de l'entreprise s'étend désormais à toute l'entreprise. J.L. Le Moigne propose ainsi le modèle OID qui distingue le système Opérant, le système d'Information et le système de Décision [Le Moigne 77]. Dans un des premiers modèles proposés, le modèle IDEF<sub>0</sub>, les entités sont définies comme des activités qui consomment des entrées pour fournir des sorties et utilisent, pour ce faire, des ressources et des informations de contrôle [Ross 77] [Bravoco 85].

### 2.2.3 Les modes de pilotage et indicateurs mis en place : les limites du contrôle de gestion et l'apparition de l'indicateur technique

Le pilotage prend ici son sens contemporain ; l'entreprise étant considérée comme un système, il faut la piloter en tant que tel. Il ne s'agit plus de réduire simplement les coûts mais également d'augmenter la valeur, c'est-à-dire atteindre des objectifs définis selon de multiples critères. Sachant que ces objectifs évoluent sans cesse et que les consommations ne peuvent être totalement maîtrisées, l'écart constaté entre prévision et réalisation montre que la planification seule ne peut suffire pour les atteindre. Il est nécessaire de la compléter par un suivi et une correction des actions entreprises en fonction de ces écarts. Le pilotage stratégique, qui planifie les actions de l'entreprise et ne vérifie leur exécution qu'à moyen et long termes, doit être enrichi par le pilotage opérationnel qui permet de corriger sur le court terme, les écarts survenus en production. Se pose alors le problème de la mesure de ces écarts, les grandeurs financières utilisées pour le pilotage stratégique n'étant pas adaptées pour cela.

Dans ce cadre, le contrôle de gestion prédomine toujours malgré un calcul des coûts inadapté [Kaplan 83], une incapacité à exprimer la performance non financière [Globerson 85] et une expression de la performance passée qui arrive trop tard pour réagir aux écarts constatés. Les techniques quantitatives de gestion et la comptabilité analytique se développent pour pallier cette insuffisance mais restent incapables de mesurer la valeur [Gervais 94], mesure qui reste donc du domaine de la gestion industrielle. Suite à ces besoins non satisfaits, la nécessité de disposer d'instruments capables de mesurer la valeur pour piloter la performance technique est posée [Cross 88-89] [Kaplan 83] et aboutit à la proposition de l'indicateur **technique** [Fortuin 88] [Kaplan 87] [Berliner 88]. D'autre part, l'inadaptation du calcul des coûts trouve une réponse dans la méthode *ABC Activity Based Costing* [Cooper 88] [Berliner 88]. Les coûts des activités « indirectes » sont imputés en fonction de la consommation de ressources. Le coût d'un produit/service dépend des activités nécessaires à son élaboration, activités qui consomment des ressources donc des coûts. Cette connaissance du coût réel des activités permet de mieux cibler les actions entreprises et d'en mesurer ainsi les effets.

Dans ces conditions, les indicateurs techniques sont mis en place localement pour mesurer la valeur apportée par l'entreprise, là où les indicateurs financiers sont inadaptés. Ces indicateurs, qui expriment la performance non financière de l'entreprise, trouvent de nombreux exemples en termes de disponibilité [Nakajima 86], de délai [Stalk 88], de qualité [Schneidermann 88]. Pour une entité de l'entreprise donnée (atelier, service...), ces indicateurs sont regroupés dans un tableau de bord, défini comme « une liste d'indicateurs destinés à étayer un jugement sur le fonctionnement d'un centre de responsabilité (décision) » [Giard 03] [Sulzer 85]. L'entreprise a conscience que ces tableaux de bord, constitués d'indicateurs qui mesurent une performance suivant des critères multiples (coût, qualité, délai) pour différentes entités (fonctions, activités, ateliers...), sont désormais dépendants. Chaque entité de l'entreprise ne peut plus rechercher à optimiser sa seule performance locale sachant que cela va à l'encontre de la performance globale ; par exemple, un commercial remplit son carnet de commandes, la production ne peut assurer les délais, l'entreprise perd alors les clients.

Dans ce sens, certaines approches proposent d'intégrer la performance technique dans des tableaux de bord financiers pour calculer une performance globale. On trouve ainsi la méthode de « coûts de non efficacité des équipements » [Boucly 88] qui chiffre les conséquences financières directes et indirectes pour l'entreprise de toute heure de production perdue, ainsi que la méthode des « coûts et performances cachés » [Savall 89] qui évalue les coûts indirects dus à tous les dysfonctionnements de l'entreprise (accident, absentéisme, *turn-over*, baisse de productivité, non qualité).

## **2.3 La phase III : l'offre est très supérieure à la demande (des années 90 à aujourd'hui)**

### **2.3.1 Un marché saturé et des objectifs toujours multiples**

L'offre est désormais très supérieure à la demande, la croissance du PNB reste globalement faible, les marchés sont ouverts, il n'y a plus de barrières commerciales. La concurrence s'est encore intensifiée. Pour vendre, l'entreprise influence le client et l'incite à surconsommer en développant des stratégies de marketing et de communication. Les critères de coût, qualité, délai ne sont plus suffisants. Il faut innover, personnaliser le produit pour l'adapter au besoin du client et lui offrir tous les services (mise en route, maintenance, reprise après usage...) qui le satisferont sur tout le cycle de vie du produit.

### 2.3.2 Les évolutions de l'entreprise : un système réactif

Pour caractériser l'aptitude de l'entreprise à répondre à la demande, apparaît le concept de réactivité. « La réactivité est devenue une arme concurrentielle majeure. Savoir répondre rapidement et précisément à la demande d'un client est souvent essentiel pour conquérir et conserver sa clientèle » [Kaplan 98]. Déployée sur le système de production, la réactivité est définie comme étant « la qualité d'un système à élaborer une réponse à un problème sur un délai approprié à la dynamique de son environnement » [Chebeanne 1999]. Pour répondre immédiatement et pleinement à la demande, elle s'applique à tous les domaines : réactivité en **conception** pour suivre, voire précéder le marché et intégrer les innovations technologiques, réactivité en **production** pour synchroniser les commandes et optimiser leur délai de réalisation grâce aux techniques d'ordonnancement [Di Mascolo 00] [Sadfi 02] et réactivité en **logistique** pour synchroniser les approvisionnements aux lancements de production.

Mais la seule réduction des délais de production n'est pas suffisante, il faut réduire également le délai de conception du produit grâce à :

- la conception intégrée et l'ingénierie simultanée qui permettent de traiter conjointement les contraintes des fournisseurs, des distributeurs, des fabricants, des méthodes et des études, tout au long de la conception [Kuziak 93] [Parsei 93],
- la simulation qui permet d'améliorer la qualité du produit, réduire le temps et le coût nécessaires à son développement, en reproduisant virtuellement, sur la base de modèles numériques, le comportement tant du produit que des moyens de le produire [Pierreval 90] [Chedmail 01].

Il faut, d'autre part, concevoir un produit qui réalise exactement les fonctions attendues par le client. Pour cela, l'entreprise a recours à l'analyse de la valeur et l'analyse fonctionnelle [Delafollie 91] [X50-101 96]. Toutes ces évolutions demandent de nouveaux savoirs et de nouvelles compétences individuelles et collectives [Bruneau 92] [Desouza 03].

La plupart des entreprises achètent désormais plus qu'elles ne produisent, les achats représentent plus des trois quarts du coût du produit fini dans l'informatique, l'automobile, l'aéronautique, quand elles en représentaient environ la moitié dans les années 75 [Caverivière 02]. Elles s'insèrent alors dans une chaîne de production et d'échanges, qui va de la matière première au client final [Lee 93] [Geneste 03]. L'entreprise **virtuelle** qui résulte de cette nouvelle organisation, regroupe les fonctions, processus, compétences de différents partenaires autour d'un produit ou service [DRDF 97] [Théroutde 02] [Vernadat 96]. Elle est reconfigurable très rapidement, répondant ainsi au besoin de réactivité. Cette entreprise virtuelle est un réseau de fournisseurs, de donneurs d'ordres, de distributeurs et s'appuie sur des sites de production, des plates-formes logistiques et des moyens de communication (physiques et informationnelles) [Harbi 01] [Eymery 97]. Les cinq processus de base « Planifier, Approvisionner, Produire, Livrer, Recycler »<sup>1</sup> [SCC 03] mis en œuvre identifient la « *supply chain* » ou « chaîne logistique » [Ayers 00].

L'entreprise ne fabrique que ce qu'elle a l'assurance de vendre (commande ferme ou anticipée). Pour supprimer les stocks, les flux se tendent tout en honorant le délai promis au client. Les prévisions étant rendues quasi-impossibles, le planning des livraisons se substitue

---

<sup>1</sup> « Plan, Source, Make, Deliver, Return »

au plan directeur de production PDP de l'approche MRP II dans le *Distribution Resource Planning* DRP. Le DRP est alors défini comme « le processus de gestion en cascade qui détermine les besoins des localisations de stocks et qui garantit que les sources d'approvisionnement pourront répondre à la demande » [Martin 96]. Il est vital d'assurer des approvisionnements synchronisés avec la production [Benyoucef 00]. Cette extension amont (fournisseurs) et aval (distributeurs) de la gestion de production donne naissance au *supply chain management* qui consiste à coordonner les cinq processus de base de la *supply chain* [Akbari Jokar 02] [Rota 98]. On parle en particulier de GPA, Gestion Partagée des Approvisionnements, quand le fournisseur gère le stock du donneur d'ordres et de RMR (*Retail Managed Replenishment*) quand le distributeur transmet ses plans d'approvisionnement au fournisseur [Aupetit 99].

Le système d'information, dont la capacité de traitement et la souplesse d'utilisation vont croissant, traite du cycle de vie complet du produit, grâce aux systèmes de gestion de données techniques SGDT [Randoing 95] et aux applications logicielles qui assistent tous les processus. Succédant au MRP II, les ERP *enterprise resource planning* regroupent toutes les applications qui utilisent les SGDT dans un même progiciel qui couvre alors la totalité des processus de l'entreprise. Ils se diffusent vers la fin des années 90 et proposent des architectures basées sur des modules génériques et paramétrables [Lequeux 02]. Dans le même temps, les échanges de données informatisées avec les donneurs d'ordres et fournisseurs de l'entreprise apparus en 94 se généralisent et sont intégrés dans ces architectures [Agnoux 99], allant même, grâce au *e-business*, jusqu'au client final [Hamilton 02]. Les besoins de partage de l'information et de son traitement automatisé conduisent à des solutions *groupwares* et *workflows*<sup>2</sup> [Khoshafian 98] qui utilisent les nouvelles technologies de l'information et de la communication NTIC (intranet, internet, courrier électronique, visio-conférences, etc.).

Dans ces conditions, la frontière entre les systèmes d'information et de décision s'estompe : la notion de *workflow* est significative de cette situation, la procédure d'échange d'informations étant indissociable de son traitement et des décisions à prendre. D'une façon générale, il s'agit de fournir une information la plus pertinente possible pour une aide au pilotage, traitée selon une procédure ou de façon spécifique. Dans ce dernier cas, il est possible de recourir à des systèmes interactifs d'aide à la décision SIAD [Morton 95] [Tahon 01]. En conséquence, il n'est désormais plus possible de distinguer les systèmes information des systèmes de décision, ce qui conduit de nombreux auteurs à proposer le concept de **système de pilotage** de l'entreprise [Binder 91] [Hétreux 96] [Raviard 99] [Wiseman 88].

Le concept de processus qui émergeait à la fin de la période précédente ainsi que celui de projet [Giard 03] sont formalisés dès le début de cette phase autour des mots clés d'objectifs, d'actions ou activités et de ressources. Un projet est défini comme étant « un ensemble d'activités coordonnées et maîtrisées comportant des dates de début et de fin, entreprises dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques » [Giard 03]. Ces nouveaux concepts bouleversent la structure organisationnelle [Malone 94 99] [Molleman 01]. Celle-ci prend désormais de multiples formes, caractérisées par [Mintzberg 82] :

---

<sup>2</sup> *Groupware* (collecticiel) : « Utilisation de ressources informatiques, dans le contexte d'un projet réalisé par les membres d'un groupe de travail reliés en réseau ». *Workflow* (gestion de flux de production) : « Contrôle automatisé de la circulation des informations entre les divers intervenants d'un circuit de production de biens et services » [GDT 04].

- d'une part la division du travail sous forme d'entités organisationnelles, qui peuvent être fonctionnelles (par métier), divisionnelles (par site), orientées produit (par activité) ou projet, matricielles (combinaison de deux divisions),
- d'autre part les mécanismes de coordination entre ces entités qui peuvent être l'ajustement mutuel dans les structures coordonnées et distribuées [Trenteseaux 96], la supervision directe dans la structure centralisée [Titli 79], la supervision hiérarchique dans les structures hiérarchisées [Mesarovic 80], ou les deux derniers mécanismes dans les structures distribuées supervisées.

Ce besoin de coordination dans la structure de pilotage, de partage des connaissances à tous les niveaux de l'entreprise conduit au troisième niveau « intégration des processus » du CIM (sur la décennie 90) (cf. fig. 2). La modélisation de l'entreprise dans sa globalité, initiée durant sa phase précédente est désormais une première étape indispensable à la résolution des problèmes industriels au vu « du nombre de processus en interactions, de variantes de produits, de décisions et de la quantité d'information à traiter ou échanger » [Vernadat 96]. Les modèles proposés reprennent les principes posés par J.L. Le Moigne et les propositions telles que MERISE et IDEF<sub>0</sub> en les adaptant. Ainsi, trouve-t-on par exemple :

- la méthode IDEF3, qui permet de représenter les processus opérationnels [Mayer 95],
- la méthodologie GIM qui analyse les systèmes de production intégrés [Chen 97],
- le modèle Olympios, basé sur le concept « Fournisseur-Utilisateur » [Braesch 89], qui vise à modéliser le système d'information et de décision de l'entreprise [Maire 91] [Théroutte 02],
- l'architecture CIMOSA qui décline dans une même sémantique les différents concepts utilisés dans le CIM [Vernadat 96 99],
- le modèle PERA destiné à la conception de systèmes de production qui distingue points informationnels et points décisionnels [Williams 94].

Une liste ainsi qu'une description plus approfondies de ces différents modèles est disponible dans [Vernadat 96], ainsi qu'un comparatif de ces modèles dans [Monteiro 01].

### 2.3.3 Les modes de pilotage et indicateurs mis en place : le système d'indicateurs pour le pilotage d'un système pris dans sa globalité

Dans cette période, le pilotage se distingue réellement du contrôle de gestion car il intervient à tous les niveaux de l'entreprise pour améliorer la réactivité. Il intègre l'aspect multicritère de la performance, prend en compte l'amélioration permanente de la performance [Hatchuel 96] et traite aussi bien l'entreprise que les relations avec ses fournisseurs et distributeurs.

**Un pilotage par niveau.** Dans la continuité de la logique MRP, le pilotage des moyens de production est détaillé sur cinq niveaux qui vont du long terme au temps réel : **planification, programmation, ordonnancement, conduite et commande** [Dindeleux 92] [Trenteseaux 96]. A côté de ce pilotage **technique**, qui intervient au niveau des processus et permet leur maîtrise (gestion des aléas) et leur amélioration (suppression des gaspillages, optimisation), l'AFGI propose le pilotage **économique** à caractère davantage stratégique, qui autorise la remise en cause des processus [AFGI 92].

**Une performance multicritère.** Le pilotage de l'entreprise s'identifie désormais au pilotage des projets et des processus pour augmenter la valeur et diminuer les coûts [Mévellec 96] [Ravignon 03]. Dans ce sens, l'approche *Activity Based Management* ABM, complémentaire de l'approche ABC, permet de prendre en compte la performance des activités aussi bien en termes de coût que de valeur, soient tous les critères qui permettent de satisfaire le client [Brimson 98] [Mévellec 96]. Chaque activité est pilotée grâce à des inducteurs de performance ou variables d'action qui agissent sur le coût, le délai ou la qualité et dont l'effet est mesurable (fig. 3). De la même façon, le *Balanced Scorecard* BSC proposé par Kaplan et Norton repose sur une approche de pilotage qui équilibre la recherche de la performance financière et non financière et en particulier celle des processus internes [Kaplan 92].

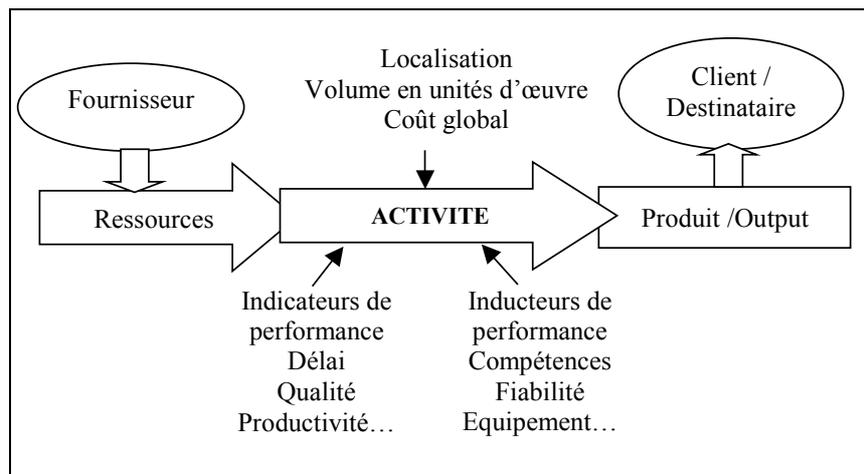


Figure 3 : Indicateurs et inducteurs liés à une activité [Lorino 01a]

**L'amélioration permanente.** Apparu à la fin de la période précédente, le CIP *Continuous Improvement Process*, adapté à l'amélioration progressive de la performance, n'est pas toujours suffisant en particulier lorsque le gain de performance attendu est important. Hammer et Champy proposent alors le *Business Process Reengineering* BPR : si les processus actuels ne permettent pas l'atteinte des objectifs fixés, il faut les reconcevoir [Hammer 93]. La généralisation de cette méthode est contestée et son taux de réussite n'excède pas les 30 à 40%, les difficultés les plus fortement perçues sont liées au pilotage du changement, à l'informatique, à l'identification des processus, à la planification du changement [Peucelle 00]. Simultanément et dans le même esprit, le *Hoschin Kanri* (management par percée) propose de subordonner l'innovation sur les processus à celle sur les produits/services. En veille permanente, l'entreprise est capable de réagir aux évolutions de son environnement grâce à un personnel formé spécifiquement dans ce but [Akao 91] [Tennant 01].

Malgré leur différence de mise en œuvre, ces méthodes, CIP, BPR, *Hoschin Kanri*, partagent un certain nombre de concepts. On retrouve l'**objectif** qu'il faut atteindre, le **plan d'action** qu'il faut élaborer et mettre en œuvre sur les **processus** critiques vis-à-vis de cet objectif, la **performance** qu'il faut évaluer et interpréter dans un cadre stratégique donné, c'est-à-dire par rapport à l'ensemble des objectifs à atteindre et l'ensemble des plans d'action associés [Bond 99]. Cette philosophie commune d'amélioration permanente de la performance repose sur une démarche de réorganisation industrielle qui peut concerner tout type d'objectifs et aspects de l'entreprise (système d'information, système de décision, processus opérationnels, etc.) [Jacob 95] [Harzallah 00]. Il faut alors s'appuyer sur des démarches structurées et les outils associés pour mener à bien ces projets de réorganisation industrielle. Dans ce sens, le

guide méthodologique PETRA<sup>3</sup> basé sur les démarches de conception et de modélisation de système de production (GRAI, CIMOSA...) généralise les approches existantes pour proposer un cadre commun aux différents cas de réorganisation, quel que soit leur champ d'application [Berrah 01 03].

**Pilotage de l'entreprise et de ses relations.** Le pilotage de l'entreprise étendue pose les questions de la définition commune d'objectifs, du partage de l'information ainsi que de la décision conjointe [Chen 04] [Gunasekarana 04] [Monatéri 01]. Les nouvelles méthodologies de réorganisation évoquées précédemment sont mises en œuvre pour adapter les différents partenaires à cette nouvelle organisation. Ainsi, le modèle SCOR *Supply Chain Operations Reference model* propose une méthodologie d'implantation de la supply chain en quatre étapes (BPR, Benchmarking, Analyse des meilleures pratiques, Proposition) [SCC 03].

Dans ce contexte, les indicateurs sont mis en œuvre à tous les niveaux (stratégique, tactique, opérationnel) pour exprimer une performance financière ou technique [Bitton 90] [Cotonnec 01] [Jacot 96]. C'est autant le résultat obtenu par tout ou partie de l'entreprise qui est évalué, que la façon de l'atteindre, ce qui rend le pilotage réactif : on sait que la performance n'est pas bonne et surtout on sait pourquoi [AFGI 92] [Berrah 02a] [CPC 97] [ISO 9000 00] [Lorino 91] [Najar 94]. A chaque variable d'état dont la valeur permet de calculer la performance du système, il faut associer des variables d'action qui ont une influence sur cette valeur [Berrah 02a] [Bitton 90] [Brimson 98]. On parle du degré de contrôlabilité de la variable d'action selon qu'elle est interne ou externe pour le pilote.

Pour identifier les variables d'action pertinentes et atteindre les objectifs fixés, des typologies sont disponibles concernant les inducteurs de coût [Hronec 95] et les inducteurs de performance [Guennou 01] souvent identifiés aux 5M<sup>4</sup>. Ainsi, pour garantir un délai court, les variables d'action sont l'ordonnancement et le niveau de stocks (méthodes), la fiabilité des équipements, la flexibilité en capacité (machines)... chacune d'entre elles étant suivie par un indicateur [Ternisien 01]. Le pilotage revient alors à jouer sur les variables d'action de chaque activité pour augmenter le ratio valeur /coûts [Fitzgerald 91] [Fischer 92]. Mais la mise en place d'indicateurs suivant des critères multiples et à des niveaux différents rend leur exploitation conjointe et simultanée difficile : comment prendre une décision sur la base d'indicateurs de coût, de qualité, de délai... sachant que des décisions prises à d'autres niveaux sur d'autres parties de l'entreprise, ou à l'extérieur de l'entreprise, auront également une influence sur ces mêmes indicateurs ? **C'est en fait toute la problématique de la décision multicritère et multi-niveau qui est posée.**

Les solutions proposées pour y répondre relèvent de philosophies différentes et complémentaires. La première d'entre elles consiste à agréger les différentes performances en une seule performance qualifiée de globale, la décision étant alors plus facile à prendre. Pour agréger les performances, il est nécessaire de leur donner un sens commun malgré la diversité de leurs univers de discours. Ces pratiques trouvent des bases théoriques dans divers travaux académiques. On trouve ainsi des propositions qui :

- projettent ces performances selon un critère particulier, le coût [Harrington 90], le délai, avant de les agréger [Barker 95]. Ainsi, dans la démarche COQ (coût d'obtention de la

---

<sup>3</sup> <http://www.esia.univ-savoie.fr/labos/>

<sup>4</sup> Le fonctionnement d'un système et donc sa performance sont la conséquence de 5 familles de causes ou variables d'action : *machines, main d'œuvre, matière, milieu et méthodes.*

qualité), les non conformités sont évaluées en termes de coût et additionnées aux coûts de détection et de prévention pour établir le coût d'obtention de la qualité,

- élaborent une expression de performance multicritère. Le *Overall Equipment Effectiveness* OEE (Taux de Rendement synthétique) regroupe ainsi les données de disponibilité, qualité et productivité dans un même univers de discours [Jonsson 99],
- traduisent ces expressions sur une échelle numérique sans unité, de type  $[0,1]$  [Cérruti 92].

Ces méthodes sont bien acceptées en entreprise grâce à leur facilité de mise en œuvre et à la persistance de l'opinion que l'expression de la performance selon une seule grandeur (le coût aux niveaux stratégique et tactique ou le temps au niveau opérationnel) est suffisante pour piloter l'entreprise.

Une autre solution héritée de la méthode ABC/ABM consiste à laisser coexister des indicateurs suivant des grandeurs différentes [Kaplan 92] [Keegan 89] [Kueng 99]. C'est alors au pilote d'interpréter les différents indicateurs pour prendre une décision « équilibrée » suivant des règles qu'il est le seul à maîtriser. D'autre part, la déclinaison des tableaux de bord aux différents niveaux de l'entreprise repose sur une décomposition d'objectifs : à partir d'un objectif global défini à un niveau donné, des objectifs au niveau inférieur sont identifiés. Leur l'atteinte contribue à celle de l'objectif global [Atkinson 97]. Ces solutions, entièrement dépendantes des compétences des décideurs, sont bien diffusées dans les entreprises où existe une culture du management capable d'équilibrer la performance à un niveau donné et de la décliner au niveau inférieur sans recourir à des outils formels [Bourguignon 01].

Des propositions inspirées des deux solutions précédentes voient le jour. Ainsi Y. Ducq propose un modèle qui permet de décomposer les objectifs globaux suivant les critères *coût, qualité, délai*, indépendamment selon chaque critère. Les objectifs du niveau inférieur, définis suivant les mêmes critères se voient alors associer une mesure et un opérateur de comparaison. Ces indicateurs monocritères sont ensuite agrégés pour obtenir une performance globale selon chacun de ces critères [Ducq 99].

Quelle que soit la philosophie retenue, ces indicateurs (multicritères et multi-niveau) et leurs liens (décomposition d'objectifs, agrégation de performances) sont toujours communiqués aux décideurs sous forme de tableaux de bord [Epstein 98] [Kaplan 92] [Savall 89] [Selmer 02]. L'emploi de l'appellation « **système d'indicateurs** » pour qualifier cet ensemble d'indicateurs nécessaire au pilotage, est désormais bien admis. Mais ces indicateurs, bien que conçus dans le souci d'équilibrer la performance, sont ensuite exploités dans une logique cloisonnée, *i.e.* un indicateur est exploité par une partie de l'entreprise et pour un critère, indépendamment des autres indicateurs. Cette pratique engendre deux inconvénients majeurs. En effet chaque pilote ignore :

- en quoi les actions qu'il met en œuvre contribuent à l'atteinte des objectifs globaux,
- si ces actions contrarient ou amplifient celles mises en œuvre par les autres pilotes.

Bien que ressentis avec acuité, les problèmes tels que la dépendance entre indicateurs, leur cohérence au même niveau et à des niveaux différents, l'évolution de cet ensemble d'indicateurs, ne trouvent aujourd'hui pas de réponse entièrement satisfaisante dans le monde industriel [Clivillé 00].

Pour proposer un cadre qui fournisse des solutions à ces problèmes de l'aide au pilotage (fig. 4), il est indispensable d'**identifier les besoins du pilotage actuel en termes de système d'indicateurs**. Pour cela, il convient de définir au préalable les concepts de pilotage et d'indicateurs, ce qui fait l'objet de la deuxième section de ce chapitre.

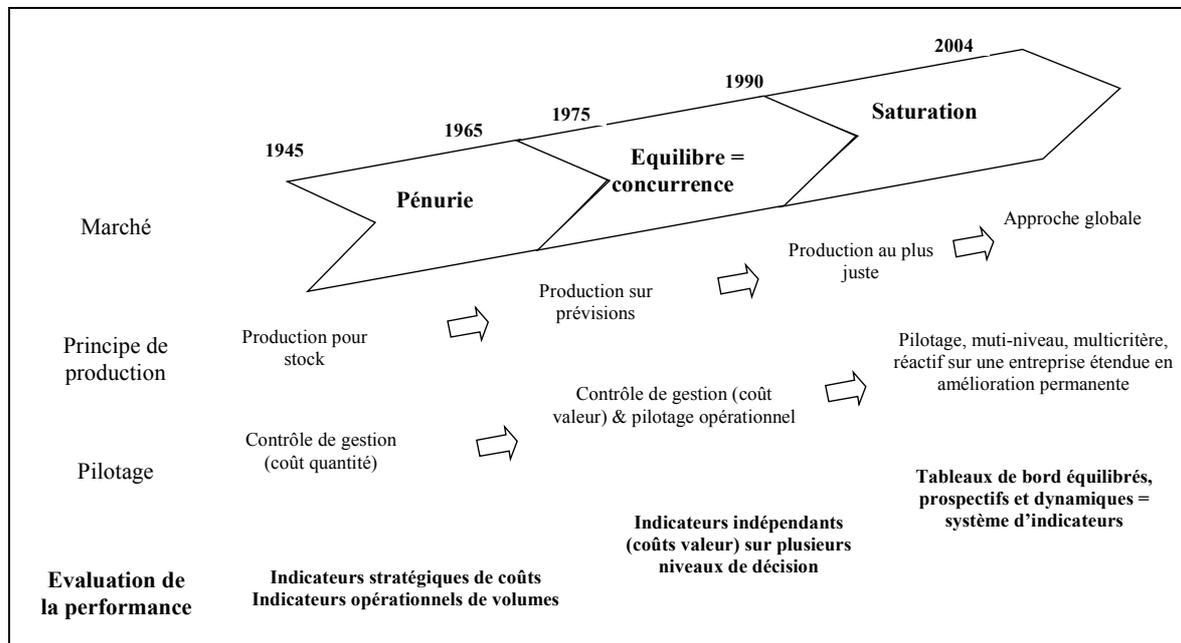


Figure 4 : L'évolution de l'évaluation de la performance (inspiré de [Berrah 02b])

### 3 Des indicateurs de performance pour l'aide au pilotage industriel

Ainsi, les dispositifs de pilotage industriel ont considérablement évolué depuis la phase de pénurie de l'après-guerre jusqu'à la phase de saturation des marchés que nous connaissons actuellement. Ce basculement du contrôle au pilotage est marqué par les transitions suivantes [Lorino 03] :

- d'une logique de constat (mesure) à une logique d'explication (diagnostic),
- de la vérification *a posteriori* de l'atteinte des objectifs à l'anticipation des dérives,
- d'une logique de stabilité des objectifs et du système de production à une logique de remise en cause permanente des objectifs et en conséquence de toute l'entreprise,
- d'une performance monocritère (coût) à une performance multicritère (coût, qualité, délai, innovation...),
- du seul facteur de performance MOD de production à l'ensemble des facteurs étendus à toute l'entreprise.

Afin de déterminer avec précision les attentes du pilotage actuel en termes de système d'indicateurs, revenons brièvement sur les notions essentielles concernant ce pilotage.

### 3.1 Le concept de pilotage industriel

#### 3.1.1 Les fondements du pilotage industriel

Intuitivement, piloter tout ou partie de l'entreprise, c'est planifier et enclencher des actions pour corriger en permanence un écart entre l'objectif visé et le résultat atteint (§ 2.2.2). Cette notion de pilotage trouve ses fondements dans des domaines tels que la cybernétique, l'automatique et le contrôle de gestion. Elle s'inspire ainsi du concept de la boucle de rétroaction que l'on retrouve en automatique avec la boucle de commande [De Larminat 93] ou en contrôle de gestion avec le suivi des réalisations [Ardoin 86]. Dans cette logique, le pilotage industriel partage un certain nombre d'analogies avec la commande en automatique. On parle ainsi :

- de *consigne* ou d'*objectif* pour caractériser les sorties espérées du système *commandé* ou *piloté*,
- de *variables d'état* ou de *variables essentielles* pour caractériser l'état du système,
- de *grandeurs de commandes* ou de *variables d'action* pour caractériser les entrées sur lesquelles agir pour modifier l'état du système,
- de *système de commande* ou de *système de pilotage* pour fixer, en fonction de l'écart constaté, les grandeurs de commande du système *commandé* ou *piloté*,
- de *perturbations* ou d'*aléas* pour caractériser les modifications de l'état du système hors des actions du système de commande,
- d'*erreur* ou de *performance* pour caractériser la correspondance entre les sorties réelles et les sorties espérées.

De la même façon, il est possible d'établir un parallèle entre le système d'indicateurs de performance et l'instrumentation de l'automatique ou les indicateurs et tableaux de bord financiers du contrôle de gestion. Le rôle du système d'indicateurs consiste à fournir des informations au système de pilotage sur l'état du système piloté. Il est analogue en cela à celui des capteurs qui renseignent le système de commande de l'état du système commandé.

Par ailleurs, la notion de contrôlabilité, définie en automatique par l'aptitude du système de commande à déterminer les grandeurs de commande en fonction de la consigne définie suivant les variables d'état, se retrouve dans le pilotage. En effet, le système de pilotage identifie les variables d'action pour agir conformément à un objectif défini selon une variable essentielle.

En outre, pour l'entreprise, le système piloté englobe toutes les activités qui assurent la transformation des produits et services. Il comprend la production, la gestion de production, la conception, l'industrialisation, les achats, les expéditions, etc. Le système de pilotage regroupe l'ensemble des moyens et flux qui élaborent les plans d'action en fonction des objectifs et des performances du système piloté. Rappelons que d'une façon générale « un plan d'action décrit les actions à mener et les moyens nécessaires pour atteindre les objectifs quantitatifs et qualitatifs d'une unité de travail » [GDT 04]. La commission indicateurs de performance de l'AFGI précise cette définition : « un plan d'action est un ensemble construit d'opérations à mener sur les variables d'action d'un processus, d'une activité, d'un système

ou d'un sous-système pour que ce dernier atteigne l'objectif visé ». Elle ajoute que dans le cadre d'un plan d'action « des moyens d'actions sont définis, c'est-à-dire les éléments actifs pour l'amélioration de la performance considérée ; ils concernent les ressources (capacité...), les processus (méthodologie...) ainsi que les échéances » [AFGI 92] [CPC 97].

Parmi les premiers à proposer ce point de vue, J. Mélése voit le pilotage comme regroupant des opérations sur deux niveaux [Mélése 91] (fig.5) :

- « la **régulation** (opération consistant à réduire les écarts entre valeurs visées et réalisées des variables essentielles en jouant sur certaines variables d'action) à divers niveaux »,
- « le **contrôle** (opération consistant à fixer la valeur visée de chaque variable essentielle et simultanément les valeurs des variables d'action correspondantes) ».

En effet, l'état du système physique connu par des mesures (valeur des variables essentielles) est comparé aux objectifs afin de décider s'il s'agit de régulation (les mesures restent dans un domaine acceptable au vu de la latitude disponible sur les variables d'action) ou de contrôle (dans les autres cas). Le système de pilotage élabore ensuite un plan d'action, qui peut jouer sur les variables d'action (régulation), les objectifs, le réglage de la boucle de régulation (contrôle) ou le système physique lui-même (on parle dans ce dernier cas d'évolution du système).

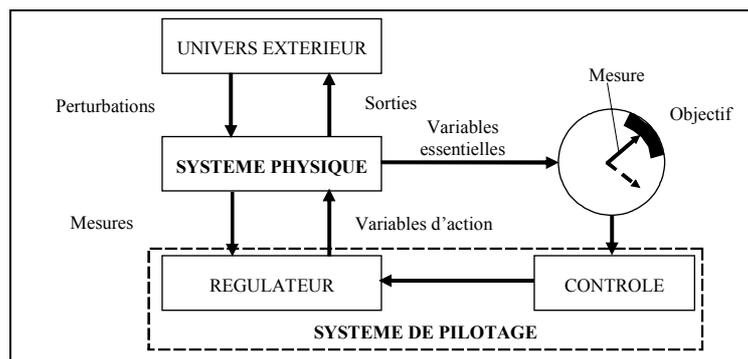


Figure 5 : Le modèle de pilotage [Mélése 91]

La contrôlabilité du système piloté est un point clé du pilotage et demande la connaissance de la loi de comportement du système piloté, qui lie les variables essentielles aux variables d'action. Sachant que dans le cas des systèmes industriels, complexes par nature, une telle loi ne peut être complètement synthétisée sous une forme mathématique, on a alors recours à un modèle empirique. Ce modèle identifie, de façon qualitative ou quantitative, les relations entre un effet (valeur prise par une variable essentielle) et ses causes (une action particulière qui fixe la valeur d'une variable d'action). Ce modèle, qualifié de modèle cause-effet, peut être :

- détaillé sur plusieurs niveaux, les causes à un niveau sont considérées comme des effets au niveau inférieur,
- plus ou moins exhaustif, généralement, seules les causes principales sont retenues selon une analyse de type Pareto.

## Exemple

La disponibilité d'un système dépend de sa fiabilité évaluée par son taux de défaillance  $\lambda$  et de sa maintenabilité évaluée par son taux de réparation  $\mu$  selon une relation quantitative  $D = \mu / (\lambda + \mu)$ . En revanche, sa fiabilité dépend du milieu d'exploitation, de la compétence de la main d'œuvre, de la politique de maintenance, etc. selon des relations qualitatives :  $\lambda$  décroît modérément quand la compétence de la main d'œuvre augmente,  $\lambda$  tend vers 0 quand une maintenance préventive conditionnelle est mise en place, etc.

Si toutes les relations cause-effet peuvent être identifiées et quantifiées, le système piloté est totalement contrôlable et le pilotage est analogue à la commande de l'automatique. Dans le cas général, le système piloté est trop complexe, et seule une partie de ces relations est formellement identifiée. Dans ce cas, le système de pilotage génère un ou plusieurs plans d'action pour atteindre les objectifs [Wilenski 83]. Il faut alors prendre des **décisions** (choisir, trier, classer parmi un ensemble de solutions [Pomerol 93]) selon un processus que H. Simon structure en quatre étapes (fig. 6).

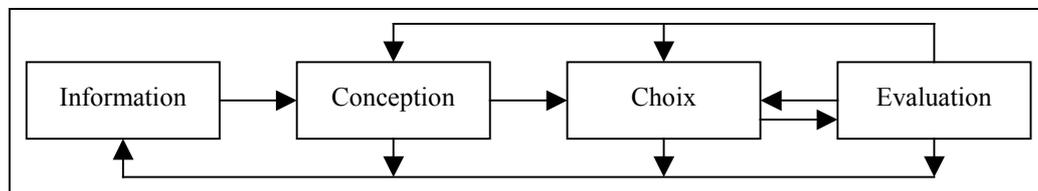


Figure 6 : Le processus de décision selon [Simon 77]

Cette prise de décision est évidemment plus facile lorsque le modèle cause effet est réduit. Dans le cas contraire, le système piloté est décomposé en entités (parties du système) plus simples à piloter, conformément aux principes de la systémique. En conséquence, les plans d'action portent sur un faible nombre de variables d'action. Leur effet sur le système piloté est donc plus facile à évaluer. En contrepartie, le système de pilotage doit garantir leur cohérence : les actions lancées à tous les niveaux et sur toutes les entités ne doivent pas être contradictoires. On parle alors de décomposition des objectifs de l'entreprise, du plus global qui concerne tout le système piloté sur le long terme, au plus local sur le très court terme qui ne concerne qu'une entité identifiée et contrôlable [Ducq 99] [Lorino 91] [Mélèse 91]. L'atteinte conjointe des objectifs locaux permet ainsi l'atteinte de l'objectif global associé.

La décomposition des objectifs conduit à distinguer différents types de pilotage suivant le niveau où sont définis l'entité à piloter et la nature l'objectif à atteindre. Différentes typologies, plus ou moins détaillées, sont alors proposées. Le pilotage est ainsi caractérisé selon les gestionnaires par sa déclinaison à un niveau donné (stratégique, tactique et opérationnel) [Lorino 01b], et selon les technologues par son horizon (planification, programmation, enclenchement, supervision) [Dindeleux 92] [Geneste 95].

Par ailleurs, nous considérons deux types de pilotage, suivant qu'il consiste à :

- mettre en œuvre des processus existants pour atteindre un objectif de production. Il s'agit du pilotage de processus structurés, aux niveaux tactique et opérationnel. Ce pilotage correspond au pilotage technique défini par l'AFGI [AFGI 92]. L'objectif à atteindre est un objectif **maîtrisé** [CPC 97]. Par exemple, un responsable d'atelier a pour objectif de produire 150 façades de meuble de cuisine pour la semaine 29. Il lance cet OF, puis vérifie sa réalisation et, en cas d'écart (140 façades réalisées), prend la décision de relancer 10 façades,

- remettre en cause ces processus pour atteindre un objectif d'amélioration de la production. Il s'agit d'un pilotage concernant des processus semi-structurés ou non-structurés [Elmahmedi 97] aux niveaux stratégique et tactique. Ce pilotage correspond au pilotage économique défini par l'AFGI. L'objectif à atteindre est un objectif de **progrès** [CPC 97]. Par exemple le responsable Qualité d'une entreprise met en œuvre un plan d'action spécifique pour atteindre un Taux de service de 97,5%, quand la mesure actuelle est de 93%.

### 3.1.2 Quelques définitions du pilotage industriel

Dans sa dimension économique, le pilotage industriel oriente les moyens disponibles en vue de l'amélioration de la performance. Cette amélioration consiste aussi bien à *mieux atteindre* un objectif existant qu'à atteindre un *nouvel objectif*. Les objectifs à atteindre sont définis aux niveaux stratégiques et tactiques de l'entreprise et concernent tous les critères de performance. On retrouve là le problème de la réorganisation de tout ou partie de l'entreprise suivant une démarche structurée, telle que le BPR, le *Hoschin Kanri* ou le CIP (§ 2.3.3). La mise en œuvre d'une réorganisation industrielle peut être appréhendée comme un processus particulier de l'entreprise et doit donc être pilotée comme tel [Berrah 01] [ISO 9000 00]. Il faut alors définir les objectifs des différentes activités, exécuter et enchaîner ces activités afin d'atteindre l'objectif stratégique fixé à l'entreprise.

Concernant le pilotage technique, le système physique concerné peut être les ateliers, les lignes de production, les processus opérationnels... et doit atteindre des objectifs en termes essentiellement de quantité, délai et qualité. Ainsi pour l'APICS *American Production and Inventory Control Society*, le pilotage d'atelier est défini comme « le groupe d'activités directement responsable de la gestion de la transformation d'ordres de fabrication planifiés en pièces sorties de l'atelier » [Melnyk 87]. Cette gestion est déclinée sur plusieurs niveaux à horizon décroissant [Doumeingts 90] où l'on distingue la gestion prévisionnelle (planification, programmation, ordonnancement), conformément à l'approche MRP II, et le pilotage temps réel (conduite et commande) [Dindeleux 92] proche de la commande en automatique. L'information nécessaire est perçue par des capteurs (physiques ou humains) placés sur le système physique. Cette information est reportée par la suite vers les niveaux supérieurs.

Plus précisément, B. Grabot identifie le rôle du pilotage d'atelier à celui de la régulation, qui regroupe l'ensemble des activités permettant la production à court terme dans l'atelier [Grabot 96] :

- en accord avec les objectifs établis par la gestion de production,
- en adaptant la production aux aléas pouvant survenir au niveau de l'atelier ou de son environnement, et ce en modifiant certaines variables d'action (ordonnancement, gestion de la capacité, sous-traitance, etc.).

Considérant le système piloté dans sa plus large acception (toutes les entités qui interviennent dans le cycle de vie du produit), l'AFGI propose une définition du pilotage qui englobe les deux niveaux précédents. Le pilotage est vu comme étant « un mécanisme multi-niveau, hiérarchisé (chaque niveau cadrant le suivant) et bouclé (répercussion et correction des écarts). Ces niveaux, qui ne sont pas à confondre avec les niveaux hiérarchiques de l'organigramme de l'entreprise, sont chacun caractérisés par leur horizon (visibilité), leur période (réactualisation) et leur maille (résolution). Le processus consiste alors, niveau par

niveau, par cadrages successifs, à préparer formellement, progressivement, en cohérence et avec une exécutabilité croissante les conditions de la réalisation pour se terminer par l'émission d'ordres exécutoires vers le processus physique, il est fait de comparaisons, d'itérations, de simulations..., et, pour atteindre les objectifs fixés, nécessite entre autres des moyens de mesure et d'évaluation, (indicateurs ou cadrans) et des moyens d'action (variables de décision ou leviers) » [AFGI 92]. Cette définition considère le pilotage dans sa globalité et met l'accent sur la nécessité de le déployer sur toutes les parties et à tous les niveaux de l'entreprise, tout en conservant une **cohérence** dans la préparation des actions (ordres exécutoires). Ces actions doivent donc être non contradictoires, *i.e.* leur mise en œuvre pour atteindre un objectif particulier ne doit pas contrarier l'atteinte d'un autre objectif.

Ainsi, conformément à la définition de l'AFGI, ces actions sont regroupées dans un plan d'action (§ 3.1.1). Dans ce sens, nous identifions le pilotage aux différentes transformations du plan d'action, *i.e.* sa génération et son choix (cf. fig. 6), puis sa mise en œuvre et sa clôture qui utilise alors des « indicateurs et cadrans ». Le choix et la mise en œuvre d'un plan d'action reviennent le plus souvent à choisir dans une liste d'alternatives le plan censé permettre la meilleure atteinte de l'objectif global. Ce choix et cette mise en œuvre s'effectuent en général à partir de l'ensemble des expressions de performance délivrées par l'ensemble des « indicateurs et cadrans ». On emploie alors les techniques d'aide à la décision en univers multicritère [Pomerol 93] [Roy 85].

Pour terminer cette revue des définitions du pilotage industriel, soulignons la nécessaire identification du modèle cause-effet qui est à la base du pilotage.

Ce modèle étant par essence, plus ou moins conforme à la réalité, le système de pilotage va **apprendre** en utilisant ce modèle cause-effet et donc l'améliorer. Aussi, pour P. Lorino : « piloter c'est définir et mettre en œuvre des méthodes qui permettent d'apprendre ensemble à agir de manière performante et de plus en plus performante ». Il faut pour cela accomplir deux fonctions complémentaires :

- déployer la stratégie en règles d'action opérationnelles (déploiement),
- capitaliser les résultats et les enseignements de l'action pour enrichir la réflexion sur les objets (retour d'expérience) [Lorino 01a].

Autrement dit, la pratique du modèle cause-effet révèle ses limites (variables d'action ignorées, effets de ces variables mal évalués, liens négligés) ce qui permet d'améliorer ce modèle [Argyris 03].

### 3.1.3 La structure de pilotage

Dans ce cadre, la notion de centre de décision<sup>5</sup> permet d'identifier l'entité du système de pilotage qui, à un niveau donné, prépare les actions ou exécute les ordres. Il est vu comme étant « un ensemble d'activités d'une fonction donnée, à un niveau temporel donné »

---

<sup>5</sup> E. Dindeleux, parle de **centre de conduite** qui à partir de contraintes, tâches prévues, information, élabore une décision concernant le point de pilotage qui met en relation un stock et une transformation [Dindeleux 92]. C. Berchet propose la notion très proche de **centre de pilotage** « *structure organisée et autonome, dépendante de la stratégie de l'entreprise, ayant un pouvoir décisionnel, associée à une entité à piloter et disposant d'un ensemble de ressources nécessaires à la mise en place d'actions pour atteindre un ou plusieurs objectifs définis dans le cadre global de l'entreprise* » [Berchet 00].

[Bitton 90] [Doumeingts 83], qui pilote localement chaque entité sur la base d'un objectif déduit de l'objectif global. Les centres de décision dépendent les uns des autres pour assurer la cohérence des ordres exécutoires avec les objectifs. L'ensemble de ces centres et de leurs liens de dépendance forment alors une structure de pilotage [Pujo 02]. Ces liens peuvent être de :

- **subordination**, il s'agit alors de décision et de retour d'information, lorsque les centres de décision appartiennent à des niveaux décisionnels différents. Ce type de lien assure la cohérence « verticale » du pilotage, l'atteinte des objectifs locaux contribue à celle de l'objectif global,
- **coordination**, il s'agit alors de prise de décision commune (co-décision) ou **communication**, il s'agit d'échanges d'information concernant les objectifs, actions enclenchées, expressions de performance [Monteiro 01]. Les objectifs appartiennent à des entités de même niveau, ce qui assure la cohérence « horizontale » du pilotage, les objectifs d'un même niveau ne sont pas contradictoires entre eux.

Il est bien évident que ces différents centres de décision utilisent des indicateurs conformément aux définitions du pilotage technique et économique et que les liens mis en place dans cette structure doivent se retrouver au niveau des indicateurs aussi bien dans la définition de leurs objectifs que dans les expressions de performance qu'ils fournissent à la structure de pilotage. Les différentes approches de pilotage rencontrées dans la littérature caractérisent cette structure selon le nombre de niveaux décisionnels, l'existence de liens de subordination, communication ou coordination pour en proposer différentes déclinaisons [Coudurier 82] [Dindeleux 92] [Massotte 00] [Pujo 02] [Trenteseaux 96] (tableau 1 et fig. 7).

Déclinaison	Nombre de niveaux	Liens de subordination	Liens de coordination	Liens de communication
Centralisée	1	oui	non	non
Hiérarchisée	> 1	oui	non	non
Coordonnée	> 1	oui	oui	non
Distribuée	> 1	oui	non	oui
Distribuée supervisée	> 1	oui	oui	oui
Décentralisée (autonome)	1	non	non	oui

*Tableau 1 : Caractérisation de la structure de pilotage*

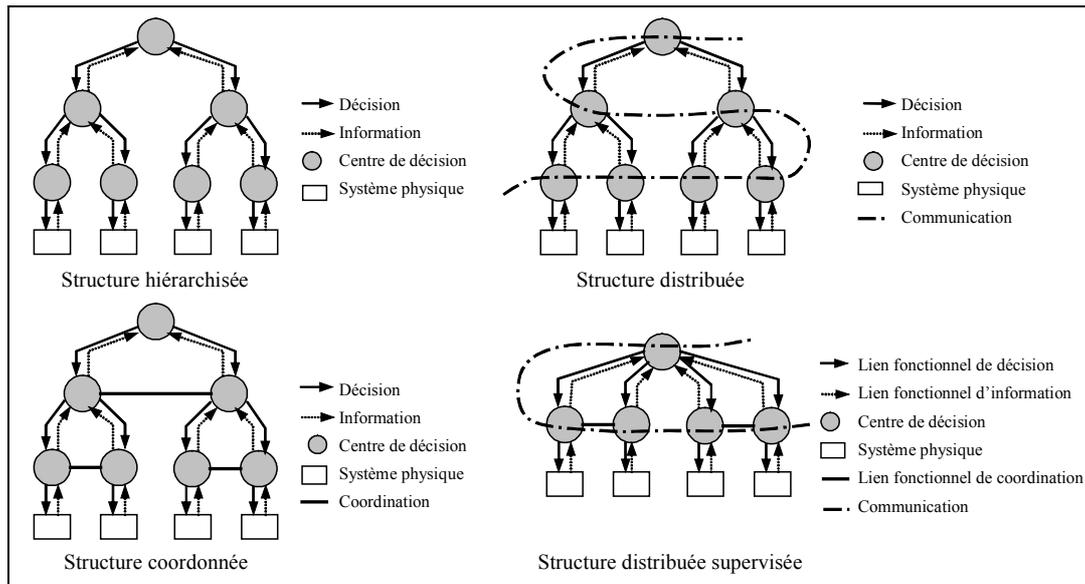


Figure 7 : Les structures de pilotage [Pujo 02]

Sans détailler toutes ces structures, remarquons que :

- la structure hiérarchisée n'autorise que des relations de subordination, ce qui rend la coordination dépendante du centre de décision supérieur [Mesarovic 80],
- la structure distribuée ou décentralisée ne permet que des échanges d'information,
- la structure coordonnée est retenue par de nombreux auteurs comme étant bien adaptée pour prendre en compte la cohérence verticale, tout en permettant la coordination nécessaire à la prise en compte de la cohérence horizontale [Saaty 80] [Roy 98] [Berchet 00] [Monteiro 01].

### 3.1.4 Bilan

Pour un objectif stratégique donné, retenons que piloter revient à réaliser les quatre actions suivantes, conformément à la roue de Deming :

- générer un plan d'action dans un environnement donné (*Plan*),
- mettre en œuvre ce plan d'action (*Do*),
- contrôler le système piloté pendant la mise en œuvre et au terme du plan d'action (*Check*),
- réagir suite à ce contrôle (*Act*).

La contrôlabilité du système piloté nécessite alors la mise en place d'un instrument capable :

- d'exprimer sa performance par rapport à un objectif global,
- d'indiquer à la structure de pilotage les variables d'action pour améliorer cette performance.

Ces informations sont les expressions de performance délivrées par le système d'indicateurs.

## 3.2 Le système d'indicateurs pour le pilotage industriel

### 3.2.1 L'indicateur de performance

La définition que nous adoptons, homologuée par l'AFNOR, a été formulée par la commission indicateurs de performance de l'AFGI : « Un indicateur de performance est une donnée quantifiée, qui mesure l'efficacité et / ou l'efficacité de tout ou partie d'un processus ou système (réel ou simulé) par rapport à une norme, un plan ou un objectif déterminé et accepté dans le cadre d'une stratégie d'entreprise » [Fortuin 88] [AFGI 92]. D'autre part, pour positionner l'indicateur dans son environnement, il faut lui associer :

- une variable d'action déterminante,
- un plan d'action ou une action de celui-ci.

Dans ce cadre, le rôle de l'indicateur est aujourd'hui bien défini. Il « autorise fondamentalement une boucle de retour dans le processus de décision » [Bitton 90] appelée boucle de pilotage. Sur la base de l'information retournée, le centre de décision enclenche ou pas une action sur la ou les variables d'action considérées : en fonction de la performance constatée, un plan d'action est enclenché sur les variables d'action dont l'effet est ensuite mesuré... et une nouvelle boucle peut se dérouler (fig. 8).

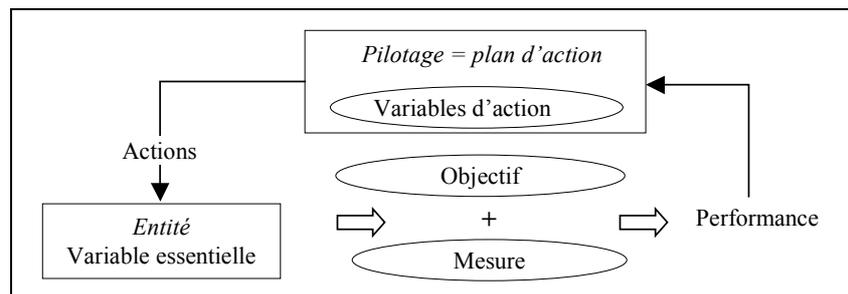


Figure 8 : La boucle de pilotage à travers l'indicateur (inspiré de [Berrah 97])

Dans ce sens, nous retenons la proposition de voir l'indicateur comme un triplet [Bitton 90] qui associe trois paramètres : un **objectif**, une **mesure** et une **variable essentielle** [Berrah 02b]. Cette variable (une quantité, un coût, un délai) est à observer *a posteriori* pour vérifier le degré d'atteinte de l'objectif assigné au système. Les expressions de l'objectif et de la mesure sont comparées pour délivrer une expression de la performance. Mais pour assurer la contrôlabilité, connaître l'état du système ne suffit pas, il faut interpréter cette expression de performance et lancer, en fonction de cette interprétation, les actions nécessaires sur les variables d'action identifiées.

Ainsi, d'une façon générale, un objectif peut être atteint en jouant sur la *main d'œuvre*, le *milieu*, les *méthodes*, les *machines* ou la *matière* pour reprendre la typologie des 5M, soit autant de familles de variables d'action. Dans l'approche par niveaux généralement retenue [Van Gigch 91], ces variables d'action d'un niveau donné deviennent les variables essentielles pour définir les objectifs des centres de décision de niveau inférieur, sur des horizons plus rapprochés [Lorino 01b]. Les nouveaux indicateurs du niveau inférieur remplissent alors deux fonctions :

- une fonction rétrospective, qui analyse le résultat de l'évolution d'une entité selon une variable essentielle ; on parle alors d'**indicateur de résultat** qui évalue le degré d'atteinte d'un objectif global à son horizon ; dans la figure 9, l'indicateur A1 joue le rôle d'indicateur de résultat pour le centre de décision de niveau N,
- une fonction prospective, qui analyse l'évolution d'une entité pendant la mise en œuvre du plan d'action ; on parle alors d'**indicateurs de processus** qui jalonnent le plan d'action (grâce à la définition d'objectifs locaux dont l'horizon est antérieur à celui de l'objectif global) et permettent de réagir avant la fin de celui-ci ; dans le tableau 2, les indicateurs A1, A2, A3 sont des indicateurs de processus pour le centre de décision de niveau N+1.

Niveau décisionnel	Indicateur de résultat	Indicateurs de processus
Niveau N+1	A B	A1 A2 A3
Niveau N	A1	A11 A12 A13
Niveau N-1	Etc.	

Tableau 2 : Le rôle conjoint de l'indicateur de performance [Lorino 91]

Un centre de décision dispose alors d'un indicateur de résultat et de plusieurs indicateurs de processus liés à cet indicateur de résultat. Dans ce cas, la boucle de pilotage associée à l'indicateur de résultat doit se décliner en autant de boucles locales qu'il y a d'indicateurs de processus identifiés [Clivillé 01a]. Ces boucles locales ont alors des liens de :

- coordination, si les performances des entités de même niveau sont dépendantes,
- subordination, si la performance d'une entité à un niveau donné contribue à celle du niveau supérieur,

qui doivent apparaître dans la structure de pilotage et entre les indicateurs mis en place.

Le fascicule (FD X 50-171) capitalise ces différents aspects de la norme [ISO 9000 00] et formalise l'**indicateur** au moyen des dix paramètres suivants :

- l'identification de l'indicateur,
- le champ de la mesure,
- l'objectif,
- les critères,
- les paramètres,
- le mode de calcul, les responsabilités et la périodicité de la collecte des informations,
- le mode de communication,

- l'exploitation des informations,
- les responsabilités et modalités de l'analyse des indicateurs et/ou TdB.

Constatons alors que dans le cadre actuel du pilotage, les indicateurs sont multiples, soumis à des liens de coordination et de subordination et doivent garantir conjointement que les différentes actions entreprises pour atteindre l'objectif global ne sont pas contradictoires. Il est donc naturel de les considérer en tant que système, affiché sous forme de tableaux de bord, ce qui fait alors apparaître un certain nombre de problèmes inexistantes dans la pratique taylorienne [De Toni 97].

### 3.2.2 Les indicateurs dans le cadre du pilotage : vers un cahier des charges du système d'indicateurs

Comme tout système de l'entreprise, le système d'indicateurs n'est pas livré « clés en main » pour la mise en œuvre du pilotage, pas plus qu'il ne serait invariant quelles que soient les évolutions de son environnement [Crawford 90]. Pour mettre en place un tel système revenons à sa vocation qui est d'aider à la transformation d'un plan d'action conformément à un objectif global. Il d'agit donc :

- en premier lieu, de délivrer des expressions de performance afin de :
  - générer et choisir le plan d'action pour atteindre un objectif global ce qui correspond à une phase de **conception** du système d'indicateurs qui n'existait pas préalablement à la définition de cet objectif global,
  - mettre en œuvre le plan d'action et de le clôturer, ce qui correspond à une phase d'**exploitation** du système d'indicateurs conçu dans la phase précédente,
- en second lieu de s'adapter aux changements de l'environnement du système d'indicateurs lors de la transformation du plan d'action, ce qui correspond à une phase de **révision** du système d'indicateurs, simultanée de sa phase d'exploitation.

Chacune de ces phases pose à son tour un certain nombre de problèmes. Il convient de les détailler dans le cadre d'une structure de pilotage, en particulier au travers des liens de subordination et de coordination évoqués dans le paragraphe précédent. Dans ce sens, nous considérons les différentes structures centralisée, hiérarchisée, autonome comme des cas particuliers de la structure coordonnée qui rassemble tous les types de lien : subordination, coordination, communication. Par ailleurs, nous considérons qu'aucune action externe au plan d'action n'a d'effet sur les expressions de performance délivrées par le système d'indicateurs.

#### 3.2.2.1 La conception du système d'indicateurs

Si le système d'indicateurs est un ensemble d'indicateurs exploités pour une finalité commune, l'aide au pilotage, il peut être vu comme une structure composée d'indicateurs ayant entre eux un certain nombre de liens. La conception repose donc sur :

- d'une part, la conception des indicateurs eux-mêmes, qui est aujourd'hui bien maîtrisée dans le sens où il s'agit de définir le triplet (variable, objectif, mesure) et de lui associer un opérateur de comparaison (objectif, mesure) pour exprimer la performance,

- d'autre part, l'identification des liens entre les indicateurs qui pose encore aujourd'hui un certain nombre de problèmes sur lesquels nous revenons dans le paragraphe suivant.

### 3.2.2.1.1 L'identification des liens entre les indicateurs

Concernant les liens entre indicateurs, nous avons vu précédemment qu'un lien de subordination existe entre deux indicateurs de niveaux différents lorsque la variable essentielle de l'indicateur de niveau inférieur, considéré comme local, est vue comme une variable d'action vis-à-vis de l'indicateur de niveau supérieur, considéré comme global. Les variables d'action sont identifiées grâce au modèle cause-effet et sous la forme d'un arbre de variables [Berge 73]. Au niveau stratégique, ces variables sont les Facteurs Clés de Succès et de Performance FCS/FCP<sup>6</sup> de l'entreprise. Au niveau tactique, on retrouve les facteurs de performance et enfin au niveau opérationnel les facteurs de progrès [AFGI 92] [Berrah 97] [Lorino 01b]. Deux exemples de liens de ce type sont bien connus :

- le lien indicateur de résultat / indicateur de processus pour améliorer la contrôlabilité du système piloté (fig. 8),
- le lien indicateur synthétique / indicateur local pour construire une expression de performance agrégée.

#### *Exemple*

Pour une variable essentielle « **indisponibilité d'un équipement** », les variables d'action identifiées sont les suivantes : « **changements d'outil** », « **contrôle qualité** », « **stock** », « **pannes** », « **opérateurs** ».

Mais l'identification des liens de subordination n'est pas suffisante. En effet, il est bien connu que l'atteinte de plusieurs objectifs peut mener à des actions contradictoires suivant certaines variables d'action. Un lien de coordination existe alors entre des indicateurs ayant de tels objectifs. L'arborescence précédente se transforme pour former un graphe des relations cause-effet. On a alors recours à des outils cognitifs tels que la carte des connaissances (*cognitive map*) qui identifie les liens entre variables qu'elles soient de même niveau ou de niveau différent [Eden 88].

#### *Exemple*

Quatre liens de coordination entre les variables de l'exemple précédent sont identifiés expérimentalement dont le plus important concerne les variables (**opérateurs - changements d'outils**) [Dupas 03]. L'effet d'une action sur ces deux variables est supérieur à la somme des effets sur chacune d'entre elle.

A ce stade, le seul lien entre les membres du triplet concerne la variable, le lien entre indicateurs ne peut donc pas être quantifié. Cette absence de quantification pose problème pour :

---

<sup>6</sup> Les FCS ont un impact décisif sur les positions de compétitivité dans un secteur donné. Ils représentent les enjeux de succès auprès de la **clientèle**. Ce sont généralement les critères de performance externe (orientés clients). Les FCS sont des éléments sur lesquels se fonde prioritairement la lutte concurrentielle. Ils sont à rechercher dans l'environnement au niveau des types de clients [Lorino 03] [Garibaldi 01]. Les FCP traduisent les FCS au niveau des processus (ou fonctions) de l'entreprise. Ils représentent des enjeux de performance **interne**, non perçus par le client. Un FCP est nécessairement lié à un FCS [AFGI 92].

- générer un ou plusieurs plans d'action, ce qui suppose de connaître le détail de l'état espéré sous forme d'objectifs associés aux différentes variables identifiées,
- choisir un plan d'action et suivre sa mise en œuvre grâce à une performance synthétique.

Dans ces conditions, le système de pilotage pourra s'appuyer sur :

- des tableaux de bord constitués d'indicateurs de performance qui renseignent du degré d'atteinte des objectifs par une comparaison de la mesure à l'objectif,
- des performances agrégées qui synthétisent les informations précédentes pour simplifier les choix du décideur.

### 3.2.2.1.2 *La caractérisation des liens entre indicateurs*

Pour caractériser les liens entre indicateurs, il faut donc définir :

- d'une part, des objectifs associés aux variables, cohérents avec l'objectif global, *i. e.* l'atteinte des objectifs locaux permet l'atteinte de l'objectif global, ce qui est désigné comme étant la **décomposition des objectifs**,
- d'autre part, des opérateurs permettant de synthétiser les expressions de performance délivrées par les indicateurs en une expression agrégée qui est communément désignée comme étant l'agrégation des performances.

En fait, ces deux points sont indissociables, l'agrégation s'appuyant sur la décomposition qui elle-même est ressentie comme l'opération critique pour caractériser les liens de subordination.

La définition des objectifs locaux est communément identifiée à la **décomposition** (ou déclinaison ou déploiement) d'un objectif global qui considère des indicateurs ayant des seuls liens de subordination. Le résultat de cette décomposition se présente sous la forme d'un arbre d'objectifs. La décomposition des objectifs est une démarche descendante qui s'effectue du niveau stratégique vers le niveau opérationnel. Certaines décompositions génériques sont parfois proposées, pour les objectifs de production [Grabot 98] ou ceux de la *supply chain* [SCC 03]. Dans le cas général, elle reste spécifique et repose sur les outils d'analyse causale, de type diagramme d'Ishikawa et méthode des 5 pourquoi [Ohno 88] [Chauvel 00] ou QFD *Quality Function Deployment* [Chan 02]. Il s'agit alors d'associer un objectif à tout ou partie des variables identifiées.

#### **Exemple**

Pour les variables identifiées dans l'exemple précédent, nous avons les quatre objectifs suivants : **temps changements d'outil** = 0.1 h/jour , **temps contrôle qualité** = 0.05 h/jour, **temps pannes** = 0.5 h/j, **temps opérateurs** = 0.25 h/jour.

Dans la décomposition des objectifs, les liens de coordination ne sont pas pris en compte. Pour P. Lorino, si deux indicateurs ont un lien de coordination, c'est que les décompositions respectives de leurs objectifs présentent des intersections. Il propose alors le concept de « nuage de relations cause-effet » (fig. 9), où la subordination entre les objectifs locaux et un objectif global est nuancée : l'objectif local est rattaché à un seul objectif global (zone

centrale d'un nuage) ou à deux objectifs globaux différents (zone d'intersection entre deux nuages).

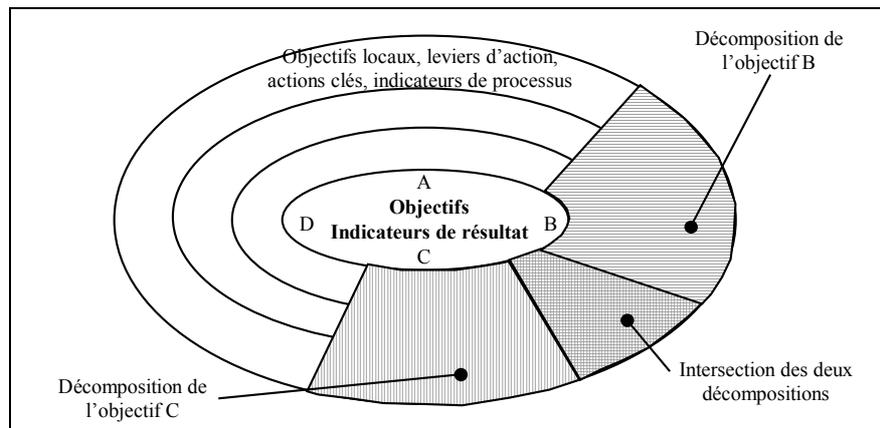


Figure 9 : La dépendance des variables d'action d'après [Lorino 01a]

Concernant l'agrégation, différentes propositions sont faites. Lorsque les indicateurs sont peu nombreux, définis selon le même univers de discours et que leurs liens sont faciles à appréhender (addition de coûts, de quantités, de non-qualités), un centre de décision peut estimer la performance globale par expertise. Mais lorsqu'ils sont nombreux, définis sur plusieurs niveaux et que leurs relations sont plus complexes, une telle estimation est plus délicate. Devant la multiplicité des cas envisageables, les différents domaines d'application et la nature de la connaissance disponible pour établir cette relation, de nombreuses approches ont vu le jour pour réaliser cette agrégation [Pomerol 93]. Si les plus employées aujourd'hui dans le domaine du Génie Industriel utilisent des mécanismes basés sur des opérateurs, d'autres approches sont envisageables telles que la théorie des sous-ensembles flous et des possibilités, les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones [Valet 01]. Pour le cas du système d'indicateurs, la difficulté dans le choix du mécanisme retenu tient à la prise en compte des performances locales considérées pour tenir compte à la fois de leurs liens de :

- subordination ; quelle est la contribution d'une performance à la performance agrégée ?
- coordination ; la contribution de deux (ou plus) performances à la performance globale est-elle différente de la somme des contributions locales ?

Au terme de sa conception, le système d'indicateurs est structuré sous forme d'indicateurs situés par niveau ayant des liens de subordination et de coordination avec les autres indicateurs. Ces liens sont quantifiés par la décomposition des objectifs et l'agrégation des expressions de performance. Nous concluons donc que les trois problèmes rencontrés lors de la conception du système d'indicateurs sont :

- la **conception** de l'indicateur en tant que tel, qui est aujourd'hui bien maîtrisée,
- la **décomposition** des objectifs et l'**agrégation** des performances qui ne sont aujourd'hui que partiellement traitées.

### 3.2.2.2 L'exploitation du système d'indicateurs

Le système d'indicateurs élabore les expressions de performance qui sont ensuite affichées sous forme de tableaux de bord que ce soit pour générer, choisir, mettre en œuvre ou clôturer

un plan d'action. De nombreux travaux ont permis de dégager les points clés de ces tableaux de bord tels que leur conception, les médias utilisés, leur localisation, la périodicité de mise à jour, l'animation des centres de décision etc. et en particulier la nécessité de respecter deux contraintes [Greif 98] [Iribarne 03] [ISO 9000 00] [Lorino 91, 03] :

- les tableaux de bord doivent être faciles à interpréter, ce qui se traduit par la réduction du nombre de variables d'action associées à un indicateur donné,
- les liens entre les indicateurs doivent être peu nombreux et bien identifiés, ce qui est une contrainte lors de la décomposition des objectifs,

et d'éviter deux écueils :

- la surinformation ; si on dispose de trop d'indicateurs aux nombreuses relations, la prise de décision est difficile et l'apprentissage impossible ; dans ce cas le recours à des indicateurs agrégés est une solution,
- la sous information qui nuit à la réactivité en conduisant au pilotage cloisonné de l'entreprise taylorienne.

Concrètement, un système d'indicateurs délivre au pilotage des informations essentielles (de l'ordre d'une dizaine) pour prendre les décisions. Il peut pour cela retenir un filtrage des informations (on se limite aux causes produisant 80% des effets sur la base d'une analyse de Pareto) et/ou une agrégation d'informations sous une forme plus synthétique.

### 3.2.2.3 La révision du système d'indicateurs

Le dernier problème inhérent au système d'indicateurs concerne sa révision. Les besoins de contrôle du système piloté changent durant la mise en œuvre du plan d'action pour trois raisons principales.

- Les besoins de pilotage évoluent durant la mise en œuvre du plan d'action. Une fois l'action réalisée il n'est plus utile d'afficher l'expression de performance qui permettait son suivi,
- L'environnement du système d'indicateurs évolue naturellement pour des raisons indépendantes du plan d'action. Il est bien évident que si un des éléments essentiels sur lequel est basé le pilotage, tels que le système physique, la structure de pilotage, l'objectif stratégique, etc. est remis en cause, le modèle cause-effet doit l'être également et donc le système d'indicateurs.
- Les liens de causalité à l'origine du système d'indicateurs sont mieux connus et évoluent en fonction de cette connaissance. Le suivi par le système d'indicateurs de la mise en œuvre du plan d'action permet tout d'abord d'ajuster la décomposition des objectifs en ajoutant, modifiant ou supprimant des objectifs. En outre, l'analyse des données passées permet de préciser les contributions des performances à la performance globale et d'ajuster l'agrégation des performances.

### 3.2.3 Bilan

Conformément aux § 3.1 & 3.2, nous considérons les seuls aspects du pilotage relatifs aux plans d'action. Dans ce contexte, piloter tout ou partie de l'entreprise consiste à respectivement générer, mettre en œuvre, clôturer et reconsidérer des plans d'action pour atteindre des objectifs globaux. Le système d'indicateurs doit délivrer et agréger des expressions de performance dans ce sens.

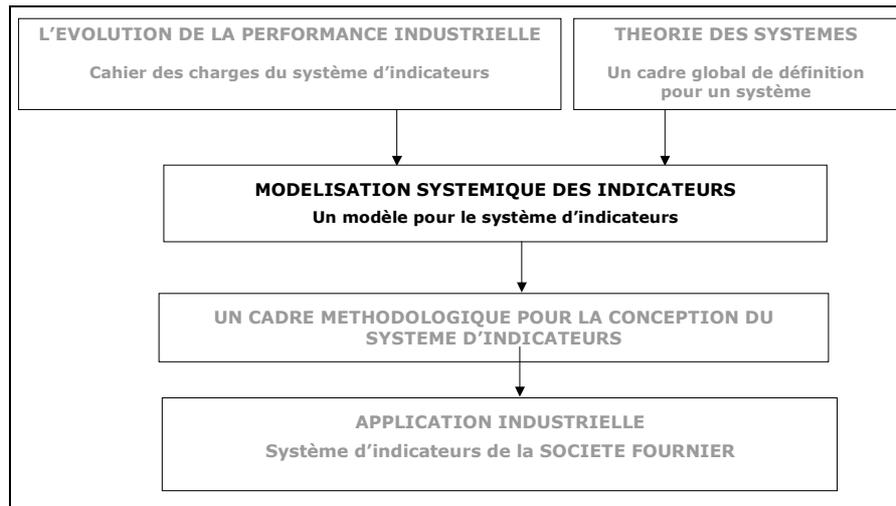
En particulier, lors de la conception du système d'indicateurs, d'une part les indicateurs sont définis conformément à l'objectif global et l'arbre des variables associé ; d'autre part, une performance globale est exprimée à partir des différentes expressions de performance considérées. Lors de son exploitation, le système d'indicateurs élabore les différentes expressions de performance rattachées aux indicateurs du système selon l'horizon de leurs objectifs respectifs. Enfin, à l'horizon de l'objectif global, le système d'indicateurs élabore l'expression de la performance globale. Si les expressions élaborées lors de l'exploitation diffèrent des expressions élaborées lors de la conception, ou si l'environnement a connu d'importantes évolutions, la révision du système d'indicateurs peut être envisagée. Elle peut être totale ou partielle, voire concerner l'objectif global.

Dans ces conditions, pour un objectif global et dans un cadre stratégique donné, la structure de pilotage attend du système d'indicateurs les fonctionnalités suivantes :

- exprimer la performance et l'agréger, pour un plan d'action donné,
- réviser le système d'indicateurs lorsque la performance n'est pas satisfaisante du point de vue du pilotage.

## 4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les besoins du pilotage industriel et montré en quoi le système d'indicateurs était une réponse appropriée. Une analyse bibliographique sur la performance industrielle nous a permis de comprendre, d'une part, dans quelle mesure les évolutions de l'environnement industriel avaient amené l'entreprise à s'adapter pour demeurer performante, et, d'autre part, quelles étaient aujourd'hui les exigences du pilotage. Compte tenu des limites de l'instrumentation actuelle en termes d'indicateurs, les besoins de l'aide au pilotage ont été analysés. Nous avons alors conclu sur la nécessité de considérer désormais l'ensemble des indicateurs mis en place par l'entreprise comme un système d'indicateurs. Cette nouvelle problématique a été décomposée en trois sous problèmes que sont la conception, l'exploitation et la révision de ce système d'indicateurs indissociables de la génération, la mise en œuvre et la clôture des plans d'action. Le chapitre suivant sera donc consacré à la définition d'un cadre global satisfaisant ces besoins sur la base d'un état de l'art concernant les propositions actuelles en termes de système d'indicateurs.



*Positionnement du contenu du chapitre II dans notre plan de thèse*

## **Chapitre II : Un modèle systémique pour le système d'indicateurs de performance**

### **1 Introduction**

La mission du pilotage est de définir et exécuter un certain nombre d'actions en vue d'atteindre les objectifs fixés dans l'entreprise. Pour ce faire, il faut évoluer les plans d'action en fonction des performances délivrées par le système d'indicateurs. Plus précisément et conformément aux conclusions du chapitre précédent, le système d'indicateurs doit :

- élaborer des expressions de performance relativement à l'évolution des plans d'action, que ce soit pour leur génération, leur choix, leur mise en œuvre ou leur clôture,
- permettre sa propre révision selon les évolutions de son environnement.

L'objet de ce chapitre est la définition d'un modèle qui respecte ces deux points fondamentaux. Dans ce sens, après avoir présenté les modèles existants dans la littérature, nous nous appuyons sur la théorie des systèmes pour en décliner les principales notions sur le système d'indicateurs de performance. Un retour sur la littérature dans ce domaine nous permettra, à la lumière de ce modèle systémique, de cibler les principaux besoins traités actuellement et ceux qui doivent faire l'objet de développements plus approfondis.

### **2 Revue bibliographique concernant les systèmes d'indicateurs de performance**

De nombreux travaux traitent des problématiques liées respectivement à la conception, à l'exploitation ainsi qu'à l'évolution des systèmes d'indicateurs de performance. Historiquement, les premières contributions des « précurseurs » (à partir des années 85) concernent des aspects particuliers de l'expression de la performance. Dans un second temps,

des cadres plus généraux, souvent désignés sous le terme de « *Performance Measurement System* » apparaissent à partir du début de la décennie 90 avec la méthode ECOGRAI [Bitton 90] et le *Balanced ScoreCard* [Kaplan 92].

## 2.1 Les précurseurs

Les premières contributions, qui se démarquent du contrôle de gestion par la volonté de prendre en compte une performance multicritère, s'appuient sur un modèle fonctionnel et hiérarchique de l'entreprise. Elles traitent de l'expression d'une performance multicritère sur plusieurs niveaux, de la dépendance des critères ou de la méthodologie de mise en place du système d'indicateurs.

### 2.1.1 L'expression d'une performance multicritère

Dès 1985, S. Globerson propose un « système de critères de performance » [Globerson 85] qui a pour objectif de prendre en compte l'aspect multidimensionnel de la performance. Ce système est mis en place suivant une démarche structurée en quatre étapes :

- choix des critères critiques vis à vis des clients, employés et dirigeants,
- mise en place d'indicateurs suivant ces critères,
- définition des objectifs par étalonnage concurrentiel,
- conception d'une boucle de pilotage pour corriger les écarts entre la performance réalisée et les objectifs.

L'agrégation de la performance globale de toute l'entreprise, à partir des indicateurs stratégiques, est basée sur la moyenne pondérée, le poids des indicateurs étant déterminé grâce à une matrice de comparaison deux à deux.

Un peu plus tard, le « *Performance Measurement Questionnaire* » PMQ identifie les zones d'amélioration de l'entreprise et propose les indicateurs de performance correspondants [Dixon 90]. Les indicateurs sont définis dans une approche hiérarchisée. La connaissance nécessaire est collectée grâce à un modèle de questionnaire organisé en trois parties :

- partie I quels sont les dirigeants de l'entreprise à questionner ?
- partie II quelles sont les priorités de l'amélioration (objectifs) à long terme et quelle est la pertinence des indicateurs existants (tableau 1) ?
- partie III quel est l'existant en termes d'objectifs et d'indicateurs ?

Dans une dernière partie, le PMQ propose de nouveaux indicateurs plus adaptés.

Priorité de l'amélioration à long terme							Améliorations							Pertinence des indicateurs existants / amélioration						
Nulle		>>>>			Elevée									Nulle		>>>>			Elevée	
1	②	3	4	5	6	7	Qualité							1	2	③	4	5	6	7
1	2	3	4	5	⑥	7	Efficacité opérateurs							1	2	3	4	⑤	6	7
1	2	③	4	5	6	7	Efficacité équipement							1	2	3	④	5	6	7

Tableau 3 : Illustration de la partie II du PMQ [Dixon 90]

### 2.1.2 Une expression de performance sur plusieurs niveaux

Egalement basé sur une approche multicritère, le modèle SMART (*System Measurement Analysis and Reporting Technique*) décline la stratégie de l'entreprise jusqu'au niveau opérationnel suivant des critères **mesurables** [Cross 88-89]. Générique, le modèle permet de hiérarchiser ces critères suivant quatre niveaux décisionnels qui constituent alors une « pyramide de la performance ». Les objectifs sont décomposés selon ces critères du plus haut niveau vers le plus bas niveau et les indicateurs sont reportés du plus bas niveau vers le plus haut (fig. 1).

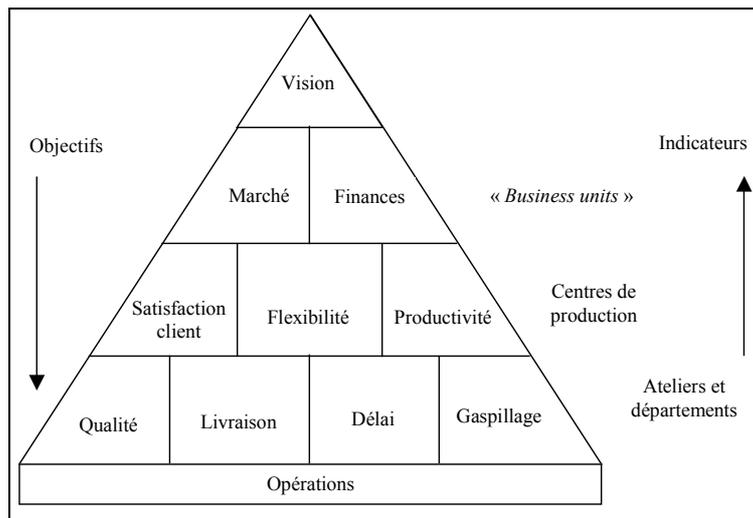


Figure 1 : La pyramide de la performance dans le modèle SMART [Cross 88-89]

### 2.1.3 Des critères dépendants

La recherche des liens entre critères de performance donne lieu à des propositions de typologie. Ainsi, l'objectif de la « Performance Matrix » est de classer les critères de performance selon deux aspects [Keegan 89] :

- le critère est **externe** ou **interne**,
- le critère est **financier** ou **non financier**.

Les auteurs proposent alors d'équilibrer la performance entre ces différents aspects tout en soulignant les liens de coordination existant entre eux mais sans les expliciter, conformément à l'exemple fourni figure 2a.

Le cadre proposé par Fitzgerald distingue, pour sa part, les critères génériques qui permettent de mesurer (fig. 2b) [Fitzgerald 91] :

- la performance globale de l'entreprise exprimée par des indicateurs de résultat,
- la performance des déterminants (facteurs d'influence) de cette performance globale, exprimée par des indicateurs de processus.

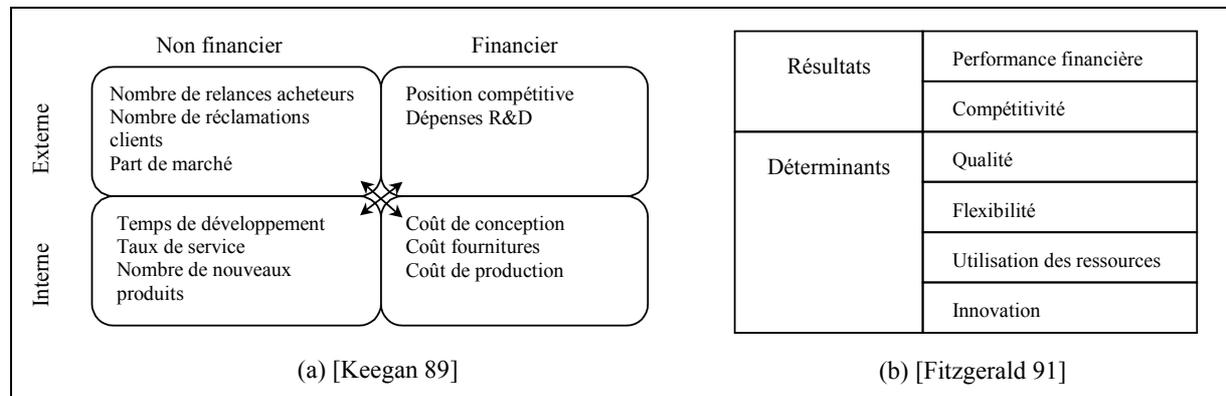


Figure 2 : Illustration des typologies de critères de performance

S'appuyant sur ces typologies, *performance financière / performance non financière, indicateur de résultat / indicateur de processus*, les approches ABC, ABM [Brimson 91] [Cooper 87] [Ravignon 03] [Turney 92] révolutionnent la pratique industrielle en termes d'instrumentation et de pilotage de la performance. Basées sur un modèle « processus / activité » de l'entreprise, les approches ABC, ABM identifient les inducteurs permettant d'améliorer la performance des activités et processus de l'entreprise. Chaque activité est définie par ses différents attributs (consommation des ressources techniques ou humaines, flux de sortie, gestion des flux), les critères spécifiques (délai, qualité, productivité) qui permettent de mesurer sa performance et les indicateurs de performance associés ainsi que les inducteurs qui permettent d'améliorer cette performance (Ch. I fig. 3). Sans être formalisé, le modèle d'indicateur est conforme à la définition fournie Ch. I § 3.2.1. Cette approche donnera lieu au cours de la décennie 90 à de nombreux développements et inspirera de multiples propositions en termes de *Performance Measurement System*.

Les typologies de critère vues précédemment se déclinent également dans des contextes particuliers. Ainsi, Azzone propose une typologie lorsque le **délai** est le critère de performance prioritaire. Il reprend la notion de critères internes et externes qu'il définit pour les domaines de l'entreprise où le délai joue un rôle primordial (tableau 4) [Azzone 91].

Dans ces premières propositions, nous constatons qu'il n'y a pas consensus sur la généralité des critères de performance et donc des indicateurs à mettre en place. Concernant les modèles d'entreprise, seule l'approche ABC-ABM fait référence à un modèle.

Critère global	Critères internes	Critères externes
Délai ingénierie R&D	Nombre de changements dans le projet Délai moyen entre deux innovations consécutives	Temps de développement de nouveaux produits
Délai de production	Respect des délais Qualité intrants Distance parcourue % de temps à valeur ajoutée Respect des plannings	Qualité des extrants Coût de production
Délai de traitement des commandes	Complexité des procédures Taille des lots d'information	Temps de cycle Délai de commande

Tableau 4 : Indicateurs pour une performance basée sur les délais [Azzone 91]

#### 2.1.4 Les contributions méthodologiques

Les années charnières concernant l'expression de la performance se situent au début de la décennie 90. En effet, les premiers cadres globaux apparaissent, traitant à la fois de l'expression de la performance de l'entreprise et des démarches pour mettre en place les indicateurs correspondants. Sans parler de système, [Maskell 91] propose un de ces premiers cadres pour concevoir l'expression de la performance. Ce cadre, non prescriptif, est construit en respectant les 7 principes suivants :

- les mesures doivent être liées directement avec la stratégie de l'entreprise,
- des mesures non financières doivent être adoptées,
- une mesure est spécifique à une entité de l'entreprise,
- les mesures doivent changer quand l'environnement change,
- les mesures doivent être simples et faciles d'utilisation,
- les mesures doivent permettre la réactivité dans le pilotage,
- les mesures doivent favoriser l'amélioration continue plutôt que le contrôle.

Wisner et Fawcett ont un objectif identique et présentent un cadre de mise en place formalisé par une procédure en neuf étapes [Wisner 91]. Ils insistent en particulier sur la notion de déploiement de la stratégie sur les parties critiques de l'entreprise, qualifiées de « zones fonctionnelles » et intègrent le « rafraîchissement » périodique de cette évaluation.

- Etape 1 - définir clairement la mission de l'entreprise.
- Etape 2 - identifier les objectifs stratégiques déduits de cette mission.
- Etape 3 - analyser la contribution des différentes « zones fonctionnelles » à l'atteinte des objectifs stratégiques.

- Etape 4 - mettre en place des indicateurs globaux sur ces zones fonctionnelles destinés au reporting vers la direction.
- Etape 5 - déployer les objectifs stratégiques et des indicateurs globaux à tous les niveaux.
- Etape 6 - vérifier la cohérence des indicateurs mis en place à tous les niveaux.
- Etape 7 - vérifier la compatibilité des indicateurs utilisés sur les différentes zones fonctionnelles.
- Etape 8 - utiliser les indicateurs de performance pour piloter l'entreprise.
- Etape 9 - réévaluer périodiquement la pertinence des indicateurs selon l'environnement concurrentiel.

Se revendiquant comme un des premiers *Performance Measurement Systems*, cette approche est un des premiers cadres globaux de l'expression de la performance. Aux caractéristiques précédentes, elle ajoute la nécessité de **concevoir** (étapes 2 à 7) et **mettre à jour** (étape 9) les indicateurs de performance suivant une démarche structurée.

## 2.2 Les « *Performance Measurement Systems* »

Les approches sur le système d'indicateurs qui se revendiquent comme telles apparaissent à partir des années 90. Nous retenons une dizaine de propositions les plus significatives dans le domaine. Les approches sont présentées dans l'ordre chronologique, positionnées par rapport aux trois phases de la mise en œuvre du système d'indicateurs : conception, exploitation, révision. Sauf indication, ces propositions reprennent le modèle d'indicateur de l'approche ABC/ABM. Ces propositions sont présentées en Annexe II.

### 2.2.1 La méthode ECOGRAI (1990)

La méthode ECOGRAI a pour objectif de concevoir et implanter le système de mesure de performance pour évaluer la performance technico-économique d'une unité de production de l'entreprise, voire du système de production [Bitton 90] [Doumeingts 98] [Merle 93]. Elle est développée sur la base du modèle d'entreprise GRAI [Doumeingts 84], issu du concept CIM. ECOGRAI trouve un certain nombre d'applications en entreprise.

Le modèle GRAI d'entreprise décompose l'entreprise par fonction et par niveau, cette structure étant matérialisée par la grille GRAI. La structure de pilotage se superpose à cette grille : un centre de décision CD est défini pour une fonction et à un niveau donné et les liens de subordination (CD de niveaux différents) et de synchronisation (CD de même niveau) sont définis. Le système physique est défini sur cette base, une activité est associée à un CD. Une activité est décomposée en activités plus élémentaires, une fonction composition d'activités (ET, OU, Séquence) décrivant les échanges entre ces activités élémentaires.

**Conception** : la méthode dispose d'un modèle d'indicateur basé sur le triplet (objectif, mesure, indicateur). Selon les auteurs, la conformité à ce modèle garantit la cohérence de l'indicateur. Les objectifs sont décomposés conformément à la structure de pilotage de l'entreprise et donc à ses liens de subordination et de synchronisation. Selon les auteurs, le respect de la structure de pilotage garantit la cohérence des indicateurs définis sur deux niveaux. Les opérateurs d'agrégation dépendent du critère considéré (coût, qualité délai) et du

type de fonction qui permet la composition des activités [Ducq 99 01]. Pour une composition « OU » d'activités, l'opérateur pour les coûts est le « mini », celui pour les délais est le « ET ». L'expression des objectifs locaux est alors déterminée comme une valeur particulière de la performance des activités, celle qui correspond à une atteinte totale de l'objectif global.

**Exploitation** : après la conception du triplet, chaque indicateur est spécifié conformément à une fiche de référence qui précise les variables d'action associées à l'indicateur et implantées dans le système d'information. Chaque activité est donc suivie par un, deux ou trois indicateurs qui sont mis à la disposition du CD. Ce groupement d'informations (objectifs, mesures, indicateurs, variables d'action et autres spécifications) constitue le tableau de bord d'un centre de décision. Pour chaque variable d'action, son pouvoir d'action « quel degré d'atteinte de l'objectif autorise t-elle ? » est quantifié. Le pilotage au niveau d'un CD consiste alors à choisir la meilleure combinaison possible de variables d'action pour atteindre les objectifs du centre de décision.

**Révision** : le champ d'application de la méthode ECOGRAI concerne l'amélioration sur le long terme de la performance des entreprises industrielles. Il s'agit le plus souvent de reconception de sites. Le problème de l'évolution du système d'indicateurs n'est donc posé que lorsque les objectifs globaux sont remis en question.

### 2.2.2 Les méthodologies directement liées à ABC/ABM (1991)

De nombreux travaux concernent des méthodologies de mise en place d'un système d'indicateurs cohérent avec les objectifs globaux de l'entreprise [Lorino 91] [AFGI 92] [Berrah 97] [Le Clainche 00]. Basées sur les notions d'indicateur et d'inducteur de performance, ces méthodologies se fondent sur la méthode ABC/ABM.

**Conception** : comme pour ECOGRAI, un modèle d'indicateur est proposé sous forme de triplet (objectif, mesure, variable) qui permet d'exprimer une performance tant quantitative que qualitative [AFGI 92] [Berrah 97]. Les objectifs sont décomposés selon un modèle cause-effet qui est basé sur le modèle « processus / activités » de l'entreprise [Lorino 01b]. Les méthodologies insistent sur les liens entre indicateurs de résultat et indicateurs de processus, garants de la réactivité du pilotage. D'une façon générale, ce sont des liens qualitatifs qui sont mis en place bien que le problème de leur quantification soit posé [Berrah 97], tant en ce qui concerne la décomposition des objectifs [Clivillé 01b] que l'agrégation des performances [Berrah 02c].

**Exploitation** : les tableaux de bord, qui regroupent les indicateurs par famille de *facteurs de progrès*, par *niveau de décision* et par *processus* [AFGI 92] [Berrah 97], permettent alors :

- de faire apparaître les liens entre indicateurs (même famille de facteurs de progrès),
- de privilégier l'amélioration de la performance globale,
- de respecter la logique du déploiement de la stratégie sur les processus/activités.

**Révision** : la démarche de mise en place reprend le principe de l'amélioration continue et, à ce titre, le système d'indicateurs est sans cesse remis en question. Les indicateurs sont conçus puis supprimés ou changent de nature (un indicateur de progrès devient un indicateur de maîtrise) dès lors que les objectifs sont atteints.

### 2.2.3 Le « *Balanced ScoreCard* », BSC (1992)

Ce tableau de bord **équilibré** et **prospectif** a pour objectif de traduire la stratégie de toute l'entreprise en actions opérationnelles ; ses auteurs le qualifient de système de management. Elaboré à partir de réflexions sur les limites du contrôle de gestion [Kaplan 87] et une pratique industrielle de la mise en place de tableaux de bord, cet outil d'aide au pilotage trouve ses origines dans :

- le modèle de la chaîne de création de valeur au niveau des « *business units* » ou unités de production de l'entreprise,
- l'approche ABC/ABM pour la vision « processus / activités » et la notion d'inducteur,
- la typologie des critères de performance de la matrice de performance de Keegan (§ 2.1.2) pour l'équilibre de la performance.

**Conception** : la structure du système d'indicateurs repose sur la décomposition des objectifs stratégiques suivant un modèle standard :

- La performance est systématiquement exprimée suivant quatre axes : « financier », « clients », « processus opérationnels », « apprentissage organisationnel ». Le tableau de bord obtenu est constitué d'indicateurs de résultat standards, aux plus hauts niveaux de décision, et d'indicateurs avancés (de processus) généralement spécifiques à l'entreprise.
- Les tableaux de bord sont mis en place à chaque niveau de l'entreprise et permettent à chacun de situer son action par rapport aux objectifs stratégiques de l'entreprise et à sa performance financière. Autrement dit, tout indicateur retenu dans le BSC doit contribuer aux résultats financiers de l'entreprise, mais sans que la relation ne soit quantifiée pour autant. L'opérateur sait qu'il améliore la performance globale, mais il ne sait pas de combien.

**Exploitation** : Le BSC est divisé en quatre tableaux de bord suivant chacun des axes retenus. Ces axes sont reliés entre eux par un lien de causalité : les indicateurs de l'axe « processus opérationnels » sont subordonnés à ceux de l'axe « apprentissage organisationnel » qui sont eux-mêmes subordonnés à ceux de l'axe « clients », ces derniers étant subordonnés à l'axe « financier ». Le tableau de bord associe à chaque indicateur son objectif, les variables d'action ainsi que les actions mises en œuvre.

**Révision** : elle ne fait pas l'objet d'un traitement spécifique dans le BSC, les tableaux de bord étant supposés invariants à objectifs stratégiques donnés. Si les objectifs changent, le BSC doit être reconsidéré dans son ensemble.

### 2.2.4 Le « *Quantitative Model for Performance Measurement System* », QMPMS (1995)

Le modèle QMPMS « *Quantitative Model for Performance Measurement System* » est l'aboutissement des travaux menés à l'Université de Strathclyde en Ecosse par U. Bititci et son équipe [Bititci 95 97 00 01] [Suwignjo 00]. Le QMPMS est intégré dans l'entreprise

suivant le *Viable Systems Model VSM*<sup>7</sup> [Beer 84]. Il est considéré comme un sous-système du système de pilotage et se fixe deux objectifs :

- réaliser la décomposition des objectifs stratégiques, *i.e.* définir et quantifier les liens de subordination et de coordination entre les indicateurs de performance au travers d'une identification des variables d'action,
- assurer le retour des mesures de performance du niveau opérationnel (l'activité) vers les niveaux décisionnels supérieurs (processus, unité, entreprise) *i.e.* définir les opérateurs d'agrégation.

**Conception** : le modèle s'appuie sur la notion de variable à laquelle sont associés un objectif implicite et une mesure pour définir les indicateurs. Ces variables sont identifiées sur plusieurs niveaux grâce à des outils d'analyse causale tels que la *cognitive map* (Ch. I § 3.2.2). Deux types de liens entre variables sont retenus :

- les liens à effet direct (vertical) lorsqu'une variable de niveau supérieur est influencée par une variable de niveau inférieur, ce lien est quantifié par la méthode AHP [Saaty 77]. Les facteurs d'un même niveau sont comparés deux à deux pour définir leur importance respective grâce à un jugement d'expert. Chaque facteur se voit alors attribuer une importance absolue (un poids) en fonction des importances respectives précédentes selon une échelle de ratio, sous la contrainte que la somme de ces poids reste égale à 1.
- les liens à effet indirect (horizontal) lorsqu'une variable d'un niveau donné est influencée par une variable de même niveau, ces liens sont directement quantifiés par les experts.

Les effets directs sont ensuite corrigés pour tenir compte des effets indirects, les auteurs parlent alors d'effet combiné. L'effet combiné d'une variable permet donc de calculer la performance associée à une variable de niveau supérieur en fonction des performances associées aux variables de niveau inférieur. L'opérateur d'agrégation retenu est la moyenne pondérée, le poids étant proportionnel à l'effet combiné des variables.

**Exploitation** : afin de faciliter leur exploitation, les tableaux de bord affichent un nombre réduit d'indicateurs en jouant sur la périodicité d'affichage. Par exemple, un indicateur dont la valeur change rapidement et qui est associé à une variable ayant un effet important aura un affichage (mis à jour) continu ou quotidien. Un indicateur, dont la valeur change lentement et qui est associé à une variable ayant un effet faible, aura un affichage mensuel ou trimestriel.

**Révision** : le QMPMS intègre un mécanisme d'évolution basé sur la roue de Deming. Il observe (*Check*) les évolutions internes et externes à l'entreprise. Le pilotage analyse ces évolutions et propose de nouveaux objectifs (*Act*) dont il planifie l'atteinte (*Plan*) et la mise en place de nouveaux tableaux de bord (*Do*). L'observation de l'évolution de la performance suite à cette mise en place permet une nouvelle analyse bouclant ainsi le processus. Ce mécanisme d'évolution est répété à tous les niveaux de l'entreprise.

---

<sup>7</sup> Le VSM identifie cinq systèmes, respectivement le système opérationnel, de supervision, de pilotage tactique, de développement, et le système stratégique. Le système de pilotage regroupe le système de pilotage tactique et de développement.

### 2.2.5 Le « *Process Based Approach* », PBA (1995)

L'objectif des travaux menés depuis le début des années 90 par A. Neely et son équipe est de fournir une méthodologie d'intégration du système d'indicateurs. Ce système est défini comme étant « un ensemble de mesures utilisées pour quantifier l'efficacité et l'efficience des actions » [Neely 95 96a 96b 99, 00]. En accord avec les principes et caractéristiques d'un système d'indicateurs [Dixon 90], [Wisner 91] [Kaplan 92], les auteurs constatent le manque de guide méthodologique pour mettre en place ce système. Ils proposent donc une approche qui traite des différentes phases de la vie du système d'indicateurs comme un processus qu'ils qualifient de « *Process Based Approach* » PBA. Cette approche est développée en collaboration avec les entreprises où elle est testée et mise en œuvre. Elle est formalisée sous forme de guide qui décrit le processus sous la forme d'une succession de fiches.

**Conception** : dans cette première phase, les indicateurs définis comme *des mesures utilisées pour quantifier l'efficacité ou l'efficience d'une action* sont conçus et validés selon le guide méthodologique défini. Les objectifs stratégiques sont d'abord identifiés à partir des besoins des clients et des partenaires puis décomposés pour définir :

- d'une part, les indicateurs de résultat qui mesurent le degré d'atteinte de ces objectifs,
- d'autre part, des indicateurs de processus sur les facteurs de performance, semblables aux indicateurs avancés du BSC.

**Exploitation** : avant cette phase d'exploitation proprement dite, le système d'indicateurs est implémenté dans le système d'information de l'entreprise afin de réaliser automatiquement les différentes tâches de collecte, d'organisation et d'exploitation des mesures. La phase d'exploitation proprement dite utilise un modèle de tableau de bord défini dans le guide méthodologique qui affiche les indicateurs, met en avant les progrès réalisés (comparaison temporelle des expressions de performance) ainsi que les actions à mettre en œuvre.

**Révision** : l'évolution du système d'indicateurs est évoquée comme la conséquence des influences internes et externes à l'entreprise, des résultats du processus de développement du système d'indicateurs selon le principe de la démarche d'amélioration continue [Wagonner 99]. Cette évolution, dont la formalisation n'a pas encore abouti, s'intègre dans les phases de conception et d'exploitation du système.

### 2.2.6 Le « *Integrated Dynamic Performance Measurement System* » IDPMS (1997)

L'objectif du système IDPMS *Integrated dynamic performance measurement* [Ghalayini 96 97] est d'intégrer les différents aspects du système d'indicateurs dans un même modèle (*integrated*) et de permettre une actualisation permanente du système (*dynamic*) comme le propose Wagonner dans l'approche précédente. Outre cette référence, il s'inspire des propositions telles que le SMART pour le déploiement de la stratégie, le PMQ pour l'identification des entités à améliorer et le BSC pour l'aspect équilibré de la performance. Il retient un modèle qui appréhende l'entreprise en trois sous-systèmes distincts : le système de *pilotage stratégique* qui définit les objectifs, le système de *pilotage tactique* qui élabore les plans d'action pour l'amélioration permanente et le système *opérant* qui comprend les processus opérationnels.

**Conception** : les indicateurs résultent d'une décomposition des objectifs définis :

- selon les FCS-FCP de l'entreprise au niveau stratégique pour fournir des indicateurs de résultat,
- selon les facteurs qui sont déterminés grâce au PMQ aux niveau tactique et opérationnel pour fournir des indicateurs de processus.

Les liens entre les indicateurs sont identifiés au niveau stratégique grâce à un graphe générique des liens entre un FCS et les différents FCP. Chaque objectif stratégique quantifié est ensuite décomposé en employant le modèle *Value Focus Cycle Time* [Noble 94]. Le modèle permet d'identifier les non-performances des processus actuels quel que soit le FCP et donc de mettre en place les indicateurs correspondants. Les liens sont ensuite quantifiés par expertise dans le cadre d'un plan d'action donné.

**Exploitation** : un tableau de bord regroupe les indicateurs de processus et de résultats relatifs à un FCP sur trois niveaux (pilotage stratégique, pilotage opérationnel, processus opérationnels). Dans le cadre d'un plan d'action donné, les liens entre les tableaux de bord sont identifiés grâce au graphe générique des FCS et FCP sans qu'une performance agrégée ne soit calculée.

**Révision** : comme le propose l'approche PBA ou le modèle QMPMS, les tableaux de bord évoluent de façon classique par une redéfinition des FCS-FCP de l'entreprise en fonction des évolutions de l'entreprise et de son environnement. En outre, les objectifs décomposés sont reconsidérés périodiquement pour intégrer la progressivité de l'amélioration continue. Cette reconsidération permet de n'exprimer que des objectifs atteignables sur un horizon à court ou moyen termes.

### 2.2.7 Le « *Process Performance Measurement System* » PPMS (1999)

Le « *Process Performance Measurement System* » PPMS a pour objectif de fournir à l'entreprise un système qui aborde l'expression de la performance, d'une part de façon **qualitative et quantitative**, d'autre part dans sa **globalité** [Kueng 99 00 01]. Il trouve ses fondements dans l'approche ABC/ABM, le BSC, et les approches de *Total Quality Management* telles que le MBNQA<sup>8</sup> et de son équivalent européen, l'EQA<sup>9</sup>. Le système d'indicateurs est vu comme un système d'information spécialisé qui doit collecter la performance des processus, la comparer aux valeurs passées et attendues et communiquer ces résultats sous forme de tableaux de bord.

**Conception** : les objectifs stratégiques de l'entreprise sont décomposés sur chaque processus opérationnel selon cinq aspects génériques (financier, clients, employés, société et innovation). Si la performance associée à cet objectif ne peut être mesurée directement, l'objectif est à nouveau décomposé jusqu'à ce qu'une ou plusieurs mesures soient possibles.

---

<sup>8</sup> MBNQA « *Malcolm Baldrige National Quality Award* » : Prix décerné par le gouvernement des USA pour améliorer la compétitivité des entreprises américaines et promouvoir un modèle de pilotage suivant les 7 axes suivants : Leadership, Information et analyse, Planification stratégique, Gestion et développement des ressources humaines, Gestion des processus, Résultats de l'organisation, Orientation client et satisfaction de la clientèle [MBNQA 03].

<sup>9</sup> EQA « *European Quality Award* », prix décerné par l'*European Foundation for Quality Management* pour promouvoir l'excellence des entreprises européennes. Huit critères d'évaluation sont définis : Orientation Résultats, Vision Client, Stratégie, Management par Processus, Motivation et Gestion des Hommes, Innovation et Amélioration Continue, Développement dans le cadre de Partenariats, Responsabilité Sociale [EQA 03].

Au final, la performance de chaque processus est exprimée grâce à des arborescences d'indicateurs à cinq branches, une par aspect.

**Exploitation** : le tableau de bord qui affiche les performances est structuré sous forme de plusieurs niveaux d'indicateurs ayant des liens de subordination. Il collecte automatiquement les données grâce à un workflow, et propose une analyse de cette performance afin d'aider à la décision. Sans préciser les outils utilisés pour cette aide à la décision, l'auteur évoque les possibilités suivantes : l'agrégation de données, l'analyse de tendance, le recoupement d'informations.

**Révision** : l'auteur propose de développer et modifier le tableau de bord en fonction de l'expérience et des résultats obtenus sans expliciter davantage cet aspect.

### 2.2.8 L'approche ENAPS (1999)

L'approche ENAPS (*European Network for Advanced Performance Studies*) est le résultat d'un projet européen ESPRIT [Browne 99]. Elle a pour objectif de proposer et valider un système d'indicateurs générique aux niveaux stratégique et tactique. Ce système permettrait alors à chaque entreprise un étalonnage concurrentiel qui peut alors identifier ses points forts et ses points d'amélioration. L'approche est basée sur un certain nombre d'approches (ECOGRAI, EFQM model, BSC, PMQ) et deux systèmes d'indicateurs existants. Le TOPP *system* permet à l'entreprise d'évaluer la performance de ses processus critiques suivant les critères coût, qualité délai [SINTEF 92]. Le AMBITE *system* propose des indicateurs standards selon cinq FCS pour les cinq principaux processus de l'entreprise [Bradley 96]. L'entreprise est modélisée au travers de ses processus qui interviennent dans la totalité du cycle de vie du produit. Cette méthode est en cours de validation avec un certain nombre de grands groupes industriels comme Volkswagen.

**Conception** : les indicateurs sont mis en place de façon systématique aux niveaux stratégique (entreprise) et tactique (processus majeurs). L'indicateur est défini relativement à un modèle qui traite la mesure selon une formule (ratio, différence...) afin de rendre l'interprétation plus facile. Les indicateurs sont génériques et fournis sous forme de listes relatives à un niveau, un processus et un critère. L'utilisation d'indicateurs standards (95 exactement) permet alors aux entreprises d'étalonner leur performance aux niveaux stratégique et tactique par rapport aux entreprises comparables. Les auteurs garantissent la cohérence des indicateurs proposés sans l'expliquer. Ils sont complétés au niveau opérationnel (activités) par des indicateurs spécifiques à l'entreprise.

**Exploitation** : cet aspect n'est pas traité dans l'approche.

**Révision** : le système est par définition standard et ne doit donc pas, en principe, évoluer. Cependant au niveau opérationnel, rien n'interdit à l'entreprise de modifier ses indicateurs.

### 2.2.9 Le système de management de la qualité de la norme ISO 9000 (2000)

Les préconisations de la norme ISO 9000 concernant le système d'indicateurs forment un guide de mise en place des indicateurs nécessaires pour piloter les processus. La mise en place de ce système est un prérequis obligatoire dans le cadre de la certification des entreprises, ce qui accélère et généralise sa diffusion depuis l'année 2001. Son objectif est d'instaurer l'évaluation systématique des processus dans le système de pilotage de l'entreprise afin d'inscrire cette dernière dans une démarche d'amélioration continue. La démarche repose sur

un modèle processus de l'entreprise formalisé par une cartographie des processus décrite dans le fascicule (FD X 50-176) de la même norme. Elle se présente sous la forme d'une procédure qui traite de la conception, de l'exploitation ainsi que de la remise en cause du système. Les processus sont liés par les flux de produit, de service ou d'information qu'ils s'échangent.

**Conception** : l'indicateur est conçu progressivement au travers de sa variable essentielle, de son objectif, de sa mesure ainsi que de l'expression de sa performance. Il est relatif à un processus de l'entreprise, chaque processus étant suivi par un ou plusieurs indicateurs qui lui sont obligatoirement propres. Les liens entre indicateurs sont implicitement fournis par les liens entre les processus de la cartographie. Le problème de la cohérence des actions sur les différents processus n'est pas posé en tant que tel, chaque processus devant optimiser sa performance. La conception est complétée par une phase d'implémentation où les personnels sont formés et les procédures de collecte et de diffusion des indicateurs sont testées.

**Exploitation** : les tableaux de bord communiqués à la structure de pilotage regroupent les indicateurs relatifs à un centre de décision et délivrent éventuellement des expressions de performance agrégées selon l'information souhaitée.

**Révision** : le système d'indicateurs est actualisé en fonction de l'amélioration réalisée (certains indicateurs devenus inutiles sont supprimés) et des nouveaux objectifs fixés : les indicateurs existants sont maintenus, modifiés, supprimés et de nouveaux indicateurs apparaissent.

### 2.2.10 La mise en place des indicateurs dans le modèle SCOR (2000)

L'objectif de cette approche est d'implanter un système d'indicateurs sur une chaîne logistique pour obtenir des gains de performance selon quatre FCS (fiabilité, réactivité, coût et rotation des capitaux). C'est le point de vue du donneur d'ordres qui est privilégié. Le modèle SCOR (*Supply Chain Operations-Reference*) résulte de la mise en commun au sein du *Supply Chain Council* des pratiques industrielles concernant la mise en place de chaînes logistiques, et de l'apport des principaux fournisseurs d'ERP. Reprenant le concept de chaîne de la valeur, SCOR modélise la chaîne logistique selon une description hiérarchique sur quatre niveaux des processus qui la constituent. Le SCOR *model* est devenu aujourd'hui un standard international utilisé dans de très nombreux groupes. Les indicateurs préconisés sont donc logiquement repris comme indicateurs de référence des processus qui participent à la chaîne logistique [Ayers 00] [SCC 03].

**Conception** : les cinq indicateurs du niveau 1 sont toujours identiques (coût SCM, performance de livraison, délai de traitement des commandes, productivité et productivité du capital). Leur objectif est fixé par étalonnage concurrentiel. Les indicateurs dont la performance est insuffisante sont déclinés jusqu'au niveau 3 du modèle SCOR. Cette déclinaison est également générique. Les objectifs de ces indicateurs sont eux aussi fixés par étalonnage concurrentiel. Comme pour la norme ISO 9000, les liens entre indicateurs sont déduits de la cartographie des processus. La déclinaison au niveau 4 est spécifique à l'entreprise concernée.

**Exploitation** : une cartographie des processus est documentée pour chaque indicateur de niveau 1 dont la performance a été jugée insuffisante par les indicateurs déclinés sur les deux niveaux suivants. Le tableau de bord est conforme à la modélisation sur trois niveaux des processus. Un indicateur associé à un processus de niveau donné présente des liens de

subordination avec l'indicateur associé au processus de niveau supérieur et aux indicateurs associés aux processus de niveau inférieur.

**Révision** : le modèle SCOR ne considère que la ré-ingénierie de la supply chain, équivalente à un BPR. Dans ce cadre, le système d'indicateurs reste inchangé sur toute la durée de vie de la chaîne logistique, la problématique de sa révision n'est donc pas posée.

### 2.3 Synthèse de l'analyse bibliographique

La littérature concernant le système d'indicateurs traite de nombreux aspects de ce système ainsi que des prérequis nécessaires à sa définition. Un certain nombre d'invariants se retrouvent dans ces propositions, tels que :

- le recours à un modèle de l'entreprise et de son système de production,
- l'identification des FCS et FCP de l'entreprise et des objectifs globaux associés,
- l'aide au pilotage en tant que finalité du système d'indicateurs.

Une certaine diversité dans les propositions apparaît pour ce qui est de la structure, de l'exploitation et de la mise en place du système d'indicateurs.

Le modèle d'indicateur et le calcul des indicateurs proprement dit sont, le plus souvent, implicites et conformes à la définition de l'indicateur donné par [Fortuin 88] à l'exception de ECOGRAI, des approches issues de ABC/ABM et de ISO 9000 qui le spécifient complètement.

Toutes les approches insistent sur la conception du système d'indicateurs allant jusqu'à proposer des démarches structurées sous forme de guide méthodologique (la méthode ECOGRAI, le BSC, les approches issues de ABC/ABM, PPMS, l'approche PBA). La structure du système donne lieu à plusieurs types de propositions. Une famille qui regroupe le BSC, ENAPS, SCOR et IDPMS propose une structure où les niveaux de définition des indicateurs et les liens de subordination sont pré établis. Dans ces conditions, tout système mis en place dans l'entreprise à partir de cette structure conserve la cohérence garantie par l'approche. Dans la deuxième famille se retrouvent les approches ECOGRAI, le QMPMS, ISO 9000 et les approches issues de ABC/ABM ; les indicateurs ainsi que leurs liens sont mis en place spécifiquement pour une entreprise donnée et ses objectifs globaux. Ces approches définissent des procédures pour décomposer les objectifs globaux. Dans le cas de ECOGRAI les liens de subordination sont définis conformément aux niveaux du modèle GRAI. Dans le cas du QMPMS, la quantification des liens de subordination et de coordination est basée sur l'analyse causale.

L'exploitation du système est identifiée au calcul des expressions de performance et à leur affichage sous forme de tableaux de bord. Des modèles de tableau de bord sont disponibles en particulier dans le BSC, PPMS, IDPMS, ECOGRAI et QMPMS.

L'approche PBA et dans une moindre mesure les PPMS, IDPMS et ISO 9000, s'intéressent également à la révision du système d'indicateurs, consécutive aux évolutions de l'entreprise et de son environnement. Cependant, les propositions relèvent davantage de recommandations que d'une méthodologie opérationnelle.

Constatons, par ailleurs, que les propositions sont nettement différenciées en ce qui concerne leur audience industrielle. Le BSC, SCOR, ABC/ABM, ISO 9000 sont des approches réellement mises en place en entreprise. L'approche PBA trouve des applications assez nombreuses, de même que la méthode ECOGRAI, utilisée pour l'implantation des systèmes de production ainsi que leur réorganisation. Les autres approches, bien que testées en entreprise, n'ont pas connu de réelle diffusion.

Au final, cette revue bibliographique montre bien la pertinence des problèmes de conception, d'exploitation et de révision du système d'indicateurs. Mais nous constatons que :

- aucune des approches envisagées ne propose un cadre global pour répondre pleinement à l'ensemble de ces problèmes,
- les approches ne prennent pas suffisamment en compte le fait qu'un système d'indicateurs ne doit être mis en place que s'il est associé à un plan d'action destiné à atteindre l'objectif global.
- les outils formels pour exprimer la performance, décomposer les objectifs, agréger les performances sont rares, et généralement réservés à des cas spécifiques.

Nous appuyant sur ce constat, il nous paraît donc légitime de proposer un modèle plus complet pour le système d'indicateurs. Afin de pouvoir travailler à différents niveaux de détails, tout en conservant une approche globale, nous avons opté pour une vision systémique dont nous rappelons les principales notions dans la section 3. Leur utilisation pour une modélisation du système d'indicateurs est présentée dans la section 4.

### 3 Rappels sur la théorie des systèmes

Un système est une représentation, un modèle de la réalité perçue par un observateur. Lorsque cette réalité est complexe, il devient nécessaire de la modéliser (sous la forme d'un système) afin de mieux l'appréhender [Le Moigne 90]. Par abus de langage, on parle dans ce cas d'un système « complexe » plutôt que de « la modélisation d'une réalité perçue comme étant complexe ». La complexité est alors synonyme d'« une grande variété d'éléments, définis à plusieurs niveaux et présentant une grande variété d'interactions » [De Rosnay 95].

Depuis les années 1945, la perception de plus en plus complexe des objets ou phénomènes (vivants ou artificiels) qui nous entourent a conduit au développement de méthodes de modélisation systémique [EU 99]. Le champ d'application très large de ces méthodes [François 97] comprend des disciplines comme l'informatique [Wiener 48], l'économie [Boulding 56], la cybernétique [Ashby 57], la biologie [Bertalanffy 68], les organisations [Simon 69] [Yatchinovski 00], etc. Mais quelle que soit la discipline, ce sont toujours les mêmes caractéristiques qui permettent d'appréhender le système, *i.e.* comprendre ce qu'il fait et comment il le fait [Boulding 56] [Le Moigne 90] [EU 99].

#### 3.1 La notion de système

Une première proposition de L. Van Bertalanffy, fréquemment citée dans la littérature, définit un système comme étant « un ensemble d'entités dépendantes <sup>10</sup> » [Bertalanffy 1968]. Cette

---

<sup>10</sup> « *A set of interrelated elements* »

notion d'entités dépendantes est reprise dans la définition de J. De Rosnay : « un système est un ensemble d'entités qui interagissent dynamiquement et sont organisées en fonction d'une finalité » [De Rosnay 75]. Ainsi, pour que le système atteigne sa **finalité**, ses entités forment une **organisation** dans laquelle elles **interagissent**. Dans ce sens, E. Morin envisage qu'un système puisse avoir plusieurs finalités : « un système opère et se transforme pour quelques finalités » [Morin 77]. Toujours selon l'auteur, dans la poursuite de ses finalités, le système adopte un **comportement** qui prend deux formes indissociables et complémentaires, le fonctionnement (il opère) et la transformation.

J.L. Le Moigne propose une définition du système qu'il qualifie de *général* comme étant la « représentation d'un phénomène actif, perçu identifiable par ses projets, dans un environnement actif, dans lequel il fonctionne et se transforme téléologiquement » [Le Moigne 90]. L'auteur précise le rôle de **l'environnement** qualifié d'actif, *i.e.* qui échange avec le système.

A partir de ces définitions, conformément à ce que J.L. Le Moigne appelle la « forme canonique » du système général, nous retenons qu'un système peut être défini par les caractéristiques suivantes :

- sa(es) finalité(s),
- son environnement,
- son organisation,
- son comportement.

Par ailleurs, un des principaux avantages de la vision systémique est de considérer un système à différents niveaux d'abstraction, ce qui permet de le structurer hiérarchiquement. En effet, le système peut être vu, d'une part comme une entité unique qui échange avec son environnement, c'est la vision « boîte noire ». D'autre part, il peut être vu comme un ensemble d'entités en interaction qui échangent entre elles et avec l'environnement, c'est la vision « boîte blanche ». Les entités de cette vision « boîte blanche » peuvent à leur tour être détaillées, ce qui amène à considérer le système au travers de sous-systèmes dans une hiérarchie de niveaux.

## 3.2 Les caractéristiques d'un système

### 3.2.1 Finalités d'un système

#### 3.2.1.1 Définition

« Les finalités d'un système expriment sa raison d'être, sa vocation en termes économiques, éthiques et sociologiques. Elles reflètent l'idée qu'un groupe humain se fait des missions d'un système, en ce sens qu'elles ne sont pas directement opératoires » [Mélèse 91].

#### 3.2.1.2 Propriétés

- Les finalités restent à un niveau d'abstraction élevé.
- Elles sont indépendantes du temps.

- Elles concernent le système dans sa globalité.

### 3.2.1.3 Exemple

La finalité du système entreprise peut être le maintien et le développement de son activité [Marmuse 97]. Nous considérons donc, dans cet exemple, que la finalité de l'entreprise est sa pérennité.

## 3.2.2 Environnement d'un système

### 3.2.2.1 Définition

L'environnement d'un système est défini par l'ensemble des éléments qui lui sont extérieurs.

### 3.2.2.2 Propriétés

- Le choix de la frontière du système, qui permet de le distinguer de son environnement, dépend du point de vue de l'observateur. Celui-ci la choisit en fonction de son besoin de modéliser la réalité, de « dissocier l'indissociable » : le système et son environnement [Le Moigne 77].
- L'environnement du système change dans le temps.
- Un système est *ouvert* lorsqu'il échange de la matière, de l'énergie ou de l'information avec son environnement. Dans le cas contraire, il est *fermé*.
- Deux types d'échange sont distingués [Heyligen 02] :
  - les entrées (ou intrants ou inputs) : tout échange de l'environnement vers le système,
  - les sorties (ou extrants ou outputs) : tout échange du système vers son environnement.

### 3.2.2.3 Exemple

Pour une entreprise :

- environnement : actionnaires, clients, fournisseurs, marché de l'emploi, société civile, concurrents, monde de la recherche...
- échanges : capitaux, dividendes, produits et services, emploi, impôts...

## 3.2.3 Organisation d'un système

### 3.2.3.1 Définitions

Pour un observateur donné, l'**organisation** d'un système est définie par deux ensembles bien identifiés : l'ensemble des entités et l'ensemble des interactions entre ces entités (fig. 3).

Appréhender un système par son organisation permet de le décomplexifier, *i.e.* appréhender des entités qui sont moins complexes et dont le comportement est mieux connu. Le caractère

systemique ne sera pas pour autant « mutilé » grâce à la prise en compte des interactions entre des entités. Une **entité**  $E_i$  est définie comme étant une partie de ce système ayant, tout comme un système, ses propres entrées-sorties. Il y a **interaction** entre deux entités  $E_i$  et  $E_j$ , si une variation d'une sortie de  $E_i$  entraîne une variation d'une sortie de  $E_j$  ou inversement [Bertalanffy 68].

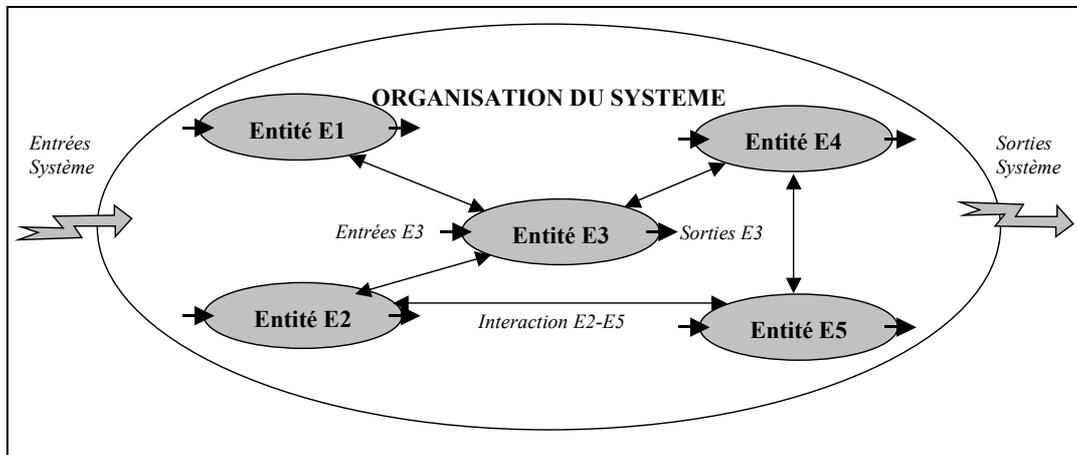


Figure 3 : Illustration de l'organisation d'un système

### 3.2.3.2 Propriétés

- Des organisations différentes peuvent être définies pour un même système selon le point de vue et les objectifs de l'observateur. Par exemple, l'organisation de l'entreprise du point de vue du technologue, du financier ou du sociologue ne repose pas sur les mêmes entités ni sur les mêmes interactions. En simplifiant, le technologue verra d'abord des activités et processus, quand le financier verra des postes de charges et de profit, et le sociologue des groupes humains.
- Une entité est dite active si elle élabore des sorties différentes de ses entrées.
- L'organisation se définit dans une logique récursive et descendante : toute entité décomposée est considérée comme un nouveau système, qualifié de sous-système. Ce dernier interagit avec les autres sous-systèmes qui constituent alors son environnement [Simon 82]. Un sous-système peut, si nécessaire, se décomposer à son tour en de nouveaux sous-systèmes sur autant de niveaux que nécessaire.
- Dans un souci de décomplexifier la réalité complexe représentée, l'organisation idéale du système comprend peu d'entités ayant entre elles aussi peu d'interactions que possible.

### 3.2.3.3 Exemple

Dans le cas de l'entreprise, considérée comme étant un système social particulier, l'organisation type comprend trois sous-systèmes en interaction [Le Moigne 77] :

- le Système Opérant, SO,
- le Système d'Information, SI,
- le Système de Décision, SD.

Pour ce qui nous concerne, nous avons choisi de considérer deux sous-systèmes dans l'entreprise, d'une part le **système de pilotage** qui regroupe le Système de Décision et le Système d'Information, d'autre part le **système piloté** équivalent du Système Opérant SO (Ch.1 § 3).

### 3.2.4 Buts et objectifs d'un système

#### 3.2.4.1 Définitions

« Les buts concrétisent les finalités en analysant les missions en composantes opératoires (ce que doit faire le système) souvent qualitatives» [Mélèse 91].

H. Mintzberg identifie pour tout système deux types de buts [Mintzberg 96] :

- les **buts de mission** qui caractérisent les sorties du système, attendues par son environnement,
- les **buts de système** qui concernent l'organisation propre du système : l'organisation à mettre en place pour atteindre ses buts de mission.

#### 3.2.4.2 Propriétés

- Les buts concernent le système dans sa globalité.
- Un « but de mission » dépend de l'environnement du système, il est exogène.
- Un « but de système » ne concerne que le système, il est endogène.

En outre, « un objectif précise un but par des critères d'évaluation assortis d'un niveau à atteindre » [Mélèse 91]. Les notions de buts et objectifs sont souvent confondues dans la pratique. En conséquence, seul le terme **objectif** sera retenu ici. Dans ce sens, nous qualifierons les buts de mission d'*objectifs exogènes* et les buts de système d'*objectifs endogènes*.

#### 3.2.4.3 Exemple

Dans la poursuite de sa finalité (pérennité) et selon son environnement, une entreprise se fixe trois objectifs exogènes :

- *objectif exogène 1 : Rentabilité de l'outil de production = amélioration importante, 1 an*
- *objectif exogène 2 : Marché du sportwear pour les 15-25 ans = leader, 3 ans*
- *objectif exogène 3 : Normes environnementales ISO 14000 = satisfaction totale, 1 an*

Pour atteindre ces objectifs exogènes, l'entreprise se fixe en interne un certain nombre d'objectifs endogènes :

- *objectif endogène 1 : Equipe autonome pilote = mise en place, 12 mois*
- *objectif endogène 2 : Design produit = ciblé sur les 15 -25 ans, 18 mois*
- ...

Une fois définis, ces objectifs peuvent être décomposés. Par exemple, l'*objectif endogène 1 : Equipe autonome pilote = mise en place à 12 mois*, est décomposé en trois objectifs :

- *objectif 1 : Communication de la politique de l'entreprise = affichage des objectifs et plans d'action stratégiques, 2 mois*
- *objectif 2 : Intéressement à la performance de l'entreprise = prime calculée sur le taux de service processus, 6 mois*
- *objectif 3 : Gestion des ressources humaines = formation au travail de groupe des opérateurs de production, 9 mois.*

### 3.2.5 Comportement d'un système

#### 3.2.5.1 Définitions

Dans la poursuite de sa finalité, un système tente d'atteindre :

- ses objectifs exogènes qui définissent les sorties attendues du système,
- ses objectifs endogènes qui concernent sa propre organisation.

Pour cela le système se **comporte**, *i.e.* :

- il **fonctionne** ou élabore des sorties conformément à ses objectifs exogènes,
- il se **transforme** ou modifie son organisation conformément à ses objectifs endogènes.

Le système fonctionne dès qu'un objectif exogène est fixé et tant que cet objectif n'est pas atteint. Si le système ne peut atteindre ses objectifs exogènes, il se transforme (transforme son organisation) simultanément à son fonctionnement. Son objectif endogène s'identifie alors rattaché à un fonctionnement satisfaisant du système. Dès lors que l'objectif endogène est atteint, le système cesse de se transformer.

Deux cas de transformation sont particulièrement intéressants.

- La **conception** d'un système : une nouvelle organisation se substitue à une absence d'organisation. En fait, il s'agit le plus souvent de la formalisation d'une organisation jusque là non explicitée.
- La **suppression** d'un système : l'ancienne organisation est abandonnée. En fait, il s'agit souvent du remplacement de l'ancienne organisation par une nouvelle, suffisamment différente pour être distinguée de l'ancienne.

#### 3.2.5.2 Propriétés

- Le fonctionnement du système est à considérer dans une perspective *synchronique* : ce que fait le système dans le temps présent avec une organisation donnée pour atteindre ses objectifs exogènes.

- La transformation du système est à considérer dans une perspective *diachronique* : ce que fait le système pour atteindre ses objectifs endogènes à travers le temps [Morin 77] (fig. 4).
- Le fonctionnement d'un système peut être modélisé sous forme de relations entre les sorties du système et ses entrées. Dans le cas général, ces relations ne se présentent pas sous une forme analytique simple.
- La transformation d'un système revient à modifier ses entités ou leurs interactions pour obtenir des relations entrées-sorties conformes aux objectifs exogènes du système.
- Chaque entité du système est douée d'un comportement propre.
- Le comportement d'un système dépend principalement des interactions entre les entités.
- Le comportement du système peut être déduit du comportement de ses entités. Cette vision est déterministe en apparence seulement car dans les systèmes complexes, les interactions ne sont jamais parfaitement connues.

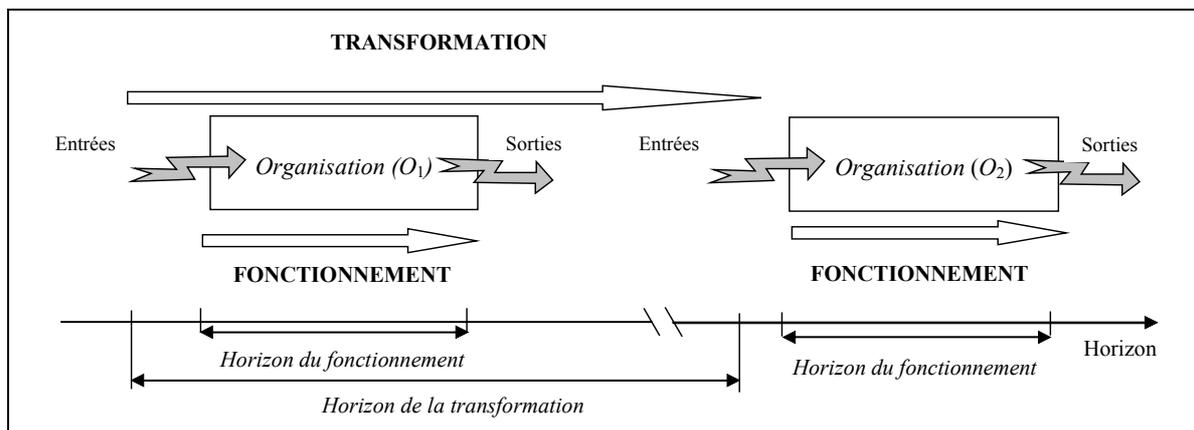


Figure 4 : Fonctionnement et transformation d'un système

### 3.2.5.3 Exemple

**Fonctionnement** : un système de production fonctionne en élaborant des produits et services destinés aux clients à partir des fournitures et informations provenant de son environnement.

**Transformation** : un système de production peut se transformer de deux manières suivant le degré de révision de son organisation [Mélèse 91].

- Une révision partielle du système ou **évolution** [Mélèse 91]. Ce type de transformation trouve une illustration dans la démarche CIP (Ch. I § 2.3.3).
- Une révision totale du système ou **mutation** [Mélèse 91]. Ce type de transformation trouve une illustration dans la démarche BPR (Ch. I § 2.3.3).

### 3.2.6 Récapitulatif des caractéristiques d'un système

Un système poursuit des *finalités* qui se concrétisent sous forme de *buts* et *objectifs* à atteindre, dans un *environnement* donné. Pour un observateur, le système est vu comme une

*organisation* douée d'un *comportement* conformément aux objectifs à atteindre. L'organisation est décomposée sur plusieurs niveaux de détail en un ensemble d'*entités* et un ensemble d'*interactions* entre ces entités. Les *objectifs exogènes* définissent les sorties attendues du système. Les *objectifs endogènes* permettent de définir l'organisation attendue pour atteindre les objectifs exogènes.

L'organisation doit permettre au système de *fonctionner* et de se *transformer* pour atteindre ses *objectifs exogènes* et *endogènes*. Les deux formes complémentaires de comportement d'un système sont donc :

- le *fonctionnement* dans le temps réel où il fixe ses entrées pour élaborer ses sorties conformément à ses objectifs exogènes,
- la *transformation* au travers du temps où il modifie son organisation conformément à ses objectifs endogènes.

Notre étude portant sur la modélisation du système d'indicateurs, nous décrivons dans le paragraphe suivant ce dernier conformément aux caractéristiques systémiques étudiées précédemment.

## 4 Un modèle systémique pour le système d'indicateurs

### 4.1 Finalités du système d'indicateurs

La finalité du système d'indicateurs est, dans un cadre stratégique donné, de délivrer des expressions de performance associées à l'évolution d'un plan d'action.

Finalité :: Aide à la génération, au choix, à la mise en œuvre et à la clôture d'un plan d'action.
--

### 4.2 Environnement du système d'indicateurs

Le système d'indicateurs est un sous-système du système de pilotage. Les principaux échanges sont notamment dans le système de pilotage et avec le système piloté. Rappelons que (Ch. I § 3.1): « *le système piloté englobe toutes les activités qui assurent la transformation des produits et services soient la production, la gestion de production, la conception, l'industrialisation, les achats, les expéditions, etc. Le système de pilotage regroupe l'ensemble des moyens et flux qui élaborent les plans d'action qui regroupent les variables d'action identifiées le plus souvent aux 5M, en fonction des objectifs et des performances du système piloté* ».

Environnement :: {système de pilotage, système piloté}
--

Les entrées du système d'indicateurs sont donc fournies par :

- d'une part, le système de pilotage :
  - l'objectif global  $O$  et sa variable  $V$ ,
  - les variables d'action associées à  $V$ ,

- les mécanismes d'élaboration de la performance,
- les mécanismes d'agrégation de la performance,
- d'autre part, le système piloté :
  - l'ensemble des signaux retournés par les capteurs.

Les sorties du système sont destinées au système de pilotage. Ce sont des expressions de performance.

### 4.3 Organisation du système d'indicateurs

L'organisation d'un système d'indicateurs, notée OSIP, permet de transformer les entrées du système en sorties. Elle repose, de notre point de vue, sur la décomposition de l'objectif global. Cette décomposition génère des objectifs dépendants et donc des indicateurs en interaction. D'une façon générale, l'organisation du système d'indicateurs se présente sous la forme d'un ensemble d'indicateurs en interaction.

OSIP :: [*Indicateur de performance*}, *Interaction*}]

#### 4.3.1 Entités du système d'indicateurs

L'entité de base du système d'indicateurs est l'indicateur [Clivillé 03a]. Nous rappelons ci-après le modèle d'indicateur développé précédemment à nos travaux [Berrah 97] et sur lequel nous nous appuyons.

Un indicateur de performance est constitué sur la base du triplet (*variable, objectif, mesure*). La définition des éléments de ce triplet en appelle à la notion préalable d'*univers de discours U*.

- *U* est défini sur l'ensemble des univers de discours *U* et est constitué d'un ensemble de paramètres :
  - l'*identificateur* qui permet de reconnaître l'objectif et la mesure, c'est-à-dire la variable essentielle considérée, par exemple *la compétence d'un opérateur*,
  - le *type* de l'objectif ou de la mesure qui peut être numérique par exemple *une quantité produite*, ou linguistique par exemple *la compétence d'un opérateur*,
  - l'*unité* lorsque l'objectif ou la mesure est numérique, par exemple une quantité produite *en milliers*,
  - le *domaine* qui fixe les valeurs potentiellement prises, par exemple un ensemble de valeurs linguistiques *{débutant, confirmé, expert}*.

Dans un souci d'homogénéité et de clarté d'écriture, nous adoptons dans ce mémoire la grammaire suivante [Berrah 97] :

$$U :: \langle \textit{identificateur}_U \rangle, \langle \textit{type} \rangle, \langle \textit{unité} \rangle, \langle \textit{domaine} \rangle$$

- $v$  est la variable essentielle par rapport à laquelle l'objectif est défini.  $v$  est définie sur  $V$ , l'ensemble des variables de l'entreprise, et est exprimée en cohérence avec l'identificateur de l'univers de discours de l'objectif, *i.e.* selon une même grandeur. Le plus souvent, la variable  $v$  et l'*identificateur*  $_U$  sont confondus.

$$v :: \langle \textit{identificateur}_U \rangle$$

- $o$  est la déclaration de l'objectif, définie sur  $O$ , l'ensemble des objectifs de l'entreprise. L'*expression* de  $o$  identifie l'état espéré de tout ou partie de l'entreprise.

$$o :: \langle \textit{identificateur}_U \rangle, =, \langle \textit{expression} \rangle$$

- $m$  est la mesure, définie sur  $M$ , l'ensemble des mesures associées aux objectifs de l'entreprise.  $m$  traduit l'état atteint par tout ou partie de l'entreprise, noté  $\mu$ .  $\mu$  est défini sur  $E$ , l'ensemble des signaux délivrés par les capteurs de l'entreprise. La mesure  $m$  est définie à partir du signal  $\mu$ , retourné par un capteur physique, logique ou humain, significatif de l'état du système. Ce traitement peut être formalisé par une fonction  $T$ , *Traitement* :

$T: E \times U \rightarrow M$ $(\mu, U) \rightarrow (\mu, U) = m$
---

$$m :: \langle \textit{identificateur}_U \rangle, =, \langle \textit{expression} \rangle$$

Par ailleurs, un indicateur exprime une performance  $p$ , définie sur  $P$ , l'ensemble des expressions de performance associées aux objectifs de l'entreprise.  $p$  est également définie sur un univers de discours  $U_p$  [Berrah 97].

$$p = \langle \textit{identificateur}_{U_p} \rangle, =, \langle \textit{expression} \rangle$$

L'indicateur utilise alors une opération pour la comparaison, conformément à la fonction *Comparaison*  $C_p$  :

$C_p: O \times M \rightarrow P$ $(o, m) \rightarrow C_p(o, m) = p$
--

Notons que cette fonction se traduit généralement par une relation analytique simple (différence, ratio,..) entre l'objectif et la mesure mais que d'autres procédures peuvent être envisagées (Cf. Ch. III), comme par exemple l'interrogation directe du pilote sur des couples  $(o, m)$  particuliers.

### **Exemple**

Le responsable des approvisionnements assure les approvisionnements en matière première et produits intermédiaires de l'entreprise au meilleur coût. Il se définit deux objectifs  $o_1, o_2$  rattachés respectivement au *Taux\_de\_pénurie* et au *Coût\_de\_stockage* et déclarés sur les univers de discours  $U_1, U_2$ .

$U_1 :: \text{Taux\_de\_pénurie, numérique, \% sorties magasin, [0, 20]}$

$o_1 :: \text{Taux\_de\_pénurie} = 2\%$

$U_2 :: \text{Coût\_de\_stockage, numérique, \% CA, [0, 100]}$

$o_2 :: \text{Coût\_de\_stockage} = 3\%$

Supposons que les capteurs retournent les signaux  $\mu_1, \mu_2$  suivants :

$\mu_1 = 13 \text{ pénuries pour } 325 \text{ sorties d'articles.}$

$\mu_2 = 25 \text{ k€ pour } 500 \text{ k€ de CA.}$

Les mesures  $m_1, m_2$  correspondantes seront donc (en effectuant un rapport) :

$m_1 :: \text{Taux\_de\_pénurie} = 4\%$

$m_2 :: \text{Coût\_de\_stockage} = 5\%$

Les univers de discours de la performance  $U_{p1}$  et  $U_{p2}$  sont définis comme suit :

$U_{p1} :: \text{Taux\_de\_pénurie, numérique, \% sorties magasin [0, 20]}$

$U_{p2} :: \text{Coût\_de\_stockage, numérique, \% CA, [0, 100]}$

Supposons que l'expression de performance  $p_1$  soit calculée grâce à un opérateur de différence,  $Cp(o_1, m_1) = o_1 - m_1$  :

$p_1 :: \text{Taux\_de\_pénurie} = o_1 - m_1 = + 2\%$

L'expression de performance  $p_2$  est calculée grâce à un opérateur de différence relative,

$$Cp(o_2, m_2) = \frac{m_2 - o_2}{o_2} :$$

$p_2 :: \text{Coût\_de\_stockage} = \frac{m_2 - o_2}{o_2} = 67\%$

### 4.3.2 Interactions du système d'indicateurs

Deux indicateurs sont en interaction si l'expression de performance élaborée par l'un d'entre eux modifie l'expression de performance élaborée par l'autre indicateur. Une interaction concerne des indicateurs d'un même niveau, et se limite généralement à deux indicateurs. Elle peut être **unidirectionnelle**, une expression  $p_i$  évolue quand une expression  $p_j$  évolue, ou **mutuelle** (bidirectionnelle), une expression  $p_i$  évolue quand une expression  $p_j$  évolue et réciproquement.

L'interaction entre deux indicateurs peut donc être formalisée de la façon suivante :

Int. ::  $[IP_i, IP_j]$  pour  $i \neq j$  où  $\Delta p_j \Rightarrow \Delta p_i$  et/ou  $\Delta p_i \Rightarrow \Delta p_j$

#### Exemple

Cet exemple illustre une interaction unidirectionnelle, il est inspiré de la méthode QMPMS (Annexe II-D). Une entreprise se définit un système d'indicateurs relativement à un objectif global  $O :: \text{coût\_global\_unitaire} = C$  (fig. 5). Parmi les indicateurs définis dans le cadre de ce système, deux indicateurs, qui délivrent les expressions suivant les variables  $v_1 :: \text{volume}$  et  $v_2 :: \text{coût\_matière\_et\_fournitures\_unitaire}$  sont en interaction. Une action pour améliorer  $p_1$

(augmentation du volume) entraîne une amélioration de  $p_2$  (diminution du coût matière et fournitures par unité) sans qu'aucune action spécifique à  $p_2$  ne soit mise en œuvre.

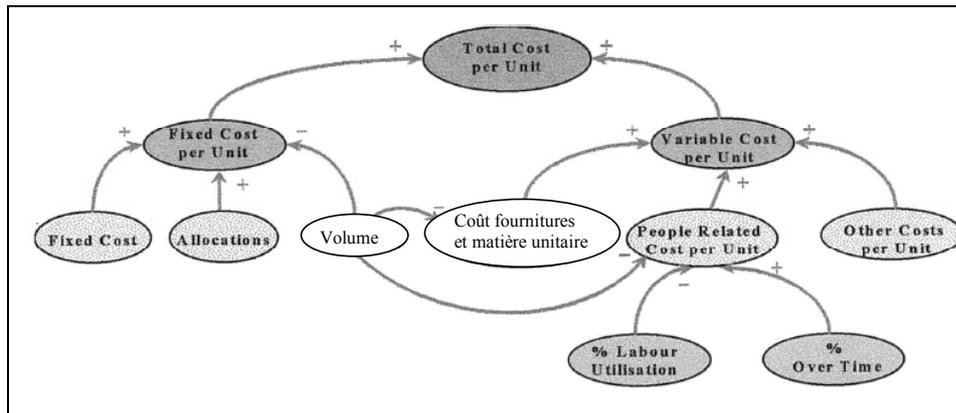


Figure 5 : Exemple d'interaction entre deux indicateurs [Suwignjo 00 p.236]

### 4.3.3 Sous-systèmes du système d'indicateurs

L'organisation d'un système d'indicateurs peut être vue à différents niveaux de détail. Au niveau d'abstraction le plus élevé, le système d'indicateurs se résume à l'indicateur  $(V, O, M)$  associé à l'objectif  $O$ . Au niveau de détail 1,  $O$  se décompose en un ensemble d'objectifs  $(o_1, \dots, o_i, \dots, o_n)$ . Le système s'organise alors sous forme de  $n$  indicateurs en interaction. Aux niveaux de détails  $\lambda$  suivants, les objectifs associés aux indicateurs précédents peuvent être décomposés, donnant lieu encore une fois à des indicateurs en interaction etc., jusqu'au niveau de détail le plus bas, soit  $L$ . L'organisation du système peut être alors vue à travers des sous-systèmes, chaque sous-système regroupant des indicateurs dont les objectifs sont issus de la décomposition d'un même objectif (fig. 6). Comme indiqué dans l'analyse des modèles existants, la décomposition peut se faire selon :

- la structure de pilotage de l'entreprise, dans ECOGRAI par exemple,
- les processus, dans les approches ABC/ABM ou ENAPS par exemple,
- les axes stratégiques, dans le BSC ou le PPMS par exemple,
- ...

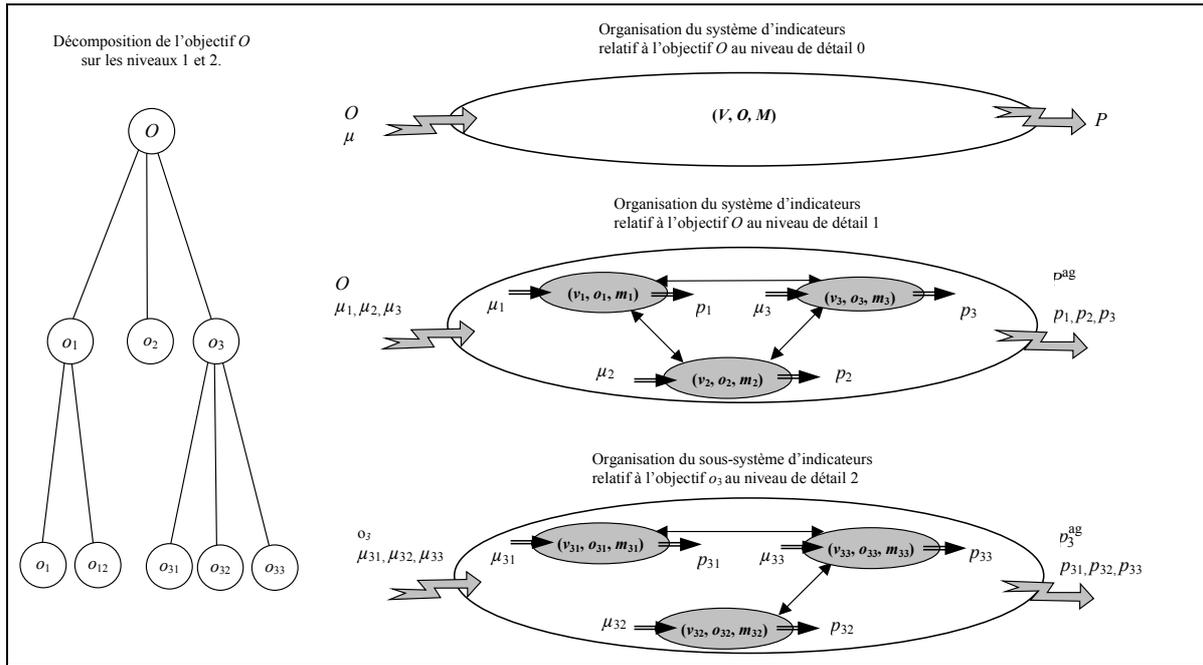


Figure 6 : Exemple d'organisation d'un système d'indicateurs

#### 4.4 Objectifs exogènes et endogènes du système d'indicateurs

Nous distinguons trois objectifs exogènes suivant que les expressions de performance délivrées par le système d'indicateurs sont associées à la génération ou au choix d'un plan d'action, à sa mise en œuvre ou à sa clôture.

Objectif exogène 1 :: expressions de performance associées à la génération ou au choix d'un plan d'action

Objectif exogène 2 :: expressions de performance associées à la mise en œuvre d'un plan d'action

Objectif exogène 3 :: expressions de performance associées à la clôture d'un plan d'action

Les objectifs endogènes associés à ces objectifs exogènes consistent à mettre en place une organisation du système d'indicateurs capable de délivrer des expressions de performance conformément aux objectifs exogènes. Trois phases, de conception, de révision et de suppression sont distinguées dans la mise en place de cette organisation.

Nous identifions donc les trois objectifs endogènes suivants.

Objectif endogène 1 :: conception de l'organisation du système d'indicateurs

Objectif endogène 2 :: révision de l'organisation du système d'indicateurs

Objectif endogène 3 :: suppression de l'organisation du système d'indicateurs

#### 4.5 Comportement du système d'indicateurs

Conformément aux préceptes systémiques, le système d'indicateurs :

- *fonctionne* pour atteindre ses objectifs exogènes, *i.e.* délivre des expressions de performance,
- *se transforme*, conformément à ses objectifs endogènes, *i.e.* adapte son organisation afin de délivrer les expressions de performance attendues.

Autrement dit, pour fonctionner, le système d'indicateurs doit transformer son organisation, conformément à ses objectifs endogènes. Il doit d'abord la concevoir, puis éventuellement la réviser, voire pour finir, la supprimer.

#### 4.5.1 Conception du système d'indicateurs

La conception d'un système d'indicateurs permet d'en définir l'organisation, dès lors qu'un objectif global est fixé par le système de pilotage. Cette conception repose donc sur la décomposition de l'objectif global et traduit l'interaction entre l'indicateur associé à l'objectif global et les indicateurs associés aux objectifs décomposés. Outre cette décomposition, deux types de mécanisme sont à considérer pour définir complètement l'organisation :

- celui d'élaboration directe de la performance par comparaison de l'objectif et de la mesure,
- celui d'agrégation d'expressions de performance d'un même niveau (fig. 7) utiles pour fournir une information synthétique concernant l'atteinte de l'objectif de niveau supérieur.

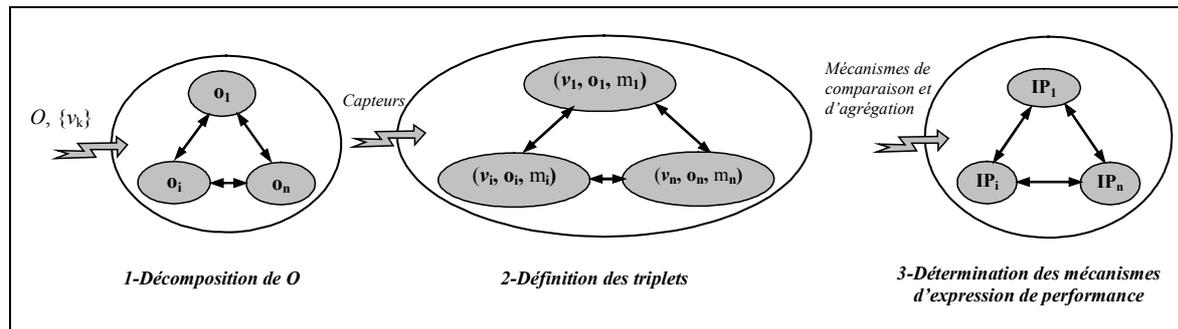


Figure 7 : Illustration de la conception du système d'indicateurs (sur un niveau)

##### 4.5.1.1 Décomposition des objectifs

Le mécanisme de décomposition des objectifs est basé sur une hiérarchisation des variables. En effet, le système de pilotage identifie l'arbre complet  $A_v$  des variables relatives à la variable  $V$  de l'objectif  $O$  ; 0 en sera le niveau d'abstraction le plus élevé,  $L$ , le niveau de détail le plus bas et  $\lambda$  un niveau intermédiaire. La hiérarchisation est formalisée par la fonction  $H$  :

$$H: V \rightarrow P(A_v)$$

$$V \rightarrow H(V) = \{v_j^\lambda\}$$

$\lambda$  étant l'indice associé au niveau de la décomposition (généralement entre 2 et 4), et  $j$  l'indice permettant de distinguer les variables d'un même niveau (généralement entre 3 et 10).

A partir de cet arbre, le système d'indicateurs réalise :

- une sélection, basée sur l'importance des contributions de chaque variable, qui, selon la valeur de  $O$ , restreint l'arbre des variables  $\{v_j^\lambda\}$  à l'arbre  $\{v_i^\lambda\}$  ; la sélection est formalisée par la fonction  $S$  :

$$S: \quad O \times P(A_v) \rightarrow P(A_v)$$

$$(O, \{v_j^\lambda\}) \rightarrow S(O, \{v_j^\lambda\}) = \{v_i^\lambda\} \text{ avec } \{v_i^\lambda\} \subset \{v_j^\lambda\}$$

- une quantification des objectifs qui, selon la valeur de  $O$ , associe à l'arbre des variables  $\{v_j^k\}$ , un arbre d'objectifs, noté  $\{o_j^k\}$ , qui fixe les valeurs espérées ; la quantification est formalisée par la fonction  $Q$  :

$$Q: \quad O \times P(A_v) \rightarrow P(O_v)$$

$$(O, \{v_i^\lambda\}) \rightarrow Q(O, \{v_i^\lambda\}) = \{o_i^\lambda\}, \text{ avec } O_v \text{ l'arbre des objectifs associés à } A_v$$

$$o_i^\lambda, :: \langle v_i^\lambda \rangle = \langle \text{expression}_{-i} \rangle$$

Conformément à la déclaration d'un objectif  $o_i$ , il faut alors définir les univers de discours  $U_i$  :

$$\forall o_i, U_i :: \langle v_i \rangle, \langle \text{type}_{-i} \rangle, \langle \text{unité}_{-i} \rangle, \langle \text{domaine}_{-i} \rangle$$

Au final, la décomposition, notée  $D$ , associe un arbre d'objectifs  $\{o_i^\lambda\}$  à l'objectif global  $O$ .

$$D: \quad O \times P(A_v) \rightarrow P(O_v)$$

$$(O, \{v_j^\lambda\}) \rightarrow D(O, \{v_j^\lambda\}) = \{o_i^\lambda\}$$

Cette fonction  $D$  se déduit naturellement par la composition des deux fonctions précédentes  $S$  et  $Q$ .

Signalons que, lorsque nous considérerons deux niveaux consécutifs, nous omettrons, pour simplifier l'écriture, l'indexation associée mise en exposant. Un objectif global se décompose alors en  $n$  objectifs de niveau immédiatement inférieur :

$$D(O, \{v_j\}) = (O, o_1, \dots, o_i, \dots, o_n), i = 1 \text{ à } n.$$

Enfin terminons en signalant que le système d'indicateurs peut proposer plusieurs décompositions. Il faudra dans ce cas être capable de discriminer entre ces propositions (Ch. III § 2.2.2).

### Exemple

Soit l'objectif global,  $O :: \text{Disponibilité\_Equipement} = 80\%$ , défini sur l'univers de discours  $U :: \text{Disponibilité\_Equipement, numérique, \%, [30, 95]}$ .

Le système de pilotage identifie cinq variables d'action au niveau 1 ; formant ainsi l'arbre  $\{V, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$  (par rapport à la variable essentielle  $V :: \text{Disponibilité\_Equipement}$ ).

$$H(V) = \{V, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} \text{ avec}$$

$$v_1 :: \text{Compétence\_opérateurs}$$

$$v_2 :: \text{MTBF}$$

$$v_3 :: \text{Changement\_de\_série}$$

$$v_4 :: \text{Maîtrise\_des\_procédés}$$

$$v_5 :: \text{Niveau\_d'encours}$$

Pour  $O :: \text{Disponibilité\_Equipement} = 80\%$ , le système d'indicateurs ne sélectionne que quatre de ces cinq variables d'action, l'action sur la variable  $v_1 :: \text{Compétence\_opérateurs}$  étant écartée dans le contexte considéré.

$$S(O, \{V, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}) = \{V, v_2, v_3, v_4, v_5\}$$

Le système d'indicateurs fixe alors la valeur des objectifs.

$$Q(O, \{V, v_2, v_3, v_4, v_5\}) = \{O, o_2, o_3, o_4, o_5\}, \text{ avec}$$

$$o_2 :: \text{MTBF} = 2000 \text{ h}$$

$$o_3 :: \text{Changement\_de\_série} = 200 \text{ centiheures}$$

$$o_4 :: \text{Maîtrise\_des\_procédés} = 100\%$$

$$o_5 :: \text{Niveau\_d'encours} = 4 \text{ heures}$$

Pour terminer la décomposition, le système d'indicateurs complète chaque variable par un type, une unité et un domaine définissant ainsi les univers de discours des objectifs associés.

$$U_2 :: \text{MTBF, numérique, heures, [1000, 3000]}$$

$$U_3 :: \text{Changement\_de\_série, , numérique, centiheures, [50, 400]}$$

$$U_4 :: \text{Maîtrise\_des\_procédés, numérique, \%, [0, 100]}$$

$$U_5 :: \text{Niveau\_d'encours, numérique, heures, [0, 8]}$$

La décomposition des objectifs est donc réalisée :

$$D(O) = \{O, o_2, o_3, o_4, o_5\}$$

#### 4.5.1.2 Définition des indicateurs

Il s'agit de compléter tout couple  $(v, o)$  formé d'une variable et d'un objectif, obtenus par la décomposition précédente, par une mesure  $m$ . Cette mesure  $m$  est obtenue par la fonction *Traitement T* à partir d'une grandeur  $\mu$  délivrée par un capteur du système piloté. L'indicateur IP est alors constitué conformément aux entités du système d'indicateurs (§ 4.3.1).

### Exemple

L'objectif global  $O :: Disponibilité\_Equipement = 80\%$  est décomposé en les objectifs  $o_2, o_3, o_4, o_5$ , associés respectivement aux variables  $v_2, v_3, v_4, v_5$ . Les indicateurs sont constitués en leur associant les mesures  $m_2, m_3, m_4, m_5$  élaborées à partir des traitements suivants.

$T(\mu_2, U_2) = m_2$	où $\mu_2$ est le nombre de pannes survenues sur l'équipement pour une durée d'utilisation donnée.
$T(\mu_3, U_3) = m_3$	où $\mu_3$ est un relevé des temps de changement de série pour une durée d'utilisation donnée.
$T(\mu_4, U_4) = m_4$	où $\mu_4$ est l'ensemble des cartes de contrôle de capacité de l'équipement pour une durée d'utilisation donnée.
$T(\mu_5, U_5) = m_5$	où $\mu_5$ est un relevé d'observations instantanées pour une durée d'utilisation donnée.

Suite à la mise en œuvre, par le système de pilotage, d'un plan d'action intitulé « Qualité Totale », le traitement des grandeurs délivrées par des capteurs physiques ( $\mu_2, \mu_3$ ) ou humains ( $\mu_4, \mu_5$ ) a permis d'obtenir les mesures suivantes.

$m_2 :: MTBF = 1750 \text{ h}$
$m_3 :: Changement\_de\_série = 2,5 \text{ h}$
$m_4 :: Maîtrise\_des\_procédés = 87,5\%$
$m_5 :: Niveau\_d'encours = 2 \text{ h}$

#### 4.5.1.3 Elaboration des expressions de performance

L'élaboration des expressions de performance relève des entités du système d'indicateurs, *i.e.* des indicateurs de performance. Conformément à la définition de l'indicateur (§ 4.3.1), l'expression de performance  $p$  est obtenue par une comparaison de  $m$  à  $o$ , formalisée par la fonction *Comparaison*  $Cp$ . Il n'est pas toujours possible d'explicitier directement  $Cp$ , notamment dans le cas où aucun capteur ne peut fournir  $\mu$ , ce qui interdit le traitement fournissant  $m$ . C'est souvent le cas lorsque les plans d'action sont générés. Une valeur  $m$ , ou éventuellement une valeur  $p$ , est affectée par expertise à chaque plan d'action ce qui revient à construire  $Cp$  de manière indirecte.

Notons que c'est lors de l'élaboration de ces expressions de performance que seront identifiées les interactions unidirectionnelles ou mutuelles entre deux indicateurs de même niveau. Il s'agit d'établir la relation entre deux expressions  $p_i$  et  $p_j$ . Pour modéliser cette interaction, il est possible de définir un terme  $p_{ij}$  qui corrige une expression en fonction de l'autre :  $p'_i = p_i + p_{ij}$ , et/ou  $p'_j = p_j + p_{ji}$ . Si  $p_{ij} = 0$  ou  $p_{ji} = 0$ , l'interaction est unidirectionnelle, si  $p_{ij} \neq 0$  et  $p_{ji} \neq 0$ , l'interaction est mutuelle<sup>11</sup>.

### Exemple

Soient les indicateurs constitués sur la base des triplets  $(v_2, o_2, m_2), (v_3, o_3, m_3), (v_4, o_4, m_4), (v_5, o_5, m_5)$ , associés à l'objectif global précédent,  $O :: Disponibilité\_Equipement = 80\%$ . Les expressions de performance sont élaborées sur les univers de discours propres  $U_{p2}, U_{p3}, U_{p4}, U_{p5}$ . Des opérateurs de comparaison tels que le rapport, la différence relative ou l'identité, sont utilisés pour l'élaboration des expressions de performance.

<sup>11</sup> Dans le modèle QMPMS (Annexe II-D), l'auteur suppose que  $p_{ij} = -p_{ji}$ .

$U_{p2}$	::	Indice_de_fiabilité, numérique, heures, [1/3, 3]
$p_2$	::	Indice_de_fiabilité = $\frac{m_2}{o_2}$
$U_{p3}$	::	Changement_de_série, , numérique, centiheures, [1/4, 4]
$p_3$	::	Changement_de_série = $\frac{4-m_3}{o_3}$
$U_{p4}$	::	Maîtrise_des_procédés, numérique, %, [0, 100]
$p_4$	::	Maîtrise_des_procédés = $m_4$
$U_{p5}$	::	Indice_niveau_d'encours, numérique, décimal, [-1, 1]
$p_5$	::	Indice_niveau_d'encours, = $\frac{m_5-o_5}{o_5}$

Ainsi, suite à la mise en œuvre du plan d'action « Qualité Totale », les indicateurs élaborent les expressions de performance suivantes :

$p_2$	::	Indice_de_fiabilité = $\frac{m_2-1750}{o_2-2000} = 0,875$
$p_3$	::	Changement_de_série = $\frac{4-m_3}{o_3} = \frac{4-2,5}{2} = 0,75$
$p_4$	::	Maîtrise_des_procédés = $m_4 = 87,5\%$
$p_5$	::	Indice_niveau_d'encours, = $\frac{m_5-o_5}{o_5} = \frac{2-4}{4} = -0,5$

Si ces expressions permettent une interprétation aisée pour le pilotage local, elles sont plus difficiles à interpréter pour le pilotage du niveau supérieur, notamment parce qu'elles sont définies sur des domaines différents. Le responsable impose alors de définir systématiquement des univers de discours  $U_p$  de type numérique, sur le domaine borné de l'intervalle [0,1]. Le système d'indicateurs définit alors les nouveaux univers de discours  $U_{p2}$ ,  $U_{p3}$ ,  $U_{p5}$  et les opérateurs de comparaison  $Cp_2$ ,  $Cp_3$ ,  $Cp_5$  correspondants. Dans ces conditions, les indicateurs élaborent par exemple les expressions suivantes.

$p_2$	::	Indice_de_fiabilité = $\min\left(\frac{m_2}{o_2}; 1\right)$
$p_3$	::	Changement_de_série = $\min\left(\frac{4-m_3}{o_3}; 1\right)$
$p_5$	::	Indice_niveau_d'encours = $\frac{m_5}{o_5}$ si $m_5 < o_5$ , $2 - \frac{m_5}{o_5}$ si $m_5 > o_5$

Notons que les opérateurs utilisés le sont simplement à titre d'illustration, la problématique générale de l'interprétation au niveau supérieur des performances du niveau inférieur est un point important sur lequel nous revenons ci-après et plus complètement dans le chapitre 3.

#### 4.5.1.4 Agrégation des expressions de performance

La décomposition des objectifs aboutit généralement à des expressions de performance nombreuses et de diverses natures. Prendre des décisions directement à partir de cet ensemble d'expressions est donc souvent difficile. C'est pourquoi l'agrégation des performances est une

fonction clé de l'aide au pilotage. Elle consiste à exprimer la performance, relativement à un objectif, par la combinaison des expressions de performance des objectifs qui le composent. La performance ainsi obtenue est qualifiée de performance agrégée et permet de passer d'un niveau de détail donné à un niveau plus synthétique.

Notons qu'il est possible de contourner cette agrégation des expressions de performance, souvent difficile à déterminer, soit par des méthodes de décision basées sur l'ensemble des expressions de performance, soit par la définition de variables plus synthétiques, qui sont généralement des agrégations de grandeurs physiques. Notre approche étant résolument orientée « indicateur de performance », nous ne décrivons ci-après que le mécanisme d'agrégation des expressions de performance.

Raisonnons, dans un souci de clarté et de simplification, sur deux niveaux consécutifs, le principe étant le même pour un raisonnement sur la globalité des niveaux. Considérons un objectif  $o_i$  décomposé en les objectifs  $o_{i1}, \dots, o_{in}$ . L'expression de performance agrégée,  $p_i^{ag}$ , significative du degré d'atteinte de l'objectif  $o_i$  est obtenue conformément à la fonction  $Ag$  suivante [Berrah 04] :

$$Ag : \quad P^n \rightarrow P$$

$$(p_{i1}, \dots, p_{in}) \rightarrow Ag(p_{i1}, \dots, p_{in}) = p_i^{ag}$$

Cette expression de performance  $p_i^{ag}$  est déclarée sur son univers de discours  $U_{p_i^{ag}}$  :

$$p_i^{ag} = \langle \text{identificateur}_{U_{p_i^{ag}}}, =, \langle Ag(p_{i1}, \dots, p_{in}) \rangle \rangle$$

### Exemple

Reprenons l'exemple précédent où l'objectif global est  $O :: \text{Disponibilité\_équipement} = 80\%$ .

Dans le cas de la mise en œuvre du plan d'action « Qualité Totale », ces expressions de performance sont alors :

$$p_2 :: \text{Indice\_de\_fiabilité} = 0.875$$

$$p_3 :: \text{Changement\_de\_série} = 0.75$$

$$p_4 :: \text{Maîtrise\_des\_procédés} = 0.875$$

$$p_5 :: \text{Indice\_niveau\_d'encours} = 0.5$$

Le système d'indicateurs peut agréger ces expressions de performance en une expression agrégée  $P^{ag}$  définie sur l'univers de discours  $U_{p^{ag}}$  comme étant la moyenne des expressions de performance :

$$U_{p^{ag}} :: \text{Indice\_Disponibilité\_Équipement, numérique, réel, } [0, 1]$$

$$P^{ag} :: \text{Indice\_Disponibilité\_Équipement} = \left( \frac{p_2 + p_3 + p_4 + p_5}{4} \right)$$

Dans le cas du plan d'action « qualité totale »,  $P^{ag}$  prend la valeur suivante :

$$P^{ag} :: \text{Indice\_Disponibilité\_Equipement} = \left( \frac{0.875+0.75+0.875+0.5}{4} \right) = 0.75$$

Notons là aussi que les opérateurs utilisés le sont simplement à titre d'illustration, la problématique générale de la détermination de l'opérateur d'agrégation de manière cohérente à la décomposition est un point important sur lequel nous revenons plus complètement dans le chapitre 3.

#### 4.5.2 Révision et suppression du système d'indicateurs

La révision d'un système d'indicateurs permet d'en adapter l'organisation lorsque celle existante ne permet pas l'atteinte des objectifs exogènes. En effet, rappelons que l'organisation permet de transformer les entrées du système en sorties. Dès lors que les entrées évoluent, généralement en raison d'une évolution de l'environnement, l'organisation peut ne plus fournir les sorties attendues. Plus précisément, les fonctions *Décomposition*, *Traitement*, *Comparaison* et *Agrégation* peuvent être remises en cause. Dans ce sens, le tableau 3 récapitule les cas de révision envisageables dans le système d'indicateurs, selon les évolutions possibles de ses entrées.

Entrée modifiée / Fonction révisée	Objectif global	Arbre des variables	Capteurs	Mécanismes de comparaison	Mécanismes d'agrégation
<i>Décomposition</i>	oui	oui			
<i>Traitement</i>	oui	oui	oui		
<i>Comparaison</i>	oui	oui	éventuellement	oui	éventuellement
<i>Agrégation</i>	oui	oui			oui

Tableau 5 : La révision du système d'indicateurs

Dans ce tableau, nous pouvons lire par exemple, qu'une modification de l'arbre des variables entraîne la révision de toutes les fonctions du système d'indicateurs. La modification des capteurs entraîne, pour sa part, la révision de la fonction *Traitement* et éventuellement de la fonction *Comparaison* du système d'indicateurs.

Signalons enfin que le système d'indicateurs est supprimé lorsque l'entreprise supprime l'objectif global  $O$ .

#### 4.6 Récapitulatif concernant le système d'indicateurs

Caractéristique	Déclaration
Finalité	<i>Aide à la génération, le choix la mise en œuvre, la clôture d'un plan d'action</i>
Environnement	{ <i>système_de_pilotage, système_piloté</i> }
Organisation	[{ <i>Indicateur de performance</i> }, { <i>Interaction</i> }]
Entité	$IP : (v, o, m),$ $U :: \langle \text{identificateur}_U \rangle, \langle \text{type} \rangle, \langle \text{unité} \rangle, \langle \text{domaine} \rangle$ $v :: \langle \text{identificateur}_U \rangle$ $o :: \langle \text{identificateur}_U \rangle, =, \langle \text{expression} \rangle$ $m :: \langle \text{identificateur}_U \rangle, =, \langle \text{expression} \rangle$ $p = \langle \text{identificateur}_{U_p} \rangle, =, Cp(o, m)$
Interaction	( $IP_i, IP_j$ ) pour $i \neq j$
Objectifs exogènes	<p>Expressions de performance associées à la génération ou au choix d'un plan d'action</p> <p>Expressions de performance associées à la mise en œuvre d'un plan d'action</p> <p>Expressions de performance associées à la clôture d'un plan d'action</p>
Objectifs endogènes	<p>Conception de l'organisation du système d'indicateurs</p> <p>Révision de l'organisation du système d'indicateurs</p> <p>Suppression de l'organisation du système d'indicateurs</p>
Comportement	Fonctionnement, Transformation
Fonctionnement	<p>Expression de la performance associée à la génération ou au choix d'un plan d'action</p> <p>Expression de la performance associée à la mise en œuvre d'un plan d'action</p> <p>Expression de la performance associée à la clôture d'un plan d'action</p>
Transformation	<p>Conception du système d'indicateurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Décomposition des objectifs</li> <li>• Définition des indicateurs</li> <li>• Elaboration des expressions de performance</li> <li>• Agrégation des expressions de performance</li> </ul> <p>Révision du système d'indicateurs</p> <p>Suppression du système d'indicateurs</p>

## 5 Retour sur la littérature

Le tableau 4 résume le traitement des caractéristiques du système d'indicateurs dans les différentes propositions rencontrées dans la littérature. Les caractéristiques telles que les *finalités*, l'*environnement*, les *objectifs exogènes* et *endogènes* étant unanimement traitées, elles ne sont pas mentionnées.

Concernant l'organisation du système d'indicateurs, il est globalement bien admis que l'indicateur est l'entité de base de ce système. Cet indicateur est parfois complètement formalisé, mais la règle est plutôt d'en considérer un modèle implicite, sans que ni l'objectif, ni l'expression de performance n'apparaissent clairement.

L'existence d'interactions dans le système d'indicateurs fait l'unanimité, certaines approches proposant leur traitement dans quelques cas particuliers. Il s'agit le plus souvent des interactions entre indicateurs de niveaux différents qui sont traitées par la décomposition des objectifs. Cette décomposition peut être réalisée selon des axes génériques (§ 2.2.3, § 2.2.7), des processus (§ 2.2.2, § 2.2.8) ou la structure de pilotage (§ 2.2.1). Bien que mentionnée, l'agrégation n'est proposée formellement que dans deux modèles (§ 2.2.1, § 2.2.4). L'interaction entre indicateurs de même niveau n'est étudiée que dans une approche (§ 2.2.4), l'expression de performance étant corrigée selon un coefficient fixé par le pilotage.

Le comportement du système d'indicateurs est diversement traité. Dans son fonctionnement, l'élaboration des expressions de performance ne pose pas de difficulté particulière, mais l'agrégation de ces expressions n'est proposée que dans certaines approches et pour certains cas particuliers. De plus, elle est généralement considérée *a posteriori* et donc ne considère pas un cadre global qui intègre la décomposition des objectifs, la définition des indicateurs et l'élaboration des expressions de performance, ce qui pose la question de la cohérence des expressions ainsi obtenues.

La transformation est très souvent abordée sous la forme du cycle de vie du système d'indicateurs qui distingue les phases de conception, d'exploitation et de révision du système d'indicateurs, une phase d'implémentation étant éventuellement intercalée entre la conception et l'exploitation. D'une façon générale, la conception est traitée systématiquement mais pas complètement. Les grandes étapes de la conception sont la décomposition des objectifs, la définition des indicateurs, l'élaboration des mécanismes d'expression et d'agrégation de la performance. L'exploitation est le plus souvent implicite. La transformation fait l'objet de contributions spécifiques et encore non totalement abouties.

Comme nous pouvons le voir au terme de cette analyse, seules quelques approches, ECOGRAI, QMPMS, les démarches inspirées de ABC/ABM, considèrent l'ensemble des caractéristiques du système d'indicateurs. Cependant, ces modèles présentent certaines limites quant à l'agrégation qui n'est pas complètement formalisée ou qui reste disjointe de la décomposition des objectifs et de l'élaboration des performances.

Dans ce contexte, c'est donc à un traitement cohérent d'informations de performance que nous contribuerons dans la suite de ce travail. En particulier, l'agrégation est appréhendée dans le cadre global de la conception du système d'indicateurs, *i.e* conjointement à la décomposition des objectifs, la définition des indicateurs et l'élaboration des expressions de performance.

Caractéristiques	Organisation		Comportement					
			Fonctionnement		Transformation			
Approche	Modèle IP	Modèle Int.	Expression p	Expression p <sup>ag</sup>	Décomposition	Définition IP	Elaboration Cp	Elaboration Ag
ECOGRAI	√	○	√	√	√	√	√	√
BSC	○	○	○		○	•	○	
ABC/ABM	√	○	√	○	√	√	√	○
QMPMS	•	•	√	√	○		√	√
PBA					○	•		
IDPMS	○	○	○		○		○	
PPMS	○	○	○		○	•	○	○
ENAPS	√	•	√			√	√	
ISO 9000	√	•	√		○	√	√	
SCOR	√	•	○		○	√		

√ : formalisée      ○ : prise en compte explicitement mais non formalisée      • : prise en compte implicitement

Tableau 6 : Le traitement des caractéristiques dans la littérature

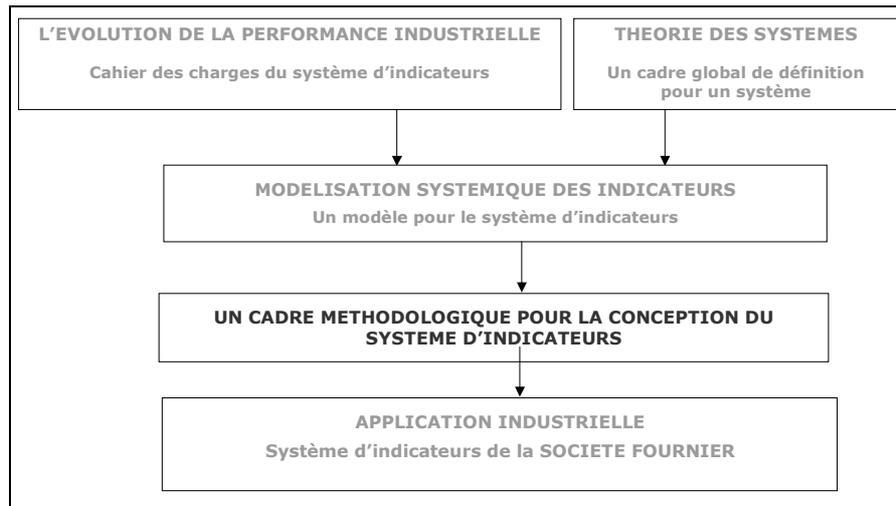
## 6 Conclusion

La revue bibliographique des systèmes d'indicateurs de performance a mis en avant les problèmes de conception, d'exploitation et de révision du système d'indicateurs. Pour autant, aucun des modèles considérés ne fournit aujourd'hui de cadre de définition de ce système dans sa globalité, ce qui fonde notre choix d'en proposer un modèle systémique.

Ce chapitre a rappelé les notions essentielles de la théorie des systèmes et a permis de retenir un certain nombre de caractéristiques nécessaires pour définir un système. Un modèle de système d'indicateurs a été défini à partir de ces caractéristiques, conformément au cahier des charges attendu par le système de pilotage. Dans ce modèle, sont définis en particulier :

- l'organisation hiérarchisée du système d'indicateurs,
- le comportement du système d'indicateurs où sont distingués,
  - son fonctionnement ; il délivre des expressions de performance relativement à l'évolution d'un plan d'action,
  - sa transformation ; dans sa conception, le système d'indicateurs détermine les fonctions *Décomposition*, *Traitement*, *Comparaison* et *Agrégation* ; dans sa révision, il modifie tout ou partie de ces fonctions.

Nous consacrons le chapitre suivant à la conception du système d'indicateurs. Nous proposons de réfléchir à une méthode opérationnelle qui traite en particulier de l'élaboration et de l'agrégation des expressions de performance, sur la base d'une décomposition d'objectifs établie.



*Positionnement du contenu du chapitre III dans notre plan de thèse*

## **Chapitre III : Un cadre méthodologique pour la conception du système d'indicateurs de performance**

### **1 Problématique**

Le chapitre II nous a permis de proposer un modèle de système d'indicateurs qui délivre des expressions de performance, directement élaborées par les indicateurs ou résultant de l'agrégation d'autres expressions. Plus précisément, dans sa phase de conception, l'objectif exogène du système d'indicateurs est de délivrer des expressions de performance concernant la génération et le choix d'un plan d'action. Il s'agit, à partir d'un objectif global décomposé en un ensemble d'objectifs selon de multiples critères, de choisir entre un nombre fini de plans d'action, *i.e.* retenir celui qui permet la meilleure atteinte de cet objectif global. Dans ce sens, la conception du système d'indicateurs, associée au choix d'un plan d'action, s'identifie à la problématique du **choix multicritère** où il s'agit de *trier, classer et choisir* un ensemble de solutions alternatives, concernant un ensemble de satisfactions de critères, c'est-à-dire d'expressions de performance. Ces expressions peuvent être multiples, associées aux différents objectifs composant l'objectif global, ou agrégées.

Pour que ces choix soient fondés, il faut que l'expression agrégée délivrée par le système d'indicateurs soit significative du degré d'atteinte de l'objectif global, ce qui revient à poser deux conditions, respectivement sur :

- la validité du modèle de décomposition des objectifs, *i.e.* l'atteinte des objectifs décomposés doit garantir l'atteinte de l'objectif global,
- la possibilité d'appliquer le modèle d'agrégation aux expressions de performance considérées, *i.e.* la possibilité d'appliquer aux expressions de performance, dans le format élaboré par les indicateurs, l'opérateur d'agrégation retenu par le système d'indicateurs.

Ces deux conditions en appellent à la théorie du mesurage par les notions de commensurabilité et de signifiante, qui conditionnent un traitement cohérent des expressions de performance. Dans le cadre du système d'indicateurs, nous envisageons donc l'élaboration des expressions de performance et le choix de l'opérateur d'agrégation conformément à ces notions. Compte tenu des interactions mutuelles entre les indicateurs, telles qu'elles ont été identifiées au chapitre II, il est entendu que la moyenne pondérée ne peut totalement satisfaire ce besoin d'agrégation. Nous considérons son extension à la forme plus générale de l'intégrale de Choquet 2-additive.

La conception du système d'indicateurs doit alors s'effectuer conformément à un cadre méthodologique cohérent, comprenant les fonctions de décomposition des objectifs, d'élaboration des expressions de performance ainsi que d'agrégation. Dans ce but, nous proposons d'adapter une méthode de choix multicritère, la méthode MACBETH, à notre problématique du système d'indicateurs.

## 2 Choix multicritère pour la conception du système d'indicateurs

Le pilote choisit entre plusieurs plans d'action générés à partir d'un ensemble d'expressions de performance élaborées puis agrégées par le système d'indicateurs (Ch. I § 3.2.3). Le problème est typiquement un problème de choix multicritère : connaissant la satisfaction de différents critères pour un ensemble de solutions, il s'agit de donner les satisfactions globales qui permettront de distinguer les différentes solutions. Dans cette section, nous exposons donc les principales notions du choix multicritère avant de les décliner à la problématique de l'agrégation dans le système d'indicateurs.

### 2.1 Les principes du choix multicritère

Dans un problème de décision multicritère, un décideur doit choisir la solution qui lui convient le mieux au vu de la satisfaction, notée  $\{s_i(x^h)\}$ , d'un ensemble de critères, noté  $\{c_i\}$ .  $i = 1 \text{ à } n$ . Ce choix s'effectue parmi un ensemble de solutions **alternatives**, noté  $\{x^h\}$   $h = 0 \text{ à } m$ , qui définissent l'espace des solutions. Le problème de la décision multicritère est que, dans le cas général, il n'existe pas de solution idéale  $x^*$  qui satisfasse totalement tous les critères [Roy 74] [Zeleny 82]. Il faut donc choisir la meilleure solution, au vu de la satisfaction globale, parmi les  $n$  envisagées. Pour cela, ces solutions peuvent être comparées selon différentes méthodes [Pomerol 93], regroupées le plus souvent en deux familles [Berro 01] présentées ci-après.

#### 2.1.1 Les méthodes basées sur les relations de surclassement

Une solution  $x^h$  **surclasse** ou domine une solution  $x^l$ ,  $l = 0 \text{ à } m$ , si elle satisfait mieux, dans un sens défini par le décideur, les critères  $\{c_i\}$ .

Ainsi, dans la *Pareto dominance*, qui est la méthode de surclassement la plus classique [Pomerol 93], une solution  $x^h$  domine au sens de Pareto une solution  $x^l$  si  $s_i(x^h) > s_i(x^l) \forall i, i \in \{1, \dots, n\}$ . Une solution qui n'est dominée (au sens de Pareto) par aucune autre solution est dite *Pareto dominante*. L'ensemble des solutions Pareto dominantes constitue la **frontière** de Pareto. Il est alors impossible de discriminer entre ces solutions « Pareto dominantes » (fig. 1). Autrement dit, les meilleures solutions appartiennent forcément à la frontière de Pareto, elles sont équivalentes entre elles et ne sont dominées par aucune autre solution.

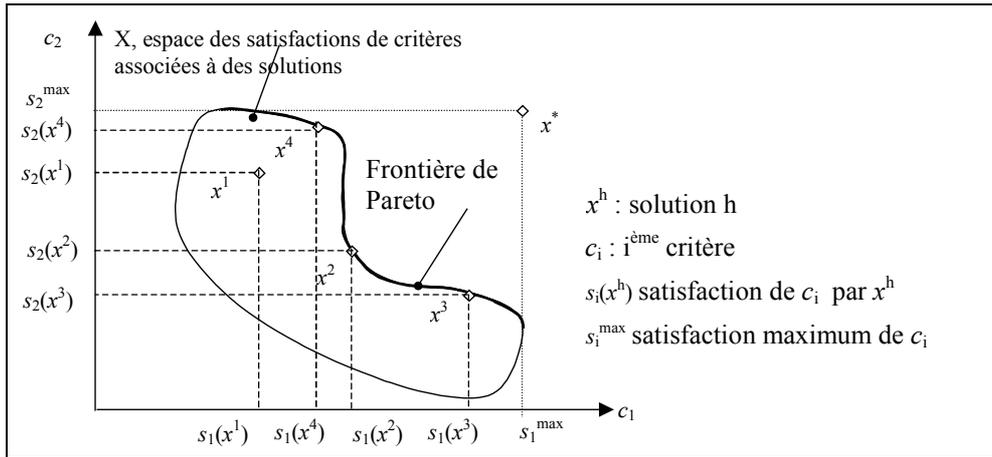


Figure 1 : Espace des solutions et frontière de Pareto en univers bi-critère

Par contre, il est impossible, en se basant uniquement sur cette relation de surclassement de choisir une solution appartenant à la frontière de Pareto (théorème d'Arrow [Pomerol 93]). Pour améliorer la discrimination des solutions alternatives, la relation de surclassement peut être davantage raffinée. De nombreuses méthodes de surclassement ont été développées dans ce sens : ELECTRE [Roy 85], PROMETHEE [Brans 86], ORESTE [Roubens 82], TACTIC [Vansnick 86]<sup>12</sup>. Ces méthodes demandent généralement aux décideurs davantage d'information que la simple comparaison des satisfactions de critères.

Globalement, les méthodes de surclassement ont l'avantage d'utiliser des connaissances que les décideurs arrivent à exprimer facilement. En revanche, ces connaissances ne sont pas toujours suffisantes pour discriminer finement l'ensemble des solutions.

### 2.1.2 Les méthodes basées sur l'agrégation des satisfactions

Chaque solution  $x^h$  se voit attribuer une note agrégée  $S(x^h)$  élaborée à partir de la satisfaction des différents critères  $\{s_i(x^h)\}$ , grâce à un opérateur d'agrégation [Pomerol 93]. La solution  $x^*$  qui satisferait idéalement tous les critères aurait bien entendu la note maximale ; mais nous l'avons dit, cette solution existe rarement. Le mécanisme d'élaboration de la note globale se fait par un opérateur d'agrégation :  $Ag[s_1(x^h), \dots, s_i(x^h), \dots, s_n(x^h)] = S(x^h)$ . La moyenne arithmétique pondérée est un exemple d'opérateur fréquemment utilisé.

Notons que le choix de l'opérateur d'agrégation (par exemple, la moyenne pondérée) ainsi que les paramètres associés (les poids pour la moyenne pondérée) est un problème parfois difficile à résoudre, le décideur n'étant pas toujours capable de synthétiser ses connaissances directement sous cette forme analytique globale.

De telles méthodes permettent une bonne discrimination de l'ensemble des solutions. Mais par rapport aux méthodes de surclassement, elles réclament davantage de connaissances que ne possèdent pas toujours les décideurs. En pratique, cela conduit souvent à postuler des opérateurs d'agrégation sans pouvoir les valider complètement.

<sup>12</sup> ELECTRE : ELimination Et Choix Traduisant la REALité. PROMETHEE : Preference Ranking Organisation METHod Enrichment Evaluations. ORESTE : Organisation, Rangement Et Synthèse de données relaTionnelles. TACTIC : Traitement des Actions Compte Tenu de l'Importance des Critères.

### 2.1.3 Un exemple de méthode de choix multicritère : la méthode AHP

Nous présentons ici brièvement la méthode AHP *Analytical Hierarchy Process*, qui est actuellement la méthode la plus utilisée dans les applications industrielles [Rangone 96] [Millet 00] [Sarkis 00 02]. Le modèle QMPMS, en particulier, s'appuie sur cette méthode pour agréger les expressions de performance (Ch. II § 2.2.4). La méthode AHP utilise :

- une méthode d'agrégation basée sur la moyenne pondérée pour élaborer la note agrégée,
- une méthode de surclassement pour déterminer les poids des critères dans cet opérateur.

La méthode de surclassement compare les différents critères selon cinq niveaux d'importance par rapport à une satisfaction globale : « égale », « faible », « déterminante », « attestée » et « absolue » respectivement quantifiés à 1, 3, 5, 7, 9 [Saaty 77]. Les valeurs intermédiaires entre deux niveaux sont acceptées. Le résultat consiste en une matrice de comparaison des critères deux à deux de type : importance critère  $c_i$ , « attestée », importance critère  $c_j$  (tableau 1).

	Critère		
	MO	Machine	Méthode
MO	1	7	6
Machine	1/7	1	1/3
Méthode	1/6	3	1
Somme colonne	1.31	11	7.33

*Le pilote estime que la main d'œuvre MO à une importance « attestée » (7) par rapport à la Machine dans la note globale de productivité*

Tableau 1 : Exemple de matrice de comparaison des critères dans la méthode AHP

Un algorithme permet alors de calculer les poids de chacun de ces critères en respectant la proportionnalité entre les notes de comparaison attribuées aux différents critères et la condition : somme des poids = 1 (tableau 2).

	MO	Machine	Méthode	Poids
MO	0.76	0.64	0.82	0.74
Machine	0.1	0.09	0.05	0.08
Méthode	0.13	0.27	0.14	0.18

*Le poids est obtenu par la moyenne des comparaisons de la matrice normalisée :  $(0.76, 0.64, 0.82) = 0.74$*

*La note initiale (7) est normalisée,  $7/11 = 0.64$  pour respecter la condition : somme des poids = 1.*

Tableau 2 : Exemple de détermination des poids dans la méthode AHP

Il est alors possible de calculer la note agrégée en connaissant les différentes satisfactions de critère. Par exemple, soit la solution qui permet d'obtenir  $s(\text{MO}) = 0.6$ ,  $s(\text{Machine}) = 0.8$  et  $s(\text{Méthodes}) = 0.5$ , alors  $S = 0.74 \times 0.6 + 0.08 \times 0.8 + 0.18 \times 0.5 = 0.6$

### 2.1.4 La terminologie multicritère pour le système d'indicateurs

La terminologie du choix multicritère doit être adaptée à la problématique de la conception du système d'indicateurs. Dans ce sens, l'analogie est faite entre les termes clés des deux domaines, le tableau 3 permettant de récapituler cette terminologie (Ch. II § 4.3.1).

Terminologie système d'indicateurs de performance	Terminologie choix multicritère
Objectif global : $O$ $O :: \langle V \rangle, =, \langle Expression \rangle$ $V$ est une variable essentielle. $V :: \langle Identificateur_{U_O} \rangle, U_O$ identificateur de l'univers de discours de l'objectif global.	Situation donnant des satisfactions totales de tous les critères : $C^*$ $C$ est un critère global
Variable : $v_i$ $v_i :: \langle Identificateur_{U_i} \rangle$ $(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n), i = 1 \text{ à } n$ , ensemble des variables sélectionnées pour $O$ .	Critère : $c_i$ $(c_1, \dots, c_i, \dots, c_n), i = 1 \text{ à } n$ , ensemble des critères contribuant au critère $C$ .
Objectif associé à une variable $v_i$ : $o_i$ $o_i :: \langle v_i \rangle, =, \langle Expression \rangle$ Vecteur d'objectifs : $(o_1, \dots, o_i, \dots, o_n), i = 1 \text{ à } n$ , associé à $(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)$ ,	Valeur de $c_i$ donnant une satisfaction totale du critère, aussi appelé seuil de satisfaction : $c_i^*$ $(c_1^*, \dots, c_i^*, \dots, c_n^*), i = 1 \text{ à } n$ , ensemble satisfaisant totalement les critères
Mesure associée à un objectif $o_i$ : $m_i$ $m_i :: \langle v_i \rangle, =, \langle Expression \rangle$ Vecteur de mesures : $(m_1, \dots, m_i, \dots, m_n), i = 1 \text{ à } n$ associé à $(o_1, \dots, o_i, \dots, o_n)$ ,	Valeur de $c_i$ décrivant la réalité observée.
Expression de performance selon $o_i$ : $p_i$ $p_i :: \langle U_{p_i} \rangle, =, \langle Expression \rangle, U_{p_i}$ identificateur de l'univers de discours de l'expression de performance Vecteur d'expressions de performance : $(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n), i = 1 \text{ à } n$	Degré de satisfaction $s_i$ d'un critère (ou utilité de la satisfaction du critère). $(s_1, \dots, s_i, \dots, s_n), i = 1 \text{ à } n$ , ensemble de degrés de satisfaction des critères
Etat $h$ , caractérisé par un vecteur de mesure $(m_1^h, \dots, m_i^h, \dots, m_n^h)$ auquel est associé le vecteur d'expressions de performance $(p_1^h, \dots, p_i^h, \dots, p_n^h)$ et l'expression de performance agrégée $p^{ag\_h}$ .	Solution $x^h$ , caractérisée par un ensemble des satisfactions des critères $(s_1, \dots, s_i, \dots, s_n)$ , et une valeur $S^h$ donnant le degré de satisfaction globale des critères.

Tableau 3 : Terminologie multicritère pour le système d'indicateurs<sup>13</sup>

Reconsidérons maintenant, à la lumière de ces analogies, les différentes fonctions (décomposition des objectifs, élaboration des expressions de performance, agrégation des expressions de performance) à mettre en œuvre pour concevoir le système d'indicateurs.

## 2.2 La décomposition des objectifs globaux

Rappelons que la décomposition des objectifs (Ch. II § 4.5.1.1) consiste, à partir d'un arbre des variables, à sélectionner ces variables puis à quantifier leur valeur espérée. Dans un souci

<sup>13</sup> Dans la suite de ces travaux, nous adopterons une notation simplifiée en indiquant l'identificateur. Par exemple,  $p :: \text{délai} = 0.5$ , sera noté  $p_{\text{délai}} = 0.5$  ou en abrégé  $p_d = 0.5$ .

de simplification, nous considérons uniquement la décomposition de l'objectif global  $O$ , de niveau 0, en objectifs du niveau immédiatement inférieur, soit le niveau 1. Ces objectifs peuvent être, à leur tour, décomposés sur autant de niveaux que nécessaire.

### 2.2.1 Les prérequis

Pour décomposer l'objectif global, le système d'indicateurs doit disposer de :

- l'ensemble des variables  $(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)$ , identifiées pour la variable  $V$  associée à l'objectif global  $O$  ; cette identification, effectuée par le système de pilotage est formalisée par les fonctions *Hierarchisation* et *Sélection* (Ch. II § 4.5.1.1),
- la connaissance de l'état du système piloté selon les variables  $(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)$  : cette connaissance prend la forme du vecteur de signaux  $(\mu_1, \dots, \mu_i, \dots, \mu_n)$  (Ch. II § 4.3.1).

### 2.2.2 La quantification des objectifs

Quantifier les objectifs consiste à associer une valeur à chacune des variables sélectionnées (Ch. II § 4.5.1.1). Cette quantification demeure un point difficile qu'aucune méthode simple ne permet de réaliser. En conséquence, cette quantification s'inscrit souvent dans une démarche itérative mise en œuvre niveau par niveau et qui fait appel aux connaissances des experts [Cha 03] [Clivillé 01b] [Ducq 99] [Gomez 01] [Grabot 98]. Dans certains cas, rencontrés le plus souvent au plus haut niveau de décision, il n'est pas possible de formuler un objectif global selon une variable unique. La pratique peut être alors de réunir les objectifs du niveau inférieur pour obtenir un objectif global multidimensionnel ou multi variable :  $O :: o_1 \cup \dots \cup o_i \cup \dots \cup o_n$ . Dans ce cas particulier, la décomposition de l'objectif global est immédiate. Dans le cas général, la valeur des objectifs est quantifiée en interne par le système d'indicateurs. Il se peut cependant, dans quelques cas particuliers, que cette valeur soit quantifiée par étalonnage externe.

#### 2.2.2.1 La quantification des objectifs par le système d'indicateurs

Nous abordons la *Quantification* sous la forme d'hypothèses à vérifier et de propriétés à satisfaire.

Hypothèse 1 : à chacun des vecteurs de signaux  $(\mu_1, \dots, \mu_i, \dots, \mu_n)$ , le système d'indicateurs associe un vecteur des mesures  $(m_1, \dots, m_i, \dots, m_n)$ .

Hypothèse 2 : à chaque vecteur de mesures  $(m_1, \dots, m_i, \dots, m_n)$ , le système d'indicateurs associe un degré d'atteinte de l'objectif global donné  $O$ .

Propriété 1 : le vecteur d'objectifs  $(o_1, \dots, o_i, \dots, o_n)$  est identifié au vecteur de mesures  $(m_1, \dots, m_i, \dots, m_n)$  qui permet une atteinte totale  $O$ .

Propriété 2 : l'ensemble des objectifs doit être réalisable, *i.e.* il existe un vecteur de mesures  $(m_1, \dots, m_i, \dots, m_n)$ .

Propriété 3 : si aucun vecteur de mesures ne permet une atteinte totale de  $O$ , le vecteur de mesures qui donne la plus grande atteinte de l'objectif global est retenu. Dans ce cas, le vecteur des mesures identifié au vecteur d'objectifs n'est dominé au sens de Pareto, par aucun autre vecteur de mesures.

Propriété 4 : la décomposition des objectifs est affinée par itérations successives, chaque nouvelle proposition d'identification de  $(o_1, \dots, o_i, \dots, o_n)$  à un nouveau vecteur de mesures  $(m_1, \dots, m_i, \dots, m_n)$  est comparée à la précédente proposition.

### 2.2.2.2 La quantification des objectifs par étalonnage externe

Il est fréquent qu'une partie des objectifs soit fixée par des pratiques d'étalonnage concurrentiel externe ou interne à l'entreprise. Ce type de quantification, pratiqué aux plus hauts niveaux de décision de l'entreprise, repose sur la veille concurrentielle, la communication des syndicats professionnels... [Dou 95].

Ainsi, dans le modèle SCOR (Annexe II-J) par exemple, une entreprise qui veut appartenir à la catégorie « *Best in Class* » doit avoir un objectif en termes de rotation du « *cash flow* » de 2 mois et un objectif en termes de « *taux de service* » de 95%. Le seul rôle du système d'indicateurs est alors de vérifier que cet état est atteignable.

## 2.3 L'élaboration des expressions de performance

Une expression de performance  $p_i$  identifie le degré d'atteinte d'un objectif  $o_i$  (Ch. II § 4.3.1). Cette expression doit pouvoir être interprétée directement par le pilote qui met en œuvre le plan d'action pour atteindre cet objectif. Par exemple, à la mesure  $m :: rotation\_du\_stock = 15$  jours, le responsable des achats qui s'est fixé un objectif  $o :: rotation\_du\_stock = 10$  jours, associe une expression de performance qu'il interprète comme « moyenne ».

Mais dès qu'un ensemble de pilotes s'appuie sur plus d'un indicateur, le problème de la comparaison ainsi que de l'agrégation des expressions de performance se pose. Il faut donc imposer que :

- ces expressions soient interprétables de manière identique par tout le système de pilotage,
- les traitements mathématiques réalisés sur ces expressions soient cohérents entre eux.

Ces deux aspects renvoient aux notions de **commensurabilité** et de **signifiante** qui forment la base de la théorie du mesurage [Krantz 71].

Nous présentons ci-après ces deux notions dans le cadre de notre problématique. Le lecteur est renvoyé à [Cook 92] [Finkelstein 75] [Grabisch 04] [Krantz 71] [Suppes 63] [Tversky 92] pour une présentation théorique plus complète.

### 2.3.1 Commensurabilité des expressions de performance

Deux expressions de performance identiques sont commensurables si elles donnent lieu à une même interprétation.

#### *Exemple*

Le responsable commercial interprète de la même façon, l'expression de performance  $p_{délai} = p_d = 0.75$  résultant de la comparaison d'un objectif de délai commercial  $o_d = 1$  semaine, et d'une mesure  $m_d = 2$  semaines, et l'expression de performance  $p_c = 0.75$  résultant de la comparaison entre un objectif de coût unitaire  $o_c = 90$  € et une mesure  $m_c = 100$  €.

L'expression de performance est alors une grandeur sans unité dont il faut fixer les bornes du *domaine* (Ch. II § 4.3.1). Un domaine particulièrement intéressant est l'intervalle [0,1]. La valeur 1 représente le plus grand élément de l'ensemble des satisfactions et correspond à la solution idéale. La valeur 0 représente le plus petit élément de l'ensemble des satisfactions et correspond à la solution anti-idéale.

### Exemple

La productivité maximale d'un îlot flexible est de 85% et fixe la valeur 1 de l'expression de performance, il s'agit de la solution idéale. La productivité minimale de cet îlot flexible est de 0% et fixe donc en théorie la valeur 0 de l'expression de performance, il s'agit de la solution anti-idéale.

Si la mesure a été définie sur  $U :: \text{productivité\_ilot, numérique, \%, [45, 85]}$ , la valeur 0 du domaine de l'expression de performance correspond à la mesure  $m^0 :: \text{productivité\_ilot} = 45\%$ .

Retenons donc que l'élaboration des expressions de performance doit prendre en considération cette notion de commensurabilité, non seulement pour définir les bornes 0 et 1, mais également pour les valeurs intermédiaires.

### Exemple

Reprenons l'exemple précédent. L'expression de performance en terme de coût  $p_c$  est obtenue par un opérateur de différence relative où :

$$o_c = 90\text{€}, \text{ et } m_c^0 = 150 \text{ € et } p = f(o_c, m_c) = \frac{m_c^0 - m_c}{m_c^0 - o_c} = \frac{150 - m_c}{60}$$

L'expression de performance en terme de délai  $p_d$  est définie, par exemple, par la fonction discrète qui à tout couple de valeurs  $(o_d^h, m_d^h)$  associe une expression  $p_d^h$ .

Le système de pilotage devra donc valider que, dans le cas où  $p_d^h = p_c$ ,  $p_d^h$  et  $p_c$  sont interprétées de façon identique.

## 2.3.2 Signifiante des relations pour les expressions de performance

Une relation portant sur des expressions de performance est signifiante, si deux résultats identiques de cette relation donnent lieu à une même interprétation.

Les expressions de performance sont destinées à être utilisées dans des traitements ultérieurs, notamment l'agrégation. Il est donc important de s'interroger sur le sens des opérations mathématiques, somme, différence, produit, ratio... utilisées dans ces traitements. Ainsi, par exemple, l'opération de différence (ou de somme) est signifiante si l'égalité  $(p^2 - p^1) = (p^4 - p^3)$  signifie que les différences perçues entre les deux éléments des couples  $(p^2, p^1)$  et  $(p^4, p^3)$  sont interprétées de la même façon. De manière identique, l'opération de ratio est signifiante par rapport aux expressions de performance si l'égalité  $\frac{p^1}{p^2} = \frac{p^3}{p^4}$  signifie que les rapports perçus entre les deux éléments des couples  $(p^2, p^1)$  et  $(p^4, p^3)$  sont interprétés de la même façon.

### Exemple

Soit l'indicateur de délai précédent, et les quatre expressions particulières  $p_d^0 = 0$ ,  $p_d^1 = 0.25$ ,  $p_d^2 = 0.75$ ,  $p_d^3 = 1$ , définies respectivement pour les mesures suivantes  $m_d^0 = 4$ ,  $m_d^1 = 3$ ,  $m_d^2 = 2$ ,  $m_d^3 = 1$  ; exprimées en semaine. La différence est significative si  $(p_d^1 - p_d^0) = 0.25$  est interprétée de la même façon que la différence  $(p_d^3 - p_d^2) = 0.25$  (fig. 2).

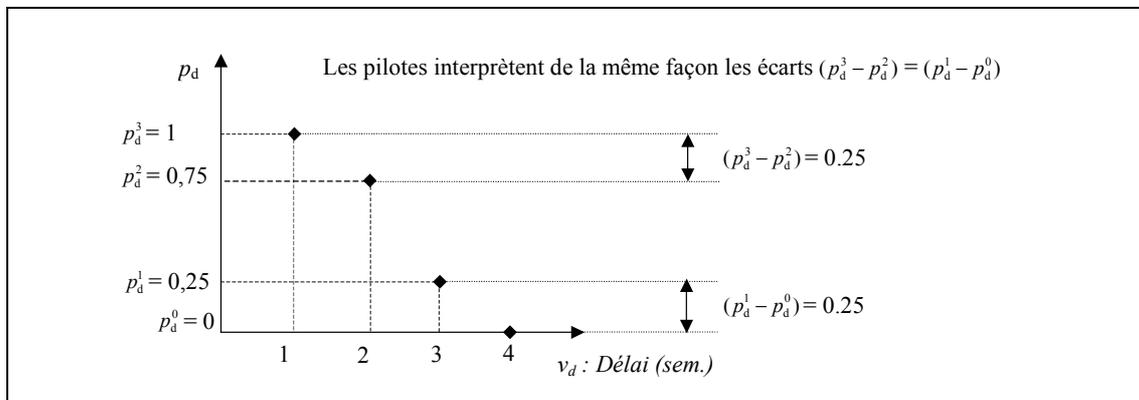


Figure 2 : La signifiante de l'opération de différence

De manière identique, si l'opération de ratio est significative, alors le rapport  $\frac{0.2}{0.4}$  est interprété de la même façon que le rapport  $\frac{0.4}{0.8}$ .

Il est clair qu'un nombre important de relations significatives est le reflet d'une connaissance approfondie du phénomène mesuré. La signifiante de certaines relations conduit à la notion d'échelle. Au niveau des expressions de performance, les relations significatives sont généralement en nombre très limité (ordre, différence, ratio) et correspondent aux différents types classiques d'échelle que nous décrivons ci-après.

### 2.3.3 Définition des types d'échelle

Trois types d'échelles, *ordinale*, *d'intervalle* et *de ratio*, sont classiquement distingués à partir des relations d'ordre, de différence et de rapport (Annexe III-A).

#### 2.3.3.1 Echelle ordinale

L'échelle ordinale exprime une relation d'ordre entre grandeurs  $x_1 > \dots > x_i > \dots > x_n$ . Dans nos travaux, cet ordre concerne des expressions de performance :  $p_1 \dots > p_i > \dots > p_n$ . Les méthodes existantes d'élaboration des expressions de performance aboutissent au moins à des échelles ordinales. Seule la relation d'ordre est significative pour une échelle ordinale :  $p_i > p_{i+1}$  est interprétée de la même façon que  $p_{i-1} > p_i$ .

### Exemple

Un responsable Maintenance se fixe un objectif en termes de disponibilité :  $o :: disponibilité\_équipement = 95\%$ . Il classe l'expression de performance  $p^{Red.}$ , associée à un état obtenu par un plan d'action « mise en redondance », devant  $p^{Fiab}$  associée à un état obtenu par un plan d'action « fiabilisation » qui est elle-même devant  $p^{Corr.}$ , associée à un état obtenu par un plan d'action « préparation du correctif ». Toutefois le plan d'action « mise en

*redondance* » ne permet pas, selon le responsable, d'atteindre l'objectif  $o$ . Il est alors possible d'écrire :  $1 > p^{\text{Red.}} > p^{\text{Fiab.}} > p^{\text{Corr.}}$ .

### 2.3.3.2 Echelle d'intervalle

L'échelle d'intervalle traduit le fait qu'un sens est donné à la différence entre grandeurs :  $(x_1 - x_2) = (x_3 - x_4), \forall x_1, x_2, x_3, x_4 \in \mathbb{R}$ .

Exemple

Soient les quantités  $n_1, n_2$  et  $n_3$  de respectivement, 500, 1000 et 1500 pièces de 100 g stockées dans un conteneur de 10 kg. Cette quantité  $n_i$  est mesurée par sa masse  $\mu_i$ . Nous avons dans ce cas les masses suivantes :

$$\mu_1 = 500 \cdot 0.1 + 10 = 60, \mu_2 = 1000 \cdot 0.1 + 10 = 110 \text{ et } \mu_3 = 1500 \cdot 0.1 + 10 = 160.$$

On constate cette fois que  $(\mu_2 - \mu_1) = (\mu_3 - \mu_2) = \Delta\mu = 50$ , cette égalité peut être généralisée quelle que soit la valeur de  $\Delta\mu$ . La quantité dans un conteneur, mesurée par la masse du conteneur, est une échelle d'intervalle.

L'échelle d'intervalle est insensible aux changements d'origine :  $(x_1 + t - x_2 + t) = (x_1 - x_2)$  et aux changements de coefficient d'échelle :  $(rx_1 - rx_2) = (rx_3 - rx_4) \Leftrightarrow (x_1 - x_2) = (x_3 - x_4)$ .

La relation d'ordre et la différence (par définition) sont significatives pour une échelle d'intervalle.

### 2.3.3.3 Echelle de ratio

Elle traduit le sens du rapport  $\frac{x_1}{x_2} = q, \forall x_1 \in \mathbb{R} \forall x_2 \in \mathbb{R}^*$

**Exemple**

Soit une quantité  $n_1 = 500$  pièces de 100 g, stockée dans un conteneur de 10 kg. Nous avons dans ce cas :  $\mu_1 = 500 \cdot 0.1 + 10 = 60$ . Soient maintenant des quantités  $n_2 = 1000$  pièces et  $n_3 = 2000$  pièces, stockées dans le même conteneur.

$$\mu_2 = 1000 \cdot 0.1 + 10 = 110, \mu_3 = 2000 \cdot 0.1 + 10 = 210.$$

On constate que si  $\frac{n_1}{n_2} = \frac{n_2}{n_3}$ , en revanche  $\frac{\mu_1}{\mu_2} \neq \frac{\mu_2}{\mu_3}$ . La quantité  $q$  s'exprime sous forme

d'une échelle de ratio. Cette quantité mesurée par sa masse  $\mu$ , ne s'exprime pas sous forme d'une échelle de ratio.

L'échelle de ratio est insensible aux changements de coefficient d'échelle :  $\frac{rx_1}{rx_2} = \frac{x_1}{x_2}$  pour tout

$r \neq 0$ . Mais elle ne permet pas le changement d'origine :  $x_1' = x_1 + t, x_2' = x_2 + t$  pour  $t \neq 0$

donne un nouveau ratio  $\frac{x_1 + t}{x_2 + t} \neq q$ .

La relation d'ordre, la différence et le ratio (par définition) sont significatifs pour une échelle de ratio.

#### 2.3.3.4 Le choix de l'échelle d'élaboration des expressions de performance

Comme les expressions de performance sont agrégées, ces expressions doivent être commensurables et l'opération d'agrégation doit être signifiante. Le respect de la condition de signifiante implique donc que l'élaboration des expressions de performance doit aboutir à une échelle. Nous envisageons alors le problème de la construction des trois types d'échelle considérés précédemment : l'échelle ordinale, l'échelle d'intervalle ainsi que l'échelle de ratio.

#### 2.3.4 Problématique de construction d'une échelle

Il s'agit d'élaborer des expressions de performance commensurables pour lesquelles les relations d'ordre, de différence ou de ratio sont signifiantes. Suivant la nature de la connaissance disponible, deux approches de construction d'échelle sont envisageables (Ch. II § 4.5.1.3) :

- une approche analytique lorsqu'une relation physique peut être établie pour élaborer l'expression de performance à partir d'une comparaison de la mesure à l'objectif,
- une approche qualitative sur la base d'une expertise humaine, lorsqu'une relation physique ne peut être aisément établie.

##### 2.3.4.1 Approche analytique

Soient un objectif  $o$  et un opérateur de comparaison  $Cp$  qui à toute mesure  $m$ , associe une expression de performance  $p$ . Si le pilote interprète  $p = kx$  comme étant  $k$  fois meilleure que  $p = x$ , l'opérateur  $Cp$  fournit une échelle de ratio, avec  $x$  et  $kx \in [0,1]$ . Si le pilote interprète la différence entre  $p = x$  et  $p = x-a$  comme équivalente à la différence entre  $p = y$  et  $p = y-a$ , l'opérateur  $Cp$  fournit une échelle d'intervalle avec  $x, x-a, y$  et  $y-a \in [0,1]$ .

##### *Exemple*

Supposons un objectif  $o_{\text{TSAV}} = 1.2\%$  du CA. Supposons une mesure  $m_{\text{TSAV}}^0 = 1.8\%$ , qui donne l'expression de performance  $p_{\text{TSAV}}^0 = 0$ . En supposant la linéarité entre les bornes, l'expression de performance s'exprime alors par la relation suivante : 
$$p_{\text{TSAV}} = \frac{m_{\text{TSAV}} - m_{\text{TSAV}}^0}{o_{\text{TSAV}} - m_{\text{TSAV}}^0} = \frac{m_{\text{TSAV}} - 1.8}{1.2 - 1.8}$$
, ce qui donne par exemple pour  $m_{\text{TSAV}} = 1.35\%$ ,  $p_{\text{TSAV}} = 0.75$ .

Si  $Cp$  fournit une échelle d'intervalle, la différence entre  $p_{\text{TSAV}} = 0.75$  et  $p_{\text{TSAV}} = 1$ , est interprétée par exemple comme la différence entre  $p_{\text{TSAV}} = 0.45$  et  $p_{\text{TSAV}} = 0.2$ .

En l'absence de relation globale, le système d'indicateurs peut exprimer directement les expressions de performance associées à certains états du système.

##### *Exemple*

Soit l'expression de performance définie suivant l'objectif  $o = 3\%$ . Le système d'indicateurs définit directement les trois expressions suivantes, pour les trois mesures considérées :

$$m = 3\%, p = 1, \quad m = 6\%, p = 0.5, \quad m = 12\%, p = 0.$$

##### 2.3.4.2 Approche qualitative

Les connaissances nécessaires à une construction analytique directe sont rarement disponibles en entreprise. Si le pilote ne sait pas toujours associer une expression de performance à un état du système, il sait généralement comparer les expressions de performance associées à différents états du système, c'est-à-dire exprimer des **préférences** entre ces états.

On dit qu'un décideur préfère une solution  $x$  à une solution  $y$  selon un critère  $c$  si la satisfaction du critère noté  $s(x)$  associée à  $x$  est supérieure à la satisfaction  $s(y)$ , associée à  $y$ . Dans notre cas, cela suppose donc qu'un pilote est capable de comparer deux expressions de performance  $p^h$  et  $p^l$ , associées à deux états  $m^h$ , respectivement  $m^l$ , *i.e.* qu'il préfère par exemple l'état  $m^h$  à l'état  $m^l$  :  $p^h > p^l$ . On dispose alors d'une échelle ordinale.

Le pilote peut exprimer davantage de connaissance, sous forme d'**intensités de préférence** entre les différents états [Vansnick 84]. Il quantifie alors les comparaisons entre les expressions de performance :  $p^h - p^l = k$ ,  $k \in \mathbb{N}$ . On dispose alors d'une échelle d'intervalle.

Nous retenons cette approche basée sur l'expertise et décrivons ci-après les procédures de construction d'une échelle ordinale et d'une échelle d'intervalle, la construction d'une échelle de ratio étant similaire. Les principales sources bibliographiques utilisées dans cette partie sont [Bouyssou 02] [Bana 03] [Pomerol 93] [Vansnick 84].

Dans ces procédures, nous comparons les expressions de performance associées à  $m$  états différents du système piloté, relativement à un objectif  $o_i$ . Ces états, notés  $m_i^0, \dots, m_i^h, \dots, m_i^m$ ,  $h = 0$  à  $m$ , sont en l'occurrence consécutifs à  $m$  plans d'action notés  $PA^h$  et donnent lieu à autant d'expressions de performance  $p_i^0, \dots, p_i^h, \dots, p_i^m$ .

### 2.3.4.3 Procédure de construction d'une échelle ordinale

Rappelons que pour un ensemble fini d'éléments  $X$ , on dit que l'on a des préférences ordinales sur  $X$  lorsque ses éléments sont rangés par satisfaction de critère décroissante. Dans ce cas, il est possible d'associer un réel  $s(x)$  à chaque élément  $x$  de  $X$ , qui satisfait aux conditions suivantes :

$$\forall x, y \in X : [x \Pi y \Leftrightarrow s(x) > s(y)]$$

$$\forall x, y \in X : [x \Xi y \Leftrightarrow s(x) = s(y)]$$

$\Pi$  est une relation asymétrique et non transitive qui modélise une relation ordinale des préférences du pilote;  $\Xi$  est une relation d'équivalence, qui modélise l'équi-préférence du pilote.

Dans le cas du système d'indicateurs, la procédure consiste donc à recueillir les préférences du système de pilotage concernant les différents états :  $[m_i^h \Pi m_i^l \text{ selon } o_i \Leftrightarrow p_i^h > p_i^l]$ . Il est alors possible de ranger les expressions de performance par ordre décroissant, et de leur affecter une valeur numérique dans  $[0,1]$ .

#### **Exemple**

Un cuisiniste veut améliorer la performance de son entreprise suivant un objectif de qualité :  $o_q = 0$  *non\_conformités*. Son expertise repose sur la connaissance de cinq états différents du système de production. Pour construire son échelle d'expression de performance, il donne ses préférences par une relation ordinale.

$$m_q^1 \Pi m_q^2 \Pi m_q^3 \Pi m_q^4 \Pi m_q^5 \Leftrightarrow p_q^1 > p_q^2 > p_q^3 > p_q^4 > p_q^5$$

Une échelle ordinale est alors élaborée. Ce type d'échelle ordinale peut être borné sur  $[0,1]$ , par exemple  $p_q^1 = 1$  et  $p_q^5 = 0$ .

Notons que cette procédure ne permet pas de définir de manière unique des valeurs pour les différentes expressions de performance intermédiaires.

#### 2.3.4.4 Procédure de construction d'une échelle d'intervalle

A partir du classement obtenu grâce aux préférences, la procédure consiste à recueillir les intensités de préférences,

$$m^h \Pi^{(k)} m^l \text{ selon } o_i,$$

et à les traduire sous forme de différence entre les expressions de performance associées à ces états

$$p_i^h - p_i^l = k\alpha, \text{ où } k \in \mathbb{N}.$$

$k$  caractérise de façon nette l'intensité de préférence,  $\alpha$  est un coefficient réel qui permet de respecter les bornes du domaine de l'expression de performance (l'intervalle  $[0,1]$  dans notre cas). La construction de l'échelle est complétée par la comparaison des expressions de performance aux valeurs extrêmes, 0 et 1, du domaine :  $1 - p_i^h = k\alpha$  et  $p_i^h - 0 = k\alpha$ .

#### Exemple

Reprenons l'exemple précédent et imaginons que le cuisiniste ne se satisfasse pas d'une échelle ordinale. Il souhaite quantifier les cinq expressions de performance  $p_q^1, p_q^2, p_q^3, p_q^4, p_q^5$ . Le cuisiniste ne peut réaliser cette quantification avec ses connaissances actuelles. Il précise cependant ses intensités de préférence entre les différents états :

$$m_q^1 \Pi^{(2)} m_q^2 \Pi^{(2)} m_q^3 \Pi^{(1)} m_q^4 \Pi^{(3)} m_q^5$$

Les comparaisons des expressions de performance déduites sont regroupées dans le système d'équations suivant. Le coefficient  $\alpha$  permet de garder la proportionnalité entre les différences d'expressions de performance. En précisant les deux valeurs particulières  $p_q^1 = 1$  et  $p_q^5 = 0$ , pour respecter la condition  $p \in [0,1]$ , ce système de quatre équations à quatre inconnues peut être résolu sans difficulté :

$$\begin{cases} (p^1 - p^2) = (1 - p^2) = 2\alpha \\ (p^2 - p^3) = \alpha \\ (p^3 - p^4) = \alpha \\ (p^4 - p^5) = (p^4 - 0) = 3\alpha \end{cases}$$

En additionnant ces équations, on obtient :  $1 - 0 = 7\alpha$  et donc  $\alpha = 1/7$

$$\text{d'où } p^2 = 5/7, p^3 = 4/7, p^4 = 3/7, \text{ avec } p^1 = 1 \text{ et } p^5 = 0$$

On dispose alors d'une échelle d'intervalle  $(0, 3/7, 4/7, 5/7, 1)$ . Tout nouvel état  $m^h$  dont on peut définir les intensités de préférence par rapport aux états déjà considérés donnera lieu à une valeur  $p^h$  de cette échelle.

Recueillir de telles informations pose cependant des difficultés. En effet, spontanément, les pilotes expriment leurs intensités de préférence davantage sous forme linguistique que sous forme numérique. Dans ce contexte, C. Bana propose le concept d'échelle **pré-cardinale** [Bana 97], qui fait l'objet du paragraphe ci-après.

#### 2.3.4.5 Procédure de construction d'une échelle pré-cardinale

Comme pour l'échelle d'intervalle, la procédure consiste à exploiter les intensités de préférence du pilote. Mais cette intensité de préférence est cette fois nuancée :  $[m^h \Pi^{(k_a, k_{a+1})} m^l]$  selon  $o_i \Leftrightarrow k_a \alpha \leq p_i^h - p_i^l \leq k_{a+1} \alpha$ .  $k_a, k_{a+1} \in \mathbb{R}$ ,  $\alpha$  est un coefficient réel qui permet de respecter les bornes du domaine de l'expression de performance (l'intervalle  $[0,1]$  dans notre cas).

Une préférence ordinaire est une intensité de préférence nuancée particulière :  $0 < p_i^h - p_i^l \leq 1$ . De même, une intensité de préférence nette est une intensité de préférence nuancée particulière :  $k_a \alpha \leq p_i^h - p_i^l \leq k_a \alpha$ .

Si, de plus, les intensités de préférence par rapport aux bornes de l'intervalle  $[0,1]$  sont connues, la résolution du système d'inéquations formé, permet de déterminer un encadrement de chaque expression de performance :  $p_i^h \text{ mini} < p_i^h < p_i^h \text{ maxi}$ .

Pour conserver la relation d'ordre des intensités de préférence, les trois conditions suivantes doivent être respectées :

$$\forall x, y \in X : [x \Pi y \Leftrightarrow s(x) > s(y)]$$

$$\forall x, y \in X : [x \Xi y \Leftrightarrow s(x) = s(y)]$$

$$\forall (x, y), (z, w) \in X \times X, \text{ si l'intensité de préférence entre } x \text{ et } y \text{ est supérieure à l'intensité de préférence entre } z \text{ et } w, \text{ alors : } s(x) - s(y) > s(z) - s(w)$$

Une échelle numérique qui satisfait les conditions précédentes est appelée échelle pré-cardinale.

#### **Exemple**

Dans l'exemple précédent, le cuisiniste exprimait une intensité de préférence de 2 entre l'état  $m_1$  et l'état  $m_2$ . Cette intensité de préférence se traduisait par la différence,  $p_q^1 - p_q^2 = 2\alpha$ , et conduisait à des valeurs :  $p_q^1 = 1$  et  $p_q^2 = 5/7$ . Lorsque les intensités sont nuancées, un système d'inéquations est obtenu. A titre d'exemple, on trouve pour les expressions  $p_q^1, p_q^2$  l'encadrement suivant :

$$p_q^1 \in ]13/16, 10/16[ \text{ et } p_q^2 \in ]12/16, 9/16[ \text{ avec } p^1 > p^2$$

Cet encadrement de la comparaison peut être traduit sous la forme d'une expression linguistique. Ainsi, une intensité de préférence entre  $x$  et  $y$  qualifiée de « modérée » peut se traduire par exemple par la relation suivante :  $2,5 < x-y < 3,5$ . Cette relation est plus riche que la préférence  $x > y$ , mais moins précise que l'intensité de préférence nette  $x-y = k$ . Le nombre de ces expressions linguistiques est en général limité. C. Bana propose par exemple 7

niveaux : « nulle », « très faible », « faible », « modérée », « forte », « très forte » et « extrême ».

Dans nos travaux, cette notion d'intensité de préférence nuancée donne lieu à un encadrement :  $k_1\alpha < p_i^h - p_i^j \leq k_2\alpha$ . Le tableau 4 précise l'encadrement pour 7 niveaux de comparaison avec  $0 < k_1 < k_2 < k_3 < k_4 < k_5 < k_6 \leq 6$ .

Différence	Nulle	Très faible	Faible	Modérée	Forte	Très forte	Extrême
Borne inf.	0	$k_1\alpha$	$k_2\alpha$	$k_3\alpha$	$k_4\alpha$	$k_5\alpha$	$k_6\alpha$
Borne sup.	$k_1\alpha$	$k_2\alpha$	$k_3\alpha$	$k_4\alpha$	$k_5\alpha$	$k_6\alpha$	$6\alpha$

Tableau 4 : L'encadrement des intensités de préférence nuancées.

### Exemple

Les clients expriment leurs intensités de préférence concernant le coût d'un produit en adoptant les niveaux précédents :

- un coût  $m^1$  de 90 € correspond à l'objectif,
- l'intensité de préférence entre le coût  $m^1$  et le coût  $m^2$  de 100 €, est « faible »,
- l'intensité de préférence entre le coût  $m^1$  et le coût  $m^3$  de 140 €, est « très forte »,
- l'intensité de préférence entre le coût  $m^2$  et le coût  $m^3$  de 140 €, est « modérée »,
- l'intensité de préférence entre le coût  $m^3$  et le coût  $m^4$  de 200 €, est « faible »
- le coût  $m^4$  ne correspond pas du tout à l'objectif.

Soient les expressions de performance  $p_c^1, p_c^2, p_c^3, p_c^4$ , associées respectivement à  $m_c^1, m_c^2, m_c^3, m_c^4$ . Il est alors possible d'écrire le système suivant qui permet de trouver les solutions envisageables pour  $p_c^1, p_c^2, p_c^3, p_c^4$  en reprenant les bornes du tableau 4.

$$\left\{ \begin{array}{l} p_c^1 = 1, p_c^4 = 0 \\ k_2\alpha < p_c^1 - p_c^2 \leq k_3\alpha \\ k_5\alpha < p_c^1 - p_c^3 \leq k_6\alpha \\ k_3\alpha < p_c^2 - p_c^3 \leq k_4\alpha \\ k_2\alpha < p_c^3 - p_c^4 \leq k_3\alpha \end{array} \right.$$

Ce système d'inéquations trouve de nombreuses solutions et en particulier les deux suivantes :

$$\begin{array}{llll} p_c^1 = 1, & p_c^2 = 5/7, & p_c^3 \in ]0, 5/14], & p_c^4 = 0 \\ p_c^1 = 1, & p_c^2 \in [9/14, 1[, & p_c^3 = 2/7, & p_c^4 = 0 \end{array}$$

L'existence de telles marges pour ajuster les expressions de performance peut être intéressante. Ainsi, le pilote élabore ces expressions en trois temps successifs : échelles ordinales, pré-cardinales, d'intervalle, son expertise dans le domaine allant croissante.

### 2.3.5 Bilan sur l'élaboration des expressions de performance

En pratique, les indicateurs de performance utilisent généralement une relation simple, par exemple le ratio ou la différence, comparant objectif et mesure pour élaborer une expression de performance. Cette approche est bien adaptée pour fournir des expressions significatives à un niveau opérationnel, par exemple pour un pilote. Mais dès lors que plusieurs pilotes exploitent ces indicateurs dans le cadre d'un système, l'élaboration doit tenir compte des traitements qui seront effectués sur ces expressions.

Il est donc nécessaire de définir des procédures d'élaboration des expressions de performance qui assurent leur commensurabilité et la signifiante des traitements ultérieurs, l'agrégation en particulier. L'approche la plus intuitive consiste à se baser sur l'identification des valeurs extrêmes 1 et 0, et sur une interpolation entre ces deux valeurs.

Cette approche garantit la signifiante de l'ordre entre les expressions de performance mais pas forcément la signifiante de la différence ou du ratio. C'est pourquoi, les procédures expertes, décrites précédemment pour comparer objectifs et mesures, sont utiles lorsque les expressions de performance sont destinées à des traitements ultérieurs tels l'agrégation.

Les deux fonctions décomposition des objectifs et élaboration des expressions de performance étant définies, passons maintenant à l'étude de la dernière fonction de la conception du système d'indicateurs : l'agrégation des expressions de performance.

## 2.4 L'agrégation des expressions de performance

### 2.4.1 Problématique

La fonction *Agrégation* associe une expression de performance agrégée  $p^{ag}$  à un vecteur d'expressions de performance  $(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n)$ , correspondant au vecteur d'objectifs  $(o_1, \dots, o_i, \dots, o_n)$  issu de la décomposition d'un objectif global  $O$  (Ch. II § 4.5.1.4) :

$$\begin{array}{l} Ag : \mathbb{P}^n \rightarrow \mathbb{P} \\ (p_1, \dots, p_i, \dots, p_n) \rightarrow Ag(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n) = p^{ag} \quad \text{avec } i = 1 \text{ à } n \end{array}$$

Nous supposons que les expressions de performance  $p_i$  sont commensurables, définies suivant le même type d'échelle et choisissons d'identifier ici la fonction agrégation à un opérateur. Le problème, dans la définition de cet opérateur, vient du fait que le lien entre les expressions de performance à agréger et l'expression de performance agrégée est rarement modélisable par une relation simple. Ce lien englobe en effet les interactions entre les indicateurs (Ch. II § 4.3.2) et des aspects comportementaux du pilote (tolérance, exigence, compromis). Rappelons, en outre, que l'opérateur d'agrégation doit être signifiant pour les expressions de performance considérées.

### 2.4.2 Propriétés des opérateurs d'agrégation

Dans notre contexte, l'opérateur d'agrégation doit respecter certaines règles comme :

- $\min(p_i) \leq p^{ag} \leq \max(p_i)$ ,
- $p^{ag} = 1$  si  $p_i = 1 \forall p_i$  pour  $i = 1$  à  $n$  et  $p^{ag} = 0$  si  $p_i = 0 \forall p_i$  pour  $i = 1$  à  $n$ .

D'une façon plus approfondie, l'opérateur d'agrégation doit satisfaire certaines propriétés mathématiques rappelées dans l'annexe III-B [Grabisch 03a].

L'opérateur le plus employé aujourd'hui est la moyenne (arithmétique) pondérée. Dans ce cas, l'expression de performance agrégée est calculée de la façon suivante :

$$Ag(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n) = \sum_{i=1}^n w_i p_i \text{ où } w_i \text{ représente le poids d'une expression de performance dans l'expression de performance agrégée.}$$

Cependant, la moyenne pondérée repose sur l'hypothèse que les interactions mutuelles entre les indicateurs sont nulles, c'est-à-dire que les expressions de performance sont indépendantes, ce qui dans le contexte actuel est rarement le cas. Il nous semble opportun d'étendre cette moyenne pondérée à la prise en compte des interactions mutuelles. Dans ce sens, les opérateurs de la famille de l'intégrale de Choquet [Grabisch 03b] [Marichal 99], dont la moyenne pondérée est un cas particulier, apportent une avancée intéressante [Berrah 04]. En effet, ces opérateurs :

- couvrent beaucoup d'opérateurs bien connus en entreprise : la *moyenne arithmétique pondérée*, la *moyenne ordonnée pondérée*, les opérateurs *maximum* et *minimum*...
- sont signifiants pour des expressions de performance définies sur des échelles d'intervalle. Dans ce cas, l'expression agrégée est elle-même définie sur une échelle d'intervalle.

### 2.4.3 L'exemple de l'intégrale de Choquet 2-additive

#### 2.4.3.1 Définition

L'intégrale de Choquet 2-additive [Labreuche 03] [Marichal 04] ne considère que des interactions mutuelles deux à deux ; les interactions d'ordre supérieur étant considérées nulles. L'expression de performance agrégée est calculée à partir d'expressions de performance commensurables, définies sur  $[0,1]$  et élaborées selon une échelle d'intervalle. L'intégrale de Choquet 2-additive fait intervenir :

- des **indices de Shapley**  $\phi_i$ , qui représentent les poids relatifs de chaque expression de performance prise isolément, avec :  $\sum_{i=1}^n \phi_i = 1$ ,
- des **coefficients d'interaction**  $I_{ij}$ , qui quantifient les interactions mutuelles  $(p_i, p_j)$ .  $I_{ij} \in [-1,1]$  et  $\left(\phi_i - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n |I_{ij}|\right) \geq 0, \forall i \in [1, n]$  et  $j \neq i$

L'expression de performance agrégée :

- s'améliore, si  $I_{ij} < 0$ , on parle de synergie entre les expressions de performance,
- se dégrade si  $I_{ij} > 0$ , on parle de contradiction entre les expressions de performance,
- reste inchangée si  $I_{ij} = 0$ , les expressions de performance sont indépendantes.

L'intégrale de Choquet 2-additive s'écrit alors sous la forme suivante :

$$Ag(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n) = \sum_{i=1}^n \phi_i p_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_{ij} |p_i - p_j|$$

Terme comparable à la moyenne pondérée

Terme corrigeant la moyenne pondérée pour prendre en compte les interactions mutuelles.

Ainsi, tandis que les paramètres  $\phi_i$  identifient les poids des expressions de performance considérées isolément, conformément à l'esprit de la moyenne pondérée, les paramètres  $I_{ij}$  viennent modifier cette moyenne pondérée en prenant en compte les non linéarités dues aux interactions mutuelles.

**Exemple**

Soit l'intégrale de Choquet dont les indices de Shapley et les coefficients d'interaction sont :  $\phi_1 = 0.5$ ,  $\phi_2 = 0.3$ ,  $\phi_3 = 0.2$ ,  $I_{12} = 0.3$ ,  $I_{23} = 0.2$  et  $I_{13} = 0$ . Un vecteur d'expressions de performance (0.8, 0.4, 0.9) donnera alors une expression agrégée :

$$Ag(0.8, 0.4, 0.9) = 0.5 \times 0.8 + 0.3 \times 0.4 + 0.2 \times 0.9 - 0.5(0.3 \times (0.8 - 0.4) + 0.2 \times (0.9 - 0.4)) = 0.59.$$

Comparée à la moyenne pondérée, l'expression de performance agrégée est corrigée de  $-0.5(0.3 \times (0.8 - 0.4) + 0.2 \times (0.9 - 0.4)) = -0.11$

Examinons concrètement sur un exemple, le sens que l'on peut donner aux coefficients d'interaction d'un tel opérateur.

**Exemple**

Considérons le cas de la disponibilité d'un équipement. L'objectif global de *Disponibilité* est décomposé en un vecteur d'objectifs ( $o_{CO}$ ,  $o_{Op}$ ,  $o_{St}$ ,  $o_{Pa}$ ) selon les variables respectives *Chgt d'outil*, *Opérateur*, *Stock*, *Pannes*. L'agrégation du vecteur d'expressions de performance ( $p_{CO}$ ,  $p_{Op}$ ,  $p_{St}$ ,  $p_{Pa}$ ) associé est réalisée par la moyenne pondérée. Les poids respectifs de ces quatre expressions sont :  $w_{Op} = 6/13$  ;  $w_{CO} = 4/13$  ;  $w_{St} = 2/13$  ;  $w_{Pa} = 1/13$ .

Supposons les deux expressions de performance agrégées indiquées ci-dessous, associées à deux états particuliers du système piloté :

	Expressions de performance				Expression agrégée
	<i>Chgt d'outil</i>	<i>Opérateur</i>	<i>Stock</i>	<i>Panne</i>	<i>Disponibilité équipement</i>
Etat 1	$p_{CO}^1 = 0.5$	$p_{Op}^1 = 0.5$	$p_{St}^1 = 0.5$	$p_{Pa}^1 = 0.5$	$p^{ag.1} = 0.5$
Etat 2	$p_{CO}^2 = 0.3$	$p_{Op}^2 = 0.8$	$p_{St}^2 = 0.5$	$p_{Pa}^2 = 0.5$	$p^{ag.2} = 0.5$

L'égalité des deux expressions de performance agrégées surprend le pilote, car en fait, il préfère l'état 1 à l'état 2. Pour autant, le pilote trouve l'opérateur *min*,  $p^{ag} = \min(p_i) = 0.3$ , trop exigeant, et l'opérateur *max*,  $p^{ag} = \max(p_i) = 0.8$  trop tolérant.

En fait, le pilote sait qu'une expression de performance  $p_{Op}$  élevée ne compense pas totalement une expression de performance  $p_{CO}$  faible. Interrogé sur cette compensation, il dira que les expressions de performance  $p_{CO}$  et  $p_{Op}$  sont fortement dépendantes l'une de l'autre. Pour la prise en compte de cette information, l'intégrale de Choquet 2-additive introduit un coefficient d'interaction  $I_{CO-Op}$ . Ce coefficient permet une compensation relative à la valeur de  $|p_{CO} - p_{Op}|$ ,

par opposition à la compensation totale de la moyenne pondérée. En choisissant par exemple,  $I_{CO-op} = 0.4$ , on obtient  $p^{ag-1} = 0.5$  et  $p^{ag-2} = 0.4$ , ce qui convient mieux au pilote.

Si l'intégrale de Choquet 2-additive nous semble mieux adaptée à la pratique industrielle, le problème de la détermination des paramètres de cet opérateur reste posé.

#### 2.4.3.2 Détermination des paramètres de l'intégrale de Choquet 2-additive

Il s'agit de déterminer la valeur des indices de Shapley et des coefficients d'interaction de l'intégrale de Choquet 2-additive. L'expression directe de ces paramètres, comme cela est souvent proposé pour les poids dans les travaux traitant de la moyenne pondérée, est faite indépendamment du résultat d'agrégation. Une détermination fondée de ces paramètres doit s'appuyer sur la connaissance préalable de l'opérateur d'agrégation utilisé, ces paramètres n'ayant pas de sens absolu mais seulement en liaison avec l'opérateur d'agrégation. Dans ce sens, nous envisageons les deux possibilités décrites ci-après, à partir d'un exemple.

Considérons trois expressions de performance  $p_1, p_2, p_3$  à agréger. Il faut alors déterminer trois indices de Shapley  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  et trois coefficients d'interaction mutuelle  $I_{12}, I_{23}, I_{13}$ . Nous avons donc six inconnues à déterminer. Deux approches sont préconisées.

- Le pilote dispose de données quantifiées, vecteurs d'expressions de performance et expressions de performance agrégées, correspondants à des états particuliers du système piloté (six en l'occurrence). On dispose alors de six équations du type, pour un état  $h$ ,  $h = 1$  à  $6$ :

$$p^{ag-h} = \phi_1 p_1^h + \phi_2 p_2^h + \phi_3 p_3^h - \frac{1}{2} (I_{12} |p_1^h - p_2^h| + I_{13} |p_1^h - p_3^h| + I_{23} |p_2^h - p_3^h|)$$

- Le pilote est à même d'exprimer des intensités de préférence entre des états particuliers (six). On dispose alors de six équations du type, pour deux états  $h$  et  $l$ ,  $h \neq l$ ,  $h = 1$  à  $6$  et  $l = 1$  à  $6$  (§ 2.3.5) :

$$p^{ag-h} - p^{ag-l} = k\alpha, k \in \mathbb{N}, \alpha \in \mathbb{R}$$

### 3 Une méthodologie pour la conception du système d'indicateurs

Comme nous venons de l'exposer, l'agrégation des expressions de performance est un point qu'il faut considérer conjointement à la décomposition des objectifs et à l'élaboration des expressions de performance. C'est donc d'une méthode globale dont il est question [Clivillé 04a]. Résumons nous, il faut :

- décomposer l'objectif global jusqu'à quantifier les objectifs issus de la décomposition,
- élaborer des expressions de performance commensurables selon des échelles d'intervalle,
- déterminer les paramètres de l'intégrale de Choquet 2-additive significative pour les échelles d'intervalle,
- agréger les expressions de performance.

Parmi les méthodes de choix multicritère, nous n'en trouvons aucune qui satisfasse totalement un tel cahier des charges. Avant de présenter notre modèle, revenons sur une méthode très utilisée dans le milieu industriel, la méthode AHP, abordée au § 2.1.3.

### 3.1 La méthode AHP

La méthode AHP est développée depuis le milieu des années 70 par T. Saaty. Une présentation plus générale de la méthode est disponible dans [Saaty 77 84]. Si, dans son modèle, la méthode se base également sur la décomposition des objectifs et l'élaboration des expressions de performance, son but principal demeure néanmoins l'agrégation des expressions de performance. Voyons maintenant comment la méthode AHP met en œuvre les trois fonctions inhérentes à la conception d'un système d'indicateurs.

*La décomposition des objectifs* : la méthode AHP n'y fait pas explicitement référence. La définition des critères sous-entend un état espéré implicite.

*L'élaboration des expressions de performance* : la méthode AHP propose leur élaboration selon une échelle de ratio. Néanmoins, le plus souvent, les utilisateurs de la méthode considèrent ces expressions préexistantes à l'utilisation de la méthode.

*L'opérateur d'agrégation* : l'opérateur d'agrégation est la moyenne pondérée. Les poids de la moyenne pondérée sont déterminés grâce à des intensités de préférence exprimées sous forme de ratios (§ 2.1.3), et ce, de manière dissociée de l'opérateur d'agrégation. Cette détermination conduit à une valeur approchée des poids.

En tant que cadre méthodologique, la méthode AHP permet effectivement d'élaborer des expressions de performance et de les agréger. Cependant, les trois fonctions sont traitées séparément, et donc pas forcément de manière cohérente. En l'occurrence, la relation d'ordre entre deux expressions de performance agrégées peut être remise en cause lorsque l'ensemble des situations retenues pour élaborer les expressions de performance est reconsidéré [Dyer 90] [Schenkerman 94]. Par ailleurs, la moyenne pondérée ne permet pas de prendre en compte les interactions mutuelles, bien que des approches récentes proposent d'y remédier (Annexe II-D).

### 3.2 La méthode MACBETH

Une autre approche existante, moins connue dans le domaine industriel, est la méthode MACBETH *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique* [Bana 92 97] [Ensslin 96] [Porto 99]. Cette méthode est développée depuis le milieu des années 90 par C. Bana e Costa, J.C. Vansnick et J.M. De Corte [Bana 99 01 03]. Dans son modèle, la méthode MACBETH a pour but d'élaborer des expressions de performance en cohérence avec leur agrégation. L'opérateur d'agrégation retenu dans cette méthode est la moyenne pondérée. Voyons maintenant comment la méthode MACBETH met en œuvre les trois fonctions inhérentes à la conception d'un système d'indicateurs.

*La décomposition des objectifs* : la méthode MACBETH ne procède pas à la décomposition d'un objectif global au sens où nous l'entendons. Par contre, la méthode considère l'arbre de variables associé à un objectif global et définit, selon chacune des variables, une expression de performance  $p^{\text{good}}$  associée à l'état espéré (« *good* » dans la méthode) pour le système piloté.

---

<sup>14</sup> Téléchargeable en version démonstration sur le site : [www.M-MACBETH.com](http://www.M-MACBETH.com)

*L'élaboration des expressions de performance* : la méthode MACBETH élabore les expressions de performance selon une échelle d'intervalle bornée sur l'intervalle [0,1]. La méthode offre la possibilité d'établir des échelles pré-cardinales intermédiaires. Toutefois, une échelle d'intervalle existante peut être une entrée de la méthode.

*L'opérateur d'agrégation* : l'opérateur d'agrégation est la moyenne pondérée. Les poids de la moyenne pondérée sont déterminés grâce à des intensités de préférence exprimées sous forme de différence, et ce de manière cohérente à l'élaboration des expressions de performance.

En tant que cadre méthodologique, la méthode MACBETH, tout comme la méthode AHP, permet d'élaborer des expressions de performance et de les agréger. Mais, contrairement à la méthode AHP, MACBETH traite les trois fonctions de manière cohérente dans le cadre d'échelles d'intervalle. Par contre, en l'état, la méthode MACBETH ne permet pas davantage de prendre en compte les interactions mutuelles.

Au vu de la signifiante de l'opérateur d'agrégation pour les échelles d'intervalle, et de la manière de déterminer les poids en cohérence, nous retenons la méthode MACBETH comme méthodologie de conception du système d'indicateurs. Nous reviendrons alors, sur l'impossibilité de tenir compte, dans cette méthode, des interactions mutuelles.

#### **4 Mise en œuvre de la méthode MACBETH pour la conception de notre modèle de système d'indicateurs**

La méthode MACBETH est un cadre global, structuré (fig. 3) de façon analogue au processus de conception du système d'indicateurs proposé (Ch. II § 4.5.1).

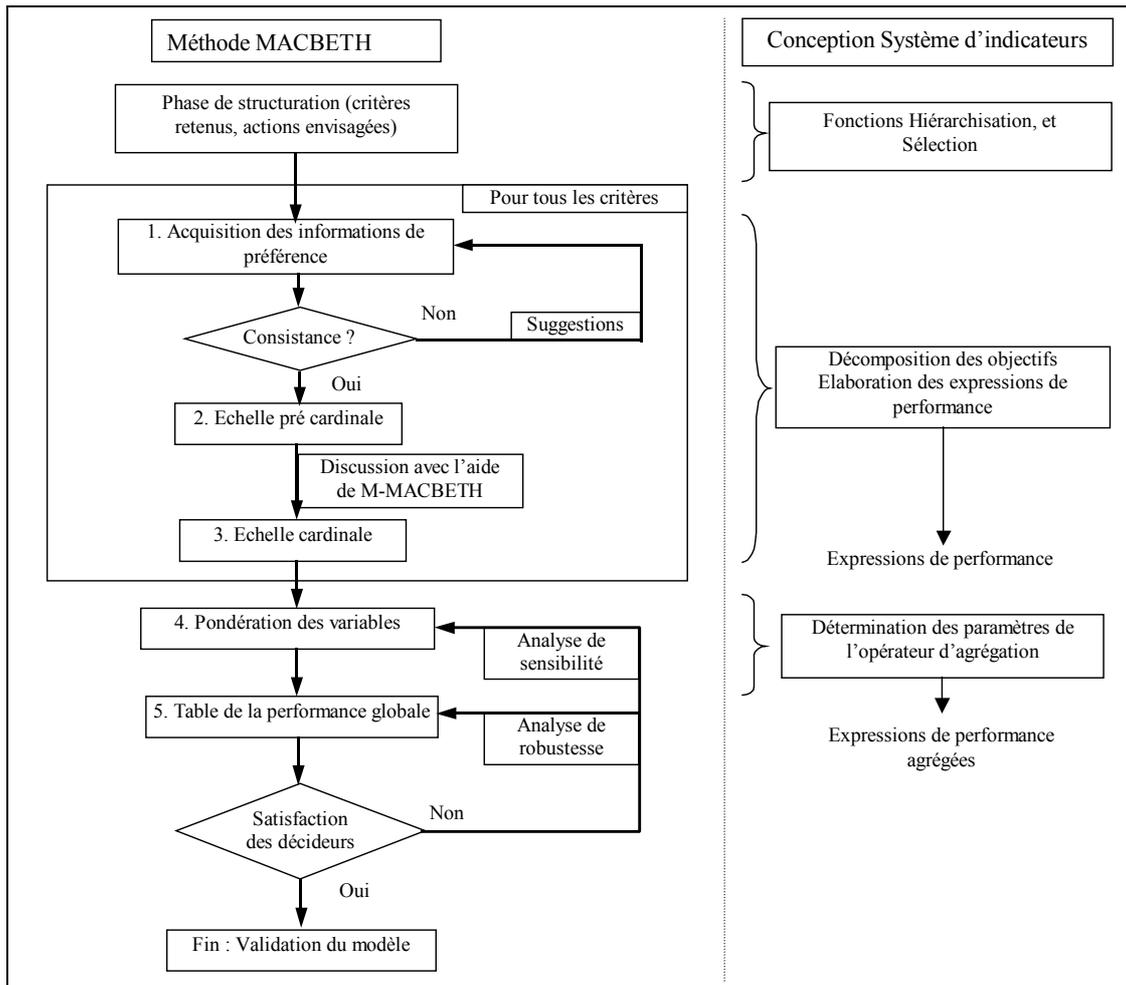


Figure 3 : Procédure MACBETH [BANA 03 p. 32] et système d'indicateurs

Détaillons maintenant les différentes étapes de la procédure. Nous proposons de décrire chaque étape et de l'illustrer au travers d'un exemple de système d'indicateurs associé à un objectif de disponibilité d'équipement. Les figures explicatives sont issues du logiciel M-MACBETH, développé par les auteurs de la méthode MACBETH [Bana 03].

Soit un objectif global  $O$ . Soit l'arbre des variables  $\{v_i\}$  identifiées par rapport à cet objectif. Soient les  $m$  plans d'action générés pour atteindre cet objectif :  $\{PA^h\}$   $h = 0$  à  $m$ . Mettre en œuvre un plan d'action  $PA^h$ , correspond du point de vue du système d'indicateurs, à élaborer l'expression de performance agrégée  $p^{ag-h}$  associée à ce plan, à partir du vecteur d'expressions de performance  $(p_1^h, \dots, p_i^h, \dots, p_n^h)$ . Rappelons que ce vecteur correspond à l'état du système piloté  $(m_1^h, \dots, m_i^h, \dots, m_n^h)$ , obtenu à l'issue de la mise en œuvre du plan d'action  $PA^h$ .

#### 4.1.1 Etape préliminaire – La phase de structuration

L'arbre des variables associé à l'objectif global est restreint par la fonction *Sélection* qui aboutit à retenir un ensemble de variable  $(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)$   $i = 1$  à  $n$ . La génération des plans d'action est réalisée par le système de pilotage, et est donc externe au système d'indicateurs.

### Exemple

Les variables identifiées pour un objectif global de *disponibilité* sont : {Opérateur Op, Changement d'Outil CO, Pannes Pa, Stock St}.

L'ensemble des plans d'action générés est : {Mise en place d'une action de formation à la TPM, Développement de la maintenance améliorative, Réimplantation des lignes de production}. Les états obtenus suite à la mise en œuvre de ces plans sont notés respectivement *Réimpl.*, *Amél.* et *Form.*

#### 4.1.2 Etape 1 – L'acquisition des informations de préférence

La première étape permet aux pilotes d'associer un ensemble d'expressions de performance (une expression pour chaque variable identifiée) à un état considéré du système piloté. Plusieurs possibilités existent pour élaborer les expressions de performance :

1. expression directe de la performance, y compris  $p = 1$  et  $p = 0$ ,
2. utilisation d'une loi mathématique, qui fournit  $p$  en fonction de  $m$ ,
3. expression indirecte des performances, par la comparaison d'expressions de performance, y compris les deux expressions de performance extrêmes 1 et 0, correspondant respectivement aux états « bon » et « nul »<sup>15</sup>.

C'est cette dernière possibilité qui nous semble la plus adaptée au recueil de la connaissance des pilotes dans la phase de conception du système d'indicateurs. Le pilote donne ses intensités de préférence entre différents états du système piloté. MACBETH utilise pour cela une échelle à 7 niveaux : l'intensité de préférence peut être : « nulle », « très faible », « faible », « modérée », « forte », « très forte », « extrême ». En cas de connaissance insuffisante le pilote exprime une préférence ordinaire notée « P » ou une préférence inconnue, notée « ? ». Les intensités de préférence sont quantifiées de façon :

- **nette**,  $m^h \Pi^{(k)} m^l$  selon  $o_i \Leftrightarrow p^h - p^l = k\alpha$  avec  $k \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ . Dans ce cas,  $p^h - p^l = 0$  pour « nulle »,  $p^h - p^l = \alpha$  pour « très faible »...,  $p^h - p^l = 6\alpha$  pour « extrême »,
- **nuancée**,  $m^h \Pi^{(k_a - k_{a+1})} m^l$  selon  $o_i \Leftrightarrow k_a\alpha \leq p^h - p^l \leq k_{a+1}\alpha$ .  $k_a, k_{a+1} \in \mathbb{R}$  et  $k_a < 6$  (2.3.4.5). Dans ce cas,  $0 \leq p^h - p^l \leq k_1\alpha$  pour « nulle »,  $k_1\alpha \leq p^h - p^l \leq k_2\alpha$  pour « très faible »...,  $k_6\alpha \leq p^h - p^l \leq 6$  pour « extrême ». Pour que les intensités de préférence ne soient pas en contradiction, il faut que les coefficients  $k_1, k_2, \dots, k_6$  respectent la condition  $0 < k_1 < k_2 < k_3 < k_4 < k_5 < k_6 \leq 6$ .

### Exemple

Soient  $p_i^h$  et  $p_i^l$  les expressions de performance associées respectivement aux états  $m^h$  et  $m^l$  selon le même objectif. L'intensité nette « modérée » se traduira par :

$$m^h \Pi^{(3)} m^l \Leftrightarrow p^h - p^l = 3\alpha.$$

---

<sup>15</sup> Nous employons indifféremment les désignations « bon » ou « good » et « nul » ou « neutral » pour ces plans, le logiciel M-MACBETH utilisant les termes anglo-saxons. Le terme « neutral » doit être associé à la valeur 0 de l'intervalle [0,1].

L'intensité nuancée « modérée » se traduira par :

$$m^h \Pi^{(k_3, k_4)} m^l \Leftrightarrow k_3\alpha < p^h - p^l < k_4\alpha.$$

Toutes les expressions de performance sont comparées, le résultat étant proposé sous forme de matrice (fig. 4). MACBETH associe le niveau « *neutral* » à l'état actuel du système et le niveau « *good* » à l'état espéré. Les comparaisons ainsi établies garantissent une échelle d'intervalle.

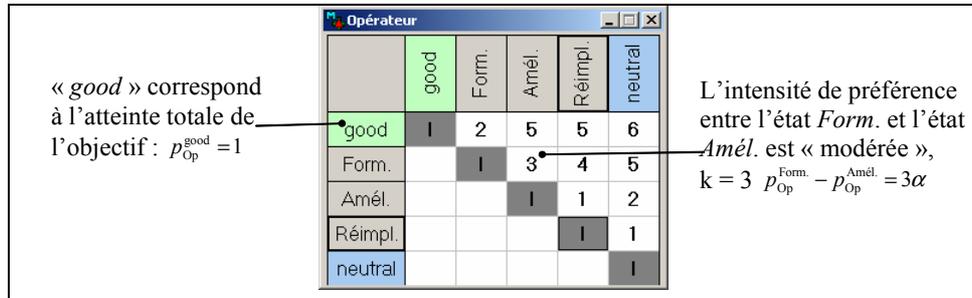


Figure 4 : Exemple de matrice d'intensités de préférence (variable Opérateur)

#### 4.1.3 Etape2 – La proposition d'une échelle

La deuxième étape permet aux pilotes de corriger les éventuelles contradictions dans leurs intensités de préférence (consistance dans MACBETH). A partir de la matrice des intensités de préférence, où les inconnues sont les expressions de performance et les paramètres les intensités de préférence, il est possible d'écrire un certain nombre :

- d'équations si les intensités de préférence sont nettes,
- d'inéquations si les intensités de préférence sont nuancées.

L'échelle est donnée par l'ensemble des expressions de performance ainsi obtenues. Cette échelle est d'intervalle dans le premier cas, elle est pré-cardinale dans le second.

#### Exemple

Dans le cas où la matrice précédente traduit des intensités de préférence nette, on obtient le système d'équations suivant<sup>16</sup> :

$$\begin{cases} p^{\text{good}} = 1, p^{\text{neutral}} = 0 \\ p^{\text{good}} - p^{\text{Form.}} = 2\alpha \\ p^{\text{Form.}} - p^{\text{Amél.}} = 3\alpha \\ p^{\text{Amél.}} - p^{\text{Réimpl.}} = \alpha \end{cases}$$

La solution étant :  $p^{\text{Form.}} = 17/21$        $p^{\text{Amél.}} = 6/21$        $p^{\text{Réimpl.}} = 3/21$  avec  $\alpha = 1/7$ .

Les valeurs (0, 3/21, 6/21, 17/21, 1) forment une échelle d'intervalle (fig. 5).

Dans le cas où la matrice précédente traduit des intensités de préférence nuancées, on obtient une échelle pré-cardinale qui sera précisée par la suite.

<sup>16</sup> Pour simplifier, nous noterons  $p^{\text{Amél.}}$  plutôt que  $p_{\text{Op}}^{\text{Amél.}}$ .

$$\begin{cases} p^{\text{good}} = 1, p^{\text{neutral}} = 0 \\ k_2\alpha \leq 1 - p^{\text{Form.}} \leq k_3\alpha \\ \dots \\ k_1\alpha \leq p^{\text{Réimpl.}} \leq k_2\alpha \end{cases}$$

Les expressions de performance donnent alors lieu à des encadrements interdépendants, ce qui rend l'écriture analytique de la solution délicate. Ainsi, par exemple, les trois ensembles de solutions suivants satisfont aux conditions du système d'inéquations et forment une échelle pré-cardinale particulière :

$$\begin{array}{lll} p^{\text{Form.}} \in ]9/14, 6/7[ & p^{\text{Amél.}} = 2/7, & p^{\text{Réimpl.}} = 1/7 \\ p^{\text{Form.}} = 5/7 & p^{\text{Amél.}} \in ]1/7, 5/14[ & p^{\text{Réimpl.}} = 1/7 \\ p^{\text{Form.}} = 5/7 & p^{\text{Amél.}} = 2/7, & p^{\text{Réimpl.}} \in ]0, 2/7[ \end{array}$$

Devant la lourdeur de résolution des systèmes d'inéquations, nous effectuerons nos calculs avec des intensités de préférences nettes dans nos **exemples**, hors l'étape d'ajustement de l'opérateur, le raisonnement étant strictement semblable dans les deux cas (Annexe III-D).

#### 4.1.4 Etape 3 – L'ajustement de l'échelle

La troisième étape permet aux pilotes de préciser les expressions de performance sans contredire leurs intensités de préférence de l'étape précédente. Il s'agit de passer d'une échelle pré-cardinale à une échelle d'intervalle. Cette étape ne concerne donc pas les intensités de préférence nettes.

##### Exemple

L'expression de la performance  $p^{\text{Amél.}}$  devra vérifier les deux seules inéquations où elle intervient :

$$\begin{cases} k_3\alpha < p^{\text{Form.}} - p^{\text{Amél.}} < k_4\alpha \\ k_1\alpha < p^{\text{Amél.}} - p^{\text{Réimpl.}} < k_2\alpha \end{cases}$$

Il faut donc que l'expression de performance  $p^{\text{Amél.}}$  reste dans l'intervalle  $]1/7, 5/14[$  pour ne pas contredire les intensités de préférence exprimées dans la matrice.

L'échelle d'intervalle obtenue (fig. 5) peut être ajustée à l'intérieur de l'encadrement proposé.

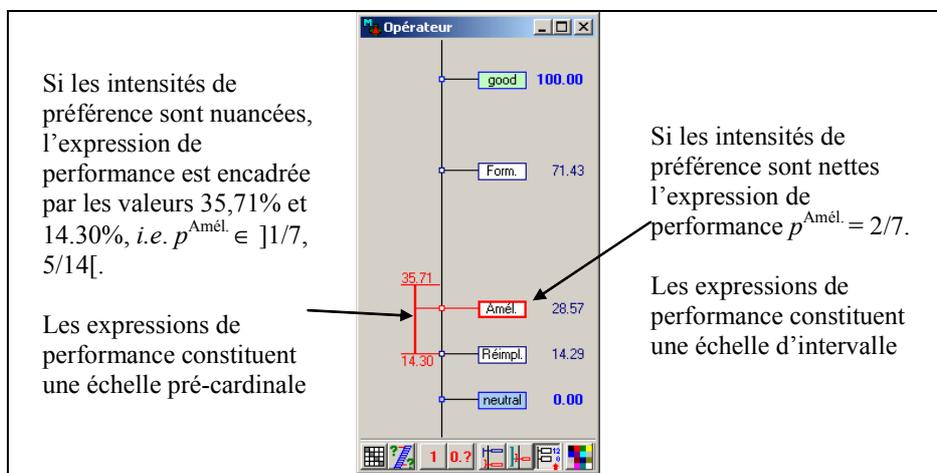


Figure 5 : L'échelle MACBETH

#### 4.1.5 Etape 4 – La détermination des poids

La quatrième étape permet au pilote de pondérer les expressions de performance. C'est une étape clé de la procédure. L'idée est de disposer d'un certain nombre de relations entre des vecteurs d'expressions de performance et les expressions de performance agrégées qui leur sont associées. Il est alors possible d'écrire autant d'équations que de relations considérées, les poids  $w_i$  étant les inconnues :

$$p^{\text{ag}_h} = w_1 p_1^h \dots + w_i p_i^h \dots + w_n p_n^h$$

##### Exemple

Pour déterminer les quatre poids  $w_{CO}$ ,  $w_{Op}$ ,  $w_{Pa}$ ,  $w_{St}$ , la connaissance de quatre relations entre le vecteur d'expressions de performance  $(p_{CO}, p_{Op}, p_{Pa}, p_{St})$  et l'expression de performance agrégée correspondante  $p^{\text{ag}}$  est suffisante.

Mais généralement, l'expression de cette performance agrégée  $p^{\text{ag}}$  n'est pas quantifiable directement. L'idée est alors de comparer les expressions de performance agrégées suivant le principe des intensités de préférence. Les équations obtenues sont du type :

$$p^{\text{ag}_h} - p^{\text{ag}_l} = k\alpha \Leftrightarrow (w_1 p_1^h \dots + w_i p_i^h \dots + w_n p_n^h) - (w_1 p_1^l \dots + w_i p_i^l \dots + w_n p_n^l) = k\alpha$$

Si le nombre d'équations obtenues est égal au nombre de poids à déterminer, il sera facile de trouver la solution  $w_1, \dots, w_i, \dots, w_n$ .

Afin de simplifier cette résolution, les auteurs de la méthode suggèrent de considérer des vecteurs d'expressions de performance particuliers, qui annulent toutes les expressions de performance sauf une, qui prend la valeur 1. Ces vecteurs sont de type  $(0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$ . Dans ce cas, l'expression de performance agrégée prend la forme suivante :  $p^{\text{ag}_h} = w_i$ , ce qui simplifie la résolution du système d'équations. Aucun état et aucun plan d'action généré ne correspondent en général à un tel vecteur. Les auteurs parlent alors d'« actions fictives ». Un tel état, éventuellement fictif, est noté [i], ce qui signifie que  $p_i^h = 1$  et  $p_j^h = 0$ , pour  $j \neq i$  et  $j = 1$  à  $n$ . Le vecteur d'expressions de performance  $(1, \dots, 1, \dots, 1)$  correspond à l'état noté « all high ». Le vecteur  $(0, \dots, 0, \dots, 0)$  correspond à l'état noté « all low ».

##### Exemple

A l'état [Op] sont associées les expressions de performance suivantes :  $p_{CO} = 0$ ,  $p_{Op} = 1$ ,  $p_{St} = 0$ ,  $p_{Pa} = 0$ , soit le vecteur  $(0, 1, 0, 0)$ . La matrice suivante (fig. 6) propose les intensités de préférence entre les états respectivement [Op], [CO], [St] et [Pa].

	[CO]	[OP]	[St]	[Pa]	[all low]
[CO]	1	2	4	5	6
[OP]		1	2	3	4
[St]			1	1	2
[Pa]				1	1
[all low]					1

L'intensité de préférence entre l'état [CO], vecteur d'expressions de performance  $(1, 0, 0, 0)$  et l'état [all low], vecteur d'expressions de performance  $(0, 0, 0, 0)$  est « extrême » pour ce qui est de la disponibilité.

Figure 6 : La matrice des préférences concernant les états fictifs

Il est alors possible de pondérer les différentes expressions de performance. En considérant des intensités de préférence nettes, il est possible d'écrire les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{\text{all high}} = w_{\text{CO}} + w_{\text{Op}} + w_{\text{St}} + w_{\text{Pa}} = 1 \\ p_{\text{all low}} = 0 \\ w_{\text{CO}} - w_{\text{Op}} = 2\alpha \\ w_{\text{Op}} - w_{\text{St}} = 2\alpha \\ w_{\text{St}} - w_{\text{Pa}} = \alpha \\ w_{\text{Pa}} - 0 = \alpha \end{array} \right.$$

La solution est :  $w_{\text{CO}} = 6/13$   $w_{\text{Op}} = 4/13$   $w_{\text{St}} = 2/13$   $w_{\text{Pa}} = 1/13$ . Si les intensités de préférence sont nuancées, un ajustement des poids est possible (fig. 7).

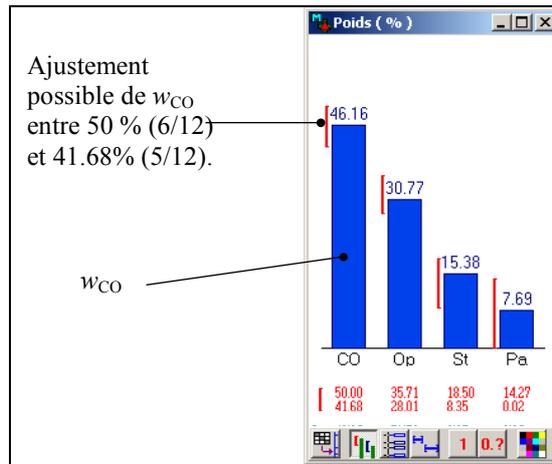


Figure 7 : Les poids des différentes expressions de performance

#### 4.1.6 Etape 5 – L'agrégation des performances

La dernière étape consiste à agréger, par la moyenne pondérée, les expressions de performance. Chacun des états considérés se voit alors attribuer une note globale, son expression de performance agrégée. Si cette expression traduit effectivement les connaissances des pilotes, l'élaboration des expressions de performance et les poids de l'opérateur d'agrégation sont validés. Sinon, la détermination des poids et l'élaboration des expressions de performance sont reconsidérées (cf. fig. 3).

Au terme de cette étape, les pilotes peuvent classer les états retenus lors de la phase de structuration de la méthode, par exemple associés à des plans générés. Si aucune expression de performance agrégée ne convient aux pilotes, il leur est possible de considérer de nouveaux états, associés par exemple à de nouveaux plans générés et relancer une nouvelle procédure. Le nouvel ensemble des états peut reprendre tout ou partie de l'ancien ensemble.

#### Exemple

La figure 8 illustre l'étape d'agrégation, conformément aux données de notre exemple. L'expression de performance agrégée associée à l'état obtenu par la mise en œuvre du plan d'action « Formation » est calculée comme suit :

$$p_{\text{CO}} = 0.7143 \quad p_{\text{Op}} = 0.8182 \quad p_{\text{St}} = 0.4444 \quad p_{\text{Pa}} = 0.3000$$

$$p^{\text{ag}} = w_{\text{CO}} p_{\text{CO}} + w_{\text{Op}} p_{\text{Op}} + w_{\text{St}} p_{\text{St}} + w_{\text{Pa}} p_{\text{Pa}} = 0,6889 \approx 69\%$$

L'état « *all high* », vecteur d'expressions de performance (1, 1, 1, 1) qui permet d'atteindre tous les objectifs à la meilleure expression de performance agrégée :  $p_{\text{all high}} = 1$ .

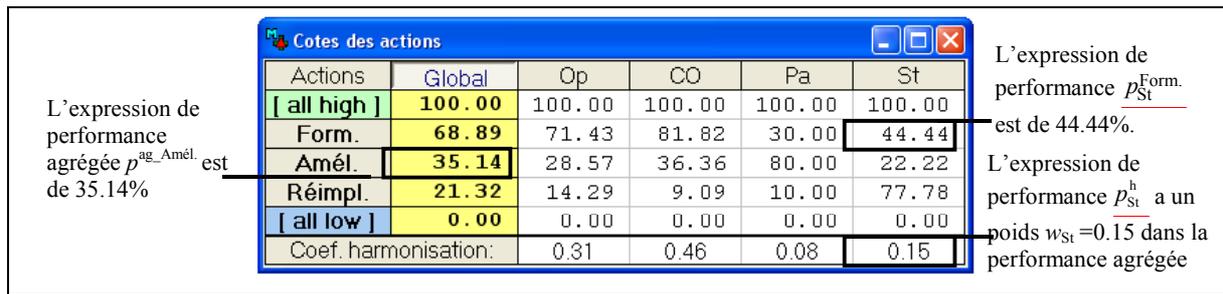


Figure 8 : L'agrégation des expressions de performance (moyenne pondérée)

#### 4.1.7 Analyse de sensibilité

Une des particularités de MACBETH est de proposer une phase d'ajustement que ce soit pour les expressions de performance ou leur pondération. Cette particularité, déjà exploitée dans les étapes 3 et 4, peut l'être pendant toute la procédure et en particulier lors de l'étape 5. Le pilote peut visualiser les conséquences des ajustements qu'il réalise, concernant les expressions de performance et leur poids, sur l'expression de performance agrégée (fig. 9).

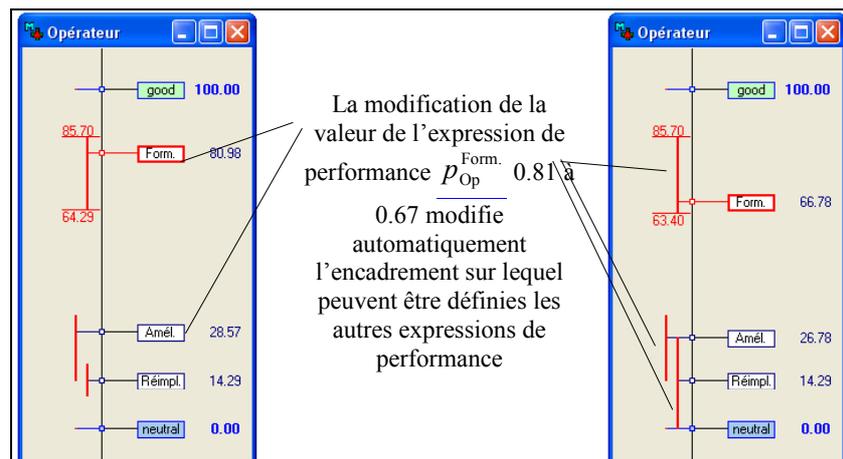


Figure 9 : Analyse de sensibilité

De même, le pilote peut suivre les conséquences de ces ajustements sur les autres expressions de performance ainsi que sur leur poids.

#### 4.2 Bilan sur l'utilisation de MACBETH pour la conception du système d'indicateurs

La méthode MACBETH propose un cadre global pour la conception du système d'indicateurs, en insistant sur l'élaboration des expressions de performance et sur leur agrégation. Elle répond donc en partie au cahier des charges présenté au début de ce chapitre. Les exigences de signifiante et de commensurabilité entre expressions de performance et expressions de performance agrégées sont prises en compte de façon satisfaisante. Il faut cependant que l'opérateur d'agrégation soit la moyenne pondérée.

Le recours à l'expertise des pilotes, pierre angulaire de la détermination des expressions de performance et des paramètres de l'opérateur d'agrégation, se fait de manière interactive et progressive, ce qui nous semble particulièrement adapté au milieu industriel.

Il nous semble cependant que quelques extensions et améliorations peuvent être apportées à la méthode concernant notamment :

- la détermination des poids des expressions de performance grâce à des situations plus réalistes que les actions fictives proposées dans la méthode,
- la levée de l'hypothèse d'indépendance des expressions de performance, inhérente à la moyenne pondérée.

Sur le premier point, la détermination des poids en faisant appel à la notion d'actions fictives auxquelles sont associés des vecteurs d'expression de performance de type  $(0\dots, 0, 1, 0\dots, 0)$  se fait de façon très intuitive. Le système d'équations présente alors son expression la plus simple :  $p^{ag-1} = w_i$ . Cependant, ce type d'état, optimum local au détriment des autres expressions de performance, ne correspond pas à la pratique industrielle actuelle de l'entreprise qui adopte des logiques de compromis ou de maximisation des expressions de performance. Ceci rend peu fiables les préférences d'un expert qui n'a généralement connu aucune situation semblable.

Dans ces conditions, la considération d'états auxquels sont associés des expressions de performance proches de 1 est plus vraisemblable. Ainsi, un état [‡] auquel est associé un vecteur d'expressions de performance de type  $(1\dots, 1, 0, 1\dots, 1)$  correspond davantage à une situation vécue dans la plupart des entreprises, notamment lors d'aléas (grève, accident, panne, rupture d'approvisionnement...). L'évaluation des intensités de préférence sur la base de ce type d'état nous semble donc plus réaliste.

Sur le second point, les interactions mutuelles entre les indicateurs ne sont pas prises en compte par la moyenne pondérée. La mise en œuvre de l'intégrale de Choquet 2-additive, dans le cas où les coefficients  $I_{ij}$  sont non nuls, permet cette prise en compte tout en restant compatible avec les expressions de performance élaborées dans les étapes 2 et 3 de la procédure MACBETH. Seules les étapes 4 et 5 doivent être modifiées. Dans ce sens, nous proposons une procédure permettant de déterminer les paramètres  $I_{ij}$  de ce nouvel opérateur [Clivillé 04b].

## **5 Une proposition d'évolution de MACBETH pour la conception du système d'indicateurs**

### **5.1 Une variante pour la pondération**

L'introduction d'un nouveau type de vecteur d'expressions de performance suscite deux interrogations.

- Peut-on obtenir les poids à partir de tels vecteurs ?
- La précision sur les poids obtenus à partir de ces vecteurs est-elle plus grande ?

Pour répondre à ces deux interrogations, nous supposons que le pilote exprime des intensités de préférence, nettes ou nuancées, et distinguons les deux situations suivantes :

- le pilote exprime avec certitude des intensités de préférence ; il est, par exemple, expert dans le domaine, ou dispose de nombreuses données historiques ou expérimentales qui garantissent un intervalle de confiance très réduit,

- le pilote a une connaissance imprécise de ses intensités de préférence ; il s'agit par exemple d'une nouvelle responsabilité ou bien d'un domaine où l'entreprise n'a pas d'expérience.

### 5.1.1 Le cas d'intensités de préférence précises

Dans MACBETH, nous avons vu que l'expression de performance agrégée suite à un état fictif [i] s'écrivait :  $p^{ag-i} = w_i$ . Le tableau 5 ci-dessous fournit un exemple de comparaison de vecteurs d'expressions de performance associés à de tels états. Rappelons que le symbole P indique une relation d'ordre entre deux états.

		Etat fictif				
Vecteur d'expressions de performance		<i>all high</i>	[1]	[2]	[3]	<i>all low</i>
(1 1 1)	<i>all high</i>	0	k <sub>1</sub>	P	P	P
(1 0 0)	[1]		0	k <sub>2</sub>	P	P
(0 1 0)	[2]			0	k <sub>3</sub>	P
(0 0 1)	[3]				0	k <sub>4</sub>
(0 0 0)	<i>all low</i>					0

Tableau 5 : Exemple de matrice d'intensités de préférence (états fictifs MACBETH)

Nous pouvons alors déduire les coefficients (k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub>, k<sub>4</sub>) ainsi que les poids (w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, w<sub>3</sub>) (Annexe III-E).

$$\begin{cases} w_1 = (k_2 + k_3 + k_4) / (k_2 + 2k_3 + 3k_4) \\ w_2 = (k_3 + k_4) / (k_2 + 2k_3 + 3k_4) \\ w_3 = k_4 / (k_2 + 2k_3 + 3k_4) \end{cases}$$

Les coefficients k<sub>i</sub>, hors (k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub>, k<sub>4</sub>), doivent respecter certaines conditions pour conserver la consistance de la matrice des préférences, *i.e* les équations qu'elles permettent d'écrire doivent être dépendantes du système précédent, par exemple le coefficient k<sub>1</sub> entre les états [*all high*] et [1] : k<sub>1</sub> = k<sub>2</sub> + k<sub>3</sub>

#### Exemple

Prenons le cas particulier k<sub>3</sub> = 1, k<sub>2</sub> = k<sub>4</sub> = 2, nous avons comme solution :

$$(w_1, w_2, w_3) = (0.5, 0.3, 0.2) \text{ et la contrainte } k_1 = 5.$$

Dans notre proposition, le pilote exprime ses intensités de préférence pour des vecteurs d'expressions de performance de type (1..., 1, 0, 1..., 1) associés à des états notés [‡]. L'expression de performance agrégée obtenue est notée  $p^{ag-‡}$ . On peut alors écrire :

$$p^{ag-‡} = w_1 + \dots + w_{i-1} + w_{i+1} + \dots + w_n = 1 - w_i \quad \text{On rappelle que } p_i = 0$$

Le tableau 6 résume les nouvelles intensités de préférence du pilote (coefficients q<sub>i</sub>), pour ces nouveaux états fictifs. Les anciens coefficients sont rappelés dans les cases grisées. Comme dans le tableau 5, il suffit d'exprimer trois intensités de préférence, la 4<sup>ème</sup> devant vérifier les trois autres. Le signe « ? » signifie que le pilote ne peut exprimer ni une intensité de préférence ni même une préférence.

		Etats fictifs							
		<i>all high</i>	[ $\frac{3}{2}$ ]	[ $\frac{2}{3}$ ]	[ $\frac{1}{2}$ ]	[1]	[2]	[3]	<i>all low</i>
(1, 1, 1)	<i>all high</i>	0	$q_1$	P	P	$k_1$	P	P	P
(1, 1, 0)	[ $\frac{3}{2}$ ]		0	$q_2$	P	P	P	P	P
(1, 0, 1)	[ $\frac{2}{3}$ ]			0	$q_3$	P	P	P	P
(0, 1, 1)	[ $\frac{1}{2}$ ]				0	?	P	P	$q_4$
(1, 0, 0)	[1]					0	$k_2$	P	P
(0, 1, 0)	[2]						0	$k_3$	P
(0, 0, 1)	[3]							0	$k_4$

Tableau 6 : Exemple de matrice d'intensités de préférence (nouveaux états fictifs)

Ce qui permet de déduire les poids ( $w_1, w_2, w_3$ ) (Annexe III-E).

$$\begin{cases} w_1 = (q_2 + 2q_3 + q_4) / (q_2 + 2q_3 + 3q_4) \\ w_2 = (q_2 + q_4) / (q_2 + 2q_3 + 3q_4) \\ w_3 = (-q_2 + q_4) / (q_2 + 2q_3 + 3q_4) \end{cases}$$

### Exemple

Pour retrouver la solution précédente, ( $w_1, w_2, w_3$ ) = (0.5, 0.3, 0.2), il faut que :  $q_2 = 1, q_3 = 2, q_4 = 5$  (ou toute autre solution où les rapports entre coefficients  $q_i$  sont conservés). Nous pouvons en déduire un coefficient  $q_1$  consistant avec ces valeurs :  $q_1 = 2$ .

Il n'y a donc pas de différence dans la pondération, que les actions fictives retenues soient de type [i] ou [ $\frac{i}{j}$ ], dans le cas d'intensités de préférence précises.

## 5.1.2 Le cas d'intensités de préférence imprécises

Les développements relatifs à cette partie sont présentés dans l'annexe III-E. Nous pouvons affirmer qu'à imprécision identique des coefficients  $q_i, k_i$ , la précision sur l'expression de performance agrégée sera plus grande avec les vecteurs d'expressions de performance de type (1..., 1, 0, 1..., 1). Cette conclusion confirme donc tout l'intérêt de considérer les vecteurs d'expressions de performance du second type.

## 5.2 Prise en compte de certaines interactions mutuelles du système d'indicateurs

### 5.2.1 Introduction

L'intégrale de Choquet 2-additive permet d'agrèger des expressions de performance en considérant les expressions de performance interagissent deux à deux, et qu'elles sont par conséquent non additives. L'absence de prise en compte des interactions mutuelles pouvant conduire à des interprétations erronées (Annexe III-F), nous proposons ci-après une adaptation de la méthode MACBETH à cet opérateur d'agrégation.

### 5.2.2 Adaptation de MACBETH à l'intégrale de Choquet 2-additive

#### 5.2.2.1 Problématique

Rappelons que l'intégrale de Choquet 2-additive peut s'écrire sous la forme suivante (§ 2.4.3) :

$$Ag(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n) = \sum_{i=1}^n \phi_i p_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_{ij} |p_i - p_j|$$

L'opérateur d'agrégation étant défini par les paramètres  $(\phi_i, I_{ij})$ , il faut donc fournir  $n \frac{C_2^n}{2}$  relations pour les identifier. Nous conservons notre hypothèse où l'expression de performance agrégée dépend de trois expressions de performance non additives deux à deux. Les principes d'une telle résolution sont posés dans [Grabisch 04]. Notre objectif dans cette partie est d'illustrer cette résolution dans certains cas particuliers en réutilisant au maximum la procédure proposée dans MACBETH. Nous cherchons donc à déterminer les paramètres de l'opérateur : trois indices de Shapley  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$ , et trois coefficients d'interaction mutuelle  $I_{12}, I_{13}, I_{23}$ .

### 5.2.2.2 Proposition

Rappelons l'opérateur de l'intégrale de Choquet 2-additive pour trois expressions de performance :

$$p^{ag} = \phi_1 p_1 + \phi_2 p_2 + \phi_3 p_3 - \frac{1}{2} [I_{12}|p_1 - p_2| + I_{13}|p_1 - p_3| + I_{23}|p_2 - p_3|]$$

Si nous pouvons établir 6 équations indépendantes pour 6 vecteurs d'expressions de performance particuliers, nous pouvons déterminer les 6 paramètres  $(\phi_i, I_{ij})$ . Pour simplifier ces équations, nous privilégions les vecteurs d'expression de la performance de type  $(1, 0, 0)$ ,  $(1, 1, 0)$ . Proposons par exemple les 6 vecteurs d'expressions de performance  $(1, 0, 0)$ ,  $(1, 1, 0)$ ,  $(0, 1, 0)$ ,  $(1, 1, 0)$ ,  $(1, 0, 1)$ ,  $(0, 1, 1)$ . Les 6 expressions de performance agrégées correspondantes seront notées respectivement<sup>18</sup> :  $p^{ag-1}, p^{ag-2}, p^{ag-3}, p^{ag-+}, p^{ag-2}, p^{ag-3}$ .

Le pilote doit exprimer au minimum 6 intensités de préférence nettes comme le propose la matrice du tableau 7. Notons que sur les 8 intensités de préférence fournies, 2 sont redondantes (par exemple  $q_1$  et  $k_1$ ) et devront vérifier les autres intensités de préférence.

		Etats fictifs							
		<i>all high</i>	[3]	[2]	[+]	[1]	[2]	[3]	<i>all low</i>
(1, 1, 1)	<i>all high</i>	0	$q_1$	P	P	$k_1$	P	P	P
(1, 1, 0)	[3]		0	$q_2$	P	P	P	P	P
(1, 0, 1)	[2]			0	$q_3$	P	P	P	P
(0, 1, 1)	[+]				0	?	P	P	$q_4$
(1, 0, 0)	[1]					0	$k_2$	P	P
(0, 1, 0)	[2]						0	$k_3$	P
(0, 0, 1)	[3]							0	$k_4$

Tableau 7 : Les préférences et intensités de préférence (détermination des paramètres de l'intégrale de Choquet)

<sup>18</sup>Comme dans les paragraphes précédents, nous notons cette performance globale  $p^{ag-+}$  plutôt que  $p^{ag-23}$ .

Le calcul de  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, I_{12}, I_{13}, I_{23}$  ne pose pas de problème particulier (Annexe III-F).

### Exemple

Appliquons ce résultat à l'exemple du système d'indicateurs relatif à l'objectif *disponibilité* considéré précédemment. Le pilote maintient ses intensités de préférence concernant les états [CO], [Op], [St] et [Pa] (fig. 6). Il les complète par des intensités de préférence entre les nouveaux états  $[\overline{Op}]$ ,  $[\overline{CO}]$  (tableau 8).

		Etats fictifs						
		<i>all high</i>	$[\overline{Op}]$	$[\overline{CO}]$	[CO]	[Op]	[St]	[Pa]
<i>all high</i>	0	2	P	( $k_1$ )	P	P	P	P
$[\overline{Op}]$		0	1	P	P	P	P	P
$[\overline{CO}]$			0	?	P	P	P	P
[CO]				0	2	P	P	P
[Op]					0	2	P	P
[St]						0	1	P
[Pa]							0	1

Tableau 8 : Les préférences et intensités de préférence (objectif de disponibilité)

Le système trouve la solution suivante (Annexe III-F) :

$$\phi_{CO} = 8/17; \quad \phi_{Op} = 6/17; \quad \phi_{St} = 2/17; \quad \phi_{Pa} = 1/17; \quad I_{CO_{Op}} = I_{12} = 4/17$$

Par comparaison au résultat du paragraphe 4.1.5, nous pouvons constater que les indices de Shapley correspondent approximativement aux poids précédents ( $w_{CO} = 6/13, w_{Op} = 4/13, w_{St} = 2/13, w_{Pa} = 1/13$ ). Le coefficient d'interaction est assez important et modifie sensiblement l'expression  $p^{ag}$ . Dans le tableau 9, on peut voir l'évolution de cet écart en fonction de différentes valeurs de  $p_{CO}$ .

	Variations de $p_{CO}$								
	0	0.125	0.25	0.375	0.5	0.625	0.75	0.875	1
Moyenne pondérée	0.23	0.29	0.35	0.4	0.46	0.52	0.58	0.63	0.69
Choquet 2-additive	0.18	0.22	0.26	0.31	0.35	0.40	0.44	0.49	0.53
$p_{Op} = 0, p_{St} = 1, p_{Pa} = 1$	L'expression de performance agrégée obtenue par la moyenne pondérée est corrigée dans le cas de l'intégrale de Choquet lorsque $p_{CO} \neq p_{Op}$								

Tableau 9 : Les expressions  $p^{ag}$  pour la moyenne pondérée et l'intégrale de Choquet

Par exemple, lorsque le vecteur d'expressions de performance prend la valeur (0.875, 0, 1, 1), la différence entre les expressions de performance agrégées obtenues par les deux opérateurs est de :  $0.63 - 0.49 = 0.14$ , soit de l'ordre de 25%. Cette différence provient en grande partie de l'interaction mutuelle entre  $p_{CO}$  et  $p_{Op}$ :

$$I_{CO_{Op}} \times (p_{CO} - p_{Op}) = -\frac{4}{17} \times 0.875 = -0.14.$$

### 5.2.2.3 Conséquences sur la procédure de MACBETH

#### *Elaboration des expressions de performance (étapes 2 et 3)*

Cette fonction n'est pas modifiée, les intensités de préférence restent semblables, les équations qui permettent de traduire les relations de préférence sont conservées et donnent lieu à la même échelle. Cela permet de maintenir intégralement le diagnostic de la consistance des jugements et l'ajustement des échelles locales.

#### *Ajustement des paramètres de l'intégrale de Choquet (étape 4)*

La notion de consistance reste pertinente, les intensités de préférence ne doivent pas être contradictoires. Cependant, les informations demandées au pilote pour déterminer les paramètres sont plus nombreuses. En effet, si la matrice des intensités de préférence peut être totalement constituée pour élaborer les expressions de performance, ce n'est pas le cas pour la matrice des intensités de préférence pour la détermination des poids. Le pilote devra imaginer des situations qui sont parfois peu réalistes, puis les comparer !

Nous proposons donc de limiter le nombre d'informations de type « intensités de préférence » pour le reste de la matrice des préférences ordinales, notées P, ou une absence d'information notée (?). Le calcul des différences  $p^{ag\_i} - p^{ag\_j}$  pour lesquels aucune intensité de préférence n'a été renseignée permet aux pilotes de les valider (ou non) *a posteriori*.

En conclusion nous préconisons une démarche pragmatique qui consiste à :

1. définir les informations de type « intensité de préférence » en nombre minimal,
2. recueillir les informations ordinales complémentaires de façon exhaustive ou non,
3. calculer les intensités de préférence en fonction des paramètres  $\phi$  et  $I_{ij}$ ,
4. vérifier que ces intensités sont en accord avec les préférences ordinales du pilote par calcul de tous les couples ( $p^{ag\_i} - p^{ag\_j}$ ) pour tous les couples d'états ( $[i], [j]$ ) considérés.

#### *Agrégation des expressions de performance (étape 5)*

L'étape d'agrégation des expressions de performance est conservée mais la moyenne pondérée y est remplacée par l'intégrale de Choquet. Pour illustrer encore une fois ce choix, raisonnons sur notre exemple et reprenons les expressions de performance agrégées, données figure 8. Considérons plus particulièrement l'expression de performance agrégée  $p^{ag\_Amél}$ . Cette expression  $p^{ag\_Amél}$  est détériorée par la grande différence entre les expressions de performance  $p_{CO}$  et  $p_{Op}$  qui donne donc une grande importance au coefficient d'interaction  $I_{CO\_Op}$  (tableau 10).

$$p^{ag\_Amél} = p_{CO} w_{CO} + p_{Op} w_{Op} + p_{St} w_{St} + p_{Pa} w_{Pa} = 0.54$$

$$p^{ag\_Amél} = p_{CO} \phi_{CO} + p_{Op} \phi_{Op} + p_{St} \phi_{St} + p_{Pa} w_{Pa} - 1/2(I_{CO-Op}) |p_{CO} - p_{Op}| = 0.45$$

$$\text{où } -1/2(I_{CO-Op}) |p_{CO} - p_{Op}| = -0.5 \times 0.2 \times 0.77 = -0.077$$

Opérateur d'agrégation	Etat	$p^{ag}$	Expressions de performance				Interaction
			$p_{CO}$	$p_{Op}$	$p_{St}$	$p_{Pa}$	$p_{CO} - p_{Op}$
Moyenne pondérée	<i>Form.</i>	<b>0.68</b>	0.82	0.71	0.30	0.44	
Choquet 2-additive		<b>0.67</b>	0.82	0.71	0.30	0.44	0.10
Moyenne pondérée	<i>Impl.</i>	<b>0.40</b>	0.36	0.29	0.8	0.22	
Choquet 2-additive		<b>0.39</b>	0.36	0.29	0.8	0.22	0.08
Moyenne pondérée	<i>Amél.</i>	<b>0.54</b>	0.91	0.14	0.10	0.78	
Choquet 2-additive		<b>0.45</b>	0.91	0.14	0.10	0.78	0.077

Tableau 10 : Les expressions agrégées (moyenne pondérée et l'intégrale de Choquet)

Toutefois, avant d'utiliser un opérateur tel que l'intégrale de Choquet 2-additive, il peut être utile de quantifier l'erreur faite en maintenant l'usage de l'opérateur moyenne pondérée même si des interactions mutuelles existent. Les calculs associés sont disponibles (Annexe III-G) de même que les méthodes préconisées pour minimiser cette erreur. La conclusion est que si l'écart entre les expressions de performance est faible, l'approximation est satisfaisante, les poids  $w_i$  sont très proches des coefficients de Shapley  $\phi_i$ .

## 6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la problématique, d'un point de vue opérationnel, de la conception du système d'indicateurs. L'idée défendue est la nécessaire élaboration des expressions de performance en tenant compte de l'opérateur d'agrégation envisagé.

Face à la difficulté d'une détermination directe, la décomposition des objectifs a été abordée sous forme de règles exigeant naturellement une expertise importante des pilotes. Grâce à la théorie du mesurage, nous avons traduit la cohérence entre les expressions de performance et leur agrégation par les notions de commensurabilité des expressions de performance et de signifiante des opérateurs d'agrégation de ces expressions. L'intérêt d'utiliser les échelles d'intervalle pour exprimer les expressions de performance a été montré. Les problèmes de choix de l'opérateur ont trouvé une réponse dans l'intégrale de Choquet 2-additive à même de traduire les interactions entre indicateurs de performance.

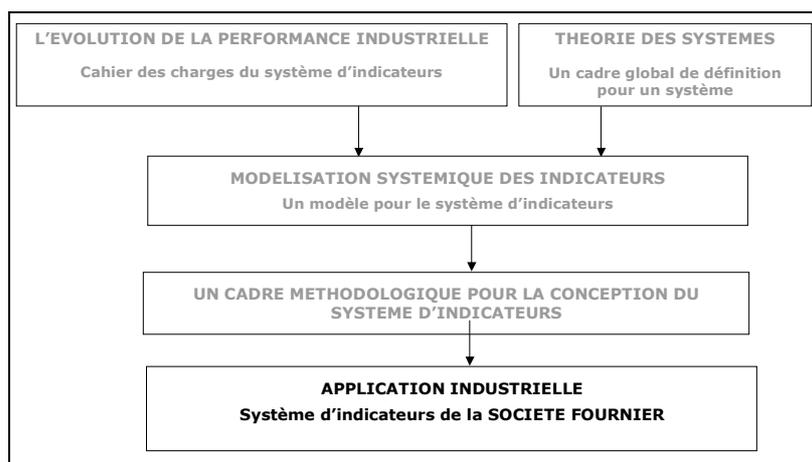
A partir des conditions déduites de cette cohérence globale, la méthode MACBETH est apparue comme pouvant fournir une méthodologie de conception du système d'indicateurs recherchée à quelques réserves près :

- la prise en compte d'une méthode pragmatique pour recueillir les connaissances des experts,
- la prise en compte des interactions mutuelles,

qui ont donné lieu à deux propositions d'adaptation de la méthode :

- la prise en compte, pour la détermination des paramètres de l'agrégation, de situations réalistes, proches d'une pratique industrielle,
- l'extension de la moyenne pondérée à l'intégrale de Choquet 2-additive.

Au final, nous disposons donc d'un cadre global, structuré en cinq étapes qui permet d'explicitier complètement les différentes fonctions constituant la conception du système d'indicateurs. Tous les éléments sont maintenant réunis pour appliquer nos propositions à un cas industriel, ce qui fait l'objet du chapitre IV.



*Positionnement du contenu du chapitre IV dans notre plan de thèse*

## **Chapitre IV : Le système d'indicateurs de la Société Fournier**

### **1 Introduction**

La Société Fournier souhaite aujourd'hui concevoir ses indicateurs de performance comme un système, soit dans un cadre global qui couvre les différentes étapes inhérentes à la définition et à l'exploitation de l'ensemble des indicateurs. En effet, avec l'avènement des politiques de Qualité Totale, l'indicateur de performance devient un élément incontournable dans le pilotage de l'entreprise, défini à tous les niveaux et selon de multiples variables. Toutefois, tant que le pilotage de l'entreprise répondait à une logique de cloisonnement et de centralisation, les plans d'action générés étaient associés à des objectifs indépendants et les indicateurs étaient utilisés pour des besoins locaux. Mais, suite aux évolutions de l'entreprise, production multi-site, nouvelles gammes et enseignes, augmentation de la variété des produits..., le pilotage s'est orienté vers une structure distribuée et coordonnée (Ch. I § 3.1.3). Il s'agit désormais d'atteindre conjointement un certain nombre d'objectifs, ce qui induit une problématique, de cohérence dans la conception des indicateurs, et de choix des plans d'action.

Dans cette logique, une première étape a concerné l'expression des performances, sur la base des préconisations de la norme ISO 9000. Cette démarche a permis d'homogénéiser les pratiques des différents pilotes, sans aborder les problèmes de choix des plans d'action. La société Fournier étant un partenaire de longue date du laboratoire, elle nous a soumis les questions suivantes, concernant la conception de son système d'indicateurs.

- Quelle est la pratique actuelle ?
- Comment définir et organiser les indicateurs de l'entreprise ?
- Comment agréger les expressions de performance ?

Après une présentation de l'existant de la Société Fournier, nous proposons :

- une organisation systémique des indicateurs de l'entreprise, conformément au modèle proposé dans le chapitre II ; nous nous focaliserons en particulier sur le système relatif à la *satisfaction\_clients*,
- un cadre méthodologique d'agrégation des expressions de performance, conformément à la méthode MACBETH, retenue dans le chapitre III ; nous nous focaliserons en particulier sur le système relatif au *taux\_service*.

Enfin, les limites de cette démarche seront soulignées et des perspectives pour généraliser cette approche dans l'entreprise seront formulées.

## **2 Les données de l'entreprise**

### **2.1 Présentation de la Société Fournier**

Créée en 1909, la Société Fournier (tableau 1) réalise un chiffre d'affaires d'environ 176 M € (exercice 2003) et emploie 900 personnes. Elle conçoit, produit et distribue du mobilier de cuisine, de salle de bains ainsi que de rangement. Ces produits sont destinés au particulier par l'intermédiaire d'un distributeur ou de grands comptes. Elle s'identifie pour le grand public à l'enseigne phare MOBALPA<sup>19</sup>. Le produit, de type modulaire, est « customisé<sup>20</sup> » lors de la commande chez le distributeur, à partir d'éléments standards. Désormais, le plan de travail, élément central de ce type de mobilier de cuisine, peut être spécifique au client.

Malgré une croissance rapide, de l'ordre de 10% par an depuis 10 ans, la Société Fournier a conservé une culture d'entreprise caractéristique des PMI/PME haut savoyardes avec une direction et un actionnariat familiaux.

---

<sup>19</sup> <http://mobalpa.fr>

<sup>20</sup> Le distributeur engage une véritable démarche de conception interactive à partir du catalogue électronique édité par la Société Fournier.

Marché	Localisation : Europe, Amérique du Nord, Moyen Orient Concurrence : forte (1 <sup>er</sup> marché français, 13 <sup>ème</sup> marché européen) Mode de réponse : mise à disposition Mode de ventes : sur stock et sur commande
Type de conception	Concepteur – fabricant
Type de production	Process : transformation Type de flux : discret Répétitivité : multi-unitaire, petites et moyennes séries Organisation produit/process : transformation convergente Délais de réalisation : 5 à 10 semaines (client/client) Degré d'automatisation : moyen
Type de distribution	Distributeurs labellisés (MOBALPA, Pérène) Distributeurs généralistes (DELPHA) Grands comptes (DOMACTIS)
Produits	Complexité : moyenne Variété : 10 <sup>12</sup> combinaisons possibles, 850 000 références Fréquence du changement : 2 à 5 ans
Nature de la valeur ajoutée	Transformation physique : main d'œuvre Savoir-faire d'étude : capacité d'innovation, de créativité Savoir-faire technique : maîtrise et expérience, métier Service : assistance conception, SAV

Tableau 1 : Fiche d'identité de la Société Fournier (année 2003)

## 2.2 Le pilotage

Le pilotage repose en particulier sur, la structure de pilotage, le système d'information, ainsi que la mémoire de l'entreprise. Celle-ci est distribuée sur les différents centres de décision ; elle est gérée de façon autonome sous forme de bibliothèques papier ou de bases de données archivées. Pour sa part, le système piloté représente une soixantaine de services et une centaine de processus (production et hors production), soit plusieurs centaines de postes de travail dont la cartographie (Annexe IV-A) donne une bonne illustration.

### 2.2.1 La structure de pilotage

Historiquement, l'entreprise est organisée de façon fonctionnelle sous formes de *services*. L'approche *processus* s'est superposée à cette organisation aux niveaux tactique et opérationnel, un processus dépendant toujours d'un et un seul Directeur de Service [Berrah 99]. En conséquence, la structure de pilotage est de type coordonné au niveau stratégique (par rapport aux services de l'entreprise), et distribué au niveau tactique (par rapport à ses processus) (fig. 1 & annexe IV-A). Dans cette structure, les pilotes peuvent être le Directeur Général, un Directeur de Service ou un Responsable de Processus.

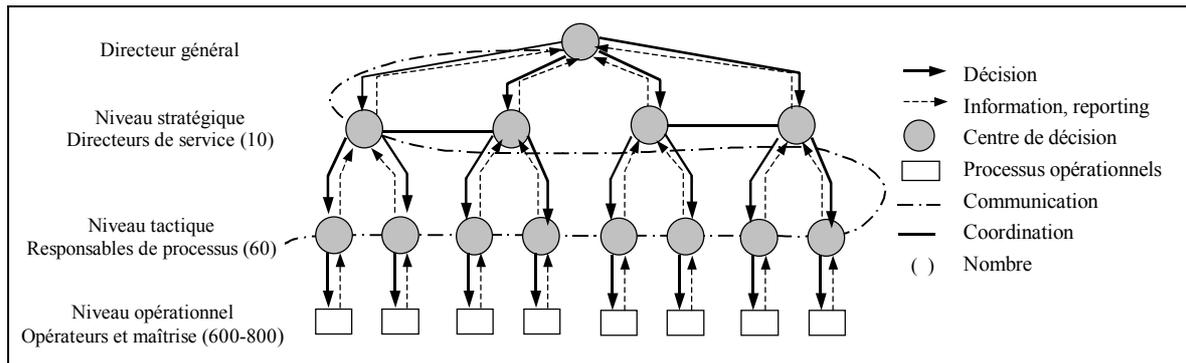


Figure 1 : La structure de pilotage de la Société Fournier

Le pilotage se situe sur des horizons différents. En effet :

- le Directeur Général pilote sur un horizon long terme, supérieur à l'année,
- les Directeurs de Service pilotent sur un horizon moyen terme, de l'ordre du trimestre à l'année,
- les Responsables de Processus pilotent sur des horizons de l'ordre de la semaine au trimestre,
- les opérateurs et la maîtrise d'atelier travaillent sur un horizon inférieur à la semaine ; leur mission relève plutôt de l'exécution des tâches avec une certaine autonomie.

La prise d'information, *volume, délai, qualité, présence opérateurs...* est réalisée le plus souvent au niveau opérationnel. Ces signaux sont ensuite regroupés, agrégés et reportés vers les niveaux décisionnels supérieurs, ce traitement étant pour partie automatisé et systématisé, pour partie réalisé de façon spécifique par chaque centre de décision.

### 2.2.2 Les objectifs stratégiques

Afin de conserver et augmenter ses parts de marché, l'entreprise identifie, outre sa rentabilité, un certain nombre de Facteurs Clés de Succès (FCS) tels que la **satisfaction des clients**, ou la **notoriété**<sup>21</sup>. A la **satisfaction des clients**, jugée prioritaire, correspondent un certain nombre de Facteurs Clés de Performance (FCP) résumé dans le tableau 2 [Clivillé 03b].

<sup>21</sup> La notoriété est définie comme l'association faite par les clients des marchés concernés, cuisine, salle de bains rangement en l'occurrence, avec les enseignes de la Société Fournier. Ainsi plus de 40% des personnes associent MOBALPA à l'ameublement de cuisine et salle de bains, classant cette enseigne 1<sup>ère</sup> en France.

FCP	Libellé de l'Indicateur / expression de l'objectif (au 01/01/03)	Mode d'élaboration et valeur (au 01/04/03)
<i>conformité_ livraisons</i>	<i>taux_service</i> 97,5%	$p_{TS} = \frac{\text{nbre com. livrées conformes et en délai}}{\text{nombre commandes}} = 93\%$
<i>qualité_ produit</i>	<i>taux_SAV</i> 1.2%	$p_{TS\text{SAV}} = \frac{\text{Valeur produits échangés}}{\text{Valeur commandes}} = 1.35\%$
<i>offre_produit</i>	<i>offre_produit</i> Très satisfaisante	Largeur et profondeur de gamme = <i>Satisfaisante</i>
<i>délai_commercial</i>	<i>délai_commercial</i> 8-10 semaines	Nombre de semaines commande/livraison = 8-13 <i>semaines</i>
<i>climat_social</i>	<i>climat_social</i> Excellent	Synthèse informations diverses = <i>Satisfaisant</i>

Tableau 2 : Exemple d'objectifs et les indicateurs stratégiques (source Fournier)

L'ensemble de ces objectifs stratégiques est décomposé à son tour en un certain nombre d'objectifs respectivement tactiques et opérationnels. L'atteinte de ces différents objectifs se traduit par la mise en œuvre de plans d'action, aux niveaux respectivement stratégique, tactique et opérationnel.

### 2.2.3 Les plans d'action

Au niveau stratégique, la direction de l'entreprise met en œuvre des plans d'action tels que la *fusion des sociétés existantes, l'acquisition de nouvelles sociétés, l'implantation de nouveaux sites, le lancement de nouveaux produits, la refonte du système d'information...* Les plans d'action stratégiques sont générés et choisis lors des revues de direction, sur un horizon de un à deux ans. Ces plans concernent prioritairement un service de l'entreprise et sont menés par son directeur.

Les plans d'action du niveau tactique traduisent les plans d'action du niveau stratégique sur les différents processus de l'entreprise. Cette démarche descendante se conjugue à une démarche ascendante qui analyse en permanence les retours d'expérience du niveau opérationnel concernant les processus mis en œuvre (fig. 2). La conjugaison des deux démarches donne lieu pour chaque processus à un plan d'action **ISOTOP**, acronyme de norme ISO et de TOP qui symbolise l'excellence de la performance. Les plans d'action ISOTOP sont reconsidérés de façon événementielle suite à des aléas, au degré d'atteinte des objectifs, à de nouvelles connaissances...

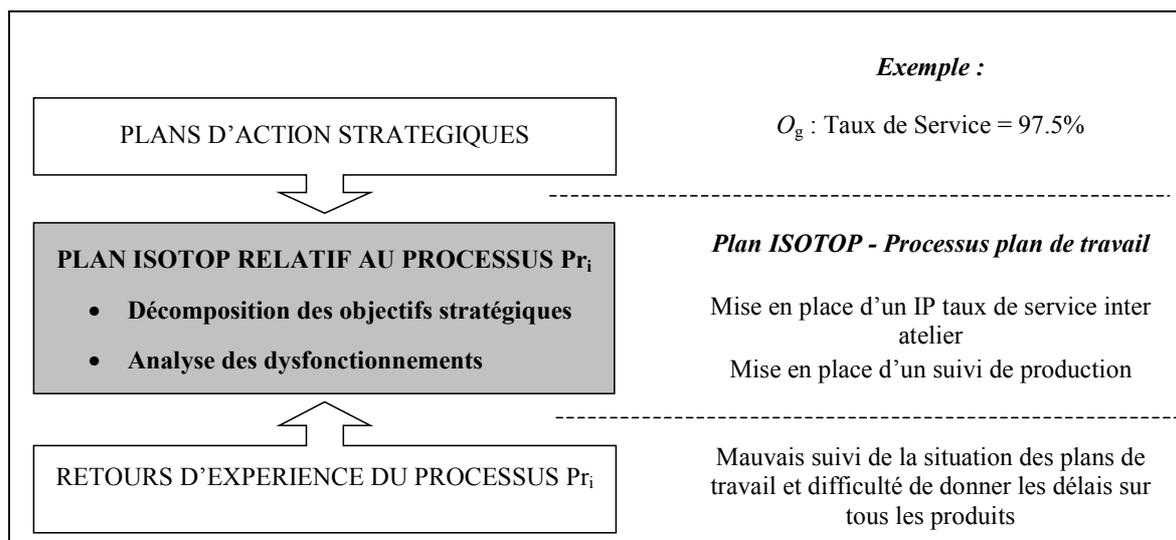


Figure 2 : Le plan ISOTOP - conjugaison de démarches ascendante et descendante

Au niveau opérationnel, les actions prévues dans les plans d'action ISOTOP sont mises en œuvre, suite à des revues de processus (hebdomadaires ou mensuelles),

### 2.3 Les indicateurs de performance

L'entreprise a mis progressivement en place ses indicateurs de performance, supervisés par le service Qualité pour leur aspect technique, le Contrôle de Gestion ayant la responsabilité des indicateurs financiers. Elle en compte aujourd'hui plusieurs centaines, du plus global, qui mesure par exemple le *taux\_service* de l'entreprise (tableau 2), au plus local, qui mesure par exemple le *taux\_qualité* d'un poste de travail.

Pour analyser l'existant en termes d'indicateurs de performance, nous en proposons dans le paragraphe suivant une lecture systémique, conformément au modèle proposé dans le chapitre II. L'idée de cette lecture est, d'une part de formaliser et, d'autre part, d'améliorer la pratique actuelle relative à la définition et à l'exploitation des indicateurs.

## 3 Une lecture systémique des indicateurs de la Société Fournier

La modélisation du système d'indicateurs de la Société Fournier se fait conformément au modèle proposé au Ch. II § 4. Les caractéristiques du système d'indicateurs de la société sont identiques à celles du système générique, pour ce qui est de la *finalité*, de l'*environnement* et des *objectifs exogènes* et *endogènes*.

Globalement, le système d'indicateurs fournit des expressions de performance, associées à la génération, la mise en œuvre ou la clôture des plans d'action. Ses entrées sont pour ce faire :

- les objectifs stratégiques, l'expertise, l'expérience, l'histoire (mémoire des objectifs, plans d'action clôturés et indicateurs des 10 dernières années) de l'entreprise et les plans d'action générés,
- l'état du système piloté.

Intéressons-nous maintenant à l'organisation proprement dite du système d'indicateurs.

## 3.1 L'organisation

### 3.1.1 Les entités

Pour formaliser ses indicateurs, l'entreprise dispose d'un modèle d'indicateur déduit de la norme ISO 9000 – fascicule FDX 171 (tableau 3). Un guide de conception de cet indicateur est fourni en Annexe IV-B.

Rubrique	Exemple
Intitulé	<i>Respect de planning</i>
Variable	<i>Temps</i>
Champ de mesure	<i>Ecart temporel entre production prévue et production réalisée d'un processus</i>
Identificateur de l'objectif	<i>Temps</i>
Données existantes	<i>Données logiciel GP</i>
Données à construire	<i>Saisie date fin OF</i>
Composition de l'indicateur (Calcul de l'expression de performance)	<i>Différence (temps réel, temps prévu)</i>
Mode de représentation	<i>Valeur numérique</i>
Déclaration de l'objectif	<i>Retard inférieur à 4 heures</i>
Fonctionnement :	
Responsable	<i>Responsable atelier (processus)</i>
Fréquence	<i>Hebdomadaire - Trimestrielle</i>
Reporting (vers)	<i>Responsable production</i>
Exploitation	<i>Réunion hebdomadaire pilotage atelier Réunion trimestrielle démarche d'amélioration</i>

Tableau 3 : Modèle de formalisation d'un indicateur de la Société Fournier (doc. Fournier)

Les expressions de performance sont élaborées par les indicateurs sur la base de la comparaison d'une mesure, fournie par le système d'information, à l'objectif fixé par la structure de pilotage. L'opérateur de comparaison  $C_p$  est souvent un ratio ou une différence relative, comme l'illustre l'exemple suivant (fig. 3) :

$$o :: \text{rendez-vous}_{\text{respectés}} = 1100, m :: \text{rendez-vous}_{\text{respectés}} = 1050 \quad C_p :: (m/o)$$

$$p :: \text{rendez-vous}_{\text{respectés}} = 1050/1100 = 99.1\%$$

L'expression de performance donne éventuellement lieu à une interprétation linguistique. Par exemple, un ratio de 99.1% est considéré comme « satisfaisant », alors que le ratio de 98 % est considéré comme « insuffisant » sur une échelle qui va de  $p = 100\%$ , expression de performance « totalement\_satisfaisante » à  $p \leq 95\%$  considérée comme une expression de performance « nulle ».

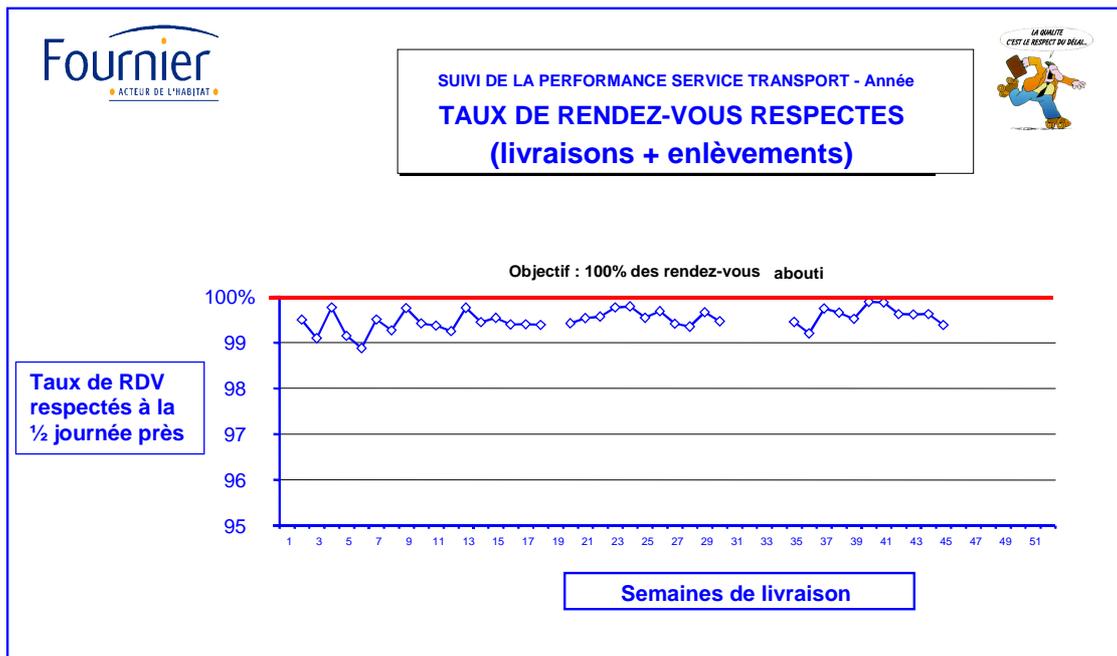


Figure 3 : Exemple d'indicateur de performance (doc. Fournier)

L'expression de la performance fournie par l'indicateur est complétée par une expression tendancielle qui permet de visualiser l'évolution de l'expression de performance sur une période donnée. Le même support permet d'afficher les deux expressions (fig. 4). En fait, la tendance est uniquement représentée par son signe (amélioration ou détérioration). Afin de tenir compte de certains phénomènes cycliques, certains indicateurs voient leur expression systématiquement comparée aux expressions des années précédentes : c'est le cas du délai de livraison qui dépend des variations saisonnières de la demande (Annexe IV-C).

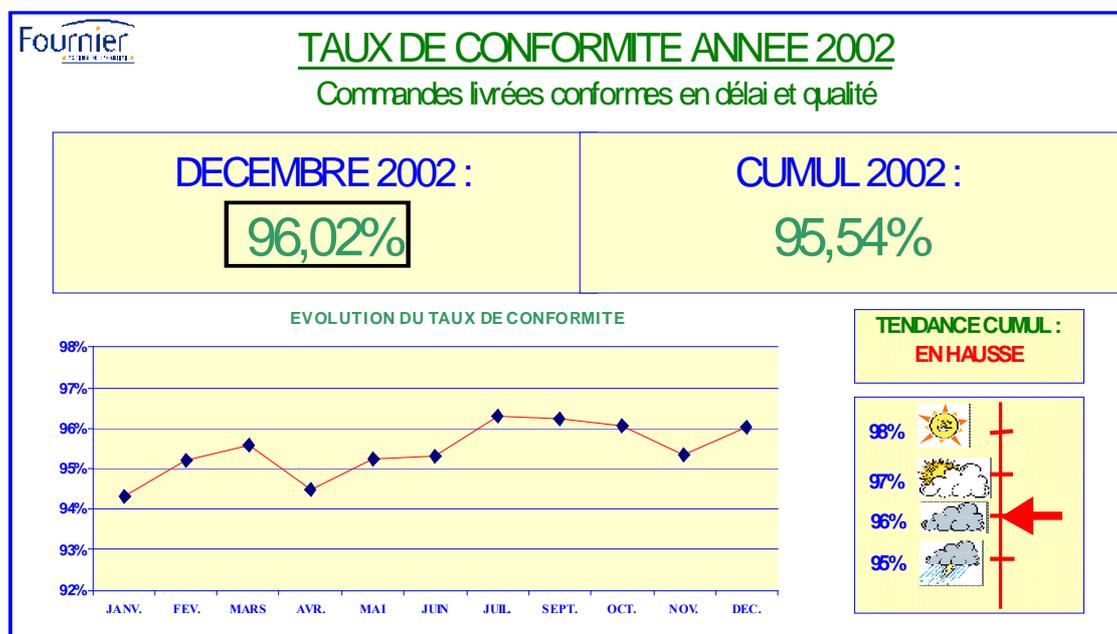


Figure 4 : Exemple d'expressions de performance (doc. Fournier)

### 3.1.2 Les interactions

Aucun des dix pilotes interrogés, Directeurs de Service ou Responsables de Processus n'a identifié d'interaction mutuelle (Ch. II § 4.3.2) forte entre, d'une part, les indicateurs qu'il exploitait, et d'autre part, les indicateurs exploités par d'autres pilotes. En effet, pour limiter les interactions mutuelles, ils ont en général recours à :

- une hiérarchisation selon un arbre de variables indépendantes ; donnant lieu de ce fait à des indicateurs indépendants,
- une gestion au niveau stratégique des interactions du niveau tactique ; par exemple le Directeur de Production interprète le *TRS* « insuffisant » du processus *Montage* en fonction des retards et manquants dus aux processus *Usinage* et *Approvisionnements*.

En accord avec le Directeur Qualité, garant des indicateurs techniques de l'entreprise, nous considérons donc qu'il n'y a pas, pour l'heure, d'interactions mutuelles identifiées en tant que telles dans le système d'indicateurs de l'entreprise.

### 3.1.3 L'organisation

Le système d'indicateurs de la Société Fournier pris dans sa globalité est complexe. L'entreprise étant structurée en services et en processus, l'organisation du système associe un sous-système respectivement à chaque service et à chaque processus. Par conséquent, ce système est détaillé selon les niveaux métapolitique (direction générale), stratégique (services), tactique (processus). Nous ne parlerons pas de système d'indicateurs au niveau opérationnel, les informations exploitées par les opérateurs relevant davantage de la mesure physique.

#### 3.1.3.1 L'organisation du système d'indicateurs au niveau métapolitique

Au niveau métapolitique, il n'y a pas aujourd'hui d'objectif global  $o_G$  et donc pas d'indicateur  $IP_G$  qui synthétise l'expression de la performance de l'entreprise dans sa totalité. Plusieurs organisations peuvent être mises en évidence, selon le FCS ou FCP considéré. Nous pouvons imaginer, à titre d'exemple, les organisations rattachées à la *rentabilité* de l'entreprise, la *notoriété*, la *satisfaction\_clients*... Dans le cadre de cette application, nous privilégions la modélisation de cette dernière organisation que nous abordons aux niveaux stratégique et tactique.

#### 3.1.3.2 L'organisation du système au niveau stratégique : le cas de l'organisation rattachée à la *satisfaction\_clients*

Au niveau stratégique, l'organisation du système d'indicateurs rattachée à la *satisfaction\_clients*, notée  $OSIP_{satisfaction\_clients}$ , comprend :

- des sous-systèmes structurels, en particulier ceux mis en place dans le cadre de la norme ISO 9001 et qui se rapportent aux objectifs permanents de l'entreprise ; ces sous-systèmes sont destinés à un Directeur de Service,
- des sous-systèmes conjoncturels, en particulier ceux mis en place dans le cadre de la norme ISO 9004 et qui se rapportent à des objectifs de progrès, ces sous-systèmes sont le plus souvent destinés à plusieurs Directeurs de Service.

Les deux sous-systèmes peuvent se recouper, certains indicateurs des sous-systèmes structurels se retrouvent dans les sous-systèmes conjoncturels. Ainsi, un indicateur comme le *TRS* est, par nature, structurel dans l'entreprise et attaché au service production. Mais si un objectif en termes de disponibilité est défini comme un objectif de progrès dans le cadre d'un plan d'action, le *TRS* peut apparaître dans l'organisation de ce sous-système conjoncturel. Il peut alors concerner outre le Directeur de Production, le Directeur des Ressources Humaines (pour la formation des opérateurs), le Directeur Qualité (pour l'assurance qualité auprès des fournisseurs).

### 3.1.3.3 L'organisation du système au niveau tactique : le cas de l'organisation rattachée à la *satisfaction\_clients*

A ce niveau, les sous-systèmes d'indicateurs, structurels et conjoncturels, de l'organisation  $OSIP_{satisfaction\_clients}$  donnent lieu à de nouveaux systèmes, conformément à la cartographie des processus. En d'autres termes, un système d'indicateurs est associé à chaque processus de l'entreprise. Les entités de ce système peuvent être :

- des indicateurs structurels, définis conformément à la norme ISO 9001 ; on en compte un à trois par processus, soit plus de 150 au total,
- des indicateurs conjoncturels, accompagnant la mise en œuvre des différents projets d'amélioration.

Tous les indicateurs, structurels ou conjoncturels, nécessaires au pilotage d'un processus donné, sont regroupés dans un sous-système  $S-SIP_{ISOTOP}$  (§ 2.2.3). Si les indicateurs structurels sont définis conformément au modèle d'indicateur de l'entreprise (cf. tableau 3), les indicateurs conjoncturels de niveau tactique sont le plus souvent définis par leur seul variable, l'objectif et l'opérateur de comparaison sont le plus souvent implicites.

### 3.1.3.4 Exemple : l'organisation du sous-système $OSIP_{Production}$ aux niveaux stratégique et tactique

L'objectif global du service Production s'exprime comme une union d'objectifs :  $o_g = \{o_{TRS...}, o_{TSI}, o_{TQ...}, o_{Prod}\}$ . L'organisation  $OSIP_{Production}$  concerne les indicateurs du service Production. Elle est détaillée en autant de sous-systèmes que de processus. Les mêmes indicateurs structurels seront déclinés sur les différents processus. Des indicateurs conjoncturels sont parfois spécifiques à un processus sans que leur objectif n'apparaisse clairement dans la décomposition des objectifs du service (fig. 5). Par ailleurs, aujourd'hui, aucune expression de performance n'agrège les expressions de performance du service ou même d'un processus dans sa globalité.

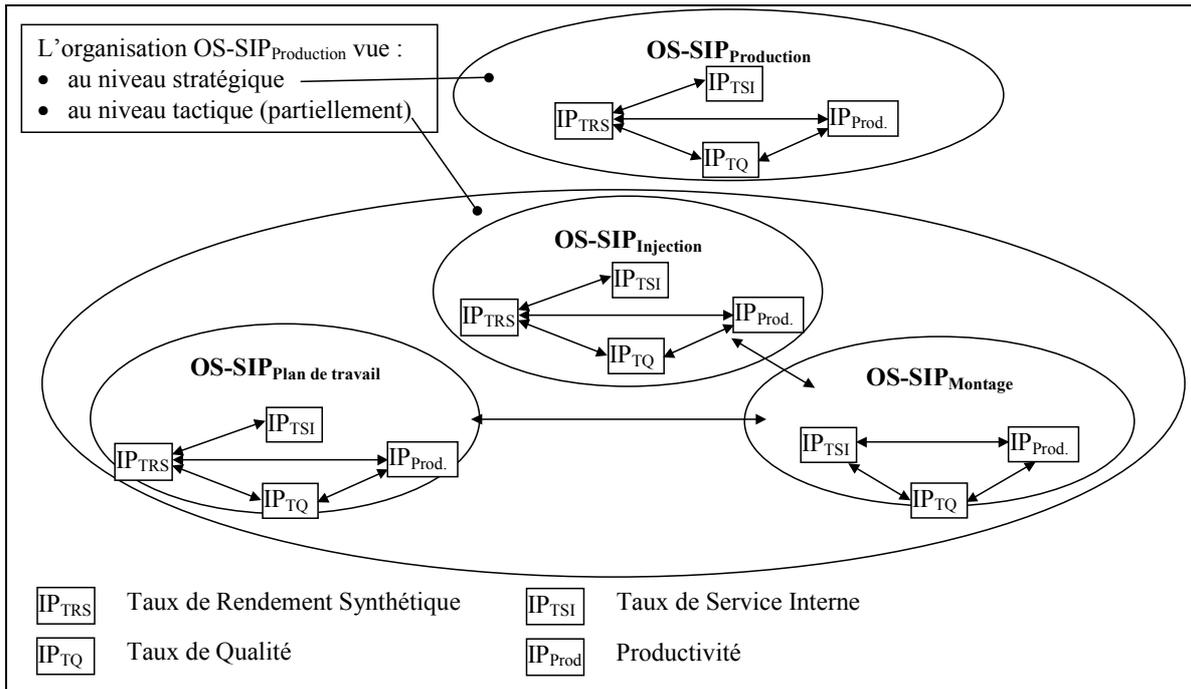


Figure 5 : Une vision de l'organisation OSIP<sub>Production</sub>

## 3.2 Le comportement

### 3.2.1 La conception

Rappelons que la conception du système d'indicateurs doit concerner, la décomposition des objectifs, l'élaboration des expressions de performance et leur agrégation (Ch. II § 4.5.1).

#### 3.2.1.1 La décomposition des objectifs

Conformément à l'organisation du système d'indicateurs, deux types d'objectifs sont distingués : les objectifs structurels et les objectifs conjoncturels, rattachés respectivement aux sous-systèmes structurels et conjoncturels. La notion d'objectif n'apparaît pas au niveau opérationnel pour les raisons évoquées précédemment.

- Au niveau stratégique, les deux types d'objectifs ne sont pas distingués par les Directeurs de service. Un objectif stratégique structurel est implicitement décomposé pour les différents processus au niveau tactique en objectifs. Les objectifs obtenus sont structurels et définis suivant la même variable. Pour l'objectif stratégique lié à la *qualité\_produits* par exemple, des objectifs de *qualité\_produits* sont définis spécifiquement à chaque processus de production de l'entreprise.
- Par ailleurs, une dizaine d'objectifs conjoncturels sont définis au niveau stratégique. Ces objectifs donnent lieu à l'identification d'un arbre des variables, les objectifs associés à ces variables restant implicites et non quantifiés. Pour l'objectif stratégique lié au *taux\_service* par exemple, des objectifs de, *disponibilité\_équipements*, *compétence\_opérateurs*, *lancement\_production*, etc. sont définis.

Ainsi, la décomposition des objectifs est implicite dans l'entreprise. En accord avec le Directeur Qualité, nous considérons que cette décomposition est acquise, et renvoyons son explicitation à des travaux ultérieurs.

### 3.2.1.2 L'élaboration des expressions de performance

L'élaboration des expressions de performance se fait conformément au modèle d'indicateur (§ 3.1.1). Elle porte sur les objectifs déclarés, *i.e.* les objectifs structurels et conjoncturels de niveau stratégique et les objectifs structurels de niveau tactique. Concernant les objectifs non déclarés, *i.e.* les objectifs conjoncturels de niveau tactique, les Responsables de processus expriment directement les performances, ayant la connaissance implicite des objectifs associés. Pour l'objectif lié au *lancement production* par exemple, à partir d'une déclaration implicite de moins d'une erreur de lancement par jour, le responsable du processus « Plan de travail », exprime une performance « insuffisante » pour une moyenne de trois erreurs quotidiennes.

L'absence de modèle pour l'élaboration de certaines expressions de performance est dommageable pour le pilotage dans la mesure où le mode d'élaboration actuel dépend du pilote concerné. Ceci a deux conséquences : la première concerne la validité de l'expression retournée, la seconde la diffusion de cette expression. En conséquence, en accord avec le Directeur Qualité, nous considérons qu'un modèle d'élaboration de ces expressions de performance est nécessaire.

### 3.2.1.3 L'agrégation des expressions de performance

L'entreprise n'élabore pas, *stricto sensu*, d'expressions de performance agrégées. Toutefois, dans certains cas, le système d'information de l'entreprise procède à l'agrégation des mesures physiques. Ce traitement est utilisé dans des indicateurs tels que la *qualité produit* ou le *TRS*. En général, l'absence d'expressions de performance agrégées est dommageable pour le pilotage, *i.e.* pour le choix des plans d'action. Il s'agira, pour le pilote, de comparer les différents états du système piloté obtenus suite à la mise en œuvre des différents plans d'action générés. Or, la comparaison des vecteurs d'expressions de performance associés à ces états ne permet pas d'aboutir dans le cas général à un classement décisif.

En conséquence, en accord avec le Directeur Qualité, nous considérons l'agrégation des expressions de performance comme problématique dans l'entreprise.

## 3.2.2 L'exploitation

Dans la phase d'exploitation des indicateurs, les expressions de performance sont effectivement élaborées à partir des données recueillies sur le système piloté selon les procédures de traitement définies par les différents pilotes (§ 3.1.1). Leur affichage est réalisé sous forme de tableaux de bord au sein des entités (processus, service, entreprise), les expressions des périodes précédentes étant en général rappelées (courbes diverses d'évolution, moyenne sur l'année). L'interprétation des tableaux de bord est réalisée lors des réunions de pilotage (revue de processus, de service, de direction). Dans le tableau 4, sont indiqués les indicateurs du tableau de bord du Directeur des Achats (Annexe IV-D).

Variable	Objectif	Elaboration de l'expression de performance	Représentation
Approvisionnement	0 rupture	Nombre de ruptures	Histogramme annuel
Stock	4 semaines	Valeur stock / Valeur achetée mensuelle	Histogramme annuel
Qualité fournisseurs	0% défauts	Evolution mensuelle (cumul annuel)	Histogramme annuel
Prix	Diminution	Prix actuels / prix année écoulée	Histogramme annuel

Tableau 4 : Le tableau de bord du service Achats (d'après source Fournier)

La mise en œuvre des indicateurs dans l'entreprise relève davantage d'une aide à un pilotage individuel et cloisonné des services que d'un pilotage global et transversal des processus, comme le montre l'interview du Directeur des Achats (Annexe IV-D). Les pilotes prennent en effet leurs décisions sur la base d'un ensemble d'indicateurs sans considérer les autres indicateurs, qu'ils soient de même niveau ou du niveau supérieur.

### 3.2.3 La révision

Les indicateurs sont révisés lorsque leurs objectifs sont reconsidérés. La reconsidération des objectifs structurels se fait de façon périodique, par exemple tous les 18 mois au niveau stratégique. Celle des objectifs conjoncturels se fait de façon événementielle, suite aux différentes revues effectuées par les pilotes ou suite aux modifications du système piloté (achat d'une nouvelle machine, déménagement, réimplantation, nouveau produit...).

La révision du système d'indicateurs s'opère à partir de quelques règles simples :

- la priorité est donnée aux indicateurs existants (un nouvel indicateur n'est créé que si le besoin est avéré),
- la pratique est analysée pour améliorer l'indicateur (affichage, tendance, visualisation de l'objectif, cumul...),
- un indicateur qui n'est pas exploité disparaît de l'affichage (pour autant, les données continuent d'être mémorisées).

### 3.3 Bilan

Au terme de cette lecture systémique des indicateurs de la Société Fournier et en accord avec le Directeur Qualité, deux questions sont posées, relatives à :

- l'élaboration des expressions de performance rattachées aux objectifs tactiques conjoncturels,
- l'agrégation des expressions de performance.

Pour répondre à ces questions, nous proposons une nouvelle approche de conception du système d'indicateurs, conformément à la méthode MACBETH étudiée au chapitre III. Nous traitons, en particulier, du système d'indicateurs rattaché à la *satisfaction\_clients*.

## 4 Une nouvelle approche de conception du SIP<sub>satisfaction\_clients</sub>

Cette partie est consacrée à l'application de la procédure MACBETH (ch. III § 4) à la conception du SIP<sub>satisfaction\_clients</sub>. Les étapes considérées sont retenues et reformulées en fonction de notre problématique. Dans un souci de décomplexification, la conception est envisagée, dans un premier temps, aux niveaux métapolitique et stratégique. Le pilote interrogé est le Directeur Qualité qui, rappelons-le, a la responsabilité de la mise en œuvre des indicateurs de performance techniques dans l'entreprise. Avec le Directeur Général, il est le pilote qui possède le plus de connaissances dans le domaine de la *satisfaction\_clients*.

### 4.1 Etape préliminaire - Les prérequis

#### 4.1.1 Les variables et les objectifs du niveau stratégique

Les variables retenues sont les différents FCP indiqués précédemment (cf. tableau 2), auxquels le Directeur Qualité ajoute la variable *Prix*. L'objectif global *O* considéré est donc :

$$O :: o_{TS} \cup o_{TSAV} \cup o_{Offre\_produit} \cup o_{Délai} \cup o_{Prix} \cup o_{Climat\_social}$$

Le tableau 5 regroupe les déclarations de ces objectifs.

Variabes	<i>taux_SAV</i>	<i>taux_service</i>	<i>offre_produit</i>	<i>délai_commercial</i>	<i>prix</i>	<i>climat_social</i>
Déclaration de l'objectif <i>o</i>	1.2% CA	97.5%	Complète	5 à 7 semaines	1 (coefficient)	Excellent

Tableau 5 : La déclaration des objectifs stratégiques

Ces déclarations des objectifs définissent l'état de l'entreprise auquel est associé le niveau de performance « *good* ». Le niveau « *neutral* » est fixé par expertise et correspond généralement au moins bon état de l'année écoulée (tableau 6).

Variabes	<i>taux_SAV</i>	<i>taux_service</i>	<i>offre_produit</i>	<i>délai</i>	<i>prix</i>	<i>climat_social</i>
Niveau « <i>neutral</i> »	1.32% CA	90%	Incomplète	9 à 11 semaines	1 (coefficient)	Bon

Tableau 6 : La définition du niveau « *neutral* » : valeurs 2003 (source Fournier)

#### Exemple

Début 2004, la déclaration de l'objectif *taux\_service* est  $o_{TS} = 97,5\%$ . L'expression de performance associée à cet état est :  $p_{TS} = 1$ .

La valeur minimale retenue pour la variable *taux\_service* en 2003 est  $m = 90\%$  et donne donc une expression de performance nulle :  $p_{TS} = 0$ .

#### 4.1.2 Les plans d'action générés

L'entreprise génère de façon permanente des plans d'action stratégiques pour atteindre son objectif global *O*. Ces plans ne sont pas associés spécifiquement à l'un des objectifs précédents mais correspondent davantage à une vision fonctionnelle de l'entreprise ; c'est avant tout par pilote et donc par service que les plans d'action sont générés. Par ailleurs, à un instant donné, l'entreprise ne choisit pas parmi plusieurs plans d'action, mais elle leur donne une priorité qui concerne leur ordre d'enclenchement. Autrement dit, il est rare qu'un plan

d'action généré soit abandonné, il est le plus souvent reporté voire modifié suite aux évolutions de l'environnement. Les plans d'action envisagés en 2003 et les états obtenus, au cas où ces plans seraient mis en œuvre, sont les suivants :

- plan d'action, « Investissement matériel », état associé noté *Invest.*,
- plan d'action, « Mise en place d'un système de suivi de production », état associé noté *Suivi Prod.*,
- plan d'action, « Formation à la polyvalence », état associé noté *Polyval.*,
- plan d'action, « Renforcement des contrôles », état associé noté *Contrôle*,
- plan d'action, « Mise en place de la politique d'amélioration continue », état associé noté *Kaizen*,
- plan d'action, « Constitution des gammes commerciales », état associé noté *Gam. Com.*,
- plan d'action, « Refonte du système d'information », état associé noté *Sys. Info.*

#### 4.2 Etape 1 - L'élaboration des expressions de performance

Chacun des plans d'action générés a un impact sur tout ou partie des objectifs identifiés  $\{o_{TS}, o_{TSAV}, o_{offre\_produit}, o_{délai}, o_{prix}, o_{climat\_social}\}$  et permet donc d'atteindre un état particulier identifié par un vecteur de mesures. Pour le plan d'action *Invest.* par exemple, le vecteur de mesures correspondant est :  $(m_{TS}^{Invest.}, m_{TSAV}^{Invest.}, m_{offre\_produit}^{Invest.}, m_{délai\_commercial}^{Invest.}, m_{prix}^{Invest.}, m_{climat\_social}^{Invest.})$ . Le Directeur Qualité exprime alors ses préférences et intensités de préférence entre les états obtenus par la mise en œuvre de ces plans d'action (cette mise en œuvre est, à ce stade, virtuelle). Les expressions de performance associées à ces différents états sont alors élaborées à partir des préférences et intensités de préférence exprimées.

Les préférences et intensités de préférence sont recueillies en deux temps.

- Dans un premier temps, le pilote est interrogé sur ses préférences pour constituer un premier classement des états considérés pour chaque objectif, le tableau 7 regroupe les préférences exprimées. Ainsi, par exemple, pour l'objectif  $o_{TSAV}$ , les préférences sont :  $m^{Gam. Com} \prod m^{Contrôle} \prod m^{Invest.} \prod m^{Polyval.} \prod m^{Sys. Info.} \prod m^{Kaizen} \prod m^{Suivi Prod.}$ .

Objectifs	Du plus important			au moins important			
<i>taux_SAV</i>	GAM.COM.	CONTROLE.	INVEST.	POLYVAL.	KAIZEN	SYS.INFO.	SUIVI PROD.
<i>taux_service</i>	INVEST.	GAM.COM.	SUIVI PROD.	POLYVAL.	SYS.INFO.	KAIZEN	CONTROLE.
<i>offre_produit</i>	GAM.COM.	INVEST.	SYS.INFO.	KAIZEN	POLYVAL.	SUIVI PROD.	CONTROLE.
<i>délai_commercial</i>	INVEST.	GAM.COM.	SYS.INFO.	POLYVAL.	SUIVI PROD.	KAIZEN	CONTROLE.
<i>prix</i>	GAM.COM.	KAIZEN	INVEST.	SYS.INFO.	POLYVAL.	SUIVI PROD.	CONTROLE.
<i>climat_social</i>	POLYVAL.	KAIZEN	INVEST.	SUIVI PROD.	SYS.INFO.	CONTROLE.	GAM.COM.

Tableau 7 : Les préférences du Directeur Qualité (états associés aux plans d'action générés)

- Dans un deuxième temps, le Directeur Qualité précise ses intensités de préférence entre les différents états. Ainsi, par exemple, pour l'objectif  $o_{TSAV}$ , les intensités de préférence sont les suivantes (l'intensité de préférence est indiquée entre parenthèses en exposants) :

$$\ll \text{good} \gg \Pi^{(2)} m^{\text{Gam. Com}} \Pi^{(2)} m^{\text{Controle}} \Pi^{(2)} m^{\text{Invest.}} \Pi^{(4)} m^{\text{Polyval.}} \Pi^{(0)} m^{\text{Kaizen.}} \Pi^{(3)} m^{\text{Sys. Info.}} \Pi^{(5)} m^{\text{Suivi Prod.}} \Pi^{(1)} \ll \text{neutral} \gg$$

Ce n'est qu'après avoir envisagé tous les couples de plans d'action que le Directeur Qualité valide ses intensités de préférence. Les niveaux « good » et « neutral » bornent naturellement ce classement (tableau 8).

Objectifs	Du plus important									au moins important								
	good	GAM.COM.	CONTROLE.	INVEST.	POLYVAL.	KAIZEN	SYS.INFO.	SUIVI PROD.	neutral	good	GAM.COM.	CONTROLE.	INVEST.	POLYVAL.	KAIZEN	SYS.INFO.	SUIVI PROD.	neutral
<i>taux_SAV</i>	2	2	2	4	0	3	5	1		5	2	2	4	0	3	5	1	
<i>taux_service</i>	5	5	0	1	1	1	3	2		5	5	0	1	1	1	3	2	
<i>offre_produit</i>	0	6	1	1	3	1	3	2		0	6	1	1	3	1	3	2	
<i>délai_commercial</i>	4	5	1	2	0	5	2	3		4	5	1	2	0	5	2	3	
<i>prix</i>	3	0	0	1	1	1	3	4		3	0	0	1	1	1	3	4	
<i>climat_social</i>	6	2	3	3	1	4	3	5		6	2	3	3	1	4	3	5	

L'intensité de préférence entre le niveau *good* (objectif *climat\_social* atteint) et l'état *Polyval.* (obtenu suite à la mise en œuvre du plan d'action **Formation à la polyvalence**) est « extrême » :  $k = 6$

L'intensité de préférence selon l'objectif *climat\_social* entre l'état *Contrôle* (obtenu suite à la mise en œuvre du plan d'action **Renforcement des contrôles**) et l'état *Gam. Com.* (obtenu suite à la mise en œuvre du plan d'action **Constitution des Gammes Commerciales**) est « modérée » :  $k = 3$

Tableau 8 : Les intensités de préférence du Directeur Qualité (états associés aux plans d'action générés)

A partir des intensités de préférence, nous élaborons les différentes expressions de performance, correspondant à chacun des états considérés, et ce, pour chaque objectif. Ces expressions sont alors déterminées selon des échelles d'intervalle conformément à la figure 6. Rappelons que l'indice P indique une préférence ordinaire : *Gamm.* P (préféré à) *Invest.* signifie que  $p_{TS}^{\text{Gamm.}} > p_{TS}^{\text{Invest.}}$ .

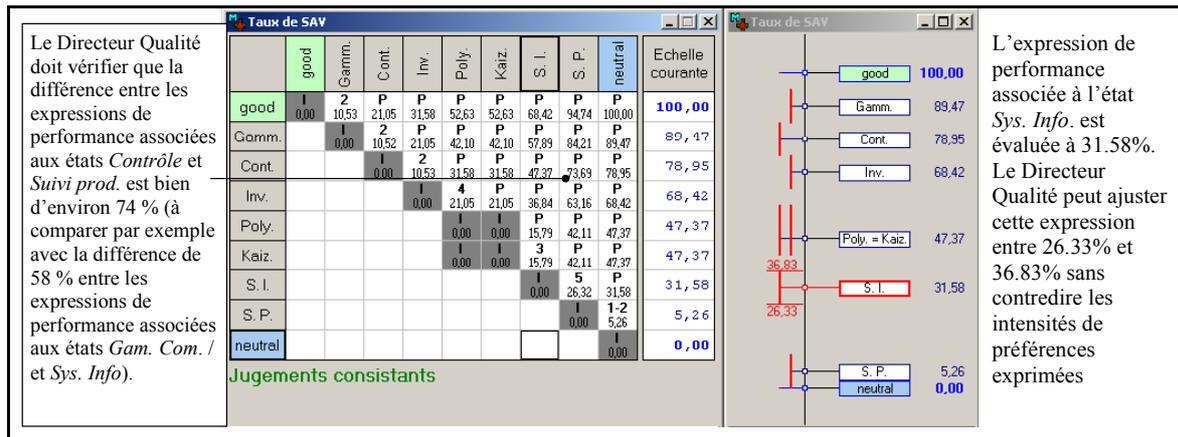


Figure 6 : La matrice complète des intensités de préférence ( $o_{TSAV}$ )

Le Directeur Qualité choisit de ne pas ajuster cette échelle, les expressions obtenues par les différents plans d'action lui convenant. En outre, il constate à l'issue de cette étape, qu'aucun plan d'action pris isolément ne permet d'atteindre l'objectif  $o_{TSAV}$ . Il en est de même pour les autres objectifs à l'exception de l'objectif  $o_{offre\_produit}$  qui est totalement atteint grâce au plan d'action *Gam. Com.*

Ce sont, par conséquent, les expressions agrégées qui permettront de se prononcer sur la génération de nouveaux plans d'action. En effet, conformément au besoin d'une vision globale, le pilote ne peut décider de générer un nouveau plan d'action sur la base d'un seul indicateur.

### 4.3 Etape 2 - La détermination des poids

Une fois élaborées les expressions de performance correspondant aux états considérés, il faut maintenant déterminer les paramètres de l'opérateur d'agrégation (moyenne pondérée), *i.e.* déterminer le poids de chaque expression performance dans l'expression de performance agrégée. Pour ce faire, il s'agit de recueillir les préférences et intensités de préférence du pilote en faisant appel à la notion d'état fictif. Dans notre cas, suite aux conclusions du Chapitre III, nous envisageons des états fictifs auxquels sont associés des vecteurs d'expressions de performance de type  $(1, \dots, 1, 0, 1, \dots, 1)$  où toutes les expressions de performance sont systématiquement égales à 1 sauf une selon l'objectif X, égale à 0. Un tel état sera noté  $[X]$  et la performance agrégée associée  $p^{ag\_X}$ .

Le Directeur Qualité procède au préalable au classement des états fictifs et définit également l'état fictif de référence « *all low* », qui est par nature bien connu du pilote car il correspond à l'état actuel de l'entreprise (tableau 8).

	Etats fictifs considérés							
	<i>all high</i>	[prix]	[délais]	[offre_produit]	[taux_SAV]	[taux_service]	[climat_social]	<i>all low</i>
<i>all high</i>	0	1	P	P	P	P	P	P
[prix]		0	0	0	0	P	P	P
[délais]			0	0	0	P	P	P
[offre_produit]				0	0	P	P	P
[taux_SAV]					0	1	P	P
[taux_service]						0	4	P
[climat_social]							0	6

Un état fictif où l'objectif *délai\_commercial* est négligé est **préfér**é à état fictif où l'objectif de *taux\_service* est négligé.

Un état fictif où l'objectif de *taux\_service* est négligé, est **préfér**é « **fortement** » à état fictif où l'objectif de *climat\_social* est négligé.

Tableau 9 : Les préférences et intensités de préférence du Directeur Qualité (états fictifs)

Il est alors possible de déterminer le poids des différents indicateurs dans l'expression de performance globale. Par exemple l'état fictif [taux\_service] est « fortement » préféré à l'état fictif [climat\_social]. Ce qui signifie que l'atteinte de l'objectif lié au *climat\_social* est ressentie comme étant plus importante que celle de l'objectif lié au *taux\_service*. Les équations correspondantes s'écrivent alors :

$$\begin{cases} p_{\text{taux\_de\_service}} - p_{\text{climat\_social}} & = 4\alpha \\ p_{\text{climat\_social}} - p_{\text{all low}} & = 6\alpha \\ \text{etc.} \end{cases}$$

D'où les poids suivants :

$$\begin{aligned} w_{\text{climat\_social}} &= 6/12 & w_{\text{taux\_de\_service}} &= 2/12 & w_{\text{taux\_SAV}} &= 1/12 \\ w_{\text{offre\_produit}} &= 1/12 & w_{\text{délai}} &= 1/12 & w_{\text{prix}} &= 1/12 \end{aligned}$$

Pour vérifier que les poids obtenus reflètent bien les préférences et intensités de préférence exprimées, nous calculons les intensités non précisées (tableau 10). Il s'agit de comparer les expressions de performance,  $p_i^j = 1 - w_j$  et  $p_i^h = 1 - w_h$ , associées aux états fictifs [j] et [h], soit  $p_i^j - p_i^h = (w_h - w_j)$ . Le Directeur Qualité utilise son expertise pour valider ce comparatif.

	Etats fictifs considérés							
	<i>all high</i>	[prix]	[délai_commercial]	[offre_produit]	[taux_SAV]	[taux_service]	[climat_social]	<i>all low</i>
<i>all high</i>	0	1/12	1/12	1/12	1/12	2/12	6/12	1
[prix]		0	0	0	0	1/12	5/12	11/12
[délai_commercial]			0	0	0	1/12	5/12	11/12
[offre_produit]				0	0	1/12	5/12	11/12
[taux_SAV]	La différence entre l'expression de performance associée à l'état fictif [taux_service] et celle associée à l'état fictif [[climat_social]] est de l'ordre de 4/12				0	1/12	5/12	11/12
[taux_service]					0	4/12	10/12	
[climat_social]						0	6/12	

Tableau 10 : La matrice complète des intensités de préférence (états fictifs)

#### 4.4 Etape 3 – L’agrégation des expressions de performance

L’expression de performance agrégée associée à chaque état est alors obtenue en agrégeant les différentes expressions de performance (tableau 11).

Etat associés aux plans d’action générés	Expressions de performance							Agrégée	Rang
	<i>taux_SAV</i>	<i>taux_service</i>	<i>offre_produit</i>	<i>délai_commercial</i>	<i>prix</i>	<i>climat_social</i>			
	2/12	1/12	1/12	1/12	1/12	6/12	1		
<b>INVEST.</b>	<b>69,2%</b>	<b>72,2%</b>	<b>64,7%</b>	<b>81,8%</b>	<b>76,9%</b>	<b>59,3%</b>	<b>65,8%</b>	<b>1</b>	
SUIVI PROD.	7,7%	44,4%	29,4%	45,5%	53,8%	48,1%	39,8%	6	
POLYVAL.	48,7%	38,9%	35,3%	45,5%	61,5%	77,8%	62,1%	2	
CONTROLE.	79,5%	11,1%	11,8%	13,6%	30,8%	29,6%	33,7%	7	
<b>KAIZEN</b>	<b>48,7%</b>	<b>27,8%</b>	<b>52,9%</b>	<b>22,7%</b>	<b>76,9%</b>	<b>70,4%</b>	<b>58,3%</b>	<b>3</b>	
GAM.COM.	89,7%	44,4%	100,0%	59,1%	76,9%	18,5%	47,6%	4	
SYS.INFO.	33,3%	33,3%	58,8%	54,5%	69,2%	44,4%	45,8%	5	

Tableau 11 : Les expressions de performance agrégées (états associés aux plans d’action générés)

L’expression de performance agrégée la plus élevée, 65,8% est associée à l’état *Invest.*, obtenu par la mise en œuvre du plan d’action **Investissement matériel**. L’expression de performance agrégée associée à l’état *Kaizen*, obtenu par la mise en œuvre du plan d’action **Mise en place d’une politique d’amélioration continue**, est évaluée à 58,3% soit le 3<sup>ème</sup> rang.

#### 4.5 Analyse des résultats

Pour ce qui est du choix des plans d’action stratégiques, nous constatons que la meilleure expression de performance globale qu’ils permettent d’obtenir est de l’ordre de 65%. Trois possibilités s’offrent alors au pilote :

- mettre en œuvre le plan d’action qui permet d’obtenir la meilleure expression de performance agrégée,
- mettre en œuvre successivement ou simultanément plusieurs de ces plans d’action,
- générer un nouveau plan d’action « transversal » sur la base des précédents.

Le Directeur Qualité n’envisage pas la première éventualité, au vu de l’expression agrégée obtenue. Ce sont en revanche les deux dernières possibilités qui sont retenues dans un premier temps.

##### 4.5.1 La mise en œuvre successive ou simultanée de plusieurs plans d’action

Supposons que les plans d’action soient mis en œuvre successivement. Les expressions de performance associées aux états obtenus suite à la mise en œuvre de chacun de ces plans, sont alors supérieures aux expressions de performance initiales. A l’issue de la mise en œuvre de chaque plan, l’état atteint est considéré comme le nouveau niveau « *neutral* » pour une nouvelle élaboration des expressions de performance. La procédure est réitérée en conservant les mêmes objectifs (niveaux « *good* »), mais avec de nouveaux niveaux « *neutral* ». Les poids sont conservés. Les gains réalisés sont additionnés et l’expression de performance

agrégée obtenue suite à la mise en œuvre successive des plans d'action est alors facilement calculée. L'entreprise choisit de ne pas retenir cette option, pour des raisons de délais de mise en œuvre.

Supposons maintenant une mise en œuvre simultanée des plans d'action. Dans ce cas, il faut exprimer non pas les intensités de préférence entre les états *Invest. / Polyval.* par exemple, mais les intensités de préférence entre les états associés à la mise en œuvre de deux sous-ensembles de plans d'action, par exemple : (*Investissement matériel & Formation à la polyvalence*) / (*Mise en place d'un suivi de production & Conception des gammes commerciales & Renforcement des contrôles*). Le nombre de possibilités étant important, nous nous basons sur les points forts (expressions de performance proches de 1) et points faibles (expressions de performance proches de 0) de chaque plan afin qu'ils se complètent. Si le sous-ensemble qui regroupe tous les plans d'action ne permet pas d'atteindre tous les objectifs, il faudra alors générer de nouveaux plans d'action.

### Exemple

Sur le tableau 12, il apparaît que les points forts des plans d'action (*Investissement matériel, Formation à la polyvalence, Conception des gammes commerciales*) se complètent bien, le degré d'atteinte de tous les objectifs donne des expressions de performance satisfaisantes pour le pilote. Ce dernier estime, de plus, que la conjonction des trois plans d'action n'entraîne pas d'effet indésirable, qui conduirait à des expressions de performance inférieures à la plus grande des expressions de performance. Nous élaborons une fois de plus les expressions de performance en définissant de nouvelles intensités de préférence ajoutant l'état « *Invest. & Polyval. & Gam. Com.* » aux états considérés précédemment (§ 4.1.1).

Etat considéré	Expressions de performance						Rang	
	<i>taux_SAV</i>	<i>taux_service</i>	<i>offre_produit</i>	<i>délai_commercial</i>	<i>prix</i>	<i>climat_social</i>	Global	
Etat considéré	2/12	1/12	1/12	1/12	1/12	6/12	1	
<b>INVEST.</b>	<b>69,2%</b>	<b>72,2%</b>	<b>64,7%</b>	<b>81,8%</b>	<b>76,9%</b>	<b>59,3%</b>	<b>65,8%</b>	<b>1</b>
SUIVI PROD.	7,7%	44,4%	29,4%	45,5%	53,8%	48,1%	39,8%	6
<b>POLYVAL.</b>	<b>48,7%</b>	<b>38,9%</b>	<b>35,3%</b>	<b>45,5%</b>	<b>61,5%</b>	<b>77,8%</b>	<b>62,1%</b>	<b>2</b>
CONTROLE.	79,5%	11,1%	11,8%	13,6%	30,8%	29,6%	33,7%	7
KAIZEN	48,7%	27,8%	52,9%	22,7%	76,9%	70,4%	58,3%	3
<b>GAM.COM.</b>	<b>89,7%</b>	<b>44,4%</b>	<b>100,0%</b>	<b>59,1%</b>	<b>76,9%</b>	<b>18,5%</b>	<b>47,6%</b>	<b>4</b>
SYS.INFO.	33,3%	33,3%	58,8%	54,5%	69,2%	44,4%	45,8%	5

Les plans **Invest.**, **Polyval.** et **Gam.Com** se complètent assez bien, aucune expression de performance n'est inférieure à 70 %.

Tableau 12 : Une proposition de regroupement de plans d'action

Cette option n'est pas retenue non plus. Elle suppose en effet que les plans d'action soient intégralement conservés ce qui n'est pas réaliste. L'entreprise adopte alors la dernière possibilité que nous décrivons ci-après. L'idée est de générer de nouveaux plans d'action en reprenant partiellement certains des plans générés [Farat 03].

#### 4.5.2 La génération de plans d'action

L'idée est de générer de nouveaux plans à partir de n'importe quel sous-ensemble de l'ensemble initial {« Investissement matériel », « Mise en place d'un système de suivi de production », « Formation à la polyvalence », « Renforcement des contrôles », « Mise en

place de la politique d'amélioration continue », « Constitution des gammes commerciales », « Refonte du système d'information ». Ainsi, le Plan Qualité Environnement 2003 (PQE 2003) considère un certain nombre de variables et d'objectifs identifiés précédemment (§ 4.1.1). Il regroupe un certain nombre d'actions de l'ensemble des plans générés initialement (Annexe IV-E).

L'objectif global du système d'indicateurs associé au plan d'action résultant de cette fusion est l'union de 12 objectifs, dont 8 nouveaux (tableau 13).

<b>PLAN QUALITE / ENVIRONNEMENT 2003</b>		
O <sub>g1</sub>	GESTION DES FICHES DE DESCRIPTION DE POSTE	Nouveau
O <sub>g2</sub>	PASSATION DES COMMANDES	Nouveau
O <sub>g3</sub>	TAUX DE SERVICE APRES-VENTE DE 1,2%	Reconduit
O <sub>g4</sub>	TAUX DE SERVICE A 97,5%	Reconduit
O <sub>g5</sub>	ANTICIPATION DES ACTIONS D'AMELIORATION	Nouveau
O <sub>g6</sub>	PREVENTION POLLUTION DU FIER	Nouveau
O <sub>g7</sub>	CERTIFICATION ISO 14001 DU SITE DE POISY (UNITE 7)	Nouveau
O <sub>g8</sub>	RECYCLAGE LES DECHETS PAPIERS	Reconduit
O <sub>g9</sub>	INTEGRATION VISUELLE DU NOUVEAU BATIMENT ADMINISTRATIF	Nouveau
O <sub>g10</sub>	NIVEAU DE DECHETS GENERE PAR LE SITE DU BRAY	Nouveau
O <sub>g11</sub>	CONSOMMATION D'ELECTRICITE	Reconduit
O <sub>g12</sub>	COMPETENCE NOUVEAUX EMBAUCHES AU SMQE	Nouveau

*Tableau 13 : Les objectifs stratégiques du PQE 2003 (source Fournier)*

Le SIP<sub>PQE\_2003</sub> est conjoncturel et est en fait un sous-système du système d'indicateurs relatif à la *satisfaction\_clients*. Nous abordons maintenant la conception, par la méthode MACBETH, d'un sous-système particulier du SIP<sub>PQE\_2003</sub>, le SIP<sub>taux\_service</sub> relatif au *taux\_service* ( $o :: \text{taux\_service} = 97.5\%$ ), détaillé au niveau tactique. L'approche proposée peut naturellement être reproduite pour les autres sous-systèmes. Le pilote interrogé est le Directeur Production, qui avec le Directeur des Ressources Humaines, a la responsabilité du *Taux\_service*.

## **5 La conception du SIP<sub>taux\_service</sub>**

### **5.1 Etape préliminaire - Les prérequis**

#### **5.1.1 Les plans d'action générés**

Le tableau 14 ci-après précise les différentes actions générées pour l'atteinte de l'objectif  $o :: \text{taux\_service} = 97.5\%$ . Le plan d'action généré est dans une logique « tout ou rien » d'atteinte des objectifs.

PLAN D'ACTION RELATIF à l'objectif $o_{TS} = 97.5\%$		
Commentaire	LIBELLE DE L'ACTION	Code
Action abandonnée	Mise en place d'une réunion mensuelle devant générer des actions de prévention en production sur nos équipements.	
	Suivi d'un indicateur sur nos délais d'intervention sur dépannage et sur le suivi des BI.	AP2
	Mise en place des audits systématiques de l'auto maintenance.	AP3
Action abandonnée	Etude de la fiabilité des stocks d'en cours entre usinage et montage.	AP4
Action différée sur 2004	Ecriture d'une procédure de gestion des OF en production.	AP5
	Mise en place d'un tableau de bord indicateur de charge dans les ateliers.	AP6
	Suivi du tableau de bord d'activité quotidien.	AP7
	Mise en place d'un tableau des capacités démontrées en production sur les principales machines.	AP8
	Remise à plat des matrices de compétences dans les secteurs.	AP9
	Nouvelle machine de perçage montage.	AP10
Action différée sur 2004	Nouvelle machine de montage préparation façades.	AP11
	Participation de l'équipe de production au démarrage de la nouvelle usine U8. L'objectif est de démarrer l'usine sans interférer de façon notable sur notre taux de service.	AP12
	Mise en place de taux de service inter atelier (9 ateliers).	AP13
Action figée (difficultés)	Etude du tri par fractionnement sur U2 et U5 puis aux polymères.	AP14
	Réflexion sur la polyvalence.	ARH1

Tableau 14 : Le plan d'action associé à l'objectif  $o_{TS}$  (source Fournier)

Dans un souci d'homogénéité, nous identifierons chaque action à un plan d'action particulier.

### 5.1.2 Les variables et les objectifs du niveau tactique

Au niveau tactique, seul l'arbre des variables associées à  $o_{TS}$  est explicite, les objectifs associés étant implicites. Pour définir le niveau « good », un entretien avec le Directeur de Production permet de déclarer ces objectifs, sur la base de la correspondance entre les actions du plan et les objectifs. Précisons de plus que les actions considérées sont censées permettre l'atteinte totale d'un objectif et d'un seul (tableau 15).

Code	Déclaration de l'objectif
AP2	<i>MTTR = 30 min.</i>
AP3	<i>2 ateliers audités /mois</i>
AP5	<i>Procédure écrite</i>
AP6	<i>Tableau de bord mis en place</i>
AP7	<i>Tableau de bord suivi quotidiennement</i>
AP8	<i>Toutes capacités machines principales démontrées</i>
AP9	<i>Toutes matrices de compétences mises à plat</i>
AP10	<i>Machine de perçage opérationnelle</i>
AP12	<i>TS = 90% 12/2003</i> <i>TS = 95% 06/2004</i>
AP13	<i>IP Taux de service inter atelier mis en place partout</i>
ARH1	<i>Réflexion menée sur X% des postes</i>

Tableau 15 : Les objectifs de niveau tactique rattachés au Taux\_service

Ces déclarations des objectifs définissent l'état de l'entreprise auquel est associé le niveau de performance « *good* ». Le niveau « *neutral* » est fixé par expertise et correspond à l'état actuel de l'entreprise.

## 5.2 Etape 1 - L'élaboration des expressions de performance

A l'état [i] obtenu par l'action i correspond par définition un vecteur d'expressions de performance où la  $i^{\text{ème}}$  expression de performance est à 1 et toutes les autres à 0 : (0..., 0, 1, 0..., 0). L'action AP2, par exemple, permet d'atteindre totalement l'objectif  $o$  :: *MTTR = 30 min.*

## 5.3 Etape 2 - Une première détermination des poids

Le Directeur de Production est interrogé sur ses préférences et intensités de préférence entre les différents états caractérisés par des vecteurs d'expressions de performance de type (0..., 1..., 0). Il est décidé de fournir les intensités de préférence entre les expressions de performance de rangs consécutifs, les expressions de performance étant ordonnées par importance décroissante. La solution d'une évaluation directe de la différence entre un vecteur quelconque d'expression de performance et le vecteur d'expression de performance (0..., 0..., 0) associé à l'état « *all low* » est en effet ressentie comme plus délicate. Les intensités de préférence sont portées dans la matrice donnée tableau 16. Les intensités non quantifiées correspondent à des préférences ordinales (P).

Etats associés aux plans d'action générés														
	all high	AP13	AP6	AP7	ARH1	AP9	AP8	AP2	AP3	AP12	AP10	AP11	AP5	all low
all high	0	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
AP13		0	2	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
AP6			0	2	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
AP7				0	1	P	P	P	P	P	P	P	P	P
ARH1					0	3	P	P	P	P	P	P	P	P
AP9						0	1	P	P	P	P	P	P	P
AP8							0	4	P	P	P	P	P	P
AP2								0	3	P	P	P	P	P
AP3	L'intensité de préférence entre l'état [AP9] et l'état [AP8] est « très faible ». L'intensité de préférence entre l'état [AP9] et l'état [AP12] n'est pas précisée.								0	1	P	P	P	P
AP12										0	2	P	P	P
AP10											0	0	P	P
AP11												0	4	P
AP5													0	2
AP5														

Tableau 16 : Intensités de préférence du Directeur de Production (états associés aux plans d'action générés)

A partir de ces préférences et intensités de préférence de type  $k_i$  (Ch. III § 5.1.1), il est possible de déterminer les poids  $w_{(i)}$  des différentes expressions de performance (Annexe IV-F) où  $w_{(i)}$  est le  $i^{\text{ème}}$  poids rangé par ordre décroissant, et  $\alpha$  un coefficient qui permet de respecter la condition  $\sum w_i = 1$  :

$$w_{(i)} = \alpha \times \sum_{j=1}^n k_j = \frac{\sum_{j=1}^n k_j}{\sum_{j=1}^n j \times k_j} \quad \text{où} \quad \alpha = \frac{1}{\sum_{j=1}^n j \times k_j}$$

### Exemple

Le calcul de  $\alpha$  se fait sans difficulté d'après le tableau 16 et donne :  $\alpha = 1/165$

Il est alors possible de calculer les poids :

$$w_{13} = 0.15 \quad w_6 = 0.14 \quad w_7 = 0.13 \quad w_1 = 0.12 \quad w_8 = w_9 = 0.10$$

$$w_2 = 0.07 \quad w_3 = w_{12} = 0.05 \quad w_{10} = w_{11} = 0.04 \quad w_5 = 0.01$$

Le Directeur de Production valide les poids.

### 5.4 Etape 3 – L'agrégation des expressions de performance

Le plan d'action généré relatif à  $\sigma_{TS}$  est dans une logique « tout ou rien » d'atteinte des objectifs. Le vecteur d'expressions de performance obtenu suite à la mise en œuvre de ce plan d'action est donc : (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1). En conséquence, l'expression de performance agrégée  $p^{\text{ag}} = \sum_{i=1}^{12} w_{(i)} p_{(i)} = 1$ .

## 5.5 Vers la prise en compte des interactions mutuelles

Nous avons supposé jusqu'alors des expressions de performance indépendantes, c'est-à-dire que :

- la mise en œuvre de chacune des actions n'a d'influence que sur l'expression qui lui est associée,
- la contribution d'une expression de performance à l'expression de performance agrégée est invariante, quelles que soient les autres expressions.

En réalité, cette hypothèse d'indépendance n'est pas toujours vérifiée. Dans le cas du  $SIP_{Taux\_service}$ , le Directeur de Production identifie en effet plusieurs cas d'interactions mutuelles entre les indicateurs de performance ; en particulier, l'interaction mutuelle entre l'indicateur  $IP_9$  associé à l'action [AP9], « Remise à plat des matrices de compétences », et l'indicateur  $IP_1$  associé à l'action [ARH1], « Réflexion sur la polyvalence », lui semble non négligeable.

Son expertise nous apprend que l'expression de performance associée à l'état noté [ARH1 & AP9], qui est obtenu suite à la mise en œuvre des actions ARH1 et AP9 est supérieure à la somme des expressions de performance associées aux états [ARH1] et [AP9], obtenus respectivement par les actions ARH1 et AP9. Ce type d'interaction est donc modélisable par l'intégrale de Choquet. Pour exploiter ces données, nous proposons de développer une matrice réduite aux seuls états [ARH1 & AP9] [ARH1] et [AP9] (tableau 17). Nous supposons qu'il s'agit de la seule interaction mutuelle de ce sous-système. En conséquence, tous les indices de Shapley  $\phi_i$  sont égaux au poids  $w_i$  hors  $w_9$  et  $w_1$ .

	[AP9 & ARH1]	[ARH1]	[AP9]	<i>all low</i>	
[AP9&ARH1]	0	P	P	$k_2$	$k_2 = 8$
[ARH1]		0	P	$k_3$	$k_3 = 4$
[AP9]			0	$k_4$	$k_4 = 3$
<i>all low</i>				0	

Tableau 17 : Les Préférences et intensités de préférence pour [AP9 & ARH1], [ARH1] et [AP9]

On peut noter que dans ce cas, le Directeur de Production a exprimé plus facilement ses intensités de préférence entre l'état « *all low* » et les états fictifs considérés qu'entre ces états.

Par ailleurs, on rappelle que pour le vecteur d'expressions de performance de type  $(p_{13}, p_6, \dots, p_1, p_{19}, \dots, p_{11}, p_5)$ , dans le cas où le coefficient d'interaction  $I_{1-9}$  entre  $p_1$  et  $p_9$  est identifiée, l'expression de performance agrégée est obtenue grâce à la formule suivante (Ch. III § 2.4.3) :

$$p^{ag} = p^{ag_{1-9}} = \sum(\phi_i p_{(i)}) - \frac{1}{2} \sum(I_{1-9} | p_1 - p_9 |).$$

Nous pouvons alors écrire pour l'expression de performance agrégée associée à l'état [AP9 & ARH1] :  $(\phi_1 + \phi_2) = 1 - (\phi_3 + \phi_4 + \phi_5 + \phi_6 + \phi_7 + \phi_8 + \phi_9 + \phi_{10} + \phi_{11} + \phi_{12} + \phi_{13}) = 1 - \Phi$

où  $\Phi = w_2 + w_3 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9 + w_{10} + w_{11} + w_{12} + w_{13}$

En comparant les états [AP9 & ARH1] [AP9], [ARH1] à l'état *all low*, on peut établir les relations suivantes :

$$\begin{cases} 1 > k_1\alpha \\ (\phi_1 + \phi_9) = k_2\alpha \\ (\phi_1 - 1/2 I_{1,9}) = k_3\alpha \\ (\phi_9 - 1/2 I_{1,9}) = k_4\alpha \\ (\phi_1 + \phi_9) = 1 - \Phi \end{cases}$$

Le système d'équations correspondant s'écrit alors sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} k_2 & -k_3 & -k_3 & -k_2/2 \\ k_4 & & -k_3 & (k_3 - k_4)/2 \\ 1 & & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ I_{1,9} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 - \Phi \end{bmatrix}$$

La solution dans le cas général s'écrit comme suit, en supposant que le discriminant  $\Delta = \frac{-k_3}{2}(k_2 + k_3) \neq 0$ . Sachant que  $k_i > 0$ , il faut donc  $k_3 \neq 0$ .

$$\begin{cases} \phi_1 = (1 - \Phi) k_3 (-k_2 - k_3 + k_4) / 2\Delta \\ \phi_9 = (1 - \Phi) k_3 (-k_2 + k_3 - k_4) / 2\Delta \\ I_{1,9} = (1 - \Phi) k_3 (-k_2 + k_3 + k_4) / \Delta \end{cases}$$

L'application numérique donne :

$$\begin{array}{llll} k_2 = 8 & k_3 = 4 & k_4 = 3 & \Phi = 0,8 \\ \phi_1 = 0.15 & \phi_9 = 0.12 & I_{1,9} = -0.03 & \end{array}$$

On peut constater que :

- l'expression de performance agrégée obtenue suite à la mise en œuvre de [AP1] est :  $p^{\text{ag-1}} = 0.15$ ,
- l'expression de performance agrégée obtenue suite à la mise en œuvre de [AP9] est ,  $p^{\text{ag-9}} = 0.11$ ,
- l'expression de performance agrégée obtenue suite à la mise en œuvre de [AP1&AP9] est  $p^{\text{ag-1-9}} = 0.3$ .

Ces résultats illustrent l'interaction mutuelle entre les indicateurs  $IP_1$  et  $IP_9$  : ( $p^{\text{ag-1-9}} > p^{\text{ag-1}} + p^{\text{ag-9}}$ ). Dans ces conditions, le Directeur Production veillera à une mise en œuvre du plan d'action qui équilibre  $p_1$  et  $p_9$ , sous peine de constater une expression de performance agrégée moindre.

## **6 Bilan de la modélisation du système d'indicateurs**

### **6.1 Les apports pour l'industriel**

Très concrètement, les pilotes disposent désormais d'un instrument leur permettant d'élaborer et d'agrèger les expressions de performance. Ces informations leur permettent de :

- choisir un plan d'action et conclure sur la pertinence de le mettre en œuvre,
- connaître les points forts et les points faibles d'un plan d'action donné, pour en générer de nouveaux.

Plus généralement, la représentation des différents sous-systèmes d'indicateurs a permis de mettre en évidence les exigences de coordination entre les différents Directeurs de Service. Lors des premières interviews, si les pilotes connaissaient bien les indicateurs mis en place dans leurs services ou processus, ils ignoraient pour la plupart à quels objectifs globaux ceux-ci contribuaient et si d'autres indicateurs interagissaient avec les leurs. Les limites du pilotage cloisonné et donc l'intérêt du pilotage global peuvent facilement apparaître à tous, en particulier du fait de la nature transversale des plans d'action. Ainsi :

- une méthodologie de mise en place du système d'indicateurs est désormais établie, renforçant l'idée d'une interprétation des expressions de performance retournées par les indicateurs selon les objectifs globaux à atteindre.
- le positionnement de chaque indicateur et donc de chaque action relativement aux objectifs globaux est pris en compte, notamment par la détermination cohérente des poids.

### **6.2 Les difficultés rencontrées**

La modélisation des indicateurs d'une entreprise industrielle ne présente pas de sérieuses difficultés en ce qui concerne, sa finalité, son environnement, ses objectifs exogènes et endogènes qui sont assez facilement définis. De la même façon, les notions de conception, d'exploitation et même de révision du système d'indicateurs sont habituelles dans une entreprise telle que la Société Fournier. Concernant la terminologie propre au système d'indicateurs, les notions de décomposition, d'interaction, d'agrégation, sont bien admises.

Certaines difficultés surviennent, en revanche, dès que l'on veut détailler l'organisation de ce système. Cette organisation est trop complexe pour être modélisée directement dans sa totalité et aucune méthodologie ne permet de donner des priorités entre les divers systèmes. Ceci conduit alors à représenter de multiples sous-systèmes sans garantir de rendre le système plus intelligible. Deux tendances complémentaires apparaissent :

- la première consiste à reproduire la structure de pilotage dans une approche hiérarchisée et conduit à définir des systèmes d'indicateurs par service, généralement structurels, pour des objectifs permanents,
- la seconde consiste à définir autant de systèmes conjoncturels qu'il y a d'objectifs globaux, ces objectifs étant remis en cause sur un horizon donné.

### 6.3 Retour sur la pratique de MACBETH

Concernant les prérequis à la méthode MACBETH, les plans d'action et les variables du niveau stratégique étaient disponibles dans l'entreprise avant le début de notre étude et la structure de pilotage était déjà formalisée.

Comme les pilotes hésitent à exprimer directement les performances associées à un état considéré, la notion d'intensité de préférence a été facilement intégrée. La quantification des intensités de préférence conduit néanmoins les pilotes à :

- préciser la nature des plans d'action (qu'entend-on effectivement par *Renforcement des contrôles* ?) qui peut aller jusqu'à une modification de leur libellé (*Mise à jour des gammes commerciales* devient ainsi *Constitution des gammes commerciales*),
- remettre en cause les préférences ordinales suite aux effets mieux évalués des plans d'action précisés, ce qui a concerné environ 20% des préférences pour le Directeur Qualité.

Il est apparu, durant cette étape, qu'un recueil exhaustif des intensités de préférence est fastidieux et peu fiable. En effet, si le pilote évalue assez naturellement la différence entre les expressions de performance associées aux états de rangs consécutifs, l'expertise est moins fiable au-delà. A cinq rangs d'écart, le pilote ne sait plus si l'intensité de préférence entre deux états est « modérée » ou « forte », alors qu'il sait très bien si elle est « très faible » ou « faible » pour deux états de rangs consécutifs. Il nous semble que la proposition de valider la matrice complète des intensités de préférence est plus proche du terrain que le recueil de toutes les intensités de préférence.

La notion d'état fictif et de plan d'action fictif, quel que soit le type de vecteur d'expressions de performance associé, est délicate à percevoir, quand elle n'est pas totalement irréaliste. Les vecteurs de type  $(1\dots, 0\dots, 1)$  semblent cependant convenir, le pilote a en mémoire des crises « délai » ou « qualité » proches de ce type d'état. Mais cet exercice demande une immersion forte dans cette logique de maximisation de toutes les expressions de performance sauf une.

Les poids attribués à chaque indicateur, bien que discutables, représentent une réelle avancée pour le pilote. En effet, au-delà de la hiérarchisation des plans d'action, cette pondération permet de cibler les indicateurs prioritaires et facilite la simulation des plans d'action.

L'apport le plus important pour le pilotage réside bien entendu dans la délivrance d'une expression de performance globale obtenue par agrégation, les pilotes disposant alors d'une information unique significative du degré d'atteinte d'un objectif global. Ainsi, le pilote qui génère des plans d'action, souvent de façon itérative, trouve un véritable outil d'aide à la décision, l'expression de performance agrégée lui permettant de classer les plans générés et d'interrompre cette génération dès lors qu'une expression de performance agrégée le satisfait pleinement.

## 7 Conclusion

Dans son évolution, la Société Fournier a ressenti le besoin d'aller au-delà de la définition cloisonnée des indicateurs vers une appréhension de la performance dans sa globalité. Dans ce sens, l'utilisation du modèle de système d'indicateurs a permis à l'entreprise de situer les indicateurs qu'elle met en œuvre dans un cadre commun.

De plus, la mise en œuvre d'une méthode d'agrégation a permis de montrer ce que pouvait apporter le développement de tableaux de bord intégrant des expressions de performance agrégées.

Néanmoins, si l'utilisation de ces techniques nouvelles de traitement de l'information sur des données réelles a séduit l'industriel, le passage à une exploitation industrielle n'a pu être réalisé dans le cadre de ce travail. Dans cette optique, la formation des pilotes à la méthode MACBETH est un point clé, qu'il faudra aborder grâce à un démonstrateur informatique dont le développement est envisagé.



## Conclusion et perspectives

Pourquoi faut-il aujourd'hui envisager les indicateurs de l'entreprise en tant que système ? Quelle forme un tel système prend-il dans son organisation et son comportement ? Comment peut-il être mis en place dans l'entreprise ? Notre mémoire s'est structuré pour répondre à ces trois questions, une application des propositions avancées conclut ce travail.

Nous avons tout d'abord analysé les conséquences de l'évolution de l'entreprise et de son environnement sur la performance industrielle. De cette analyse, ont émergé les exigences actuelles du pilotage industriel et la nécessité de considérer l'ensemble des indicateurs de l'entreprise comme un système.

Il nous est apparu nécessaire de proposer un modèle qui prenne en compte aussi bien les aspects organisationnels que comportementaux du système d'indicateurs. L'aspect organisationnel est abordé au travers de la définition des indicateurs et l'identification de leurs interactions, ainsi que leur regroupement en systèmes. L'aspect comportemental porte sur la conception, l'exploitation ainsi que la révision des indicateurs.

Plus précisément, nous avons considéré la phase de conception du système, dont le but est de délivrer des expressions de performance pour la génération et le choix d'un plan d'action. Ce but s'inscrit typiquement dans une problématique d'aide au choix multicritère. Afin de rendre opérationnel le modèle systémique proposé, nous avons utilisé une méthodologie multicritère qui intègre décomposition des objectifs, élaboration des expressions de performance et agrégation de ces expressions.

La décomposition des objectifs a fait l'objet d'une approche experte compte tenu de la complexité des relations impliquées. L'élaboration des expressions de performance reprend le modèle élaboré dans des travaux antérieurs du laboratoire sur ce sujet. Partant de la constitution de l'indicateur de performance sous la forme du triplet (variable, objectif, mesure), ce modèle définit l'expression de la performance comme le résultat d'une comparaison de la mesure à l'objectif. Les notions de commensurabilité des expressions de performance et de signifiante de l'opérateur d'agrégation ont conduit à retenir des mécanismes d'élaboration selon des échelles d'intervalle ou de ratio. L'agrégation des expressions de performance a été envisagée au travers de la famille des opérateurs de l'intégrale de Choquet dans sa forme Choquet 2-additive en particulier, à même de traduire les interactions mutuelles entre les indicateurs. MACBETH, méthode d'aide au choix multicritère, a ainsi été adaptée aux spécificités de la conception du système d'indicateurs pour rendre la méthodologie proposée opérationnelle.

Enfin, un cas industriel a permis d'appliquer le modèle de système d'indicateurs à un problème de la Société Fournier relatif à la satisfaction client. La méthodologie de conception a permis de proposer, d'une part, une réponse en définissant complètement l'organisation de systèmes d'indicateurs pressentis critiques pour l'entreprise, d'autre part, un traitement cohérent des expressions de performance.

En résumé, notre contribution tient en deux points principaux :

- d'un point de vue conceptuel, le modèle de système d'indicateurs repose sur la mise en œuvre conjointe de trois étapes fondamentales : la décomposition des objectifs, l'élaboration des expressions de performance et l'agrégation de ces expressions. La conception du système a pour but de délivrer des expressions de performance pour la génération et le choix d'un plan d'action. Son exploitation est considérée pour délivrer des expressions de performance relativement à la mise en œuvre d'un plan d'action et sa révision en fonction des évolutions de son environnement.
- d'un point de vue opérationnel, l'entreprise dispose d'une méthodologie qui lui permet de structurer progressivement le système d'indicateurs. Le pilote peut alors garantir que les indicateurs qu'il met en œuvre sont bien cohérents avec les objectifs globaux de l'entreprise, et dans ces conditions, envisager les conséquences tant locales que globales des actions et plans d'action qu'il génère et met en œuvre.

La première des perspectives d'un tel travail concerne la formalisation des interactions du système d'indicateurs avec son environnement, en particulier les échanges avec le système de pilotage.

Une autre réflexion peut concerner le traitement de l'information dans le système d'indicateurs. L'expression de performance et l'expression de performance agrégée nécessaires à la conception du système d'indicateurs doivent être prolongées par des expressions qui améliorent, lors de son exploitation, la réactivité du pilotage : des expressions tendancielles indiquant l'évolution de la performance, des expressions prédictives projetant la performance sur un horizon particulier.

Une perspective plus opérationnelle est l'utilisation plus large de la méthode MACBETH dans l'entreprise en l'étendant aux phases d'exploitation et révision du système d'indicateurs. En effet, nous ne saurions avoir démontré l'applicabilité de notre modèle et sa méthodologie de mise en œuvre sur une seule application industrielle. Il s'agit pour nous désormais de poursuivre son implantation au sein de la Société Fournier et, au-delà, dans d'autres entreprises manufacturières.

L'application du système d'indicateurs aux nouvelles architectures industrielles et en particulier à la chaîne logistique est une attente très forte des industriels. Les problèmes d'organisation, de conception et de mise en œuvre du système d'indicateurs généralisé à cette problématique, ouvrent de nombreuses perspectives de recherche.

## Références bibliographiques

- [AFGI 92] Association Française de Gestion Industrielle, *Evaluer pour évoluer, les indicateurs de performance au service du pilotage*, ouvrage collectif AFGI, 1992.
- [Agnoux 99] R. Agnoux, H. Chiaramonti, C. Marchand, *Applications EDI sur l'Internet*, Eyrolles, 437 p., 1999.
- [Akao 91] Y. Akao, *HOSHIN KANRI Policy Deployment for Successful TQM*, Productivity Press Inc; 241 p., 1991.
- [Akbari Jokaar 02] R. Akbari Jokaar, L. Dupont, Y. Frein « L'évolution du concept de logistique » *Revue Française de Gestion Industrielle*, Vol. 21 (3), pp. 5-22, 2002
- [AMICE 89] Vol. 1 *Open System Architecture for CIM*, Springer-Verlag, 1989.
- [Anthony 65] R. Anthony, *Planning and Control Systems: A framework for analysis*, Cambridge, Massachussets, Harvard University Press, 1965.
- [Ardoin 86] J.L. Ardoin, D. Michel, J. Schmidt, *Le contrôle de gestion*, Publiunion, 454 p., 1986.
- [Argyris 03] C. Argyris, *Savoir pour agir : Surmonter les obstacles à l'apprentissage organisationnel*, Eyrolles, p. 330, 2003.
- [Ashby 57] W.R. Ashby, *An Introduction to Cybernetics*, Chapman & Hall, London, 1957.
- [Atkinson 97] A.A. Atkinson, J. Waterhouse, R.B. Wells, « Bâtir les nouveaux indicateurs de la performance globale », *L'Expansion Management Review*, pp. 78-87, 1997.
- [Aupetit 99] M. Aupetit, « GPA et RMR, quelle approche retenir ? », *Stratégie Logistique*, N° 18, 1999.
- [Ayers 00] J.B. Ayers, J. Ayers, *Handbook of Supply Chain Management*, APICS Series on Resource management, 400 p., 2000.
- [Azzone 91] G. Azzone, C. Masella, U. Bertele, « Design of performance measures for time based companies », *International Journal of Operations & Production Management* 11 (3), pp. 77-85, 1991.
- [Bana 92] C.A. Bana e Costa, « Structuration, construction et exploitation d'un modèle multicritère d'aide la décision », Thèse de doctorat, Universidade Técnica de Lisboa, 1992.
- [Bana 97] C.A. Bana e Costa, J.C. Vansnick, « Applications of the MACBETH approach in the framework of an additive aggregation model », *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* Vol. 6 (2), pp. 107-114, 1997.
- [Bana 99] C.A. Bana e Costa, L. Ensslin, E.C. Corrêa, J.C. Vansnick, « Decision Support Systems in action: Integrated application in a multicriteria decision aid process », *European Journal of Operational Research*, Vol. 148, pp. 315-335, 1999.
- [Bana 01] C.A. Bana e Costa, F. Nuno da Silva, J.C. Vansnick, « Conflict dissolution in the public sector: a case study », *European Journal of Operational Research*, Vol. 130 (2), pp. 388-401, 2001.
- [Bana 03] C.A. Bana e Costa, J.M. De Corte, J.C. Vansnick, « MACBETH », *London School of Economics, Dpt of Operational Research, Working paper* 03-56, 2003.
- [Barker 95] R.C. Barker, « Financial performance measurement: Not a total solution », *Management Decision*, Vol. 33 (2), pp.31-39, 1995.
- [Beer 84] S. Beer, « The viable system model: Its provenance, development, methodology and pathology », *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 35 (1), pp. 7-25. 1984.
- [Benyoucef 00] L. Benyoucef, « Résolution d'un problème d'ordonnancement dynamique d'un fournisseur dans un mode d'approvisionnement de type livraison synchrone : approches dynamique et statique », Thèse de doctorat en Recherche Opérationnelle, INP Grenoble, novembre 2000.

- [Berchet 00] C. Berchet, « Modélisation pour la simulation d'un système d'aide au pilotage industriel » Thèse de doctorat en Génie Industriel, INP Grenoble, décembre 2000.
- [Berge 73] C. Berge, *Graphes et hypergraphes*, Bordas, 300 p., 1973.
- [Berliner 88] C. Berliner, J. Brimson (coordonnateurs), *Cost management for Today's Advanced Manufacturing. The CAM-1 Conceptual Design*, éditions Harvard Business School Press, 1988.
- [Berrah 97] L. Berrah, « Une approche d'évaluation de la performance industrielle. Modèle d'indicateur et techniques floues pour un pilotage réactif. » Thèse de doctorat en Génie Industriel, INP Grenoble 1997.
- [Berrah 99] L. Berrah, V. Clivillé, A. Haurat, *Rapport d'audit Analyse Conception* effectué pour l'établissement FOURNIER FRERES, 49 p., juillet 1999.
- [Berrah 01] L. Berrah, V. Clivillé, M. Harzallah, A. Haurat, F. Vernadat, *PETRA Un guide méthodologique pour une démarche de réorganisation industrielle*, Rapport d'activités 2001 du LGIPM Université de Metz, 102 p. 2001.
- [Berrah 02a] L. Berrah, F. Vernadat, « Perception et évaluation de la performance dans le pilotage », Chapitre 6, pp. 181-204, dans l'ouvrage *Fondements du pilotage des systèmes de production*, coordonné par P. Pujot, J. P. Kieffer, Hermès, 209 p., 2002.
- [Berrah 02b] L. Berrah, *L'indicateur de performance concepts et applications*, Cepadues, 171 p., 2002.
- [Berrah 02c] L. Berrah, G. Mauris, « The industrial performance aggregation: towards a definition », IEEE Systems, Man and Cybernetics Conference SMC'02, Vol. CD-ROM, Hammamet, Tunisie, 5 p., 2002.
- [Berrah 03] L. Berrah, V. Clivillé, F. Vernadat, « Pilotage d'un processus de réorganisation : problématique de mise en place des indicateurs de performance », 6<sup>ème</sup> Congrès de Génie Industriel, Laval, Canada, octobre 2003.
- [Berrah 04] L. Berrah, G. Mauris, F. B. Vernadat, « Information aggregation in industrial performance measurement: rationales, issues and definitions », *International Journal of Production Research*, à paraître, 2004.
- [Berro 01] A. Berro, Optimisation multi-objectifs et stratégies d'évolution en environnement dynamique, Thèse de doctorat spécialité informatique, Université de Sciences Sociales, Toulouse 1, 12-2001.
- [Bertalanfy 68] L.V. Bertalanfy. *General System Theory Foundations, development, applications*, George Braziller, 1968.
- [Bescos 99] P.L. Bescos, *Dialogues autour de la performance en entreprise : les enjeux*, ouvrage collectif Ecosip, L'Harmattan, 288 p. 1999.
- [Bitton 90] M. Bitton, « ECOGRAI : Méthode de conception et d'implantation de systèmes de mesure de performances pour organisations industrielles », Thèse de Doctorat en Automatique, Université de Bordeaux I, 1990.
- [Binder 91] Z. Binder, « Conduite décentralisée coordonnée d'atelier », Ecole d'été d'automatique de Grenoble, septembre 1991.
- [Bititci 95] U.S. Bititci, « Modelling of performance measurement systems in manufacturing enterprises », *International Journal of Production Economics*, Vol. 42, pp. 137-147, 1995.
- [Bititci 97] U.S. Bititci, « Integrated performance measurement systems: a development guide », *International Journal of Operations Production management*, Vol. 17 (5), pp. 522-534, 1997.
- [Bititci 00] U.S. Bititci, « Dynamics of performance measurement systems », *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 20 (6), pp. 692-704, 2000.
- [Bititci 01] U.S. Bititci, « Strategy management through quantitative modelling of performance measurement systems », *International Journal of Production Economics*, Vol. 69, pp. 137-147, 2001.
- [Bitton 90] M. Bitton, « ECOGRAI : Méthode de conception et d'implantation de systèmes de mesure de performances pour organisations industrielles », Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I 1990
- [Blanchard 79] M. Blanchard, *Comprendre et maîtriser le Grafset*, éditions Capadues, 174 p., 1979.
- [Bond 99] T.C. Bond, « The role of performance measurement in continuous improvement », *International Journal of Operations Production management*, Vol 19 (12), pp. 1318-1334, 1999.
- [Bonnefous 01] C. Bonnefous « Système d'indicateurs pertinents et efficaces », Chapitre 6, pp 121-148, dans l'ouvrage *Indicateurs de performance*, coordonné par C. Bonnefous, A. Courtois, Hermès, 285 p., 2001.

- [Boucly 88] F. Boucly, *Maintenance : les coûts de non efficacité des équipements*, éditions AFNOR Gestion, 1988.
- [Boulding 56] K.E. Boulding, *The Image*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1956.
- [Bouquin 01] H. Bouquin, *Le contrôle de gestion : contrôle de gestion, contrôle d'entreprise*, PUF, 464 p., 5<sup>ème</sup> éd. mise à jour édition, 2001.
- [Bourguignon 95] A. Bourguignon, « Peut-on définir la performance », *Revue Française de comptabilité*, N° 269, Juillet 1995.
- [Bourguignon 01] A. Bourguignon, V. Malleret, H. Norreklit « Balanced scorecard versus French tableau de bord: beyond dispute, a cultural and ideological perspective », *ESSEC Research Center Working Papers*, 01005, 46 p., mars 2001.
- [Bourne 00] M. Bourne, J.F. Mills, M. Wilcox, A.D. Neely, K.W. Platts, « Designing, implementing and updating performance measurement systems », *International Journal of Operations Production management*, Vol. 20 (7), pp. 754-771, 2000.
- [Bouyssou 02] D. Bouyssou, P. Vincke, « Une introduction à la modélisation des préférences », *LAMSADE*, 2002.
- [Bradley 96] P. Bradley, « A Performance Measurement Approach to the Re-engineering of Manufacturing Enterprises », Thèse de doctorat, University College Galloway, 1996.
- [Braesch 89] C. Braesch, « Approche de modélisation du système de production d'une entreprise manufacturière », Thèse de doctorat en Informatique et Automatique, Université de Franche Comté, 1989.
- [Brans 86] J.P. Brans, P. Vincke, B. Mareschal, « How to select and how to rank projects : The PROMETHEE method », *European Journal of Operational Research*, Vol. 44 (1), pp. 1-10, 1986.
- [Bravoco 85] R. Bravoco, S. Yadav, « A methodology to model functional structure of an organisation », *Computers in Industry*, Vol. 6, pp. 345-361, 1985.
- [Brimson 91] J.A. Brimson, *Activity Accounting*, Editions John Wiley and Sons, New York, 214 p., 1991.
- [Brimson 98] J.A. Brimson, J. Antos, *Activity-Based Management: For Service Industries, Government Entities, and Nonprofit Organizations*, John Wiley and Sons, 376 p., 1998.
- [Browne 99] J. Browne, J. Devlin, A. Rolstadas, B. Andersen, « Performance Measurement The ENAPS Approach », disponible sur le site <http://www.ipk.ntnu.no/Personal/Privat/bjorna/Publications/PDF%20Files/PM%20The%20ENAPS%20Way.pdf>.
- [Bruneau 92] J.M. Bruneau, J.F. Pujos, *Le management de la connaissance dans l'entreprise : ressources humaines et systèmes d'information*, éditions d'Organisation, 122 p., 1992.
- [Burdbridge 75] J. Burdbridge, *The introduction of Group Technology*, John Wiley and Sons, 1975.
- [Caverivière 02] P. Caverivière *Le Guide de l'acheteur : Une vision globale de l'achat, les NTIC et le management de la qualité*, Editions Demos, 156 p., 2002.
- [Cérruti 92] O. Cérruti, B. Gattino, *Indicateurs et tableaux de bord*, éditions AFNOR Gestion, 92 p., 1992.
- [Cha 03] Y. Cha, M. Jung, « Satisfaction assessment of multi-objective schedules using neural fuzzy methodology », *International Journal of Production Research*, vol. 41 (8), pp.1831-1849, 2003.
- [Chan 02] L.K. Chan, M.L. Wu, « Quality function deployment: A literature review », *European Journal of Operational Research*, Vol.143 (3), pp. 463-497, 2002.
- [Chandler 77] A.D. Chandler, « The Visible Hand: The Managerial Revolution in American Business », Harvard Univ. Press, 1977.
- [Chauvel 00] A. M. Chauvel, *Méthodes et outils pour résoudre un problème. 45 outils pour améliorer les performances de votre organisation*, éditions d'organisation, 2000
- [Chebeane 1999] H. Chebeane, F. Echalié, « Towards the use of a multi-agents event based design to improve reactivity of production systems », *Computer and Industrial Engineering*, Vol. 37, pp.3-9, 1999.

- [Chedmail 01] P. Chedmail, B. Maille, E. Ramstein, « État de l'art sur l'accessibilité et l'étude de l'ergonomie en réalité virtuelle: Accessibility and ergonomics study with virtual reality, a state of the art », *Mécanique & Industries*, Vol. 3 (2), pp. 147-152, 2002.
- [Chen 97] D. Chen, B. Vallespir, G. Doumeingts, « GRAI integrated methodology and its mapping onto generic enterprise reference architecture and methodology », *Computers in Industry*, Volume 33 (2-3), pp. 387-394, 1997.
- [Chen 04] I.J. Chen, A. Paulraj, « Towards a theory of supply chain management: the constructs and measurements », *Journal of Operations Management*, Vol. 22, pp. 119-150, 2004.
- [Clivillé 00] V. Clivillé, L. Berrah, A. Haurat, C. Farat, « What are the countours of a Performance Indicators System State of the art and prospects », *Proceedings of the Annual Conference of ICIMS-NOE ASI'2000*, Bordeaux, France, pp. 121-127, 18 – 20 septembre, 2000.
- [Clivillé 01a] V. Clivillé, L. Berrah, G. Mauris, A. Haurat, « Using Performance Indicators systems in an industrial improvement approach », 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Engineering Design and Automation (EDA 01), Vol. CD-ROM, 6p., Las Vegas, USA, 2001.
- [Clivillé 01b] V. Clivillé, L. Berrah, A. Haurat, « La problématique de la décomposition des objectifs dans le cadre d'une Démarche d'Amélioration Industrielle », 5<sup>ème</sup> Congrès de Génie Industriel, Aix –Marseille, juin 2001.
- [Clivillé 03a] V. Clivillé, L. Berrah, G. Mauris, A.Haurat, « A systemic view of performance indicators », 31<sup>th</sup> Int. Conf. on Computers and Industrial Engineering (ICCIE'03), actes sur CD-ROM, 6 p. San Francisco, février 2003.
- [Clivillé 03b] V. Clivillé, L. Berrah, A. Haurat, « Indicateurs pour l'amélioration de la performance », Chapitre 8, pp. 177-191, dans l'ouvrage collectif coordonné par C. Tahon, *Evaluation des performances des systèmes de production*, Hermès, 304 p., 2003.
- [Clivillé 04a] V. Clivillé, L. Berrah, G. Mauris, A.Haurat, « Comment prendre en compte les interactions entre indicateurs dans l'agrégation de performance », 5<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, Modélisation et simulation pour l'analyse et l'optimisation des Systèmes Industriels et Logistiques, Ecole des Mines de Nantes, France, pp. 711-718, 1-3 Septembre 2004.
- [Clivillé 04b] V. Clivillé, L. Berrah, G. Mauris, « Information fusion in industrial performance measurement: a 2-additive Choquet-integral based approach », IEEE SMC, International Conference on Systems, Man and Cybernetics, The Hague, Actes sur CR ROM, Pays-Bas, 10-13 octobre 2004.
- [Cook 92] W.D. Cook, M. Kress, *Ordinal Information and Preferences Structures: Decision Models and Applications*, Prentice-Hall, 1992.
- [Cooper 88] R. Cooper, R.H. Kaplan, « Measure costs right – make the right decision », *Harvard Business Review*, Vol. 66 (5), pp.106-111, 1988.
- [Cotonnec 01] G. Cotonnec, P.M. Gallois, « Des indicateurs stratégiques au management de terrain », Chapitre 4, pp. 65-100, dans l'ouvrage *Indicateurs de performance*, coordonné par C. Bonnefous, A. Courtois, Hermès, 285 p., 2001.
- [Coudurier 82] J.F. Coudurier, « Robustesse de la commande décentralisée coordonnée (CODECO) », Thèse de doctorat, INP Grenoble, novembre 82.
- [CPC 97] *De la pierre à la cathédrale, les indicateurs de performance*, ouvrage collectif Club Production et Compétitivité, Londez Conseil, 262 p., 1997.
- [Crawford 90] K.M. Crawford, J.F. Cox, « Designing performance measurement systems for just in time operations », *International Journal of Production Research*, Vol. 28 (11), pp. 2025-2036, 1990.
- [Cross 88-89] K.F. Cross, R.L. Lynch, « The SMART way to define and sustain success », *National Productivity Review*, Vol. 8 (1), pp. 23-33, 1988-1989.
- [Delafollie 91] G. Delafollie, *Analyse de la valeur*, Hachette Technique, 224 p., 1991.
- [De Larminat 93] P. De Larminat, *Automatique, commandes des systèmes linéaires*, Hermès, 334p., 1993.
- [Deming 82] Deming E.W., *Quality, Productivity and Competitive Position*, The MIT Press, 1982.
- [De Rosnay 75] J. De Rosnay, *Le Macroscopie vers une vision globale*, Seuil, 1975.

- [De Rosnay 95] J. De Rosnay, *L'homme symbiotique, regards sur le troisième millénaire*, Seuil, 1995
- [Desouza 03] K. Desouza, R. Evaristo, « Global Knowledge Management Strategies », *European Management Journal*, Vol.21 (1), pp. 62-67, 2003
- [De Toni 97] A. De Toni, G. Nassimbeni, S. Tonchia, « An integrated production performance measurement system », *Industrial Management and Data Systems*, Vol. 97 (5), pp. 180-186. 1997.
- [Di Mascolo 00] M. Di Mascolo, C. Duri, Y. Frein, « Comparison between three Pull Control Policies : Kanban, Base Stock, and Generalized Kanban », *Annals of Operations Research*, Vol. 93, pp 41-69, 2000.
- [Dindeleux 92] E. Dindeleux, « Proposition d'un modèle et d'un système interactif d'aide à la décision pour la conduite d'atelier », Thèse de doctorat en Automatique / Productique, Université de Valenciennes, 1992.
- [Dixon 90] J.R. Dixon, A.J. Nanni, T.E. Volmann, *The New Performance Challenge: Measuring Operations for World Class Competition*, Dow Jones-Irwin, Homewood IL, 1990.
- [Dou 95] H. Dou, *Veille technologique et compétitivité*, Dunod, 234 p., 1995.
- [Doumeingts 83] G. Doumeingts, D. Breuil, L. Pun, *La gestion de production assistée par ordinateur*, Hermès, 1983.
- [Doumeingts 84] G. Doumeingts, « Méthode GRAI – Méthode de conception et d'implantation des systèmes en productique », Thèse d'état, Université de Bordeaux I, novembre 84.
- [Doumeingts 87] G. Doumeingts, B. Vallespir, D. Darricau, M. Roboam, « Design Methodology for Advanced Manufacturing Systems », *Computers in Industry*, Vol. 9 (4), pp. 271-295, 1987.
- [Doumeingts 90] G. Doumeingts, « Modelling Techniques for CIM », FAMOS Summer Course, 1990, cité dans [Ducq 99].
- [Doumeingts 98] G. Doumeingts, B. Vallespir, D. Chen, « GRAI grid, decisional modelling », dans l'ouvrage, *Handbook on Architecture of Information System*, coordonné par P. Bernus, K. Mertins, G. Schmith, *International Handbook on Information Systems*, Springer, Berlin, 1998.
- [DRDF 97] *Dynamique des Relations entre Donneur d'ordre / Fournisseur : architectures industrielles, pilotage et performance*, programme de recherche Rhône Alpes 1997-1999
- [Dubois 85] D. Dubois, H. Prade, « A review of fuzzy set aggregation connectives », *Information Sciences*, Vol. 36, pp. 85-121, 1985.
- [Dubois 86] D. Dubois, H. Prade, « Weighted minimum and maximum operations in fuzzy set theory », *Information Sciences*, Vol. 39 (2), pp. 205-210, 1986.
- [Ducq 99] Y. Ducq, « Contribution à une méthodologie d'analyse de la cohérence des Systèmes de Production dans le cadre du modèle GRAI », Thèse de Doctorat en Productique, Université de Bordeaux I, février 1999.
- [Ducq 01] Y. Ducq, B. Vallespir, G. Doumeingts, « Coherence analysis methods for production systems by performance aggregation », *International Journal of Production Economics*, Vol. 69 (1), pp. 239-252, 2001.
- [Ducq 03] Y. Ducq, M. H. Gentil, « Conception et implantation de systèmes d'indicateurs de performance », Chapitre 7, pp. 143-175, dans l'ouvrage collectif, *Evaluation des performances des systèmes de production*, coordonné par C. Tahon, Editions Hermès, pp. 143-175, 2003.
- [Dupas 03] R. Dupas, D. Fournaux, G. Goncalves, « Utilisation de plans d'expériences pour l'évaluation de la performance en simulation », Chapitre 9, pp. 193-212, dans l'ouvrage collectif, *Evaluation des performances des systèmes de production*, coordonné par C. Tahon, Editions Hermès, pp. 193-212, 2003.
- [Dupont 98] L. Dupont, *La gestion industrielle*, Hermès, 414 p., 1998.
- [Dyer 90] J.S. Dyer, « Remarks on the analytic hierarchy process », *Management Sciences*, Vol. 36 (3), pp. 249-258, 1990.
- [Eden 88] C. Eden, « Cognitive Mapping », *European Journal of Operational Research*, Vol. 36, pp. 1-13, 1988.
- [Elmahmedi 97] A. Elmahmedi, C. Lerch, S. Marier, M. Sonntag, F. Vernadat, « ACNOS : Intégration des activités non structurées dans la modélisation des systèmes de production », Rapport final, ENSAIS, Strasbourg, 18 février 1997.

- [Ensslin 96] L. Ensslin, G. Montibeller Neto, S.M. Noronha, T.S. Souza, « A model to employability evaluation at the developing countries », 5<sup>th</sup> International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing: Agility & Hybrid Automation, Hawaii, août, 1996.
- [Eppink 78] D.J. Eppink, « Planning for strategic flexibility », Vol. 11, Long Range planning, 1978, cité dans [Berrah 97].
- [Epstein 98] M. Epstein, J.F. Mansoni, « Implementing Corporate Strategy: From Tableaux de Bord to Balanced Scorecards », European Management Journal, Vol. 16 (1), pp. 190-203, 1998.
- [EQA 03] The European Quality Award, disponible : [http://www.efqm.org/model\\_awards/eqa/intro.html](http://www.efqm.org/model_awards/eqa/intro.html) , accédé le 25/04/2003.
- [EU 99] Science des Systèmes, Encyclopédie Universalis, CD-ROM, 19 pages, édition 1999.
- [Eveaere 97] C. Eveaere, « Management de la flexibilité », Economica, 203p., 1997.
- [Eymery 97] P. Eymery, *La logistique de l'entreprise*, Hermès, 216 p., 1997.
- [Farat 03] C. Farat, V. Clivillé, L. Berrah, « Mise en place du système d'indicateurs relatif ay plan Qualité Environnement 2003 », Actes de la 23<sup>ème</sup> journée régionale de la productique, Ambérieu en Bugey, 21 mai 2003.
- [Fargette 85] F. Fargette, *Données de base pour bases de données*, Eyrolles, 188 p., 1985.
- [Finkelstein 75] L. Finkelstein, « Fundamental concepts of measurement: definitions and scales », Measurement and Control, 8, pp. 215-223, 1975.
- [Fischer 92] J. Fischer, « Use of non financial performance measures », Journal of Cost Management, Vol. 6 (2), pp. 31-38, 1992.
- [Fitzgerald 91] L. Fitzgerald, R. Johnston, S. Brignall, R. Silvestro, C. Voss, *Performance Measurement in Service Business*, CIMA. London, 1991.
- [François 97] C. François, *International Encyclopedia of Systems & Cybernetics*, disponible sur le site : <http://www.iigss.net/gPICT.pdf>
- [Froment 84] B. Froment, J. L. Lesage, *Productique, les techniques de l'usinage flexible*, Dunod, 140 p., 1984.
- [Fortuin 88] L. Fortuin, « Performance indicators - why, where and how? », European Journal of Operational Research, Vol. 34, pp. 1-9, 1988.
- [Gallois 00] P.M. Gallois, « Compétitivité et maîtrise du temps ou l'art du pilotage industriel », Revue Française de Gestion Industrielle, Vol. 19, pp. 5-34, 2000.
- [Garibaldi 01] G. Garibaldi, *L'analyse stratégique, comment concevoir les choix stratégiques en situation concurrentielle*, éditions d'Organisation, 438 p., 2001.
- [GDT 04] Grand dictionnaire terminologique, Office québécois de la langue française, disponible : [http://granddictionnaire.com/btml/fra/r\\_motclef/index1024\\_1.asp](http://granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index1024_1.asp) , accédé le 17/01/04
- [Gervais 94] Gervais, *Contrôle de gestion*, Economica, 660 p. 1994.
- [Ghalayini 96] A. M. Ghalayini, « The changing basis of performance measurement » International Journal of Operations & Production Management, Vol. 16 (8), pp. 63-80, 1996.
- [Ghalayini 97] A. M. Ghalayini, J.S. Noble, T.J. Crowe, « An integrated dynamic performance measurement system for improving manufacturing competitiveness », International Journal of Operations & Production Management, Vol. 15, pp. 80-116, 1997.
- [Geneste 95] L. Geneste, « Outils d'aide à la décision pour le pilotage d'atelier », Thèse de doctorat, en Informatique Industrielle, Université Paul Sabatier TOULOUSE, janvier 95.
- [Geneste 03] L. Geneste, B. Grabot, A. Letouzey « Scheduling uncertain orders in the customer-subcontractor context », European Journal of Operational Research, Volume 147 (2), pp. 297-311, 2003.
- [Giard 03] V. Giard, *Gestion de production*, Collection Gestion, Economica, 1229 p., 2003.
- [Globerson 85] S. Globerson, « Issues in developing a performance criteria system for an organisation », International of production research, Vol. 23 (4), pp. 639-646, 1985.

- [Goldratt 86] E. Goldratt, J. Fox, *Le but, l'excellence en production*, éditions AFNOR, 238 p. 1986.
- [Gomez 01] T. Gomez, M. Gonzalez, M. Luque, « Multiple objectives decomposition-coordination methods for hierarchical organizations », *European Journal of Operational Research*, Vol. 133, pp. 323-341, 2001.
- [Grabisch 95] M. Grabisch, « The application of fuzzy integrals in multicriteria decision making », *European Journal of Operational Research*, Vol. 89 (3), pp. 445-456, 1996
- [Grabisch 03a] M. Grabisch, P. Perny, « Agrégation multicritère » dans l'ouvrage collectif *Logique floue, principes, aide à la décision*, Chapitre 3, pp. 81-120, coordonné par B. Bouchon-Meunier, C. Marsala, Hermès, 252 p., 2003.
- [Grabisch 03b] M. Grabisch, Ch. Labreuche, J.C. Vansnick, « On the extension of Pseudo-Boolean Functions of Interacting Bipolar Criteria », *European Journal of Operational Research*, Vol. 148, pp. 28-47, 2003.
- [Grabisch 04] M. Grabisch, « Evaluation subjective » dans l'ouvrage collectif *Concepts et Méthodes pour l'Aide à la Décision*, Hermès, à paraître en 2004.
- [Grobot 96] B. Grabet, J.C. Blanc, C. Binda, « A decision support system for production activity control », *Decision Support Systems*, Vol. 16, pp. 87-101, 1996.
- [Grobot 98] B. Grabet, « Objective satisfaction assessment using neural nets for balancing multiple objectives », Vol. 36 (6), pp. 2377-2395, 1998.
- [Greif 98] M. Greif, *L'usine s'affiche*, éditions d'Organisation, 301 p., 1998.
- [Guennou 01] P. Guennou, « Maîtrise de la performance : mes travaux de l'AFGI », Chapitre 7, pp 149-173, dans l'ouvrage *Indicateurs de performance*, coordonné par C. Bonnefous, A. Courtois, Hermès, 285 p., 2001.
- [Gunasekarana 04] A. Gunasekarana, C. Patelb, R.E. McGaughey « A framework for supply chain performance measurement », *International Journal of Production Economics*, Vol. 87, pp. 333-347, 2004.
- [Harbi 01] S. Harbi, « Le pilotage des partenariats Donneurs d'ordres / Fournisseurs : une approche exploratoire et conceptuelle », Thèse de doctorat en Génie Industriel, INP Grenoble, 2001.
- [Hatchuel 96] A. Hatchuel, « Les axiomatiques de la production : éléments pour comprendre les mutations industrielles », Chapitre 2, pp. 15-33 dans *La performance économique en entreprise*, coordonné par J.H Jacot, J. P. Micaelli, Hermès, 222 p., 1996.
- [Hamilton 02] S. Hamilton, *Maximizing Your ERP System: A Practical Guide for Managers* McGraw-Hill, 350 p., 2002.
- [Hammer 93] M. Hammer, J. Champy, *Le reengineering Réinventer l'entreprise pour une amélioration spectaculaire de ses performances*, Dunod, version française, 247 p., 1993.
- [Harzallah 00] M. Harzallah, « Modélisation des aspects organisationnels et des compétences pour la réorganisation d'entreprises industrielles », Thèse de doctorat en Génie Industriel, Université de Metz, 2000.
- [Harrington 90] J. Harrington, *Le coût de la non qualité*, Eyrolles, 172 p., 1990.
- [Hétreux 96] G. Hétreux, « Modélisation pour la simulation d'un système d'aide au pilotage industriel », Thèse de doctorat en Automatique /Informatique Industrielle, INSA Toulouse, 1996.
- [Heyligen 02] F. Heyligen, C. Joslyn, J. Bollen, *Principia Cybernetica*, web encyclopédie sur la systémique, 2002, <http://pespmc1.vub.ac.be/>, consulté le 16 octobre 2003.
- [Hronec 95] S.M. Hronec, *Vital Signs : des indicateurs – coût, qualité, délais – pour optimiser la performance de l'entreprise*, éditions d'Organisation, 255 p., 1995.
- [Humphrey 88] W.S. Humphrey, « Characterising the software process: a maturity framework », *IEEE Software Engineering*, pp. 73-79, mars 1988.
- [Hutchins 89] D. Hutchins, *Le juste à temps* ; éditions AFNOR Gestion, 203 p., 1989.
- [Imai 92] M. Imai, *Kaizen, La clé de la compétitivité japonaise*, Eyrolles, 248 p., 1992.
- [Iribarne 03] P. Iribarne, *Les tableaux de bord de la performance*, Dunod, 239 p., 2003.
- [ISO 9000 00] *Qualité et systèmes de management ISO 9000*, éditions AFNOR, 581 p., 2001.

- [Jacob 95] G. Jacob, *La refonte des systèmes d'information*, Hermès, Série Informatique et organisation, 128 p., 1995.
- [Jacot 96] J.H. Jacot, J.P. Micaelli « La question de la performance globale », Chapitre 1, pp. 15–33, dans *La performance économique en entreprise*, coordonné par J.H. Jacot, J.P. Micaelli, Hermès, 222 p., 1996.
- [Johnson 75] H.T. Johnson, « Management accounting in early integrated industry – E.I. Dupont de Nemours Powder Company 1903-1912 », *Business History Review*, pp. 184-204, été 1975, cité dans [Neely 95].
- [Jonsson 99] P. Jonsson, M. Lesshammar, « Evaluation and improvement of manufacturing performance measurement systems - the role of OEE », *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 19 (1), pp. 55-78, 1999.
- [Kaplan 83] R.S. Kaplan, « Measuring manufacturing performance: a new challenge for managerial accounting research », *Accounting Revue*, Vol. 58 (4), pp. 686-705, 1983.
- [Kaplan 87] R.S. Kaplan, D.P. Norton, *Relevance lost: The rise and fall of management accounting*, Harvard Business School Press, Boston, 1987.
- [Kaplan 92] R.S. Kaplan, D.P. Norton, « The Balanced Scorecard: Measures that drives performance », *Harvard Business Review*, January-February, 1992.
- [Kaplan 98] R.S. Kaplan, D.P. Norton, *Le tableau de bord prospectif. Pilotage stratégique : les 4 axes du succès*, éditions d'organisation, 311 p, 1998.
- [Keegan 89] D.P. Keegan, R.G. Eiler, C.R. Jones, « Are your performance measures obsolete », *Management Accounting*, pp. 45-50, juin 1989.
- [Khoshafian 98] S. Khoshafian, M. Buckiewicz, *Groupware et workflow*, Dunod, 297 p. 1998.
- [Kranz 71] D.H. Kranz, R.D. Luce, P. Suppes, A. Tversky, *Foundations of measurement*, Vol. 1 : Additive and Polynomial Representations, Academic Press, cité dans [Grabisch 04].
- [Kueng 99] P. Kueng, A.J. Krahn, « Building a Process Performance Measurement System: Some Early Experiences », *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 58, pp. 149-159, 1999.
- [Kueng 00] P. Kueng, « Process performance measurement system: a tool to support process-based organizations », *Total Quality Management*, Vol. 11 (1), pp. 67-85, 2000.
- [Kueng 01] P. Kueng, A. Meier, T. Wettstein, « Performance Measurement Systems must be engineered », *Communication of the Association for Information Systems*, Vol. 7 (3), pp. 1-17, 2001.
- [Kusiak 93] A. Kusiak, *Concurrent engineering: automation, tools and techniques*, Wiley Inter Science, 1993.
- [Labreuche 03] C. Labreuche and M. Grabisch. « The Choquet integral for the aggregation of interval scales in multi-criteria decision making », *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 137 (1), pp. 11-26, 2003.
- [Lebas 95] M.J. Lebas, « Performance measurement and performance management », *International Journal of Production Economics*, Vol. 41, pp. 23-35, 1995.
- [Le Clainche 01] J.F. Le Clainche, « Balancing Scorecard et autres méthodes pour évaluer le score d'une entreprise », Chapitre 12, pp. 257-281, dans l'ouvrage *Indicateurs de performance*, coordonné par C. Bonnefous, A. Courtois, Hermès, 285 p., 2001.
- [Lee 93] H.L. Lee, C. Billington, « *Material management in decentralized supply chains* », *Operations Research*, Vol. 41, pp. 835-847, 1993.
- [Le Moigne 73] J.L. Le Moigne, *Les Systèmes d'Information dans les Organisations*, PUF, 1973.
- [Le Moigne 77] J.L. Le Moigne, *La théorie du système général, Théorie de la Modélisation*, P.U.F., 1977.
- [Le Moigne 90] J.L. Le Moigne, *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod, 178 p., 1990.
- [Lequeux 02] J.L. Lequeux, *Manager avec les ERP*, éditions d'Organisation, 344 p., 2002.
- [Lorino 91] P. Lorino, *Le contrôle de gestion stratégique : la gestion par les activités*, Dunod, 213 p., 1991.
- [Lorino 01a] P. Lorino, « Les indicateurs de performance dans le pilotage de l'entreprise », Chapitre 3, pp. 49-64, dans l'ouvrage *Indicateurs de performance*, coordonné par C. Bonnefous, A. Courtois, Hermès, 285 p., 2001.

- [Lorino 01b] P. Lorino, « La performance et ses indicateurs Eléments de définition », Chapitre 1, pp 24-28, dans l'ouvrage *Indicateurs de performance*, coordonné par C. Bonnefous, A. Courtois, Hermès, 285 p., 2001.
- [Lorino 03] P. Lorino, *Méthodes et pratiques de la performance*, éditions d'Organisation, 536 p., 2003.
- [Lussato 74] B. Lussato, B. France-Lanord, J.P. Bouhot, *La micro informatique : introduction aux systèmes répartis*, éditions d'Informatique, 1974.
- [Mackenzie 80] C.E. Mackenzie, *Coded Character Sets, History and Development*, Addison-Wesley, 1980.
- [Maire 91] J.L. Maire, « Olympios : un modèle de conception du système d'information d'une entreprise manufacturière – Application à l'audit », Thèse de doctorat en Informatique, Université de Savoie, 1991.
- [Malone 94] T.W. Malone, K. Crowston, « The interdisciplinary Study of Coordination », *ACM Computing Surveys*, Vol. 26 (1), pp. 87-119, 1994.
- [Malone 99] T.W. Malone & al., « Tools for Inventing Organizations: Toward a Handbook of a Organizational Process », *Management Science*, Vol. 45 (3), pp. 425-443, 1999.
- [Marichal 99] J.L. Marichal, « Agrégation de critères interactifs au moyen de l'intégrale de Choquet discrète », LFA 99, Rencontres francophones sur la logique floue et ses applications, Valenciennes, 11 p., octobre 99.
- [Marichal 04] J.L. Marichal, « Fonctions d'agrégation pour la décision » dans l'ouvrage collectif *Concepts et Méthodes pour l'Aide à la Décision*, Hermès, à paraître en 2004.
- [Marmuse 97] C. Marmuse. « Performance », dans *Encyclopédie de Gestion*, coordonnateurs Y. Simon, P. Joffre, Economica, pp. 2194-2208, 1997.
- [Martin 96] A. Martin, *Distribution Resource Planing. DRP le moteur de l'ECR*, éditions ASLOG, 1996.
- [Massotte 00] P. Massotte, R. Bataille, « Future production systems: Influence of self-organization on approaches to quality engineering », *International Journal of Production Economics*, Volume 64 (1), pp 359-377, 2000.
- [Maskell 91] B.H. Maskell, *Performance Measurement for World Class Manufacturing*, Productivity Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.
- [Mayer 95] R.J. Mayer, C.P. Menzel, M.K. Painter, P.D. deWitte, T. Blinn, B. Perakath, « Information Integration for Concurrent Engineering IDEF3 Process Description Capture Method Report », Knowledge Based, Systems Inc., 1995.
- [MBNQA 03] Malcolm Baldrige National Quality Award Criteria 03, disponible : <http://www.quality.nist.gov/>, accédé le 24 04 2003.
- [Mélèse 90] J. Mélèse, *Approches systémiques des organisations*, éditions d'Organisation, 157 p., 1990.
- [Mélèse 91] J. Mélèse, *L'analyse modulaire des systèmes AMS*, éditions d'Organisation, 1991.
- [Melnick 87] S.A. Melnick, P.L. Carter, « Production Activity Control », *The business ONE*, Irwib/APICS Series in Production Management, Richard D. Irwin Inc., 1987.
- [Merle 93] C. Merle, F. Clave, J. Samenyare, « L'optimisation du pilotage de la performance, application au secteur aéronautique », *Comptabilité et Nouvelles Technologies*, pp. 201-217, mai 1993.
- [Mesarovic 80] M.D. Mesarovic, D. Macko, Y. Takahara, *Théorie des systèmes hiérarchiques à niveaux multiples*, Economica, 303 p., 1980.
- [Mévellec 96] P. Mévellec, « La comptabilité à base d'activités : principes et mise en œuvre », Chapitre 6 & 7, pp. 93-123 dans l'ouvrage *La performance économique en entreprise*, coordonné par H. Jacot, J.P. Micaelli, Hermès, 222 p., 1996.
- [Millet 00] I. Millet, T.L. Saaty, « On the relativity of relative measures - accomodating both rank preservation and rank reversals in th AHP », *European Journal of Operational Research*, Vol. 121 (1), pp. 205-212, 2000.
- [Mintzberg 82] H. Mintzberg, *Structure et dynamique des organisations*, éditions d'Organisation, 434 p. 1982.
- [Mintzberg 96] H. Mintzberg, J.B. Quinn, *The Strategy Process: Concepts, Contexts, Cases*, Prentice Hall, 999 p., 1996.

- [Molleman 01] E. Molleman, M. Broekhuis, « Sociotechnical systems: towards an organizational learning approach », *Journal of Engineering and Technology Management*, Volume 18 (3-4), pp. 271-294, 2001.
- [Monatéri 01] J. Ch. Monatéri, « L'économie des relations industrielles », Chapitre 2 pp. 45-92, dans l'ouvrage *Maitrise et organisation des flux industriels*, par J. P. Campagne, P. Burlat, Hermès, 162 p., 2001.
- [Monteil 85] B. Monteil, M. Périgord, G. Raveleau, *Les outils des cercles et l'amélioration de la qualité*, éditions d'Organisation, 1985.
- [Monteiro 01] T. Monteiro, « Conduite distribuée d'une coopération inter entreprises le cas de la relation donneurs d'ordres – fournisseurs », Thèse de Doctorat en Génie Industriel, INP Grenoble, octobre 2001.
- [Morin 77] E. Morin, *La méthode* Tome 1, *La nature de la nature*, Seuil, 1977.
- [Morton 95] M.S. Morton, *L'entreprise compétitive au future Technologies de l'information et transformation de l'organisation*, éditions d'Organisation, 349 p., 1995.
- [Nakajima 86] S. Nakajima, *La maintenance productive totale : TPM, nouvelle vague de la production industrielle*, AFNOR, 1986.
- [Najar 94] L. Najar, « Mesure et pilotage technico-économiques des performances en industrie : analyse critique d'approches méthodologiques », Thèse de doctorat en Ingénierie de Gestion, ENS Mines de Paris, 1994.
- [Neely 95] A. Neely, M. Gregory, K. Platts, « Performance measurement system design A literature review and research agenda », *International Journal of Production Economics*, Vol. 48, pp. 23-37, 1995.
- [Neely 96a] A. Neely, J. Mills, K. Platts, M. Gregory, H. Richards, « Performance measurement system design: Should process based approaches be adopted? », *International Journal of Production Economics*, Vol. 46-47, pp. 423-431, 1996.
- [Neely 96b] A. Neely, J. Mills, M. Gregory, H. Richards, K. Platts, M. Bourne, *Getting the Measure Your Business*, Findlay publications, Horton Kirby, 1996.
- [Neely 99] A. Neely, « The performance measurement revolution: why now and what next? », *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 19 (2), pp. 205-228, 1999.
- [Neely 00] M. Bourne, J. Mills, M. Wilcox, A. Neely, K. Platts, « Designing, implementing and updating performance measurement systems », *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 20 (7), pp. 754-771, 2000.
- [Noble 94] J.S. Noble, C.W. Lahay, « Cycle time modeling for process improvement teams », *Proceedings, 3<sup>rd</sup> Industrial Engineering Research Conference*, Atlanta, GA, pp. 372-377, 1994, cité dans [Ghalayini 96].
- [Ohno 88] T. Ohno, *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*, Productivity Press, 163 p., 1988.
- [Orlicky 75] J. Orlicky, *Material Requirement Planning*, Mac Graw & Hill, 1975.
- [Parsei 93] H.R. Parsei, W.G. Sullivan (coordonateurs), *Concurrent Engineering : contemporary issues and inventory management*, Chapman & Hall, Londres, 1993, cité dans [Vernadat 96].
- [Peaucelle 00] J.L. Peaucelle, « La performance en coûts et en délais : théorie des files d'attente et BPR », *Revue Française de Gestion Industrielle*, Vol. XIX (4), pp. 71-96, 2000.
- [Pierreval 90] H. Pierreval, *Les Méthodes d'analyse et de conception des systèmes de production*, Hermès, 62 p., 1990.
- [Platts 98] K.W. Platts, J.F. Mills, A.D. Neely, A.H. Richards, M.J. Gregory, « Testing manufacturing strategy formulation processes », *International Journal of Production Economics*, Vol. 56-57, pp. 517-523, 1998.
- [Plossl 67] W.G. Plossl, O. Wight, *Production and Inventory Control Principles and Techniques*, Prentice Hall, 1967.
- [Pomerol 93] J.C. Pomerol, S.R. Barba-Romero, *Choix multicritère dans l'entreprise, principe et pratique*, Hermès, 391 p., 1993.
- [Porter 86] M.E. Porter, *Choix stratégique et concurrence*, Economica, 1986.

- [Porto 99] J.L. Porto, « Analyse multicritère dans le cadre des appels d'offres pour la construction de travaux publics et privés : le cas du métro de Porto au Portugal », *Newsletter* du Journal du European Working Group « Multicriteria aid for Decisions », 15 :1-2 1999.
- [Pouget 98] M. Pouget, *Taylor et le Taylorisme*, Que sais-je ?, PUF, 1998.
- [Pujo 02] P. Pujo, J.P. Kieffer, « Concepts fondamentaux du pilotage des systèmes de production », Chapitre 1, pp. 25-49, dans l'ouvrage collectif *Fondements du pilotage des systèmes de production*, coordonné par P. Pujo, J. P. Kieffer, Hermès, 209 p., 2002.
- [Randoing 95] J.M. Randoing, *Les SGDT*, Hermès, 272 p., 1995.
- [Rangone 96] A. Rangone. « An analytical hierarchy process framework for comparing the overall performance of manufacturing departments », *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 16 (8), pp. 104-119, 1996.
- [Raviard 99] D. Raviard, C. Tahon, « Comment piloter la performance », Chapitre 2 pp. 57-88, dans l'ouvrage collectif ECOSIP *Dialogues autour de la performance en entreprise*, L'harmattan, , 1999.
- [Ravignon 03] L. Ravignon, P. Bescos, M. Joalland, S. Le Bourgeois, A. Maléjac, *Méthode ABC/ABM*, éditions d'Organisation, 324 p., 2003.
- [Reix 02] M. Reix, *Systèmes d'information et management des organisations*, éditions d'Organisation, 443 p., 2002.
- [Ross 77] D. T. Ross, « Structured Analysis (SA): a language for communication ideas », *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. 3, pp. 16-64, 1977, cité dans [Monteiro 01].
- [Rota 98] K. Rota, « Coordination temporelle de centres gérant de façon autonome des ressources. Application aux chaînes logistiques intégrées en aéronautique », Thèse de doctorat, ENSAT, Toulouse, 1998.
- [Roubens 82] M. Roubens, « Preference relations on actions and criteria in multicriteria decision making », *European Journal of Operational Research*, Vol. 10, pp. 51-55, 1982.
- [Roy 74] B. Roy, « Management scientifique et aide à la décision », Direction Scientifique de la SEMA, rapport n° 86, Paris, 1974, cité dans [Pomerol 93].
- [Roy 85] B. Roy, *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*, Economica, 1985.
- [Roy 98] D. Roy, « Une architecture hiérarchisée multi-agents pour le pilotage réactif d'ateliers de production », Thèse de doctorat, Université de Metz, janvier 1998.
- [Sarkis 00] J. Sarkis, « A comparative analysis of DEA as a discrete alternative multiple criteria decision tool », *European Journal of Operational Research*, Vol. 123, pp. 543-557, 2000.
- [Sarkis 02] J. Sarkis, « A methodology for monitoring system performance », *International Journal of Production Research*, Vol. 40 (7), pp. 1567-1582, 2002.
- [Saaty 77] T.L. Saaty, « A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures », *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15, pp. 234-281, 1977.
- [Saaty 80] T.L. Saaty, « The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation », McGraw-Hill, USA, 1980.
- [Saaty 84] T.L. Saaty, *Décider face à la complexité*, Entreprise Moderne d'Édition, 231 p., 1984.
- [Sadfi 02] C. Sadfi, « Problèmes d'ordonnancement avec minimisation des encours », Thèse de doctorat en Génie Industriel, INP Grenoble, 2002.
- [Savall 89] H. Savall, V. Zardet, *Maîtriser les coûts et les performances cachés*, Eyrolles, 351 p., 1989.
- [Savall 92] H. Savall, V. Zardet, *Le nouveau contrôle de gestion – méthode des coût et performances cachés*, Eyrolles, 399 p., 1992.
- [Schenkerman 94] S. Schenkerman, « Avoiding rank reversal in AHP decision-support model », *European Journal of Operational Research*, Vol. 74, pp. 407-41, 1994.
- [Schneidermann 88] A. M. Schneidermann, « Setting quality goals », *Quality Progress*, Vol. 21, pp. 51-75 avril 1988.
- [SCC 03] Site web : [www.supply-chain.org/slides/SCOR5.0OverviewBooklet.pdf](http://www.supply-chain.org/slides/SCOR5.0OverviewBooklet.pdf)

- [Selmer 02] C. Selmer, *Concevoir le tableau de bord : Outils de contrôle, de pilotage et d'aide à la décision*, Dunod, 304 p., 2002.
- [Shingo 85] S. Shingo, *A Revolution in Manufacturing : The SMED System*, Productivity Press Inc, 360 p. 1985.
- [Simon 69] H. Simon, *The Sciences of the Artificial*, The MIT Press, 1969.
- [Simon 77] H. Simon, *The new science of management decision*, Prentice-Hall, 1977.
- [Simon 82] H. Simon, *Model of Bounded Rationality*, MIT Press, Boston, 1982.
- [SINTEF 92] SINTEF, TOPP: A Productivity Program for Manufacturing Industry, NTNF/NTH, Trondheim, Norvège 1992.
- [Stalk 88] G. Stalk, « Time the next source of competitive advantage », *Harvard Business Review*, Vol. 66, pp. 41-51, juillet-août 1988.
- [Sullivan 86] E. Sullivan, « OPTIM: linking cost, time and quality », *Quality Progress*, pp. 52-55, avril 1986.
- [Sulzer 85] J.R. Sulzer, *Comment construire un tableau de bord : les objectifs et méthodes d'élaboration*, Dunod, 1985.
- [Suppes 63] P. Suppes, J.L. Zinnes, « Basic measurement theory » in Busch Luce Galanter, *Handbook of Mathematical Psychology*, J. Wiley, vol. 1, pp. 1-76, 1963.
- [Suwignjo 00] P. Suwignjo, U. S. Bititci, « Quantitative models for performance measurement system », *International Journal of Production Economics*, Vol. 64, pp. 231-241, 2000.
- [Tahon 01] C. Tahon, D. Trenteseaux, « Aide à la décision en gestion de production », Chapitre 6, pp. 171-218, dans l'ouvrage *Organisation et gestion de production*, coordonné par J. Erschler, B. Grabot, Hermès, 254 p., 2001.
- [Taylor 11] F.W. Taylor, *Principles of scientific management*, 1911.
- [Tardieu 85] H. Tardieu, A. Rochfeld, R. Colletti *La méthode Merise, Tome 1 : principes et outils*, éditions d'Organisation, 1985.
- [Tennant 01] C. Tennant, P. Roberts, « Hoshin Kanri: Implementing the Catchball Process », *Long Range Planning*, Volume 34 (3), pp. 287-308, juin 2001.
- [Ternisien 01] M. Ternisien, A. F. Diguët, *Indicateurs et facteurs de compétitivité des services rendus à l'industrie*, les éditions de l'industrie, 156 p., 2001.
- [Théroude 02] F. Théroude, « Formalisme et système pour la représentation et la mise en œuvre des processus de pilotage des relations entre donneurs d'ordres et fournisseurs », Thèse de doctorat en Génie Industriel, INP Grenoble 2002.
- [Titli 79] A. Titli, *Commande hiérarchisée et optimisation des processus complexes*, Dunod, 1975.
- [Trenteseaux 96] D. Trenteseaux, « Conception d'un système de pilotage distribué, supervisé et multicritère pour les systèmes automatisés de production », Thèse de doctorat en Automatique / Productique, INP Grenoble 1996.
- [Turney 92] P., Turney, « Activity-based costing », ouvrage coordonné par D. Keller, J. Bulloch, R. Shultis, *Management Accountant's Handbook*, 4<sup>th</sup> Edition, J. Wiley, New York. 1992.
- [Tversky 92] A. Tversky, D. Kahnemann, « Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty », *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992.
- [Valet 01] L. Valet, « Un système flou de fusion coopérative : application au traitement d'images naturelles », Thèse de doctorat en Informatique, Université de Savoie, décembre 2001.
- [Van Gigch 91] J.P. Van Gigch, *System Design Modelling and Metamodeling*, Plenum Press, 1991, cité dans [Jacot 96] *La performance économique en entreprise*, éditions Hermès, 1996.
- [Vansnick 84] J. C. Vansnick, « Strength of preference: theoretical and practical aspects », *European Journal of Operational Research*, Ed. Elsevier, pp. 367-381, 1984, cité dans [Pomerol 93].

- [Vansnick 86] J. C. Vansnick, « On the problem of weights in multiple criteria decision making, the non compensatory approach », *European Journal of Operational Research*, Vol. 24, pp. 288-294, 1986.
- [Vernadat 96] F.B. Vernadat, *Enterprise modeling and integration, principles and applications*, Chapman & Hall, 513 p., 1996.
- [Vernadat 99] F. Vernadat, *Techniques de Modélisation en Entreprise. Applications aux processus opérationnels*, Economica, 129p., 1999.
- [Vollman 92] T.E., Vollman, W.L. Berry, and D.C. Whybark, « Manufacturing Planning and Control Systems », Irwin, Boston, 1992.
- [Wagonner 99] D. B. Wagonner, A. D. Neely, M.P. Kennerley, « The forces that shape organizational performance measurement systems: An interdisciplinary review », *International Journal Of Production Economics*, Vol. 60-61, pp. 53-60, 1999.
- [Wiener 48] N. Wiener, *CYBERNETICS: or Control and Communication in the Animal and the Machine*, MIT Press, 1948.
- [Wilenski 83] R. Wilenski, *Planning and understanding: a computational approach to human reasoning*, Addison Wesley Publishing Company, 1983.
- [Williams 94] T.J. Williams, « The Purdue Enterprise Reference Architecture », *Computers in Industry*, Vol. 24 (2-3), pp. 141-158, 1994.
- [Wilson 34] R.H. Wilson. « A Scientific Routine for Stock Control ». *Harvard Business Review*, 13:116-128, 1934.
- [Wiseman 88] C. Wiseman, *Strategic Information Systems*, Homewood, IL: Jones-Irwin, 1988.
- [Wisner 91] J.D. Wisner, S.E. Fawcett, « Link firm strategy to operating decisions through performance measurement », *Production and Inventory Management Journal*, Third Quarter, pp. 5-11, 1991.
- [Within 66] T. Within, G. Hadley, *Etude et pratique des modèles de stocks*, Dunod, 1966.
- [X 60 011 88] *Maintenance industrielle*, Association Française de NORmalisation (AFNOR), 1988.
- [X 50-101 96] *Analyse fonctionnelle – Caractéristiques fondamentales*, Association Française de NORmalisation (AFNOR) mise à jour en 1996.
- [Yager 88] R.R. Yager, « On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making », *IEEE Trans. Systems Man Cybernetics*, Vol. 18, 183-190, 1988.
- [Yager 94] R.R. Yager, D. P. Filev, *Essentials of fuzzy modeling and control*, John Wiley & sons, New York, USA, 1994.
- [Yatchinovski 00] A. Yatchinovski, *L'approche systémique*, ESF, 168 p., 2000.
- [Zeleny 82] M. Zeleny, *Multiple criteria decision making*, McGraw Hill, New York, 1982.



## Annexes

### Annexe du Chapitre II

Cette annexe regroupe une présentation des différents « *Performance Measurement Systems* » passés en revue dans le chapitre II.

#### Annexe II-A : La méthode ECOGRAI (1990) (§ 2.2.1)

La méthode ECOGRAI est intégrée à la méthodologie GIM pour l'implantation et la gestion de l'évolution de systèmes industriels. Elle permet de mettre en place un système d'indicateurs de performance pour évaluer la performance technico-économique du système de production de l'entreprise ou d'une des ses parties [Bitton 90] [Doumeingts 98] [Merle 93]. La modélisation de la structure de pilotage prend la forme d'une matrice hiérarchico-fonctionnelle - la grille GRAI (fig. 1)- qui fait apparaître les centres de décision pour un niveau et une fonction donnés. Chaque unité de production est décomposée en fonctions (ventes, conception, industrialisation...), elles-mêmes détaillées en sous fonctions (*Gérer la qualité, les produits, le planning, les ressources, la maintenance*, pour la fonction *gérer la production*) [Ducq 01].

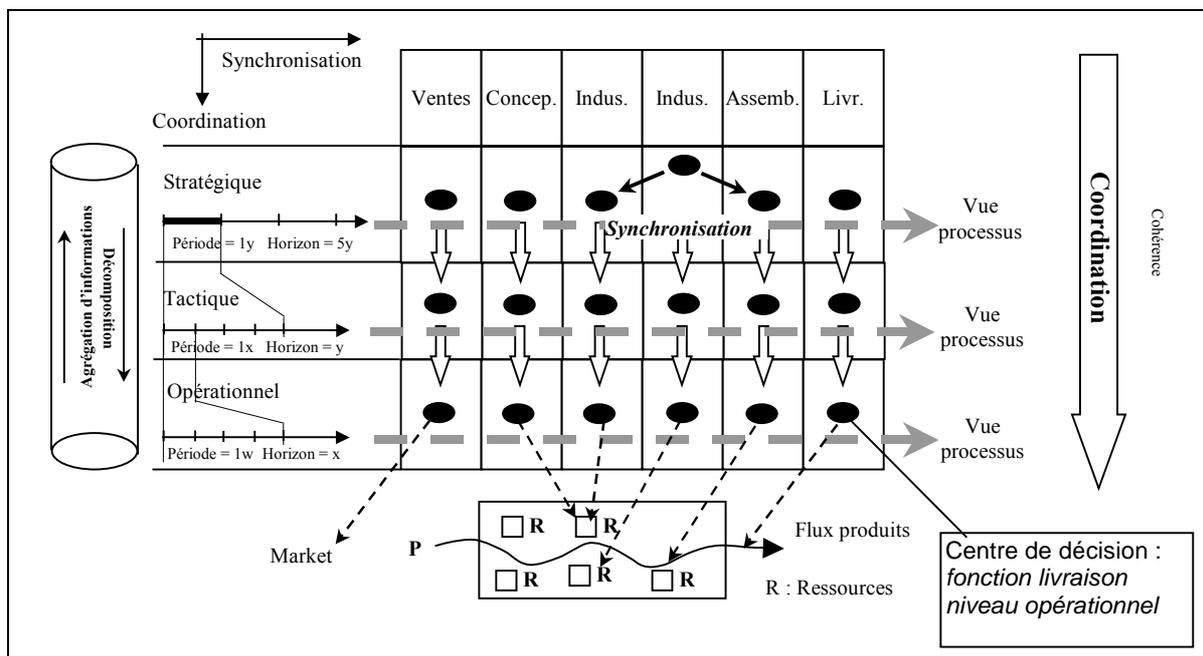


Figure 1 : Le modèle GRAI d'entreprise [Doumeingts 84] [Ducq 01]

La méthode ECOGRAI repose sur des principes et utilise des outils :

- elle est structurée en six étapes qui s'enchaînent de façon séquentielle (fig. 2),
- c'est une approche descendante qui décompose les objectifs stratégiques en objectifs tactiques et opérationnels et utilise pour cela la grille GRAI,

- c'est une approche participative qui implique les futurs utilisateurs dans la définition des indicateurs à tous les niveaux de la hiérarchie,
- c'est une approche cohérente qui organise un nombre limité d'indicateurs par fonction et par niveau qu'elle affiche selon un format standard, et définit les liens de subordination entre ces indicateurs.

La méthode ECOGRAI permet de constituer progressivement des tableaux de bord par :

- la décomposition des objectifs stratégiques sur les niveaux et fonctions du système de production,
- la recherche des variables d'action (de décision) qui permettent d'assurer la contrôlabilité du système de production,
- l'identification des indicateurs correspondant à ces couples (objectifs, variables d'action),
- la vérification de la cohérence des ces indicateurs.

Cette vérification de cohérence est triple [Bitton 90] :

- cohérence de l'indicateur par rapport au modèle d'indicateurs retenu (objectif, variable d'action, indicateur),
- cohérence des indicateurs, définis pour une même fonction à un niveau décisionnel donné qui doivent contribuer aux indicateurs du niveau supérieur (liens de subordination entre ces indicateurs),
- cohérence entre les tableaux de bord des différentes fonctions (liens de coordination).

Les indicateurs ainsi constitués sont ensuite spécifiés puis implantés dans le système d'information de la fonction considérée, au niveau du centre de décision concerné (fig. 3).

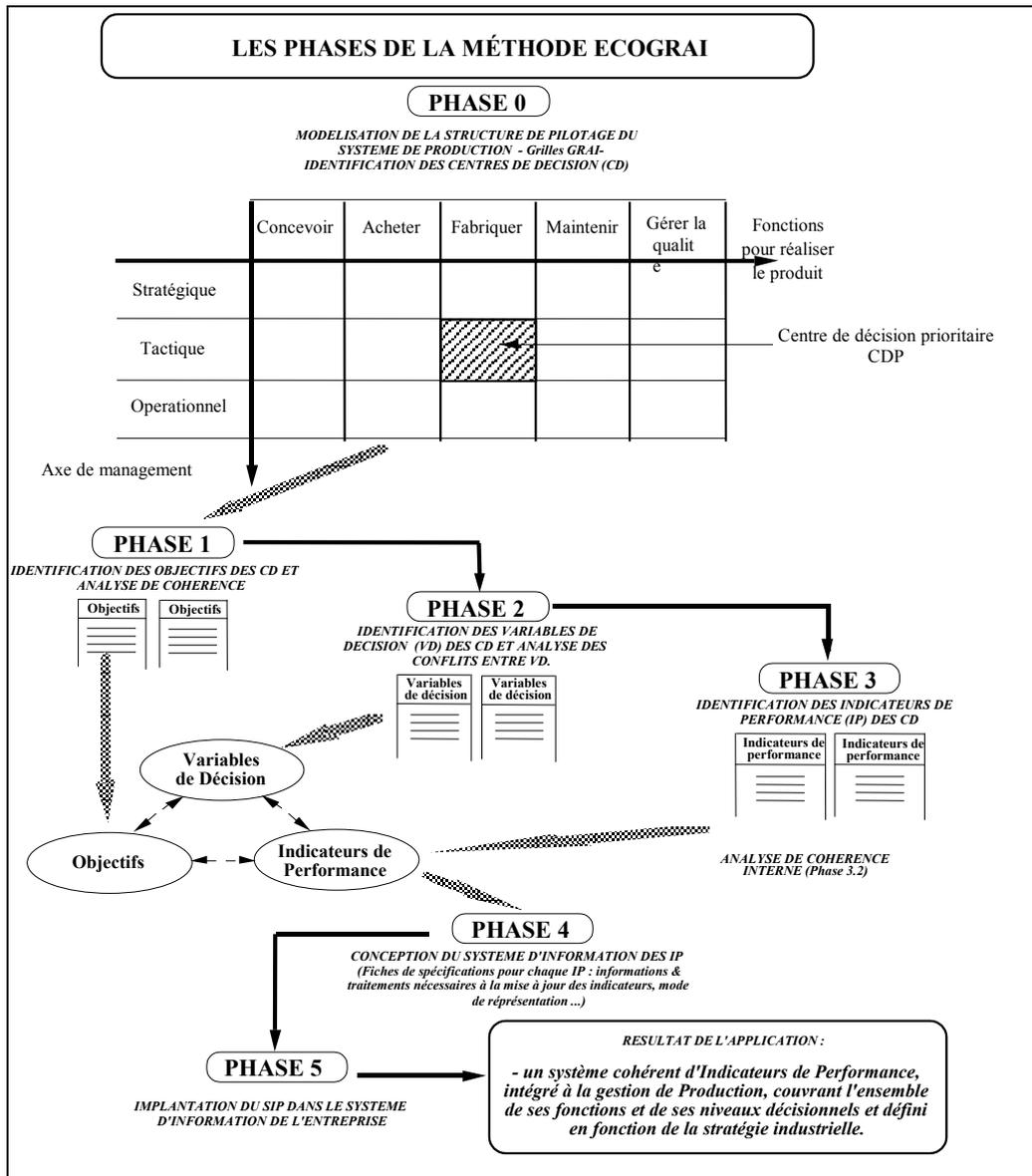


Figure 2 : Les phases de la méthode ECOGRAI [Bitton 90] [Ducq 03]

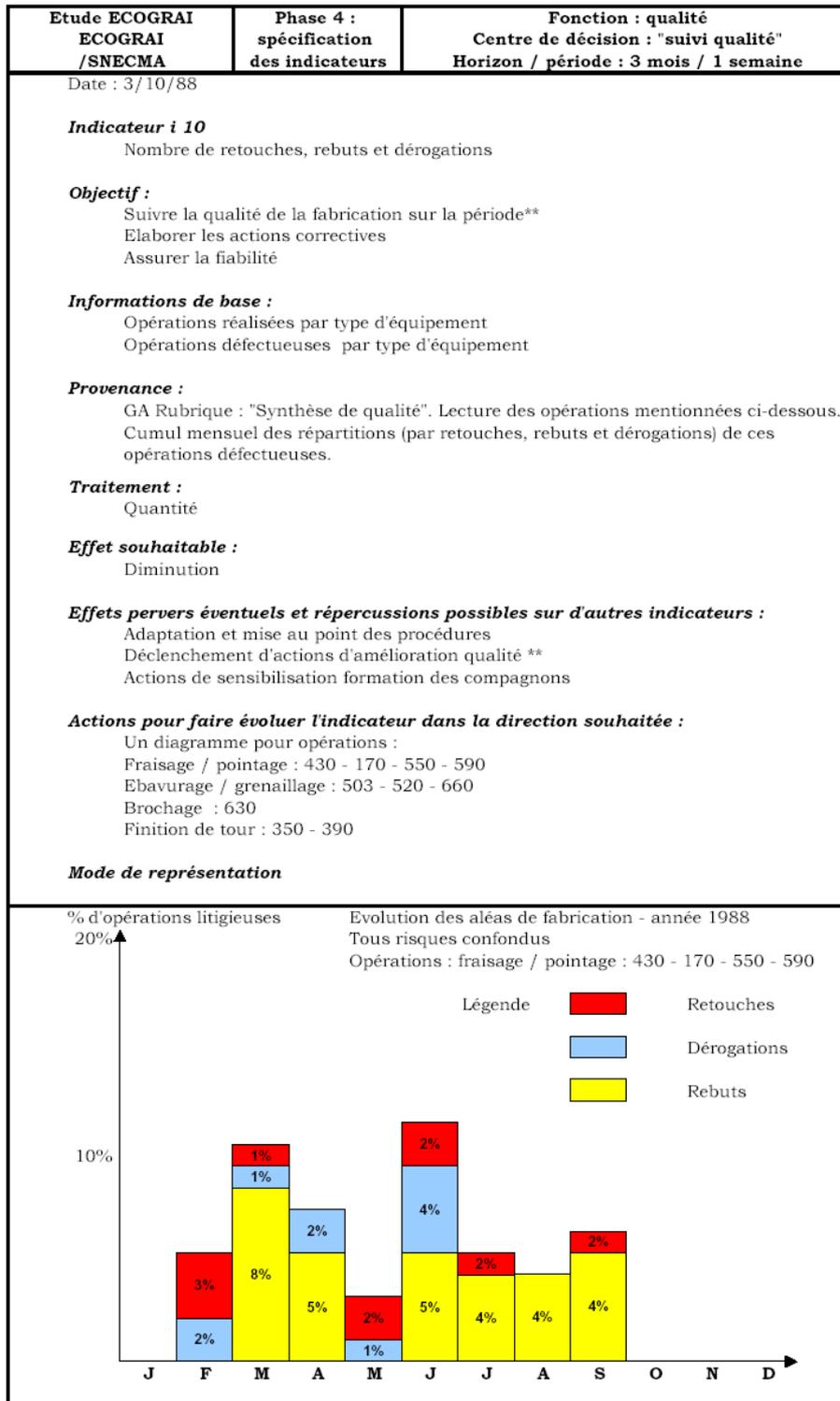


Figure 3 : La fiche de spécification d'un indicateur selon ECOGRAI [Bitton 90]

L'analyse de cohérence interne à un tableau de bord fait l'objet d'un traitement spécifique [Ducq 99]. Chaque objectif stratégique est décomposé suivant la grille GRAI jusqu'à fixer les objectifs opérationnels. Le résultat est un graphe de décomposition (fig. 4).

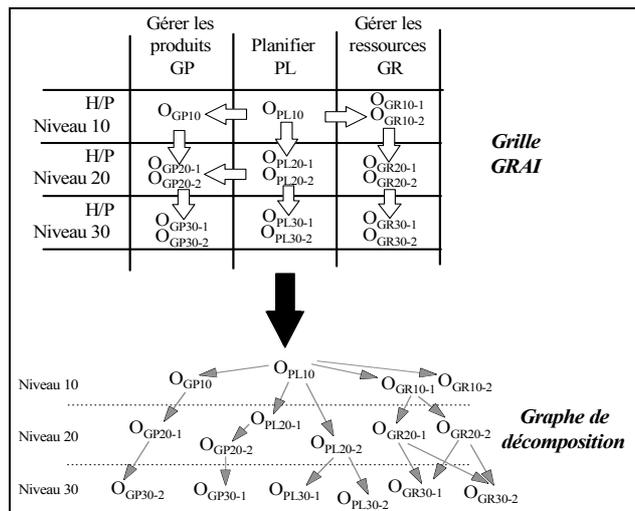


Figure 4 : La décomposition des objectifs [Ducq 99]

Un objectif résultat de la décomposition est qualifié d'« objectif fils », l'objectif qui a engendré cet objectif fils est qualifié d'« objectif père ». L'analyse de cohérence consiste à vérifier que l'agrégation des objectifs fils donne un objectif équivalent à l'objectif père. Pour résoudre les problèmes d'incommensurabilité, les objectifs sont systématiquement projetés dans une base coût C - qualité Tq - délai D grâce à des jugements d'expert. Ces différentes projections sont ensuite agrégées grâce à un opérateur adapté au critère considéré et aux relations entre activités décomposées (activités séquentielles, parallèles « OU », série « ET ») (fig. 5).

PERFORMANCE AGRÉGÉE DECOMPOSITION	C	D	Tq
SEQUENTIELLE 	$\sum_{i=1}^p C_i$	$\sum_{i=1}^p D_i$	$\prod_{i=1}^p T_{q_i}$
OU 	$\text{Max}(C_1, \dots, C_p)$	$\text{Max}(D_1, \dots, D_p)$	$\text{Min}(T_{q_1}, \dots, T_{q_p})$
ET 	$\sum_{i=1}^p C_i$	$\text{Max}(D_1, \dots, D_p)$	$\prod_{i=1}^p T_{q_i}$

Figure 5 : Les opérateurs d'agrégation retenus [Ducq 99]

La méthode ECOGRAI permet de concevoir des indicateurs de performance cohérents, relativement à une structure de pilotage organisée de façon fonctionnelle, en prenant en compte les liens de subordination entre les indicateurs de performance selon les trois critères, coût, qualité et délai.

## Annexe II-B : Les approches issues de la méthode ABC/ABM (§ 2.2.2)

La méthode ABC/ABM se propose de déployer la stratégie de l'entreprise identifiée à un certain nombre de FCS sur les processus et activités de l'entreprise. Elle sert en cela de base à de nombreuses contributions concernant la mise en place du système d'indicateurs [Lorino 91, 01] [AFGI 92] [Berrah 97] [Bonnefous 01].

L'objectif qui sous-tend ces travaux est de considérer que les indicateurs mis en place sur les activités doivent être cohérents avec les objectifs globaux : « la performance des activités n'a de sens que si elle est reliée aux facteurs de satisfaction du client grâce à la notion de processus » [Lorino 91]. On passe d'une logique d'optimisation locale des activités à une logique d'amélioration de la performance globale des processus. En effet la performance d'un processus dépend non seulement de la performance des activités elles-mêmes mais aussi de l'enchaînement de ces activités. La performance d'une activité doit donc être envisagée sous deux aspects :

- sa performance,
- les répercussions de son exécution sur la performance des autres activités.

Ce n'est qu'en prenant en compte ces deux aspects qu'un processus peut être piloté. Pour tenir compte des interactions, il faut mettre en place un système d'indicateurs en « décomposant » les objectifs globaux de l'entreprise exprimés suivant ses FCS / FCP (fig. 6) jusqu'aux activités. Les plans d'action sont alors générés suivant les facteurs clés de progrès [Berrah 97] [CPC 97] [Lorino 91]. Cette méthode a l'avantage de limiter le nombre d'indicateurs aux facteurs critiques, *i.e.* ceux qui ont un impact sur l'objectif global.

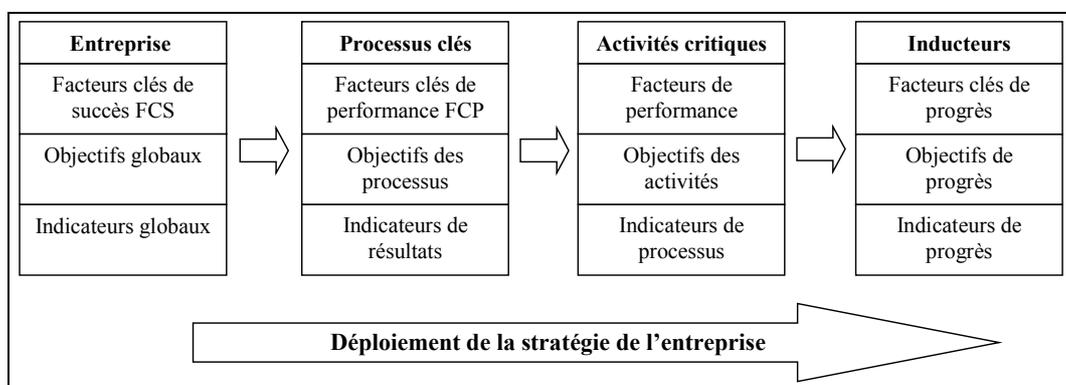


Figure 6 : Les indicateurs selon les différents facteurs (d'après [Lorino 91] [Berrah 97])

La décomposition des objectifs est réalisée selon une analyse causale (trois à quatre niveaux suffisent en général, fig. 6) basée sur la méthode des 5 pourquoi [Ohno 88]. Le plan d'action sur les facteurs clé de progrès retenu précise alors les moyens, échéances et ressources humaines nécessaires. La mise en place se termine par l'affichage des indicateurs sous forme de tableaux de bord (fig. 7). Les liens de subordination entre les différents indicateurs sont quantifiés grâce à des opérateurs issus des approches multicritères [Pomerol 93] ou des approches à base de règles [Yager 94].

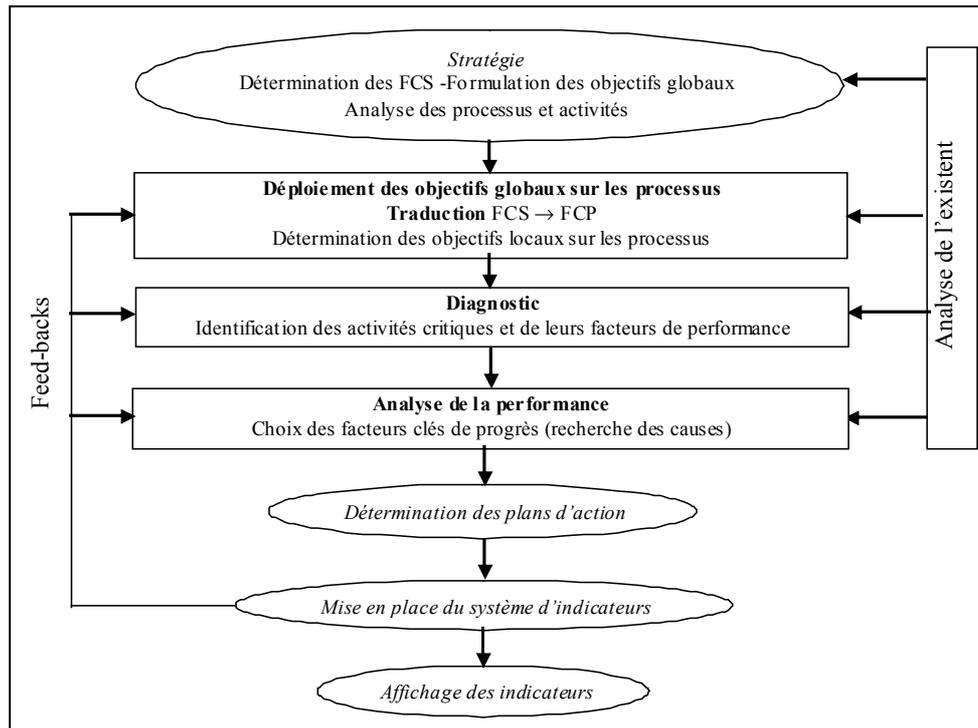


Figure 7 : Procédure de mise en place d'un système d'indicateurs à partir des FCS/FCP de l'entreprise [Berrah 97]

Le système mis en place au terme de cette procédure évolue grâce au retour d'expérience. Le déploiement des objectifs et l'identification des facteurs clés de progrès sont en effet des propositions (« la vérité vit à crédit » [Lorino 01b]) que la mise en œuvre du plan d'action permet de confirmer et de corriger. Tout objectif stratégique modifié est considéré comme un nouvel objectif et donne lieu à une nouvelle procédure. Les connaissances acquises facilitent l'analyse de l'existant de cette nouvelle mise en place.

## Annexe II-C : Le *Balanced ScoreCard BSC*(§ 2.2.3)

Le BSC est un outil d'aide au pilotage, qui repose sur une vision hiérarchique de l'entreprise structurée en « *business units* », elles-mêmes appréhendées selon une vision processus/activités. Il traduit la stratégie de toute l'entreprise en actions au niveau opérationnel. Les caractéristiques du BSC sont :

- d'être un tableau de bord,
- d'être **équilibré** et **prospectif**,
- de s'inscrire dans une amélioration de la performance.

C'est un **tableau de bord** dans la mesure où il rassemble « une liste d'indicateurs destinés à étayer un jugement sur le fonctionnement d'un centre de responsabilité » [Giard 03].

Il est **équilibré** car la performance financière (axe *financier*) est complétée par une performance non financière (axe *apprentissage organisationnel*, axe *processus internes*, axe *clients*) (fig. 8). Il est **prospectif** dans la mesure où sur chacun de ces axes, deux types d'indicateurs sont systématiquement définis :

- des *indicateurs de résultat* pour constater l'efficacité d'une action accomplie,
- des *indicateurs avancés* (de processus) pour suivre les améliorations à court terme.

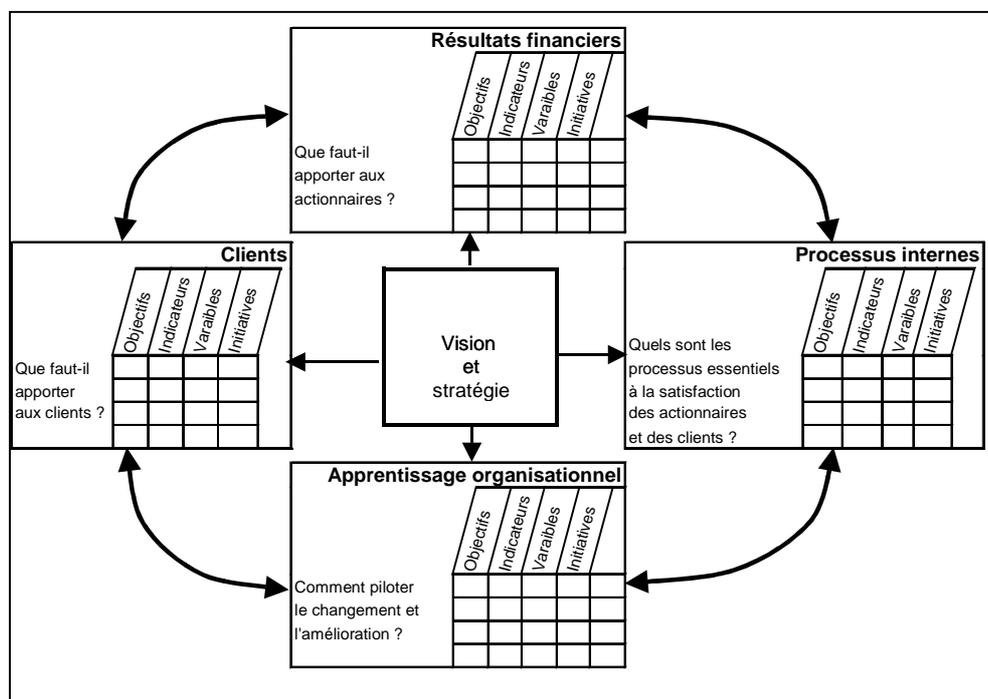


Figure 8 : Les 4 axes du BSC [Kaplan 98 p. 21]

Le BSC s'inscrit dans une démarche d'amélioration permanente dans la mesure où il identifie une chaîne de relations causales dans la performance des différents axes : l'amélioration de la performance suivant l'axe *apprentissage organisationnel* entraîne l'amélioration en cascade de la performance suivant les axes *processus internes*, *clients* et pour finir *financier*.

La procédure préconisée pour mettre en place un BSC s'articule en quatre macro-étapes qui s'enchaînent en boucle :

1. clarifier et traduire le projet et la stratégie,
2. communiquer et articuler,
3. planifier et définir les objectifs quantitatifs,
4. retour d'expérience et suivi stratégique.

Cette procédure est ensuite détaillée en dix étapes de façon à guider précisément l'entreprise pour la mise en place [Kaplan 98]. Elle débute avec la clarification du projet de l'entreprise et se termine en liant les objectifs individuels au niveau des BSC de plus bas niveau avec la stratégie de l'entreprise. Des outils logiciels<sup>22</sup> sont disponibles pour construire et exploiter un tel tableau de bord.

Dans le cas général, la mise en place du BSC dure environ seize semaines selon les auteurs. Le BSC se décline à tous les niveaux de l'entreprise, du siège social jusqu'aux *business units* et aux services supports. La structure de l'entreprise est strictement hiérarchisée, le siège imposant aux unités de production et aux services transversaux sa vision dans ce qui est appelé un alignement stratégique vertical. Au final, le BSC se présente sous la forme d'une arborescence, calquée sur l'organisation de l'entreprise, de tableaux de bord formatés selon le modèle présenté (tableau 1).

Objectifs stratégiques		Indicateurs stratégiques		Initiative
		Indicateurs de résultat	Indicateurs avancés	
Financiers	F1 répondre aux attentes des actionnaires	ROI		
	F2 Améliorer la performance opérationnelle	Ratio combiné		
	F3 Assurer une croissance rentable	Mix d'activités		
	F4 Réduire le risque pour l'actionnaire	Pertes exceptionnelles		
Clients	C1 Améliorer la performance par agence	Acquisition conservation	Performance par agence (/ plan)	
	C2 Satisfaire les titulaires de polices ciblées	Conservation de la clientèle	Satisfaction des titulaires (enquête)	
Processus	P1 développer les marchés cibles	Mix d'activité par segment	Développement des activités	
	P2 Souscrire des polices rentables	Ratio de pertes	Contrôle de conformité des polices	
	P3 Améliorer le ratio sinistres/ primes	Fréquence des sinistres	Audit qualité des sinistres	
	P4 Améliorer la productivité	Gravité des sinistres Ratio charges/produits	Evolution des budgets Evolution des effectifs	
Apprentissage organisationnel	A1 Actualisation des compétences	Productivité du personnel	Développement du personnel (/ plan)	
	A2 Accès aux informations stratégiques		Disponibilité des informations stratégiques (/ plan)	

Tableau 1 : Le BSC au niveau stratégique de l'entreprise Metro Bank [Kaplan 98]

<sup>22</sup> Le logiciel *dialog strategy* est par exemple proposé en version d'évaluation sur le site <http://www.dialogsoftware.com/homepage.htm>

Le BSC utilise deux outils spécifiques : un modèle de tableau de bord équilibré et prospectif et la procédure détaillée de mise en place. Les indicateurs définis suivant les différents axes sont standardisés, les entreprises ayant globalement les mêmes objectifs (satisfaction des clients, actionnaires et salariés). C'est l'expérience des auteurs de la méthode qui permet de définir :

- les variables sur lesquelles il faut agir,
- les indicateurs adaptés pour suivre les actions mises en œuvre sur ces variables.

Ainsi, pour l'axe *processus internes*, des indicateurs de coût (ROI, productivité MO...), délai (efficacité du cycle de production, ratio entre temps de transformation et le temps de production...) et qualité (taux de défaut, gaspillage, déchets, retouches, retours et proportion de procédés maîtrisés...) sont proposés.

Le BSC est aujourd'hui implanté dans de nombreuses entreprises surtout en Amérique du Nord. Sa diffusion en France reste freinée par une structure de pilotage spécifique et les réticences à l'exploitation individuelle des indicateurs [Bourguignon 01].

## Annexe II-D : Le Quantitative Model for Performance Measurement System, QMPMS (§ 2.2.4)

Le modèle QMPMS « *Quantitative Model for Performance Measurement System* » permet d'identifier et de pondérer les facteurs qui influencent la performance globale de l'entreprise. Il se structure en quatre étapes (fig. 9) pour :

- identifier les effets « simples » et « combinés » deux à deux, des facteurs affectant une performance globale,
- hiérarchiser ces effets,
- quantifier ces effets,
- mettre en place les tableaux de bord.

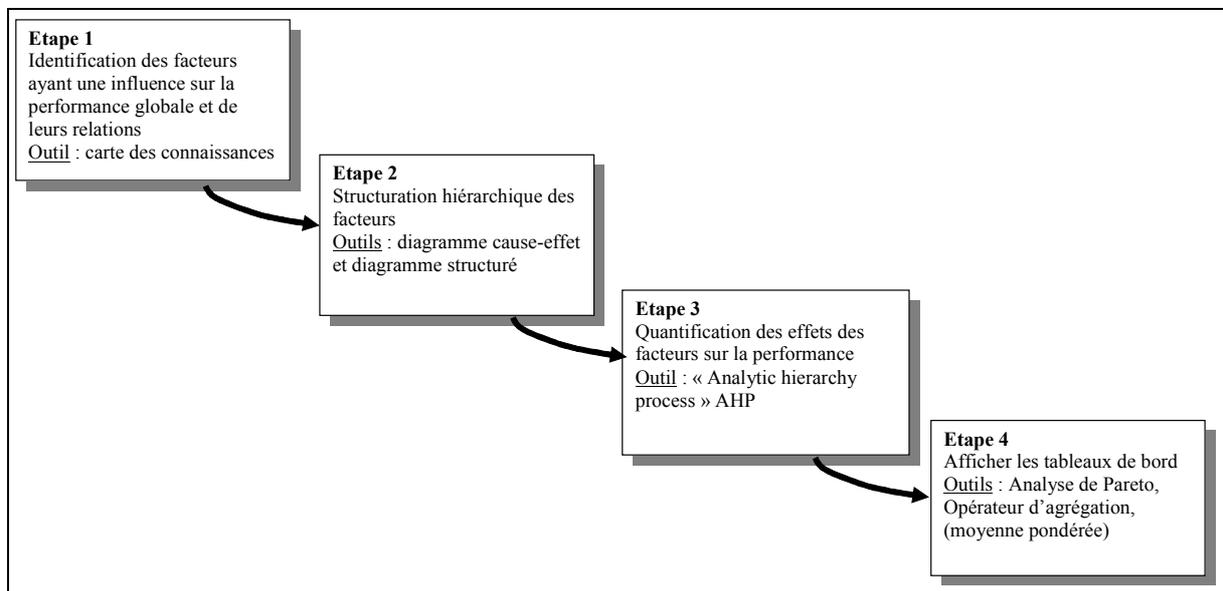


Figure 9 : Synoptique de mise en place du QMPMS [Bititci 00, 01]

Les indicateurs seront alors directement mis en place relativement à ces facteurs (analogues aux variables d'action). A un niveau donné, les auteurs identifient trois types d'interaction (effet possible) pour un indicateur (facteur) :

1. interaction hiérarchique (poids), analogue à un lien de subordination,
2. interaction mutuelle (horizontale), analogue à un lien de coordination,
3. self-interaction, *i.e* l'indicateur a un effet sur lui-même.

Une fois ces effets identifiés, ils sont hiérarchisés par niveau grâce à une analyse causale de type Hishikawa. Le résultat peut se présenter sous forme de diagramme en arête de poisson, mais, dans ce cas, les effets horizontaux et les self-interactions ne sont pas visibles. Les auteurs proposent d'utiliser un diagramme structuré ou une carte des connaissances hiérarchisée où ces interactions sont mises en évidence (fig. 10).

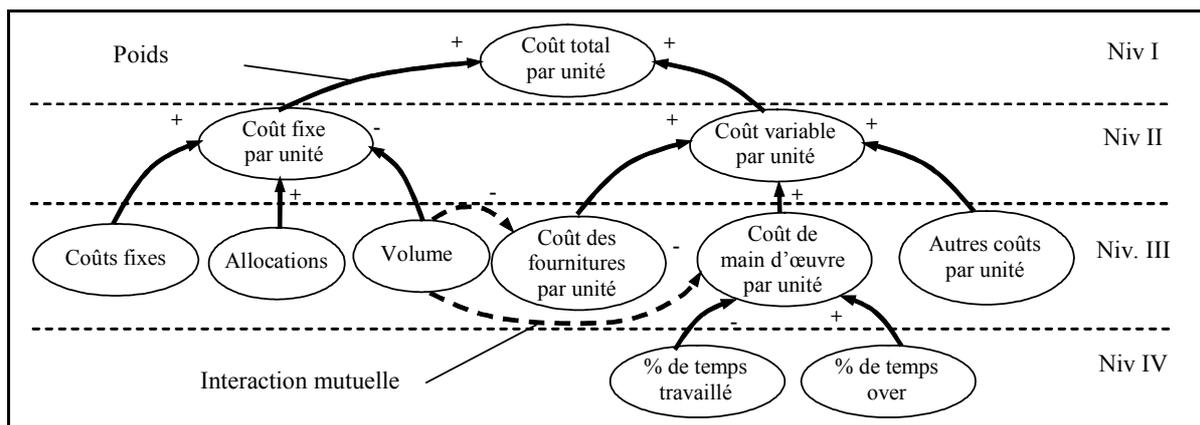


Figure 10 : La carte des connaissances de la performance globale relative au coût [Suwignjo 01]

Les interactions entre indicateurs sont ensuite quantifiées. Les poids le sont par la méthode AHP *Analytic Hierarchy Process* [Saaty 77]. Les indicateurs d'un même niveau sont comparés deux à deux pour définir leur importance respective grâce un jugement d'expert. Chaque indicateur se voit attribuer un poids en fonction de toutes ces comparaisons deux à deux. La somme des poids des facteurs à un niveau donné doit être égale à 1 (Chapitre III § 2.1.3). AHP permet par ailleurs de définir un coefficient qui permet de détecter d'éventuelles incohérences dans le jugement d'expert. *Exemple de jugement incohérent : le facteur A est jugé plus important que le facteur B, le facteur B est jugé plus important que le facteur C et le facteur C est jugé plus important que le facteur A. La règle de transitivité des préférences entre facteurs n'est pas respectée.*

Les interactions mutuelles (positives ou négatives) et la self interaction sont quantifiées grâce l'expertise de l'équipe dirigeante. Le poids global d'un indicateur est obtenu par addition, au sens arithmétique du terme, de son poids, de ses interactions mutuelles et sa self interaction. Le tableau 2 donne un détail de ces valeurs pour les indicateurs des trois premiers niveaux de la carte des connaissances de la figure 9.

Indicateur	Poids	Interaction mutuelle	Poids global
Niv. 1 Coût / un.	1	Poids calculé par AHP	1
Niv. 2 Coût fixe /un.	0.500		0.500
Niv. 2 Coût variable /un.	0.500	Poids global tenant compte des interactions mutuelles	0.500
Niv. 3 Coût fixe	0.137		0.137
Niv. 3 Coût des fournitures /un.	0.072	-0.05	0.068 = 0.72 x (1-0.05)
Niv. 3 Volume	0.205		0.245 = 0.205 + 0.72 x (1-0.05) + 0.365 x (1 -0.1)
Niv. 3 Coût de MO /un.	0.365	-0.10	0.329 = 0.365 x (1 -0.1)

Tableau 2 : Les poids et poids globaux des indicateurs de performance [Suwignjo 01]

Notons que le poids global est en fait une correction du poids : augmenter le *volume* permet de réduire le *coût de MO* et le *coût des fournitures*. Il faut donc diminuer l'importance de ces

deux indicateurs et augmenter celle du de l'indicateur *volume*, la somme des poids restant la même :  $(0.72 + 0.250 + 0.365) = (0.068 + 0.245 + 0.329)$ .

Pour proposer des tableaux de bord avec un nombre d'indicateurs réduits, les auteurs proposent de distinguer les indicateurs selon :

- l'impact du facteur de performance suivant un classement de Pareto des effets,
- la vitesse de changement de la performance selon ce facteur (élevée, moyenne, ou lente).

Un impact fort et une vitesse de changement élevée conduisent à une mesure continue ou quotidienne alors qu'un impact faible et une vitesse de changement lente donnent une mesure trimestrielle ou annuelle.

L'évolution de ce système est traitée en bouclant la démarche de mise en place du QMPMS [Bititci 00]. Les évolutions de l'environnement de l'entreprise sont observées par un *moniteur extérieur*. Les évolutions de la performance de l'entreprise sont observées grâce à un *moniteur interne*. Le mécanisme de revue analogue au pilotage utilise les informations de ces deux moniteurs pour :

- d'un part (*re*)*déployer* la stratégie sous forme de nouveaux objectifs associés aux facteurs de performance,
- d'autre part (*re*)*aligner* la performance avec ces objectifs en générant de nouveaux plans d'actions sur le système piloté de l'entreprise.

Ce processus d'évolution du système peut être comparé à une boucle PDCA comme le montre la figure 11. Cette évolution peut être déclinée sur autant de niveaux que nécessaire.

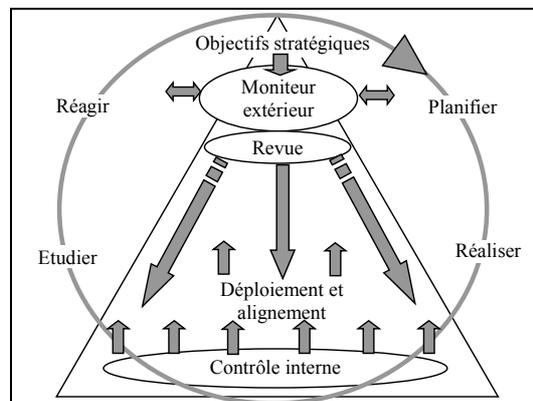


Figure 11 : L'évolution du performance measurement system dans le QMPMS [Bititci 01]

## Annexe II-E : Le Process Based Approach, PBA (§ 2.2.5)

La méthodologie *Process Based Approach* PBA s'applique aux entreprises de production et aux sociétés de service. Elle traite du cycle de développement du système d'indicateurs et en particulier de sa conception suivant une démarche structurée. L'approche PBA s'appuie sur un guide méthodologique qui décrit précisément toutes les étapes des différentes phases de développement. [Neely 95, 99, 00]. Les auteurs identifient la conception, l'implantation, l'exploitation ainsi que la mise à jour du système d'indicateurs comme un processus dont le résultat est la mise en place le système d'indicateurs [Bourne 00] (fig. 12).

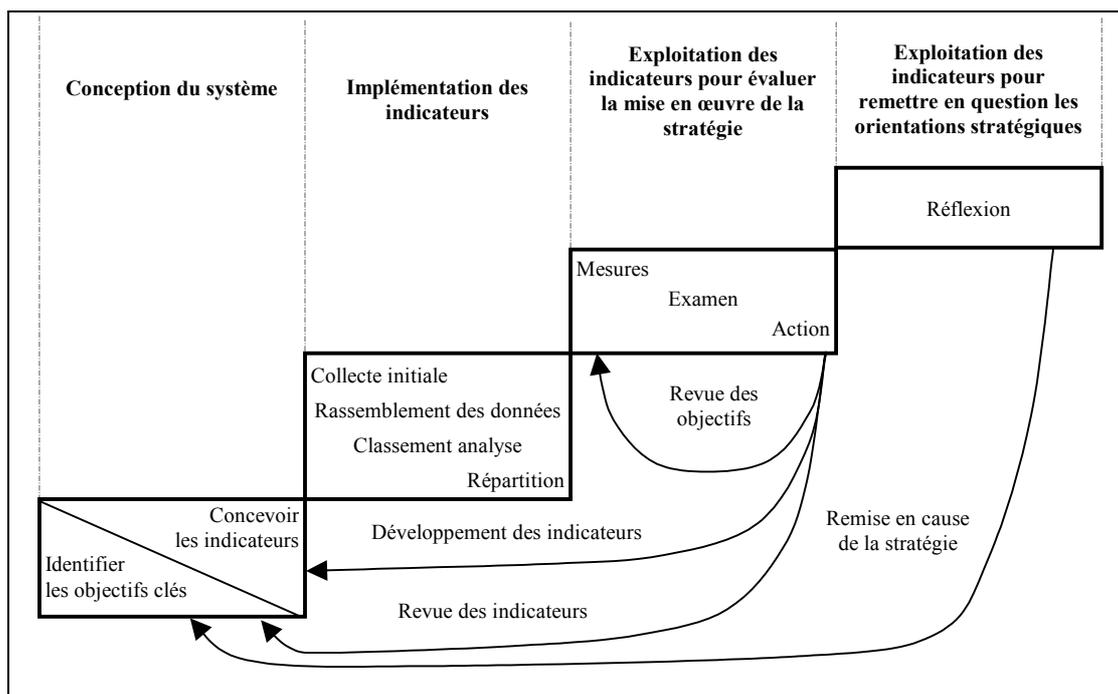


Figure 12 : Les phases du cycle de développement du système d'indicateurs [Bourne 00]

- La phase de **conception** du système permet d'identifier les besoins des clients et des partenaires afin de les synthétiser pour exprimer les nouveaux objectifs globaux de l'entreprise. Les indicateurs sont ensuite conçus et validés selon le processus décrit sur la figure 13. La phase de conception aboutit à la proposition d'indicateurs de résultat et de processus cohérents avec les objectifs globaux de l'entreprise selon deux analyses distinctes (fig. 13). Un guide méthodologique, « *workbook* », détaille cette phase de conception sous forme de fiches pour chacune des étapes du processus de conception des indicateurs [Neely 96a].

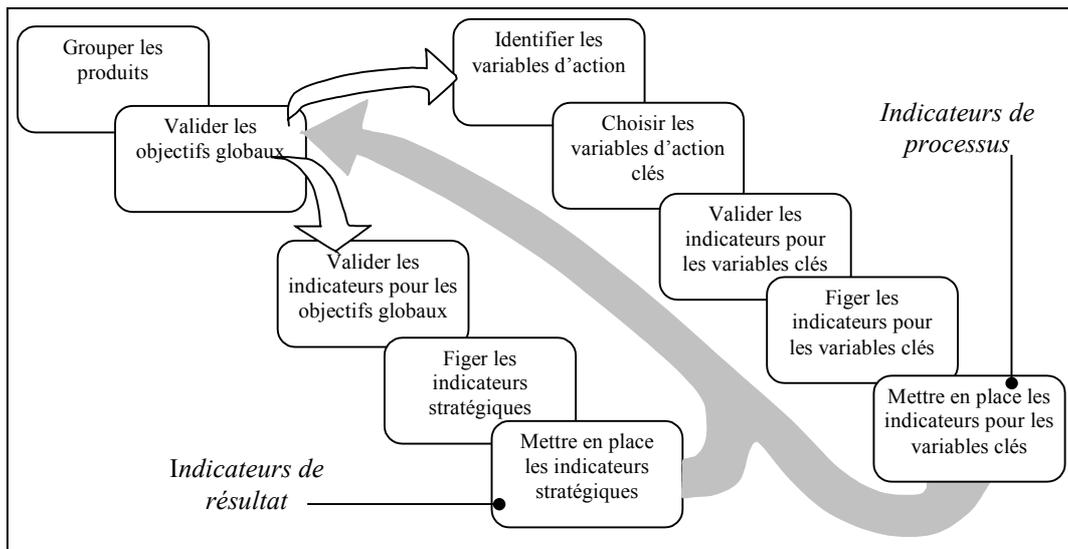


Figure 13 : Le processus de conception du système d'indicateurs [Neely 00]

- La phase **d'implémentation** du système permet de réaliser automatiquement les différentes tâches de collecte, d'organisation et d'exploitation des mesures en les intégrant dans les applications du système d'information.
- La phase **d'exploitation** du système d'indicateurs pour le pilotage permet d'instaurer des revues mensuelles pour examiner les indicateurs, les progrès réalisés et les actions à mettre en œuvre.
- La phase de **mise à jour** du système d'indicateurs remet en cause certains objectifs globaux et indicateurs existants suite aux modifications internes ou externes à l'entreprise. En effet, l'exploitation du système d'indicateurs entraîne son évolution. La phase de mise à jour concerne aussi bien la définition des objectifs globaux que la mise en place des indicateurs de processus et la remise en cause de leurs objectifs. Plus globalement, l'approche PBA identifie quatre familles de causes pour la mise à jour du système [Wagonner 99] :
  - les influences externes (législation, marché, technologies de l'information, nature de l'activité),
  - les influences internes (relations de pouvoir, recherche de légitimité, pression des collègues, coalition d'intérêts),
  - les résultats du processus de développement du système d'indicateurs (implémentation, pilotage, faiblesses, résistance au changement),
  - la démarche d'amélioration continue (implication de la direction, rapport risque / bénéfique du changement, influence de la culture d'entreprise).

## Annexe II-F : Le *Integrated dynamic performance measurement system*, IDPMS (§ 2.2.6)

Le cadre générique proposé par le modèle IDPMS repose sur une analyse générique des interactions entre critères de performance [Ghalayini 96, 97]. Il permet, pour un plan d'action considéré, d'évaluer le gain de performance suivant les différents critères identifiés. Le modèle reprend un certain nombre d'outils et concepts (SMART, PMQ, demi-cycle de vie [Schneidermann 88], modèle « *Value Focus Cycle Time* »<sup>23</sup> VFCT [Noble 94]).

Le modèle IDPMS se base sur un modèle d'entreprise qui met en avant trois aspects.

- Le **management**, que l'on peut qualifier de système de *pilotage stratégique*, définit les FCS qui influent sur la performance à long terme grâce au PMQ (Ch. II §2.1), ainsi que les FCP rattachés aux produits de l'entreprise.
- les **équipes d'amélioration**, que l'on peut qualifier de système de *pilotage tactique*, identifient les actions à mener sur un horizon donné. Le principe repose sur le « *Modified Value Focus Cycle Time* » MVFCT Model (fig. 14) et le concept de demi-cycle de vie. Les objectifs sont révisés périodiquement. Les actions sont identifiées grâce à une analyse causale menée à partir des FCS, les indicateurs associés sont déterminés grâce au PMQ. Les équipes d'amélioration ont également pour mission d'assister les processus opérationnels dans le choix de leurs indicateurs de performance.

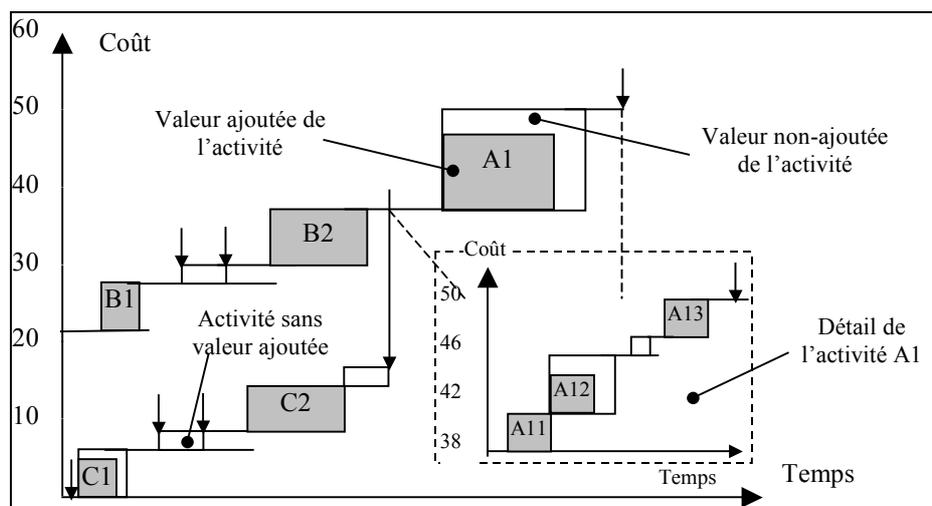


Figure 14 : Le modèle *Value Focus Cycle Time* [Noble 94]

- Les (équipes des) **processus opérationnels** reportent avec une périodicité adaptée, les indicateurs de performance définis conjointement avec les équipes d'amélioration, vers les différents niveaux de management. Elles informent également les équipes d'amélioration de la réalisation des améliorations, ce qui correspond à l'exécution du plan d'action.

<sup>23</sup> Le modèle VFCT est issu de la réingénierie des processus. On y distingue les opérations avec valeur ajoutée des opérations sans valeur ajoutée qu'il faut réduire ou éliminer (fig 14). Les non ajouts de valeur sont codifiés selon leur nature : problèmes de qualité, de stockage ou de manutention. Cette analyse permet de rechercher les actions d'amélioration à mener, de quantifier leurs effets et donc d'arbitrer entre ces actions en fonctions de leur coût. Le modèle VFCT est modifié de façon à introduire d'autres critères de performance que la valeur et le temps.

La figure 15 situe ces différents aspects, leurs échanges et les outils de formalisation utilisés. Plusieurs boucles de circulation de l'information imbriquées entre elles sont distinguées :

- une boucle de **pilotage stratégique** à moyen terme : décomposition des objectifs, élaboration, mise en œuvre et compte rendu des résultats obtenus,
- une boucle de **pilotage tactique** (à court terme) entre le management et les équipes d'amélioration,
- une boucle de **pilotage opérationnel** (à très court terme) entre les (équipes) processus et les équipes d'amélioration.

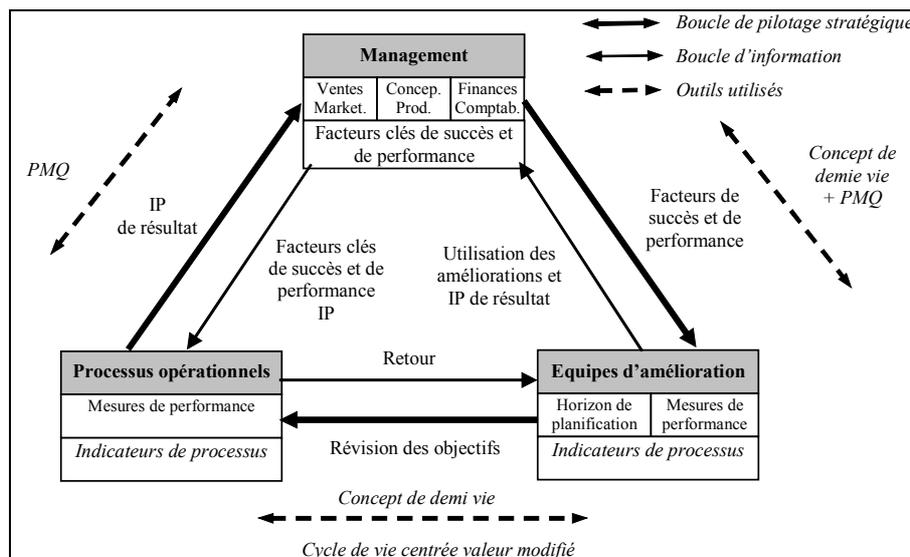


Figure 15 : Les sous-systèmes et leurs échanges dans IDPMS [Ghalayini 97]

Le modèle IDPMS considère deux types d'indicateurs :

- des indicateurs de résultat qui fournissent aux systèmes de pilotage tactique et stratégique les mesures de performance élémentaires ou agrégées relatives aux processus opérationnels.
- des indicateurs de processus qui restent au niveau des processus opérationnels et des équipes d'amélioration.

Les indicateurs sont **intégrés** dans la mesure où ils résultent d'une décomposition des objectifs définis selon les FCS-FCP de l'entreprise et des facteurs qui sont déterminés grâce au PMQ. La recherche de cohérence entre les FCS-FCP et les indicateurs associés est une des priorités de l'approche. Elle est réalisée en deux temps :

- les liens de subordination entre le FCS retenu et les FCP sont d'abord identifiés grâce au PMQ sur la base de l'expertise des différents managers au niveau global ; ces liens ne sont ni qualifiés, ni quantifiés dans l'absolu. L'exemple donné sur la figure 16 traite du FCS « satisfaction client »,
- chaque FCP fait ensuite l'objet d'une recherche des zones d'amélioration selon le modèle MVFCT avant une proposition d'actions d'amélioration. Ces actions auront des

conséquences sur le FCP considéré mais également sur les autres FCP, ce qui permet de quantifier les interactions entre FCP.

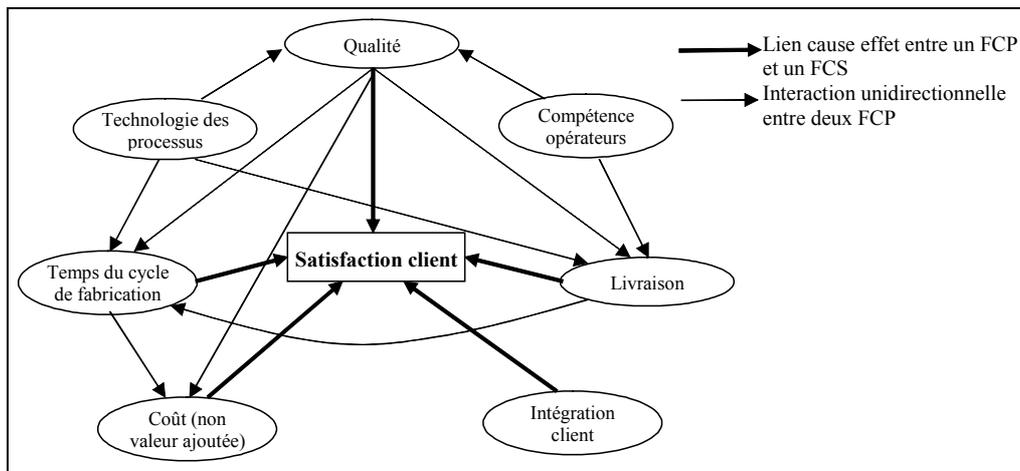


Figure 16 : Les interactions autour du FCS Satisfaction client [Ghalayini 97]

Conformément aux interactions identifiées, le modèle propose ensuite de quantifier par expertise ces interactions (tableau 3).

Gains attendus du plan d'action <i>Acquisition d'une nouvelle machine</i>		
selon le FCP <i>Technologie des processus</i>		
Interaction avec le FCP <i>Livraison</i>	Interaction avec le FCP <i>Qualité</i>	Interaction avec le FCP <i>Temps de cycle</i>
Taux de service + 20%	Taux de défaut - 3%	Temps de cycle - 22%
Temps d'écoulement - 35 %	Taux de retour - 3%	Temps de non VA - 10%
	Taux de retouche - 5%	
	Taux de rebut - 6%	

Tableau 3 : La quantification des interactions pour le FCP *Technologie des processus* [Ghalayini 97]

Le modèle propose, pour finir, de construire un tableau de bord pour chaque FCP, où les indicateurs de résultat et de processus sont mis en place sur trois niveaux dont la figure 17 donne une illustration :

- au niveau 1, l'objectif global à atteindre est défini pour le FCP considéré,
- au niveau 2, les indicateurs de résultat destinés aux équipes d'amélioration sont mis en place ; c'est à ce niveau que sont quantifiées les interactions pour le plan d'action envisagé,
- au niveau 3, le tableau de bord est complété par les indicateurs de processus destinés aux équipes des processus opérationnels.

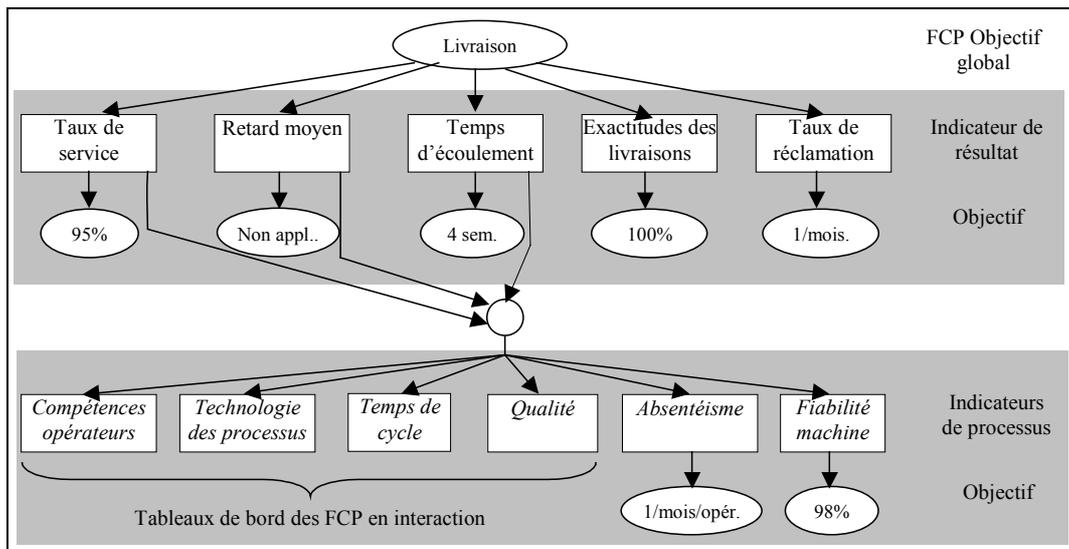


Figure 17 : Le tableau de bord du FCP livraison [Ghalayini 97]

L'aspect **dynamique** dans le système recouvre deux aspects. D'un part, comme le proposent l'approche PBA et le modèle QMPMS, les évolutions de l'entreprise et de son environnement sont observées afin de redéfinir les FCS-FCP critiques et faire évoluer les objectifs associés. D'autre part, les objectifs fixés par la direction sont modulés dans le temps selon le concept de demi-cycle de vie. Par exemple si un objectif de gain de productivité de 6% est fixé sur un horizon de 6 mois, l'équipe d'amélioration peut fixer un objectif de 4% à 3 mois. Au delà de cet horizon les objectifs sont revus à la hausse, aussi souvent que nécessaire pour les 3 mois suivants. Fixer des objectifs raisonnables facilite leur acceptation au niveau des processus opérationnels et formalise la progressivité de l'amélioration continue.

## Annexe II-G : Le Process Performance Measurement System, PPMS (§ 2.2.7)

Le PPMS aborde l'expression de la performance de façon **qualitative et quantitative**, dans sa **globalité** couvrant ainsi l'ensemble des processus et activités de l'entreprise [Kueng 99, 00, 01].

Considérant, à l'instar de la méthode ECOGRAI ou du modèle QMPMS, le système d'indicateurs comme étant un sous-système du système d'information, le PPMS lui associe trois fonctions :

- collecter les mesures de la performance,
- comparer leurs valeurs actuelles aux valeurs passées et attendues,
- communiquer sous forme de tableaux de bord ces résultats aux équipes processus (l'ensemble des acteurs qui collaborent au sein d'un même processus).

S'inspirant du BSC, du MBNQA [MBNQA 03] et de son équivalent européen, l'« *European Quality Award* » EQA [EQA 03], ce système propose d'évaluer la performance de l'entreprise selon cinq aspects. Quatre aspects sont dédiés aux *actionnaires, société civile, clients, et employés*. Un cinquième aspect concerne l'*innovation* vue comme un moyen pour améliorer les quatre autres aspects.

Le cadre de définition du PPMS est décrit sur plusieurs niveaux. Au niveau le plus global, le système est vu dans un cycle de vie qui comprend quatre phases (1-conception, 2-implémentation, 3-exploitation, 4-démantèlement) (fig. 18).

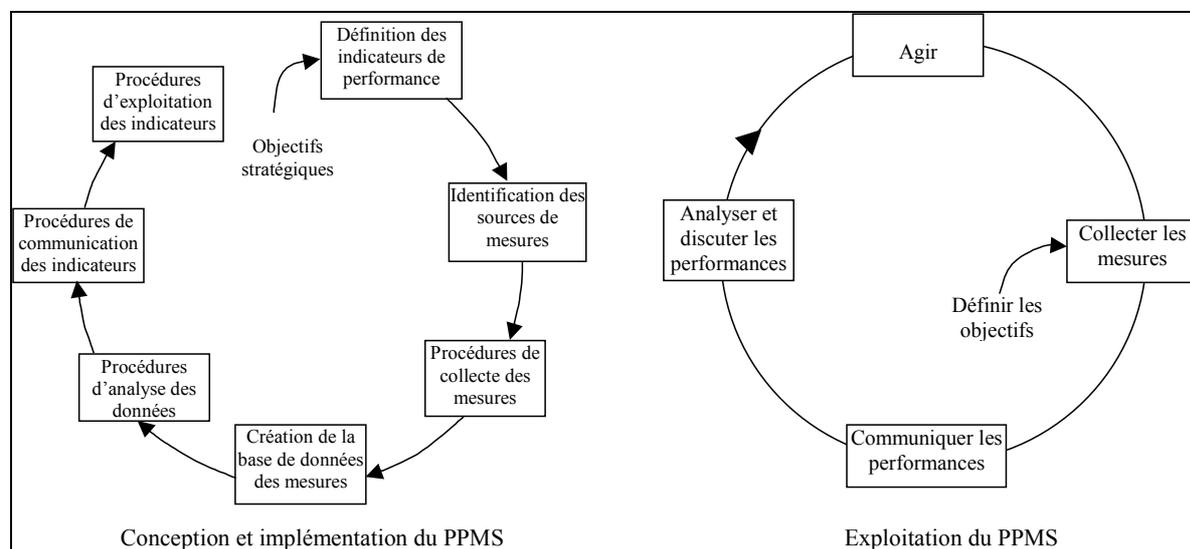


Figure 18 : Les différentes phases (hors démantèlement) du PPMS [Kueng 01]

La définition des indicateurs de performance, première sous-phase du cycle de conception des indicateurs, est réalisée en quatre étapes, selon la procédure suivante (fig. 19).

1. Pour chacun des cinq aspects, définir les objectifs des processus opérationnels en cohérence avec les objectifs globaux de l'entreprise. Cette définition est le résultat d'une collaboration entre les responsables de processus, la direction, les clients et fournisseurs de

ces processus. Ces objectifs seront déterminés par exemple, au moyen d'une analyse de marché, d'une enquête auprès des parties intéressées, des résultats d'un benchmarking, de la simulation ou de l'expérience.

2. Associer des indicateurs de performance à ces objectifs, *i.e.* proposer une mesure du degré d'atteinte des objectifs. Pour collecter les données nécessaires, l'auteur propose d'utiliser les technologies de l'information et les techniques de workflow en particulier.
3. Rechercher les actions à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs précédents et leur associer de nouveaux objectifs (sous objectifs) grâce à une analyse causale menée par les experts. C'est en fait la décomposition des objectifs ; les étapes 2 et 3 se déroulant en boucle aussi longtemps que nécessaire, pour disposer d'un plan d'action suffisamment explicite.
4. Développer et modifier les arborescences d'indicateurs obtenus (indicateurs sur plusieurs niveaux, liens de subordinations entre ces différents niveaux) en fonction de l'expérience et des améliorations réalisées.

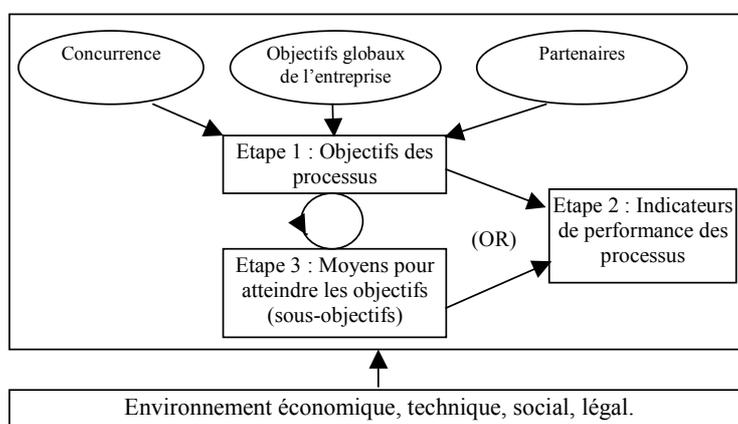


Figure 19 : La définition des indicateurs du PPMS [Kueng 00]

Avant d'être implémentés, les indicateurs choisis doivent répondre à un certain nombre d'exigences dont la vérification s'appuie sur les données historiques de l'entreprise (*aptitude à être quantifié, sensibilité, linéarité, fiabilité, efficacité*) et la qualité de l'analyse causale pour orienter les indicateurs vers l'amélioration. Les graphes d'indicateurs se présentent alors sous forme de tableaux de bord implantés et prêts à l'usage où apparaissent les objectifs et les indicateurs ainsi que leurs liens de subordination (fig. 20).

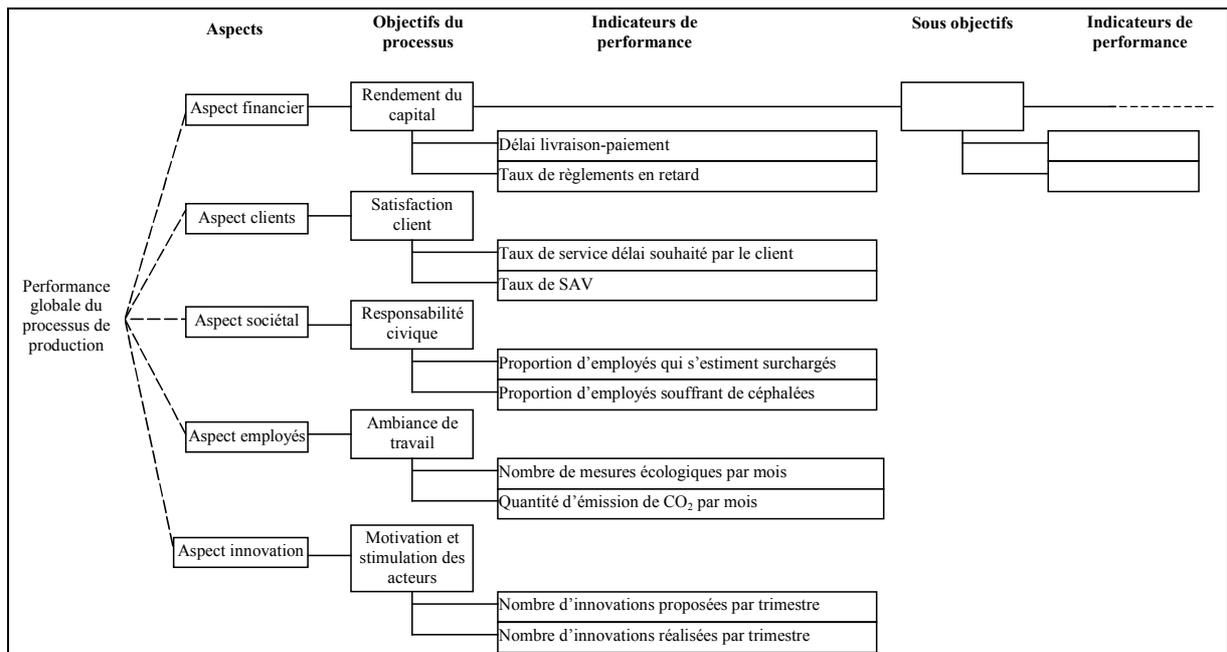


Figure 20 : Le tableau de bord du processus de production [Kueng 99]

## Annexe II-H : L'approche *European Network for Advanced Performance Studies*, ENAPS (§ 2.2.8)

L'approche ENAPS s'appuie sur une vision processus de l'entreprise. Elle propose de mettre en place un système d'indicateurs générique, à partir d'indicateurs prédéfinis. Cette approche est aujourd'hui diffusée dans les entreprises dans le cadre du projet de recherche européen ESPRIT [Browne 99]. Le système d'indicateurs permet alors à chaque entreprise de se situer par rapport à des entreprises qui lui sont comparables en termes de secteur d'activités, de taille de localisation géographique et de diagnostiquer les domaines où elle doit améliorer sa performance. L'approche est basée sur deux systèmes d'indicateurs développés indépendamment, le *TOPP system* [SINTEF 92] et le *AMBITE system* [Bradley 96] ainsi que d'autres approches (ECOGRAI, EFQM model, BSC, PMQ).

Le « *TOPP system* » est le résultat de travaux associant différents partenaires norvégiens. Il est basé sur trois critères de performance : **l'effectivité** (la satisfaction des clients), **l'efficience** (usage optimal des ressources) et **l'aptitude au changement**. L'entreprise doit qualifier, la performance (actuelle et souhaitée à un horizon de deux ans) d'une vingtaine de ses processus critiques, ainsi que son importance vis-à-vis des trois critères précédents. Elle s'appuie pour cela sur un questionnaire très détaillé (3000 questions) qui lui permet de s'étalonner par rapport à la concurrence et de définir les futurs projets d'amélioration. Ce questionnaire est relativement lourd à mettre en œuvre, il n'est pas spécifique à la stratégie de l'entreprise et il ne fait pas le lien entre les différentes performances.

Le « *AMBITE system* » (*Advanced Manufacturing Business Implementation Tool for Europe*) est l'aboutissement d'un projet européen mené de 1994 à 1996. Son objectif est de traduire la stratégie de l'entreprise (objectifs exprimés selon cinq FCS prioritaires) en indicateurs de performance, pour cinq macro-processus opérationnels (Ingénierie collaborative, Conception, Production, Achats, Ventes). Ainsi, 25 indicateurs opérationnels sont définis pour chacun des quatre types de production envisagés (fig. 21). Chaque entreprise peut décomposer ces indicateurs génériques de niveau stratégique suivant ses méthodes propres, en indicateurs opérationnels. L'étalonnage comparatif de la performance des entreprises ne peut se faire qu'au niveau stratégique, la diversité des indicateurs opérationnels rendant toute autre comparaison impossible.

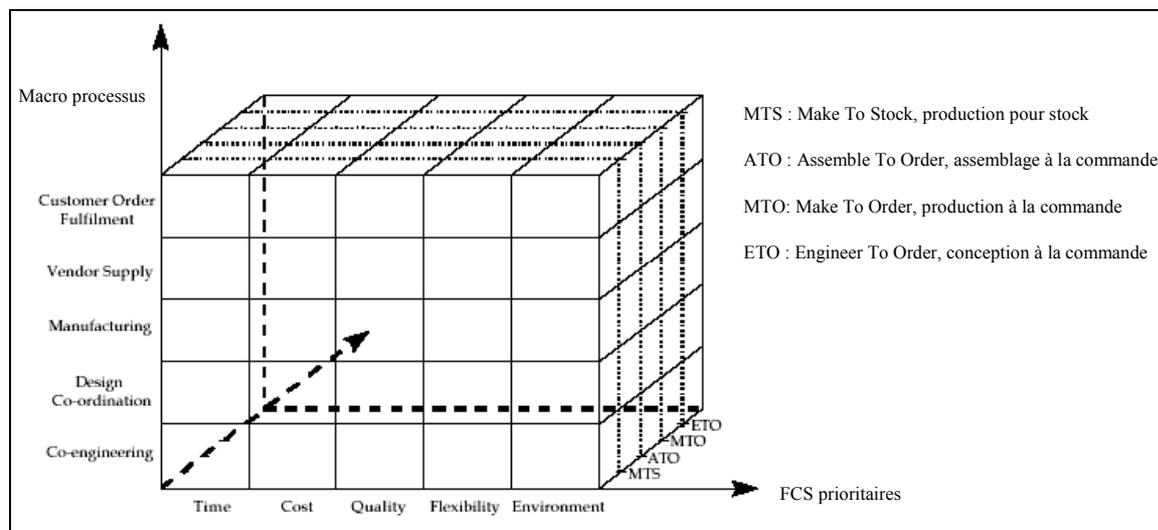


Figure 21 : Le cadre d'évaluation de la performance du modèle AMBITE [Browne 99]

L'approche ENAPS utilise des indicateurs génériques (comme le système TOPP) et utilise une approche descendante, basée sur un modèle processus de l'entreprise (comme le modèle AMBITE). Elle considère l'entreprise selon quatre fonctions principales (*développement produit, traitement des commandes, service client, marketing*) (fig. 22).

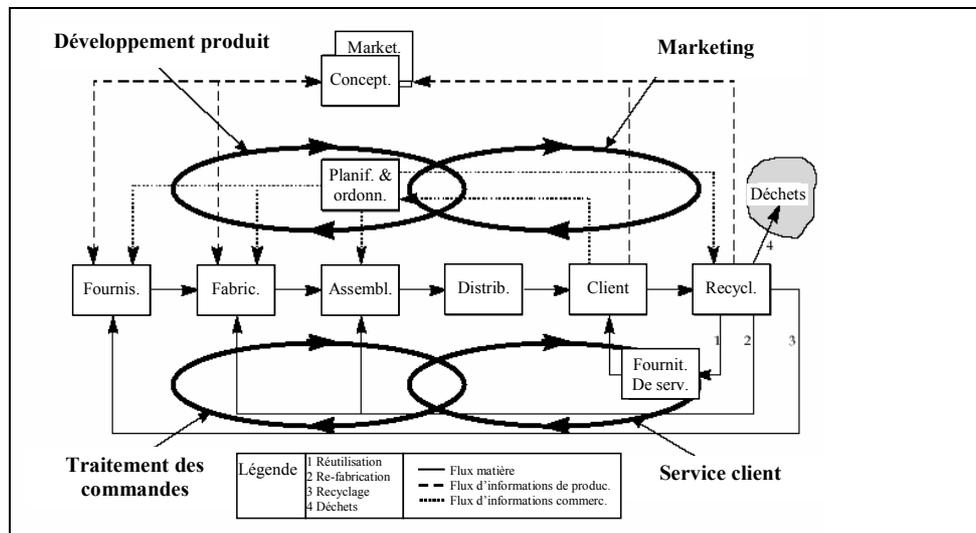


Figure 22 : Le modèle d'entreprise de l'approche ENAPS [Browne 99]

L'approche propose de systématiquement mettre en place sur les processus de l'entreprise, les mêmes indicateurs de performance (95 exactement). Les indicateurs sont calculés à partir de mesures standardisées, et ce quelle que soit l'entreprise. Ces mesures et indicateurs sont classés suivant :

- le niveau décisionnel qui peut être l'entreprise (1<sup>er</sup> niveau) ou un processus (2<sup>ème</sup> niveau). L'approche identifie quatre processus majeurs (*développement produit, ventes et marketing, service client, traitement des commandes*) et deux processus secondaires (*processus support et processus d'amélioration continue*),
- une des huit rubriques suivantes (*comptabilité, développement produit, marketing et ventes, planification de la production, service client, achats, ressources humaines et autres*).

La liste des mesures et indicateurs est fournie sous forme d'appendice comme le montre le tableau 4. La cohérence est garantie selon les auteurs par le respect du choix des mesures et du calcul de la performance des indicateurs, les relations entre ces indicateurs bien que non explicitées sont prises en compte dans ces calculs.

Au niveau des *activités* (3<sup>ème</sup> niveau), qui sont listées pour chacun des six processus identifiés, l'approche ne fournit pas d'indicateurs génériques. Elle impose cependant de choisir les critères parmi le *déla*, le *coût*, la *qualité*, le *volume*, la *flexibilité* et l'*environnement*. Les liens entre les indicateurs du niveau *activités* avec ceux du niveau *processus* ne sont pas traités. Une revue semestrielle des indicateurs retenus est réalisée pour garder au système sa pertinence. Les mesures et les indicateurs doivent être quantitatifs pour pouvoir être comparés entre entreprises de même métier, de même taille ou de même localisation géographique. Cette méthode est en cours d'expérimentation dans un certain nombre de grands groupes européens.

Table B: The ENAPS Performance Indicators.

<u>Performance Indicator</u>	<u>Value</u>	<u>Units</u>	<u>Formula</u>
<b><u>Enterprise Level</u></b>			
1 Return on capital employed		%	Capital Turnover*Margin
2 Return on equity		%	Profit/Equity
3 Capital turnover		%	Sales/Total assets
4 Margin		%	Profit/Sales
5 Profit		ECU	Sales - Operating expense
6 Operating expense		ECU	Purchased materials cost + Other costs
7 Quick ratio		%	(Current assets + Receivables)/Current liabilities
8 Cash ratio		%	Current assets/Current liabilities
9 Payment capacity		ECU	Current assets - Current liabilities
10 Sales outstanding		%	(Receivables * 360)/Sales
11 Sales per employee		%	Sales/Number of employees
12 Value-added per employee		%	(Sales-Purchased material cost)/Number of employees
13 Inventory turnover		Days	Average value of stock*360/Purchased material cost
14 Debt ratio		%	External Capital/Total liabilities
15 Customer satisfaction		Ratio	Number of customer complaints/Total number of orders
16 Value of joint ventures		%	Profit made from joint ventures/Sales

Tableau 4 : Les IP préconisés dans l'approche ENAPS au niveau « entreprise » [Browne 99]

## Annexe II-I : Le système de management de la qualité SMQ de la norme ISO 9000 (§ 2.2.9)

Le fascicule (FD X 50-171) de la norme ISO 9000 traite de la mise en place des indicateurs et tableaux de bord pour leur exploitation par le *système de management de la qualité* qui doit être mis en place dans le cadre de la norme. Il fait suite aux recommandations de la version de 1994, de la même norme. Rappelons que cette ancienne version préconisait la mise en place de procédures de conduite des équipements et de contrôle des opérations effectuées. Le *système de management de la qualité* s'appuie désormais sur :

- un modèle d'indicateur,
- des préconisations de construction des tableaux de bord,
- un modèle de cycle de vie des indicateurs et tableaux de bord.

L'**indicateur** est formalisé au moyen des dix éléments suivants :

1. l'identification de l'indicateur,
2. le champ de la mesure,
3. l'objectif,
4. les critères,
5. les paramètres,
6. le mode de calcul, les responsabilités et la périodicité de la collecte des informations,
7. le mode de communication,
8. l'exploitation des informations,
9. les responsabilités et modalités de l'analyse des indicateurs et/ou TdB.

Un **tableau de bord** rassemble « les indicateurs nécessaires pour mettre en évidence les actions qui s'imposent pour atteindre les objectifs et améliorer les processus ». L'ergonomie doit être soignée pour que les relations cause-effet apparaissent facilement. Les indicateurs peuvent être combinés pour présenter une information plus significative et éviter la surabondance. Dans ce sens, la norme ISO 9004 définit explicitement les **critères** (conformité, disponibilité, coûts de cycle de vie, impact environnemental, etc.), les **processus** (conception, achats, production, etc.) ainsi que les **aspects** (personnes, infrastructures, information, partenaires, etc.) de l'entreprise à prendre en compte dans le cadre de l'amélioration de la performance.

Le **modèle de cycle de vie** du système d'indicateurs est présenté figure 23. La norme propose une méthodologie complète qui renseigne sur le contenu de chacune des phases, leurs entrées sorties et les outils disponibles pour mener à bien ces phases. Les entrées-sorties sont

formalisées sous forme de documents ou de données informatiques (Besoins, tableaux de bord existants... de la phase conception).

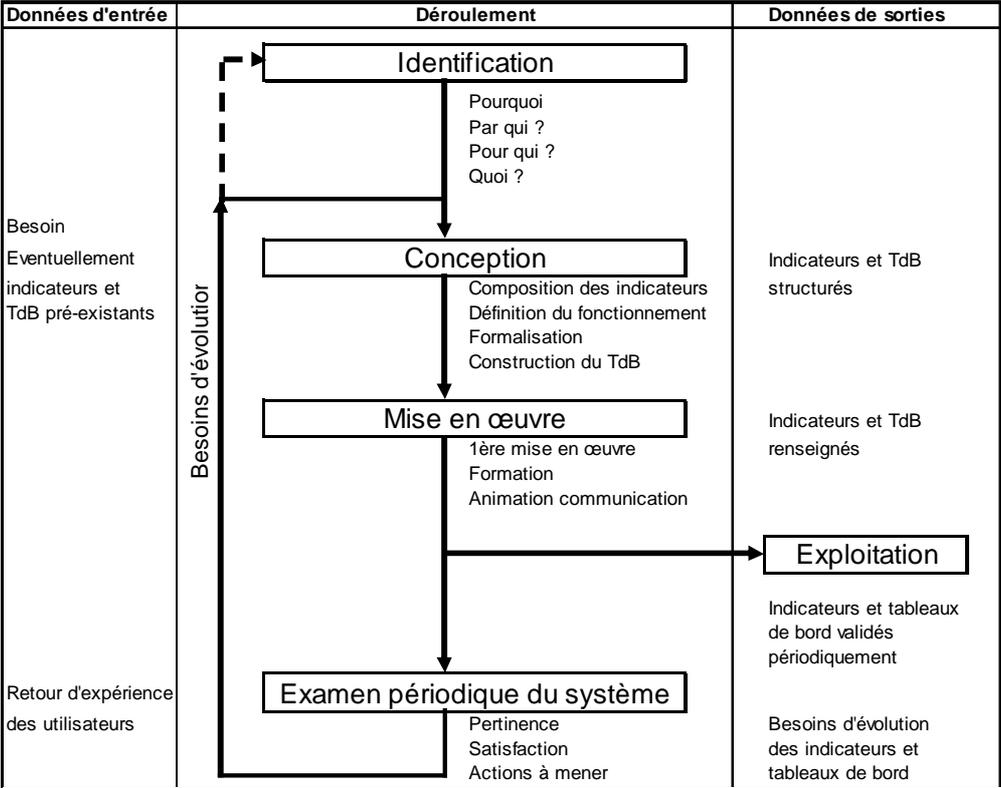


Figure 23 : Le cycle de vie du système d'indicateurs (FDX 50-171)

## **Annexe II-J : La mise en place des indicateurs dans le modèle *Supply Chain Operations Reference*, SCOR (§ 2.2.10)**

Les indicateurs du modèle SCOR permettent d'instrumenter une démarche d'implantation ou de réimplantation de chaîne logistique. Ils sont indissociables de la modélisation de cette chaîne, une cartographie de processus étant réalisée à partir d'une liste de tous les processus existants dans un tel cadre. Les processus à améliorer sont identifiés par comparaison à une grille composée d'indicateurs de référence. Cette grille, calquée sur la cartographie des processus, assure la cohérence entre les indicateurs mis en place sans expliciter leurs liens. La chaîne logistique se définit conformément aux niveaux suivants :

- Le **niveau 1** (global) où sont définis six processus majeurs ; *planification P*, *approvisionnement S*, *production M*, *livraison D*, *retour des produits S* et *processus supports E*,
- Le **niveau 2** détaille chaque processus majeur en processus génériques de base ; ainsi la production est détaillée en trois processus génériques, *produire pour stock M1*, *produire à la commande M2*, *concevoir à la commande M3* etc. La cartographie des processus est alors réalisée (fig. 24),
- Le **niveau 3** est le niveau où sont identifiés les « éléments » des processus précédents ; ainsi pour le processus générique P3, *planifier la production*, 4 éléments sont identifiés P3.1 *identification des nomenclatures*, P3.2 *identification des ressources*, P3.3 *ajustement charge-capacité*, P3.4 *calcul des besoins nets*. La cartographie des processus peut être alors affinée,
- Le **niveau 4** permet de définir les activités spécifiques aux entreprises formant la supply chain pour la cartographie où sont mis en place les éléments de processus du niveau 3. Cette définition des activités spécifiques n'est pas traitée dans la méthode.

Cinq indicateurs génériques de la supply chain du niveau 1 sont établis selon quatre FCS standards (*fiabilité, réactivité, coût et rotation des capitaux*) :

- Le coût du pilotage de la supply chain,
- La performance de livraison,
- Le délai de traitement des commandes,
- La productivité,
- La productivité du Capital.

La valeur des objectifs est fixée par étalonnage concurrentiel : par exemple dans le secteur de l'agroalimentaire, les meilleures entreprises ont une performance de livraison, mesurée par le taux de service, de 99,8% quand la moyenne est de 95% et que la performance actuelle de l'entreprise est de 90%. Un diagnostic selon les cinq indicateurs génériques est donc réalisé qui identifie les points forts et points faibles, de chaque entreprise de la supply chain. Pour les points faibles, de nouveaux objectifs sont fixés.

Les objectifs sont déclinés pour les processus majeurs du niveau 1 où un plan d'action basé sur les meilleures pratiques est mis en œuvre. Ainsi, l'indicateur taux de service est décliné sur les différents processus : taux de service des fournisseurs (S), performance de livraison (D), taux de respect du planning (M). La démarche se poursuit au niveau 2, où chaque entreprise de la supply chain est capable d'identifier les processus génériques dont il faut améliorer la performance. Par exemple avec un taux de commandes honorées de 85% la performance de livraison, notée *pl*, du processus D1 des entrepôts régionaux de l'entreprise ALPHA n'est pas satisfaisante (fig. 24). Pour mieux identifier les causes de cette performance médiocre, cet indicateur est à son tour décliné au niveau 3 selon quatre variables fournies par le modèle SCOR (*délat, exactitude, documents et dommages aux colis*).

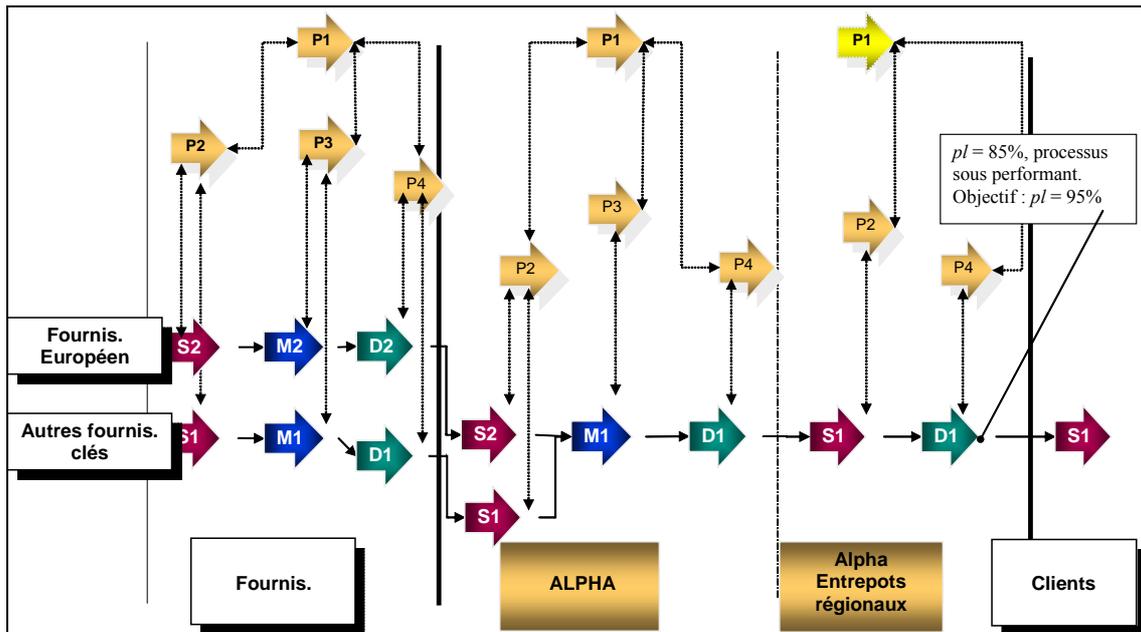


Figure 24 : La cartographie des processus de la chaîne logistique de l'entreprise ALPHA du niveau 2 [SCC 03]

Le modèle SCOR fournit ainsi jusqu'au niveau 3, une fiche précisant les indicateurs qui peuvent être mis en place en fonction des objectifs retenus (tableau 5).

<b>Élément de processus</b> : Ordonnancement des activités de production	<b>Code élément de processus</b> : M 1 1
<b>Critères de performance</b>	<b>Indicateurs</b>
Délai	Durée du cycle d'ordonnancement Horizon d'ordonnancement
Coût	Nombre de jours d'en cours Pertes de production, Coût d'ordonnancement
Qualité/Service	Taux de respect du planning
Utilisation des capitaux	Utilisation des équipements

Tableau 5 : La fiche descriptive des indicateurs relatifs à un élément de processus

La relation entre la valeur des différents objectifs n'est pas fournie par le modèle. Elle repose sur un raisonnement qualitatif : par exemple si le taux de service doit être de 99 % (meilleures entreprises), les objectifs des processus de niveau 2 et 3 devront également être semblables à ceux des meilleures entreprises.

## Annexe du chapitre III

Cette annexe regroupe les définitions concernant l'élaboration des expressions de performance suivant des échelles cardinales, les opérateurs d'agrégation, ainsi que les développements mathématiques relatifs à la méthode MACBETH et ses aménagements.

### Annexe III-A : Notion d'échelle (§ 2.3.3)

Un intervalle borné présentant les propriétés de commensurabilité et de signifiante en appelle à la notion d'échelle.

**Définition** : on appelle échelle,  $g$  une représentation de  $A$ , l'ensemble des objets possibles, vers  $B$ , l'ensembles des représentations des objets de  $A$ , où  $g$  est un homomorphisme.

$$g : \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{B} \quad u \rightarrow g(u) = x$$

Si  $B = \mathbb{R}$  ensemble des réels, l'échelle est dite numérique. En général, il existe plusieurs fonctions  $g$ . Si  $\phi \circ g$  est aussi un homomorphisme, avec  $\phi$  de  $B$  dans  $B$ , alors  $\phi \circ g$  est également une échelle.

$$\phi : \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{B} \quad x \rightarrow \phi(x) = \phi \circ g(u) = y$$

Dans le cadre du système d'indicateurs de performance, l'ensemble  $A$  s'identifie à l'ensemble des mesures, l'ensemble  $B$ , à l'ensemble des expressions de performance  $P$  et la fonction  $g$ , à l'opérateur de comparaison  $C_p$ .

**Exemple** : pour représenter deux quantités produites  $q_1$  et  $q_2$ , on dispose d'une échelle  $g$  en quantité  $q$ ,  $q \in \mathbb{N}$ , et d'une échelle  $\phi_\mu \circ g$  en masse  $\mu$ ,  $\mu$  en kg, sachant que chaque pièce à une même masse  $m$  et qu'elles sont stockées dans des caisses de masse  $m_0$ . Dans ce cas la fonction identité  $g$  est une échelle et la fonction affine  $\phi_\mu \circ g$  :

$$\begin{aligned} q &= g(q) = q & g & \text{est la fonction identité} \\ \mu &= \phi_\mu \circ g(q) = q * m + m_0 & \phi_\mu & \text{est une fonction affine} \end{aligned}$$

Parmi les échelles les plus utilisées, on trouve les échelles **ordinales** et les échelles **cardinales**. Les échelles **d'intervalle** et les échelles **de ratio** sont des échelles cardinales présentant des propriétés particulières.

### Annexe III-B : Propriétés des opérateurs d'agrégation (§ 2.4.2)

Cette annexe est basée principalement sur la publication [Grabisch 03a pp. 88-90].

#### Idempotence et unanimité pour les valeurs extrêmes

$$\begin{array}{ll} Ag(a, \dots, a) = a & \text{(idempotence)} \\ Ag(0, \dots, 0) = 0 & Ag(1, \dots, 1) = 1 \quad \text{(Unanimité pour les} \\ & \text{Valeurs Extrêmes U.V.E)} \end{array}$$

L'idempotence est une propriété plus forte que l'unanimité des valeurs extrêmes.

#### Continuité

$Ag$  est une fonction continue de  $p_1, \dots, p_i, \dots, p_n$

#### Monotonie

$$p'_i > p_i \Rightarrow Ag(p_1, \dots, p'_i, \dots, p_n) \geq Ag(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n)$$

#### Neutralité

$Ag(p_1, \dots, p_n) = Ag(p_{\sigma(1)}, \dots, p_{\sigma(n)})$ ,  $\forall \sigma \in S(N)$  où  $S(N)$  est l'ensemble des permutations circulaires de  $p(n)$ .

#### Compromis

$$\wedge p_i \leq Ag(p_1, \dots, p_n) \leq \vee p_i$$

où  $\wedge$  est l'opérateur « minimum » et  $\vee$  est l'opérateur « maximum »

#### Associativité

$$Ag^{(3)}(p_1, p_2, p_3) = Ag^{(2)}(Ag^{(2)}(p_1, p_2), p_3) = Ag^{(2)}(p_1, Ag^{(2)}(p_2, p_3)),$$

#### Stabilité pour les transformations ordinales (S.O.)

$Ag(f(p_1), \dots, f(p_n)) = f(Ag(p_1, \dots, p_n))$  où  $Ag$  est définie sur  $R$  et  $f$  une fonction strictement croissante de  $R$  dans  $R$ .

#### Cas particulier de la stabilité aux changements d'échelle linéaire (S.C.E.L.)

$$Ag(rp_1 + t, \dots, rp_n + t) = r(Ag(p_1, \dots, p_n)) + t$$

#### Stabilité comparative pour les transformations ordinales (S.C.O)

Les mêmes hypothèses que précédemment sont faites.

$$Ag(p_1, \dots, p_n) < Ag(p'_1, \dots, p'_n) \Rightarrow Ag(f(p'_1), \dots, f(p'_n)) < (Ag(f(p'_1), \dots, f(p'_n)))$$

Cette propriété est plus faible que la précédente.

### Annexe III-C : Les opérateurs d'agrégation (§ 2.4.2)

Seuls les opérateurs d'agrégation susceptibles d'être utilisés dans le cas de la performance industrielle sont présentés [Dubois 85, 86], [Grabisch 95, 03a].

Nous notons  $p(n)$  l'ensemble des expressions de performance à agréger,  $p(i)$  l'ensemble des  $i$  premières expressions de performance à agréger,  $Ag^{(n)}$  le résultat de l'agrégation de  $p(n)$  et  $Ag^{(i)}$  le résultat de l'agrégation de  $p(i)$ . Nous supposons que les expressions de performance sont définies sur l'intervalle  $[0,1]$ .

#### Opérateurs conjonctifs

Ces opérateurs donnent un résultat élevé quand les expressions de performance sont toutes élevées, ils correspondent au *et* logique. Autrement dit, il suffit d'une seule expression de performance « insuffisante » pour que l'expression de performance agrégée soit « insuffisante » elle aussi. Ces opérateurs vérifient la propriété :  $Ag(1, p) = p$

Les t-normes, notées T, sont des opérateurs conjonctifs qui présentent deux propriétés importantes :

- $T(0, p) = 0 \forall p \in [0,1]$ ,
- l'opérateur minimum, noté  $\wedge$ , est une t-norme avec pour propriété :  $T(p_1, p_2) \leq p_1 \wedge p_2$ .

#### Opérateurs disjonctifs

Ces opérateurs donnent un résultat élevé dès qu'une expression de performance est élevée, ils correspondent au *ou* logique. Ces opérateurs vérifient la propriété :  $Ag(0, p) = p$

En ajoutant à cette propriété, les propriétés de non-décroissance, de neutralité et d'associativité on obtient les t-conormes notées S. Les propriétés importantes des t-conormes sont :

- si  $S(p_1, p_2)$  est une t-conorme, alors  $T(p_1, p_2) = 1 - S(1-p_1, 1-p_2)$  est la t-norme dite duale,
- $S(1, p) = 1 \forall p \in [0,1]$ ,
- l'opérateur maximum, noté  $\vee$ , est une t-conorme avec pour propriété :  $S(p_1, p_2) \leq p_1 \vee p_2$ .

#### Opérateurs de compromis

Ces opérateurs donnent un résultat d'agrégation intermédiaire entre les opérateurs minimum et maximum. La famille des moyennes (arithmétique, arithmétique pondérée, quadratique, géométrique, harmonique) est la plus utilisée.

##### *Les opérateurs de moyenne*

La moyenne pondérée (*Weighted Arithmetic Mean WAM*) est le plus répandu des opérateurs utilisés dans le domaine du pilotage industriel. Il est intuitif et, comme tous les opérateurs de compromis, permet la compensation bien adaptée à l'approche du pilotage industriel.

$$Ag(p_1, \dots, p_n) = \sum_{i=1}^n w_i p_i$$

D'une façon générale, ces opérateurs de moyenne prennent la forme suivante :

$$Ag(p_1, \dots, p_n) = f^{-1} [w_1 f(p_1), \dots, w_n f(p_n)]$$

Où  $f$  est une fonction strictement croissante.

### Moyenne pondérée ordonnée (Ordered Weighted Average OWA)

Cet opérateur est introduit par R. Yager [Yager 88]. Les poids  $w_i$  des expressions de performance  $p_i$  sont attribués en fonction du rang de l'expression de performance  $p_i$ . Dans la contexte industriel, l'opérateur OWA permet de considérer en priorité les points forts (meilleures expressions de performance  $p_i$ ) ou au contraire les points faibles (moins bonnes expressions de performance  $p_i$ ).

$$Ag(p_1, \dots, p_n) = OWA_w(p_1, \dots, p_n) = \sum_{i=1}^n w_i p_{(i)}$$

où  $(p_{(1)}, \dots, p_{(n)})$  indique une permutation des indices telle que  $p_{(1)} \leq \dots \leq p_{(n)}$ .

### Exemple

Soient  $p_1 = 0.5, p_2 = 0.6, p_3 = 0.3, p_4 = 0.9, w_1 = 8/16, w_2 = 5/16, w_3 = 3/16, w_4 = 2/16$ .

Rangement des expressions de performance :  $p_{(1)} = 0.9, p_{(2)} = 0.6, p_{(3)} = 0.5, p_{(4)} = 0.3$

Agrégation des expressions de performance :

$$p^{ag} = \frac{0.9 \times 8 + 0.6 \times 5 + 0.5 \times 3 + 0.3 \times 2}{16} = 0,769.$$

### Intégrale de Choquet

Cet opérateur, de la famille des intégrales floues [Labreuche 03] [Marichal 04], englobe les opérateurs WAM et OWA. Soit  $\mu$  une mesure floue sur  $N$ . L'intégrale de Choquet de  $(p_1, \dots, p_n)$  par rapport à  $\mu$  est définie par :

$$Ag(p_1, \dots, p_n) = \sum_{i=1}^n (p_{(i)} - p_{(i-1)}) \mu(\{i, \dots, n\})$$

où  $\mu(\{i, \dots, n\})$  caractérise l'influence des  $(n-i)$  derniers critères ou coalition des  $(n-i)$  derniers critères sur la valeur agrégée, les critères étant rangés du plus important au moins important.

L'intégrale de Choquet est souvent restreinte à sa forme 2-additive. Dans ce cas, l'expression de performance agrégée est fonction :

- d'une part de chaque expression  $p_i$
- d'autre part de chaque différence entre deux expressions de performance différentes  $|p_i - p_j|$ ,

$$Ag(p_1, \dots, p_n) = \sum_{i=1}^n \phi_i p_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n I_{ij} |p_i - p_j| \quad i = 1 \text{ à } n, j = 1 \text{ à } n, i \neq j$$

$\phi_i$  est l'indice de Shapley, *i.e.* le poids d'importance relative de l'expression de performance  $p_i$  et dépend de toutes les coalitions où  $p_i$  intervient ; le coefficient de Shapley  $\phi_i$  est équivalent au poids  $w_i$  de la moyenne pondérée,

$I_{ij}$  est le coefficient d'interaction entre les expressions de performance  $p_i$  et  $p_j$ , *i.e.* l'interaction mutuelle entre les indicateurs  $IP_i$  et  $IP_j$ . Si l'expression de performance  $p_i$  est différente de l'expression de performance  $p_j$ , ce coefficient corrige l'expression de performance agrégée, il l'améliore si  $I_{ij} < 0$ , la dégrade dans le cas contraire si  $I_{ij} > 0$ , la laisse inchangée si  $I_{ij} = 0$ .

Dans le cas particulier où tous les  $I_{ij} = 0$ , on retrouve l'opérateur moyenne pondérée.

### Synthèse des propriétés des différents opérateurs

	Idempotence.	U.V.E.	Monotonie	Continuité	Stabilité	Compromis
Conjonctifs	Non	Oui	Non	Oui		Non
Disjonctifs	Non	Oui	Non	Oui		Non
MOYENNE PONDÉRÉE	Oui	Oui	Oui	Oui	SO.	Oui
OWA	Oui	Oui	Oui	Oui	SO.	Oui
Choquet 2 ad.	Oui	Oui	Oui	Oui	SO	Oui

Tableau 6 : Les propriétés des différents opérateurs

### Annexe III-D : Calculs complémentaires à MACBETH (§ 4.1.3)

Les données nécessaires à ces calculs proviennent de l'exemple relatif à l'objectif global de disponibilité fourni dans l'exemple du chapitre III § 4. Rappelons la matrice des intensités de préférence du pilote (fig. 25)

	good	Form.	Amél.	Réimpl.	neutral	Echelle courante
good	1	2	5	5	6	100.00
Form.		1	3	4	5	71.43
Amél.			1	1	2	28.57
Réimpl.				1	1	14.29
neutral					1	0.00

**Jugements constants**

Figure 25 : La matrice des intensités de préférence (objectif : opérateur)

Les intensités de préférence nuancées conduisent au système d'inéquations suivant :

$$\begin{cases}
 p_{\text{good}} = 1, p_{\text{neutral}} = 0 \text{ par hypothèse} \\
 k_2\alpha \leq 1 - p^{\text{Form.}} \leq k_3\alpha \\
 p_{\text{Amél.}} = k_5\alpha \\
 k_5\alpha \leq 1 - p^{\text{Réimpl.}} \leq k_6\alpha \\
 k_6\alpha \leq 1 \leq 6\alpha \\
 k_3\alpha \leq p^{\text{Form.}} - p^{\text{Amél.}} \leq k_4\alpha \\
 k_4\alpha \leq p^{\text{Form.}} - p^{\text{Réimpl.}} \leq k_5\alpha \\
 k_5\alpha \leq p^{\text{Form.}} \leq k_6\alpha \\
 k_1\alpha \leq p^{\text{Amél.}} - p^{\text{Réimpl.}} \leq k_2\alpha \\
 k_2\alpha \leq p^{\text{Amél.}} \leq k_3\alpha \\
 k_1\alpha \leq p^{\text{Réimpl.}} \leq k_2\alpha
 \end{cases}$$

et

$$0 \leq k_1 < k_2 < k_3 < k_4 < k_5 < k_6 \leq 6$$

Dans ce cas, une solution est :  $p^{\text{Form.}} = 5/7$        $p^{\text{Amél.}} = 2/7$        $p^{\text{Réimpl.}} = 1/7$  pour des valeurs  $k_1 = 0, k_2 = 1, k_3 = 2, k_4 = 3, k_5 = 4, k_6 = 5, k_7 = 6$

Dans le cas général, l'ensemble des solutions pour les expressions de performance est visualisé sur la figure 26. Les coefficients  $k_i$  peuvent prendre les valeurs indiquées sur la figure 26, MACBETH effectue un changement d'échelle pour que les expressions de performance soient exprimées sur l'intervalle  $[0,1]$ . Dans notre cas  $\alpha = 7$  et par exemple  $k_5 = \frac{2 \times 7}{3} \approx 4.66$ ,  $\frac{2 \times 7}{3} \approx 4.66 < k_6 < \frac{2 \times 7}{3} \approx 4.66$ . Si aucun coefficient ne peut varier, cela signifie que le moindre changement dans la matrice se traduira par une inconsistance, *i.e.* une contradiction entre jugements.



Figure 26 : Les valeurs possibles des coefficients  $k_i$

Si ce n'est pas le cas, le pilote pourra ajuster les expressions de performances dans certaines limites, comme le montre la figure 27, les autres expressions de performance étant automatiquement ajustées.

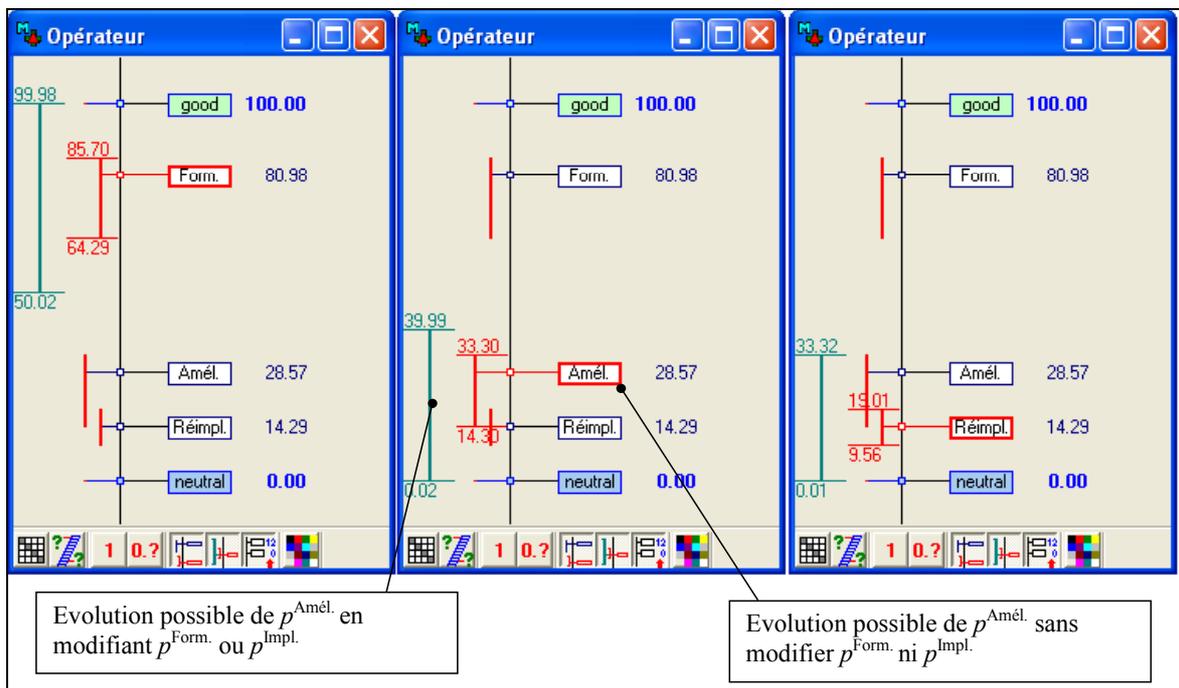


Figure 27 : Les intervalles de définition des différentes expressions de performance

### Annexe III-E : Calculs relatifs à la prise en compte de différents types de vecteurs d'expressions de performance (§ 5.1)

#### Détermination des poids $w_i$ dans le cas d'une information précise

Cas des vecteurs d'expressions de performance de type  $(0\dots, 0, 1, 0\dots, 0)$

Vecteurs d'expressions de performance		Etats fictifs				
		<i>all high</i>	[1]	[2]	[3]	<i>all low</i>
(1, 1, 1)	<i>all high</i>	0	$k_1$	P	P	P
(1, 0, 0)	[1]		0	$k_2$	P	P
(0, 1, 0)	[2]			0	$k_3$	P
(0, 0, 1)	[3]				0	$k_4$
(0, 0, 0)	<i>all low</i>					0

Tableau 7 : Exemple de matrice d'intensités de préférence (états fictifs MACBETH)

Système d'équations traduisant la matrice I :

$$k_3 (p^{\text{ag}_-1} - p^{\text{ag}_-2}) = k_2 (p^{\text{ag}_-2} - p^{\text{ag}_-3}) \Leftrightarrow k_3 (w_1 - w_2) = k_2 (w_2 - w_3)$$

$$k_4 (p^{\text{ag}_-2} - p^{\text{ag}_-3}) = k_3 (p^{\text{ag}_-3} - 0) \Leftrightarrow k_4 (w_2 - w_3) = k_3 w_3$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1$$

Mise en forme matricielle

$$\begin{bmatrix} k_3 & -k_2 - k_3 & k_2 \\ 0 & k_4 & -k_3 - k_4 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

#### Solutions

$$w_1 = (k_2 + k_3 + k_4) / (k_2 + 2k_3 + 3k_4)$$

$$w_2 = (k_3 + k_4) / (k_2 + 2k_3 + 3k_4)$$

$$w_3 = k_4 / (k_2 + 2k_3 + 3k_4)$$

Cas des vecteurs d'expressions de performance de type (1..., 1, 0, 1..., 1)

		Etats fictifs							
		<i>all high</i>	[3]	[2]	[1]	[1]	[2]	[3]	<i>all low</i>
(1, 1, 1)	<i>all high</i>	0	$q_1$	P	P	$k_1$	P	P	P
(1, 1, 0)	[3]		0	$q_2$	P	P	P	P	P
(1, 0, 1)	[2]			0	$q_3$	P	P	P	P
(0, 1, 1)	[1]				0	?	P	P	$q_4$
(1, 0, 0)	[1]					0	$k_2$	P	P
(0, 1, 0)	[2]						0	$k_3$	P
(0, 0, 1)	[3]							0	$k_4$

Tableau 8 : Exemple de matrice d'intensités de préférence (nouveaux états fictifs)

Système d'équations traduisant la matrice I :

$$\begin{aligned}
 q_3 (p^{ag_{-3}} - p^{ag_{-2}}) &= q_2 (p^{ag_{-2}} - p^{ag_{-1}}) && \Leftrightarrow q_3 (w_2 - w_3) = q_2 (w_1 - w_2) \\
 &&& \Leftrightarrow 0 = w_1 q_2 + w_2 (-q_2 - q_3) + w_3 q_3 \\
 q_4 (p^{ag_{-2}} - p^{ag_{-1}}) &= q_3 (p^{ag_{-1}} - 0) && \Leftrightarrow q_4 (w_1 - w_2) = q_3 (w_2 + w_3) \\
 &&& \Leftrightarrow 0 = -w_1 q_4 + w_2 (q_3 + q_4) + w_3 q_3 \\
 &&& 1 = w_1 + w_2 + w_3
 \end{aligned}$$

Mise en forme matricielle

$$\begin{bmatrix} q_2 & -q_2 - q_3 & q_3 \\ -q_4 & q_3 + q_4 & q_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Solutions

$\Delta = -q_3 (q_2 + 2q_3 + 3q_4)$ , ce qui donne si  $\Delta \neq 0$  :

$$w_1 = (q_2 + 2q_3 + q_4) / (q_2 + 2q_3 + 3q_4)$$

$$w_2 = (q_2 + q_4) / (q_2 + 2q_3 + 3q_4)$$

$$w_3 = (-q_2 + q_4) / (q_2 + 2q_3 + 3q_4)$$

### Détermination des poids $w_i$ dans le cas d'une information imprécise

Supposons qu'un pilote estime une intensité de préférence entre l'état [i] et l'état [j] « modérée », ce qui donne une différence entre les deux expressions de performance pondérée à  $k = 3$ , dans MACBETH. Son expertise limitée l'amène à exprimer cette différence de manière imprécise. Suivant que les vecteurs d'expressions de performance sont de type (0..., 0, 1, 0..., 0) ou (1..., 1, 0, 1..., 1), cette imprécision varie :

<sup>24</sup> On rappelle que la performance globale associée à un plan d'action qui permet d'atteindre tous les objectifs ( $p_j = 0 \forall j \neq i$ ) sauf un ( $p_i = 0$ ) est notée  $p^{ag_i}$ .

- elle est évaluée avec une imprécision d'1 niveau s'il s'agit d'un vecteur de type (0..., 0, 1, 0..., 0) ;  $k = 3 \Rightarrow k = 3 \pm 0.5$ ,
- elle est évaluée avec une imprécision d'1/2 niveau MACBETH s'il s'agit d'un vecteur de type (1..., 1, 0, 1..., 1) ;  $q = 3 \pm 0.25$ ,

La question est de savoir quelles sont les conséquences d'une erreur dans l'estimation des coefficients  $k_i$  sur les poids  $w_i$  et donc l'expression de performance agrégée  $p^{ag}$ , puis de mener cette même étude dans le cas des coefficients  $q_i$ . Pour établir cette relation entre les variations  $k_i$ , respectivement des  $q_i$ , et l'expression de performance agrégée  $p^{ag}$  nous utilisons la formule de Taylor.

Calcul de l'erreur sur  $p_{ag}$  : développement par la formule Taylor :

$$\text{Formule de Taylor : } \Delta f(\bar{k}) \cong \sum \frac{\partial f(k_i)}{\partial k_i} \cdot \Delta k_i$$

*Cas de vecteurs d'expressions de performance de type (0..., 0, 1, 0..., 0)*

$$\Delta p^{ag} = \Sigma (\partial p_{ag} / \partial k_i)$$

$$\begin{aligned} \Delta k_1 &= 1/(k_2 + 2k_3 + 3k_4)^2 [(k_2 + 2k_3 + 3k_4) p_1 - (k_2 p_1 + k_3 (p_1 + p_2) + k_4 (p_1 + p_2 + p_3))] \Delta k_2 + [(k_2 + 2k_3 + 3k_4) (p_1 + p_2) - 2 (k_2 p_1 + k_3 (p_1 + p_2) + k_4 (p_1 + p_2 + p_3))] \Delta k_3 + [(p_1 + p_2 + p_3) (k_2 + 2k_3 + 3k_4) - 3(k_2 p_1 + k_3 (p_1 + p_2) + k_4 (p_1 + p_2 + p_3))] \Delta k_4 \\ &= [(-k_2 p_2 + k_3 (p_1 - p_2) + k_4 (2p_1 - p_2 - p_3)) \Delta k_2 + (k_2 (-p_1 + p_2) + k_4 (p_1 + p_2 - 2p_3)) \Delta k_3 + [(k_2 (-2p_1 + p_2 + p_3) + k_3 (-p_1 + -p_2 + 2p_3)) \Delta k_4] / (k_2 + 2k_3 + 3k_4)^2 \end{aligned}$$

*Cas des vecteurs d'expressions de performance de type (1..., 1, 0, 1..., 1)*

$$p^{ag} = w_1 p_1 + w_2 p_2 + w_3 p_3 = (q_2 + 2q_3 + q_4) p_1 + (q_2 + q_4) p_2 + (-q_2 + q_4) p_3 / (q_2 + 2q_3 + 3q_4)$$

$$p_{ag} = q_2 (p_1 + p_2 - p_3) + q_3 (2p_1) + q_4 (p_1 + p_2 + p_3) / (q_2 + 2q_3 + 3q_4).$$

Calcul de l'erreur sur  $p_{ag}$  :

$$\Delta p^{ag} = \Sigma (\partial p_{ag} / \partial q_i)$$

$$\begin{aligned} \Delta q_1 &= 1/(q_2 + 2q_3 + 3q_4)^2 [[(q_2 + 2q_3 + 3q_4)(p_1 + p_2 - p_3) - (q_2 (p_1 + p_2 - p_3) + q_3 (2p_1) + q_4 (p_1 + p_2 + p_3))] \Delta q_2 + [(2p_1)(q_2 + 2q_3 + 3q_4) - 2 (q_2 (p_1 + p_2 - p_3) + q_3 (2p_1) + q_4 (p_1 + p_2 + p_3))] \Delta q_3 + [(p_1 + p_2 + p_3) (q_2 + 2q_3 + 3q_4) - 3(q_2 (p_1 + p_2 - p_3) + q_4 (p_1 + p_2 + p_3))] \Delta q_4 \\ &= [(q_3 (2p_2 - 2p_3) + q_4 (2p_1 + 2p_2 - 4p_3)) \Delta q_2 + (q_2 (-2p_2 + 2p_3) + q_3 (-2p_1) + q_4 (4p_1 - 2p_2 - 2p_3)) \Delta q_3 + [(q_2 (-2p_1 - 2p_2 + 4p_3) + q_3 (2p_2 + 2p_3)) \Delta q_4] / (q_2 + 2q_3 + 3q_4)^2 \end{aligned}$$

### Exemple

Pour des vecteurs d'expressions de performance de type (0..., 0, 1, 0..., 0) Dans le cas particulier où  $\Delta k_1 = \Delta k_2 = \Delta k_3 = \Delta k$

$$\Delta p^{ag} = \Delta k [k_2 (-3p_1 + 2p_2 + p_3) + k_3 (+2p_2 + 2p_3) + k_4 (3p_1 + 3p_3)] / (k_2 + 2k_3 + 3k_4)^2$$

Pour les valeurs,  $\Delta k = 1$ ,  $k_3 = 1 \pm 0.5$ ,  $k_2 = k_4 = 2 \pm 0.5$  et  $p_1 = p_2 = p_3 = 0.8$ , on aboutit à :

$$\Delta p^{ag} = 0.5 [3.2 + 2 (4.8)] / 100 = 6.4\%$$

Effectuons le même raisonnement pour des vecteurs d'expressions de performance de type  $(1, \dots, 1, 0, 1, \dots, 1)$ .

Dans le cas particulier où  $\Delta q_2 = \Delta q_3 = \Delta q_4 = \Delta q$

$$\Delta p^{ag} = \Delta q [q_2 (-2p_1 - 4p_2 + 2p_3) + q_3 (2p_1 + 2p_2 + 2p_3) + q_4 (6p_1 - 6p_3)] / (q_2 + 2q_3 + 3q_4)^2$$

Pour les valeurs,  $\Delta q = 0.25$ ,  $q_2 = 1 \pm 0.25$ ,  $q_3 = 2 \pm 0.25$ ,  $q_4 = 5 \pm 0.25$ ,  $p_1 = p_2 = p_3 = 0.8$ , on aboutit à :

$$\Delta p^{ag} = 0.25 [6.4] / 400 = 0.4\%$$

Plus généralement, on peut également, pour une imprécision donnée sur l'expression de performance agrégée  $\Delta p^{ag}$ , déterminer l'imprécision sur les coefficients  $\{\Delta q_i\}, \{\Delta k_i\}$ . En inversant la matrice qui lie les  $w_i$  aux  $q_i$ , on obtient  $q_i$  en fonction de  $w_i$ . Ce système étant dépendant, il faut fixer une valeur, celle de  $q_3$  par exemple, et en déduire les deux autres.

$$\begin{cases} q_2 = q_3 (w_2 - w_3) / (w_1 - w_2) \\ q_4 = q_3 (w_2 + w_3) / (w_1 - w_2) \end{cases}$$

Sachant que  $w_i$  est fonction de  $k_i$ , il est possible d'écrire  $q_i$  en fonction de  $k_i$  et de comparer les évolutions respectives de  $q_i$  et  $k_i$ .

$$\begin{cases} q_2 = ((k_3 + k_4) - k_4) / ((k_2 + k_3 + k_4) - (k_3 + k_4)) q_3 = k_3 / k_2 q_3 \\ q_4 = (k_3 + k_4) + k_4 / ((k_2 + k_3 + k_4) - (k_3 + k_4)) q_3 = (k_3 + 2k_4) / k_2 q_3 \end{cases}$$

En posant  $q_3 = k_2$  (il est logique de considérer que la différence entre  $w_1 + w_2$  et  $w_2 + w_3$ ) est la même que celle entre  $w_1$  et  $w_3$ . On obtient alors :

$$\begin{cases} q_2 = k_3 \\ q_3 = k_2 \\ q_4 = (k_3 + 2k_4) \end{cases}$$

On peut alors montrer que pour une erreur donnée  $(\Delta q_2, \Delta q_3, \Delta q_4)$ , correspond une erreur  $(\Delta k_2, \Delta k_3, \Delta k_4)$  où :  $\Delta q_2 = \Delta k_3$ ,  $\Delta q_3 = \Delta k_2$ , et  $\Delta q_4 = \Delta k_3 + 2\Delta k_4$ .

En conséquence pour obtenir la même imprécision  $\Delta p^{ag}$  correspondant à  $\Delta q_2 = \Delta q_3 = \Delta q_4 = 0.25$ , il faut que par exemple  $\Delta k_2 = 0.25$ ,  $\Delta k_3 = 0.25$ ,  $\Delta k_4 = 0$ . On en déduit donc que pour obtenir une même précision sur l'expression de performance agrégée  $\Delta p^{ag}$ , il faut être plus précis sur les coefficients de comparaison  $k_i$  que sur les coefficients de comparaison  $q_i$ . *Cas des vecteurs d'expression de performance de type  $(0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$*

$$p^{ag} = w_1 p_1 + w_2 p_2 + w_3 p_3 = \frac{[(k_2 + k_3 + k_4) p_1 + (k_3 + k_4) p_2 + k_4 p_3]}{(k_2 + 2k_3 + 3k_4)}$$

$$p^{ag} = \frac{k_2 p_1 + k_3 (p_1 + p_2) + k_4 (p_1 + p_2 + p_3)}{(k_2 + 2k_3 + 3k_4)}$$

## Annexe III-F : Calculs relatifs à la détermination des coefficients de l'intégrale de Choquet (§ 5.2.2)

### Proposition

En conservant les conventions du paragraphe 3, on peut écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_2 (1 - p^{\text{ag}_-1}) = k_1 (p^{\text{ag}_-1} - p^{\text{ag}_-2}) \Leftrightarrow k_2(1 - \phi_1 + \frac{1}{2}(I_{12} + I_{13})) = k_1(\phi_1 - \phi_2 - \frac{1}{2}(I_{13} - I_{23})) \\ k_3 (p^{\text{ag}_-1} - p^{\text{ag}_-2}) = k_2 (p^{\text{ag}_-2} - p^{\text{ag}_-3}) \Leftrightarrow k_3(\phi_1 - \phi_2 - \frac{1}{2}(I_{13} - I_{23})) = k_2(\phi_2 - \phi_3 - \frac{1}{2}(I_{12} - I_{13})) \\ k_4 (p^{\text{ag}_-2} - p^{\text{ag}_-3}) = k_3 (p^{\text{ag}_-3} - 0) \Leftrightarrow k_4 (\phi_2 - \phi_3 - \frac{1}{2}(I_{12} - I_{13})) = k_3(\phi_3 - \frac{1}{2}(I_{13} + I_{23})) \\ q_2 (1 - p^{\text{ag}_+}) = q_1 (p^{\text{ag}_+} - p^{\text{ag}_+}) \Leftrightarrow q_2 (\phi_2 + \phi_3 - \frac{1}{2}(I_{12} + I_{13})) = q_1(\phi_1 - \phi_2 - \frac{1}{2}(I_{23} - I_{13})) \\ q_3 (p^{\text{ag}_+} - p^{\text{ag}_+}) = q_2 (p^{\text{ag}_+} - p^{\text{ag}_+}) \Leftrightarrow q_3 (\phi_1 - \phi_2 - \frac{1}{2}(I_{23} - I_{13})) = q_2(\phi_2 - \phi_3 - \frac{1}{2}(I_{13} - I_{12})) \\ q_4 (p^{\text{ag}_+} - p^{\text{ag}_+}) = q_3 (p^{\text{ag}_+} - 0) \Leftrightarrow q_4 (\phi_2 - \phi_3 - \frac{1}{2}(I_{13} - I_{12})) = q_3 (\phi_1 + \phi_2 - \frac{1}{2}(I_{13} + I_{23})) \end{array} \right.$$

Sachant que  $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$ , nous pouvons remplacer n'importe laquelle de ces équations par cette relation sur les indices de Shapley, la dernière par exemple. Réorganisons ces égalités pour un traitement matriciel.

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_1(-k_1 - k_2) + \phi_2(k_1) + \frac{1}{2}[I_{12}(k_2) + I_{13}(k_2 + k_3) + I_{23}(k_1)] = -k_2 \\ \phi_1(k_3) + \phi_2(-k_2 - k_3) + \phi_3(-k_2) + \frac{1}{2}[I_{12}(k_2) + I_{13}(-k_2 - k_3) + I_{23}(k_3)] = 0 \\ \phi_2(k_4) + \phi_3(-k_3 - k_4) + \frac{1}{2}[I_{12}(-k_4) + I_{13}(k_3 + k_4) + I_{23}(k_3)] = 0 \\ \phi_1(q_1) + \phi_2(q_1 + q_2) + \phi_3(q_2) + \frac{1}{2}[I_{12}(-q_2) + I_{13}(-q_1 - q_2) + I_{23}(-q_1)] = 0 \\ \phi_1(q_3) + \phi_2(-q_2 - q_3) + \phi_3(q_2) + \frac{1}{2}[I_{12}(-q_2) + I_{13}(q_3 + q_2) + I_{23}(-q_3)] = 0 \\ \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1 \end{array} \right.$$

Un tel système admet des solutions si son déterminant est  $\neq 0$ .

Illustrons ce cas par un cas particulier où une interaction mutuelle est importante, les autres étant négligeables ( $I_{13} = I_{23} \approx 0$ ). On ne retient que quatre équations, le système prend alors la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_1(-k_1 - k_2) + \phi_2(k_1) + \frac{1}{2}I_{12}(k_2) = -k_2 \\ \phi_2(k_4) + \phi_3(-k_3 - k_4) + \frac{1}{2}I_{12}(-k_4) = 0 \\ \phi_1(q_1) + \phi_2(q_1 + q_2) + \phi_3(q_2) + \frac{1}{2}I_{12}(-q_2) = 0 \\ \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1 \end{array} \right.$$

$$\Delta = k_2 [q_1(k_3 + 2k_4) - (k_4 q_2 + (k_3 + k_4)(q_1 + q_2))] - (k_1 - k_2)[q_2 k_4 + (q_1 + q_2)(k_3 + k_4) - q_1 k_1(k_4 + k_3)]$$

### Exemple

Reprenons les préférences et intensités de préférence exprimées dans le tableau 12 concernant un objectif de *disponibilité*. On rappelle que la performance agrégée associée à un état fictif, [CO] par exemple, est notée  $p^{\text{ag}_-CO}$ .

$$\left\{ \begin{array}{ll} p_{\text{all low}} = 0 & p_{\text{all high}} = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 = 1 \text{ par hypothèse.} \\ p^{\text{ag\_CO}} - p^{\text{ag\_Op}} = p^{\text{ag\_Op}} - p^{\text{ag\_St}} & \Leftrightarrow \phi_1 - \phi_2 = \phi_2 - \frac{1}{2} I_{12} - \phi_3 \\ p^{\text{ag\_Op}} - p^{\text{ag\_St}} = 2(p^{\text{ag\_St}} - p^{\text{ag\_Pa}}) & \Leftrightarrow \phi_2 - \frac{1}{2} I_{12} - \phi_3 = 2(\phi_3 - \phi_4) \\ (p^{\text{ag\_St}} - p^{\text{ag\_Pa}}) = p^{\text{ag\_Pa}} & \Leftrightarrow \phi_3 - \phi_4 = \phi_4 \\ 1 - p^{\text{ag\_Op}} = 2(p^{\text{ag\_Op}} - p^{\text{ag\_Pa}}) & \Leftrightarrow 1 - \phi_1 - \phi_2 - \phi_4 + \frac{1}{2} I_{12} = 2(\phi_1 - \phi_2) \end{array} \right.$$

Sous forme matricielle nous obtenons le système :

$$\left\{ \begin{array}{llll} \phi_1 - & 2\phi_2 + & \phi_3 + & \frac{1}{2} I_{12} = 0 \\ & \phi_2 - & 3\phi_3 + & 2\phi_4 - \frac{1}{2} I_{12} = 0 \\ & & \phi_3 - & 2\phi_4 = 0 \\ 3\phi_1 - & \phi_2 & & \phi_4 - \frac{1}{2} I_{12} = 1 \\ \phi_1 + & \phi_2 + & \phi_3 + & \phi_4 = 1 \end{array} \right.$$

La solution d'un tel système est :  $\phi_1 = 8/17$ ,  $\phi_2 = 6/17$ ,  $\phi_3 = 2/17$ ,  $\phi_4 = 1/17$ ,  $I_{12} = 4/17$

La figure 28 illustre l'écart obtenu entre l'expression de performance agrégée  $p^{\text{ag}}$  obtenue grâce à l'opérateur moyenne pondérée et l'intégrale de Choquet 2-additive pour quelques valeurs des expressions de performance.

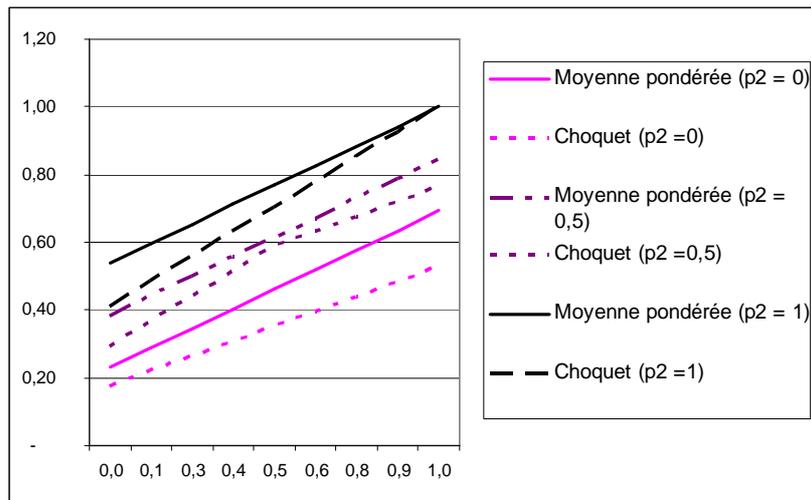


Figure 28 : Comparaison entre les opérateurs - moyenne pondérée - et - intégrale de Choquet 2-additive -

### Annexe III-G : Calculs relatifs à l'erreur due à l'approximation de l'intégrale de Choquet 2-additive par la moyenne pondérée, (§ 5.2.2)

Dans cette annexe, nous envisageons les conséquences du maintien de la moyenne pondérée sachant les interactions mutuelles entre les indicateurs de performance. Nous proposons tout d'abord de calculer les conséquences sur l'expression de performance agrégée  $p^{ag}$  avant de tenter de les minimiser.

#### Présentation

Nous poursuivons le traitement de l'exemple du chapitre III. Le pilote a identifié une interaction mutuelle entre les indicateurs relatifs au *Changement d'outils* et à l'*Opérateur*. (Chapitre III. § 4.2.1). Cette interaction est notée  $I_{CO-OP}$ . Elle est estimée à 0.2. Dans ce cas :

$$\text{si } p_{CO} = p_{OP} \text{ alors } I_{CO-OP} |p_{CO} - p_{OP}| = 0$$

$$\text{si } p_{CO} \neq p_{OP} \text{ alors } I_{CO-OP} |p_{CO} - p_{OP}| = 0,1 \times |p_{CO} - p_{OP}|$$

Le poids des différentes expressions de performances est fixé comme suit :  $w_{CO} = 5/13$  ;  $w_{OP} = 5/13$  ;  $w_{St} = 2/13$  ;  $w_{Pa} = 1/13$ ). En supposant  $\phi_i = w_i$ , la comparaison des deux états donne les performances agrégées suivantes :

$$p_{CO} = 0.5, p_{OP} = 0.5, p_{St} = 0.5, p_{Pa} = 0.5 \quad p^{ag} = 0.5 \quad (\text{état 1})$$

$$p_{CO} = 0.3, p_{OP} = 0.8, p_{St} = 0.5, p_{Pa} = 0.5 \quad p^{ag} = 0.5 - 0,1 \times 0.5 = 0,45 \quad (\text{état 2})$$

Cette différence d'expression de performance agrégée correspond aux préférences du pilote qui préfère l'état 1 à l'état 2. Elle est par ailleurs comprise entre le *min* et le *max*. Il est possible de quantifier cette erreur dans le cas où l'opérateur utilisé demeure la moyenne pondérée.

#### Quantification de l'erreur due à la moyenne pondérée

Les calculs sont lourds et conduisent à des expressions volumineuses. Les principes d'une telle quantification sont donc posés dans un cas particulier, qui peut être étendu au cas général. Soit une situation où l'expression de performance globale dépend de trois variables  $v_1, v_2, v_3$  et peut être obtenue grâce à une intégrale de Choquet dépendant de six paramètres :  $(\phi_1 \phi_2 \phi_3 I_{12} I_{13} I_{23})$

$$p^{ag} = \phi_1 p_1 + \phi_2 p_2 + \phi_3 p_3 - \frac{1}{2} [I_{12} |p_1 - p_2| + I_{13} |p_1 - p_3| + I_{23} |p_2 - p_3|]$$

MACBETH modélise l'expression de performance globale par la moyenne pondérée, notée  $\pi^{ag}$  pour la distinguer de celle obtenue par l'intégrale de Choquet, ce qui donne :

$$\pi^{ag} = w_1 p_1 + w_2 p_2 + w_3 p_3$$

Il a été démontré que la meilleure approximation, au sens de la distance euclidienne, de l'intégrale de Choquet par la moyenne pondérée est obtenue pour  $w_i = \phi_i$ . [Marichal 99] :

$$\pi^{ag} = \phi_1 p_1 + \phi_2 p_2 + \phi_3 p_3$$

L'erreur commise est donc  $p^{ag} - \pi^{ag} = - \frac{1}{2} [I_{12} |p_1 - p_2| + I_{13} |p_1 - p_3| + I_{23} |p_2 - p_3|]$ . Elle est nulle quand  $p_1 = p_2 = p_3$  et prend des valeurs particulières pour des vecteurs d'expressions de

performance de type (1, 0, 0) utilisés par MACBETH afin de déterminer les poids  $w_i$ . Considérons le vecteur (1, 0, 0). Dans MACBETH, on peut calculer :

$$\pi^{\text{ag}} = w_1.$$

En réalité, selon le modèle de l'intégrale de Choquet :

$$p^{\text{ag}} = \phi_1^{-1/2} [I_{12} + I_{13}]$$

L'erreur faite sur  $w_1$  par rapport à la meilleure détermination de la moyenne pondérée est donc de  $-1/2 [I_{12} + I_{13}]$ .

### Exemple

Soit une situation où l'agrégation des expressions de performance est bien modélisée par l'intégrale de Choquet suivante :

$$p^{\text{ag}} = 0.5p_1 + 0.3p_2 + 0.2p_3 - 1/2 (0.2|p_1-p_2| + 0.1|p_1-p_3| - 0.4|p_2-p_3|).$$

La méthode MACBETH conduit à identifier les poids de l'opérateur moyenne pondérée qui ne correspond pas à la meilleure approximation. Prenons des quelques vecteurs d'expressions de performance utilisés dans MACBETH :

$$\text{Vecteur (1, 0, 0) : } p^{\text{ag}} = 0.5^{-1/2} [0.2 + 0.1] = 0.35 = w_1 \quad (w_1 \neq \phi_1 = 0.5)$$

$$\text{Vecteur (0, 1, 0) : } p^{\text{ag}} = 0.3^{-1/2} [0.2 - 0.4] = 0.4 = w_2 \quad (w_2 \neq \phi_2 = 0.3)$$

$$\text{Vecteur (0, 0, 1) : } p^{\text{ag}} = 0.2^{-1/2} [0.1 - 0.4] = 0.35 = w_3 \quad (w_3 \neq \phi_3 = 0.2)$$

On constate que  $\sum w_i \neq 1$  et que les poids  $w_i$  diffèrent sensiblement des indices de Shapley  $\phi_i$ . Le problème de la somme des poids trouve une solution dans un changement d'échelle qui conserve les ratios entre les poids. Ce changement d'échelle ne permet cependant pas de réduire la différence entre  $w_i$  et  $\phi_i$ .

### Minimisation de l'erreur due à l'utilisation de la moyenne pondérée

Est-il alors possible de choisir des vecteurs d'expressions de performance (a, b, c) où a, b, et c sont les expressions de performance obtenues sur les trois indicateurs telles que cette erreur soit nulle ou minimale ?

$$p_{\text{ag}} = \phi_1 a + \phi_2 b + \phi_3 c - 1/2 (I_{12}|a-b| + I_{13}|a-c| + I_{23}|b-c|) = \pi_{\text{ag}} \text{ si } (I_{12}|a-b| + I_{13}|a-c| + I_{23}|b-c|) = 0.$$

Aucune relation entre a, b et c ne permet de respecter cette condition dans le cas général. Il n'y a donc pas de vecteur d'expressions de performance qui permette d'obtenir des poids  $w_i$  égaux aux indices de Shapley  $\phi_i$  dans le cas général. Mais en général certains indices  $I_{ij}$  sont nuls. Pour simplifier les calculs, prenons les cas particuliers où un, voire deux indices sont nuls.

Nous posons  $a \geq b \geq c$ <sup>25</sup>. Si  $I_{23} = 0$ , et il faut alors que :

$$[I_{12}|a-b| + I_{13}|a-c|] = 0 \Leftrightarrow a(I_{12} + I_{13}) = bI_{12} + cI_{13} \Leftrightarrow a = (bI_{12} + cI_{13}) / (I_{12} + I_{13}) \text{ si } I_{12} \neq -I_{13}.$$

<sup>25</sup> Si d'autres ordres sont envisagés, il faut tenir compte du signe de (a-b), (b-c) et (a-c) pour développer les valeurs absolues.

Dans ce cas, il existe donc une infinité de vecteurs d'expressions de performance de type  $\left(\frac{[bI_{12}+cI_{13}]}{I_{12}+I_{13}}, b, c\right)$ , dès que la condition  $I_{12} \neq -I_{13}$  est respectée. Mais il faut connaître les valeurs de  $I_{12}$  et  $I_{13}$  pour déterminer  $a$ , ce qui est exclus puisque c'est la moyenne pondérée qui a été retenue.

### Quantification de l'erreur lorsque $I_{13} = I_{23} = 0$

Il est possible de calculer l'erreur commise en utilisant l'opérateur moyenne pondérée au lieu de l'intégrale de Choquet 2-additive. Si  $I_{13} = I_{23} = 0$ , il faut alors que  $[I_{12}|a-b|] = 0 \Leftrightarrow a = b$  pour que l'erreur commise soit nulle.

Il existe donc une infinité de solutions de type  $(a, a, c)$  et en particulier  $(a, a, 0)$ ,  $(1, 1, 0)$  ou  $(a, a, 1)$ . Mais l'emploi de tels vecteurs d'expressions de performance conduit à un système d'équations dépendantes, où il est alors impossible de discriminer entre les poids  $w_1$  et  $w_2$ . On complète donc par un troisième vecteur d'expressions de performance  $(a, b, 0)$ , avec comme contrainte  $a \neq b$ .

### Exemple

$$p^{ag} = a \phi_1 + b \phi_2 + c \phi_3 - \frac{1}{2} [I_{12}|a-b|]$$

$$\text{Vecteur } (1, 1, 1) : p^{ag} = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = w_1 + w_2 + w_3 = 1$$

$$\text{Vecteur } (1, 1, 0) : p^{ag} = \phi_1 + \phi_2 = w_1 + w_2$$

$$\text{Vecteur } (a, b, 0) : p^{ag} = a \phi_1 + b \phi_2 - \frac{1}{2} [I_{12}|a-b|] = aw_1 + bw_2$$

On peut alors établir la valeur de  $w_1, w_2, w_3$  en fonction de  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, I_{12}$

$$w_1 = \phi_1 - \frac{1}{2} b I_{12} \text{ si } a > b,$$

$$w_1 = \phi_2 + \frac{1}{2} b I_{12} \text{ si } a < b$$

$$w_2 = \phi_2 + \frac{1}{2} a I_{12} \text{ si } a > b,$$

$$w_2 = \phi_2 - \frac{1}{2} a I_{12} \text{ si } a < b$$

$$w_3 = \phi_3$$

### Application numérique

$$\phi_1 = 0.5, \phi_2 = 0.3, \phi_3 = 0.2, I_{12} = 0.2, a = 0.75, b = 0.25$$

$$w_1 = 0.5 - 0.5 \times 0.25 \times 0.2 = 0.475$$

$$w_2 = 0.3 - 0.5 \times 0.75 \times 0.2 = 0.375$$

$$w_3 = 0.2$$

On peut éventuellement corriger ces poids pour obtenir  $\sum w_i = 1$ , ici l'écart est négligeable ( $\sum w_i = 1,05$ ). Pour vérifier la condition  $w'_1 + w'_2 + w_3 = 1$ , on prendra dans ce cas :

$$w'_1 = \frac{w_1 \times (1 - w_3)}{w_1 + w_2} = 0.45$$

$$w'_2 = \frac{w_2 \times (1 - w_3)}{w_1 + w_2} = 0.35$$

$$w_3 = 0.2$$

La conséquence de cette erreur est que l'expression de performance agrégée selon les deux opérateurs est différente dans des proportions que l'on peut constater sur la figure 29.

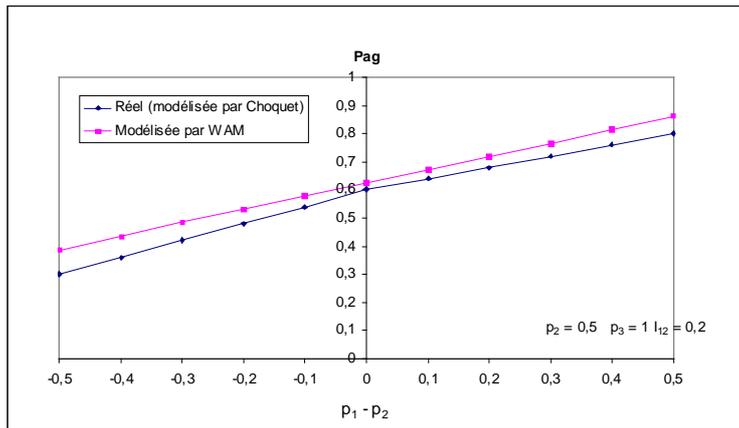


Figure 29 : Evolution de  $p^{ag}$  en fonction de  $(p_1 - p_2)$

### Conclusion

Suite aux calculs précédents, nous concluons que si l'écart entre les expressions de performance est faible, l'approximation est satisfaisante, les poids  $w_i$  sont très proches des coefficients de Shapley  $\phi_i$ . La meilleure approximation est réalisée par la comparaison des trois vecteurs d'expressions de performance suivants :

$$(1, 1, 1) ; (1, 1, 0) ; (a, b, 0) \text{ avec } a \neq b$$

La méthode MACBETH<sup>26</sup>, qui permet de comparer de tels vecteurs d'expressions de performance, reste donc pertinente sous réserve que :

- le pilote soit capable d'imaginer un état ayant un vecteur d'expressions de performance associé de type  $(a, b, 0)$  ; l'idéal est que cet état soit obtenu suite à la mise en œuvre d'une action réelle connue ce qui est envisageable dans la phase d'exploitation du système d'indicateurs en particulier,
- il n'y ait qu'un coefficient  $I_{12}$  non nul ( $I_{13} = I_{23} = 0$ ), et que celui reste faible,
- les expressions de performance concernées  $(p_1, p_2)$  soient proches.

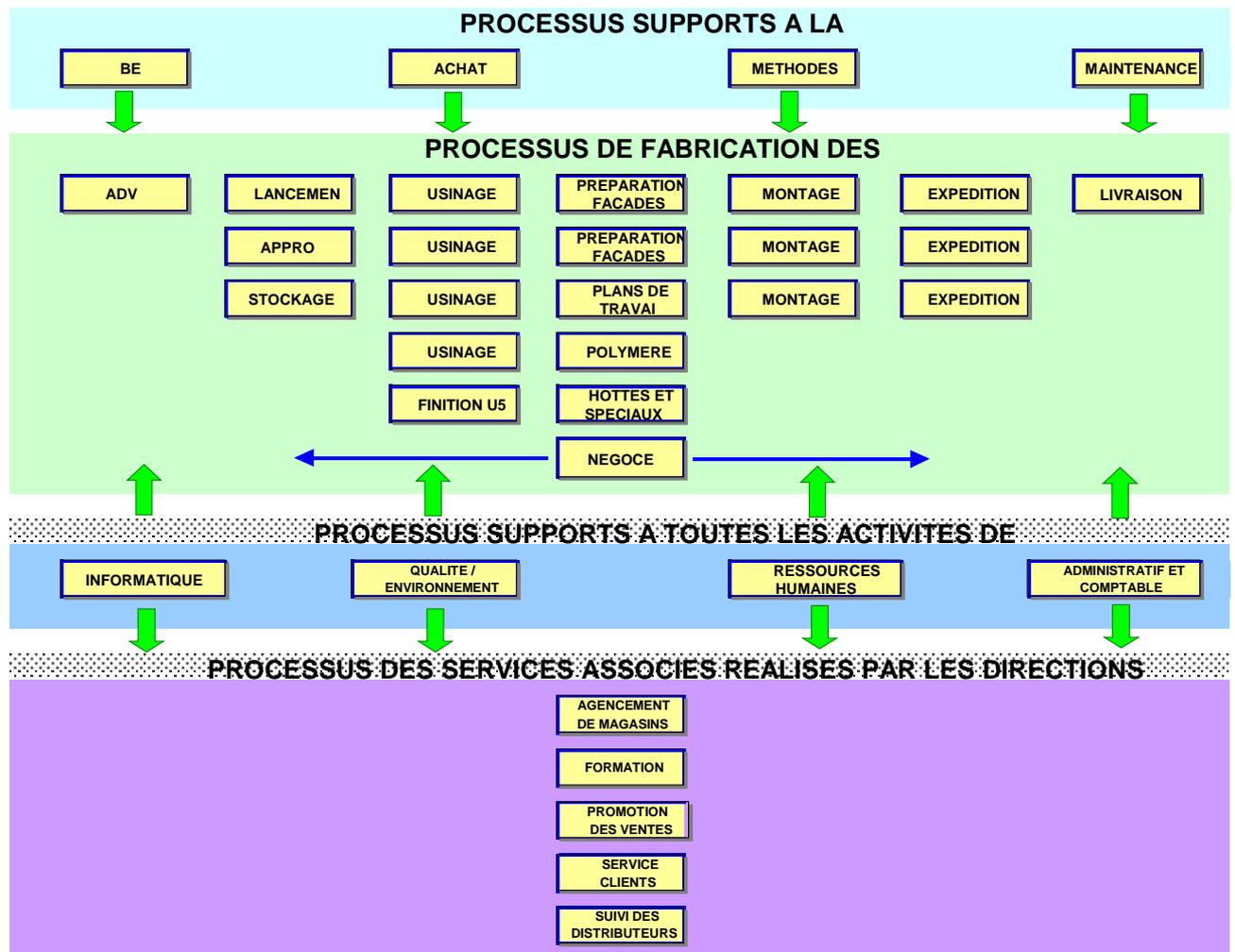
Mais si l'écart entre les expressions de performance est important, l'expression de performance agrégée, obtenue par la moyenne pondérée, devient sensiblement différente de celle obtenue grâce à l'intégrale de Choquet 2-additive. L'approximation risque alors de conduire le pilote à des interprétations erronées.

<sup>26</sup> Cependant, dans la configuration actuelle du logiciel M-MACBETH, ce type d'état fictif ne peut être simulé pour déterminer les poids  $(w_1, w_2, w_3)$ .

## Annexe du chapitre IV

Cette annexe regroupe les documents provenant de la Société Fournier qui ont permis d'illustrer cette application, ainsi que des documents réalisés dans le cadre de cette application. On y trouve également les calculs relatifs à certains développements de MACBETH spécifiques à cette application.

### Annexe IV-A : Cartographie des processus de la Société Fournier (§ 2.2)



*Document Fournier*

Processus non représentés sur la cartographie

Processus amonts « écoute clients » : Etudes de marché, Conception et développement

Processus avals « clients » : Mesure satisfaction clients

## **Annexe IV-B : Guide pour l'élaboration des indicateurs, *inspiré de la norme FDX 50-171 (§ 3.1.1)***

### ***Intituler l'indicateur***

*Donner un titre à l'indicateur*

### ***Définir le champ de la mesure***

*Sur quoi veut-on faire porter la mesure ? Exemple : le traitement des commandes*

### ***Déterminer les objectifs***

*Que cherche-t-on à atteindre ? Exemple : livrer les commandes dans les délais*

### ***Identifier les données existantes***

*Sur quelles données existantes peut-on s'appuyer ? Exemple : les commandes, listings*

### ***Composer l'indicateur***

*Comment peut-on utiliser les données existantes en chiffres ? Exemple : nombre de commandes livrées dans les délais / nombre de commandes, nombre de commandes traitées / nombre de commandes reçues*

### ***Définir le mode de représentation des indicateurs***

*Exemple : un taux, un dénombrement, un ratio, un Pareto, un histogramme ...*

*La représentation d'indicateurs doit être appropriée à la population concernée*

### ***Définir, si nécessaire, un seuil***

*Représenter l'objectif à atteindre sur l'indicateur*

### ***Définir le fonctionnement***

*Collecte des données (responsable, origine, lieu...)*

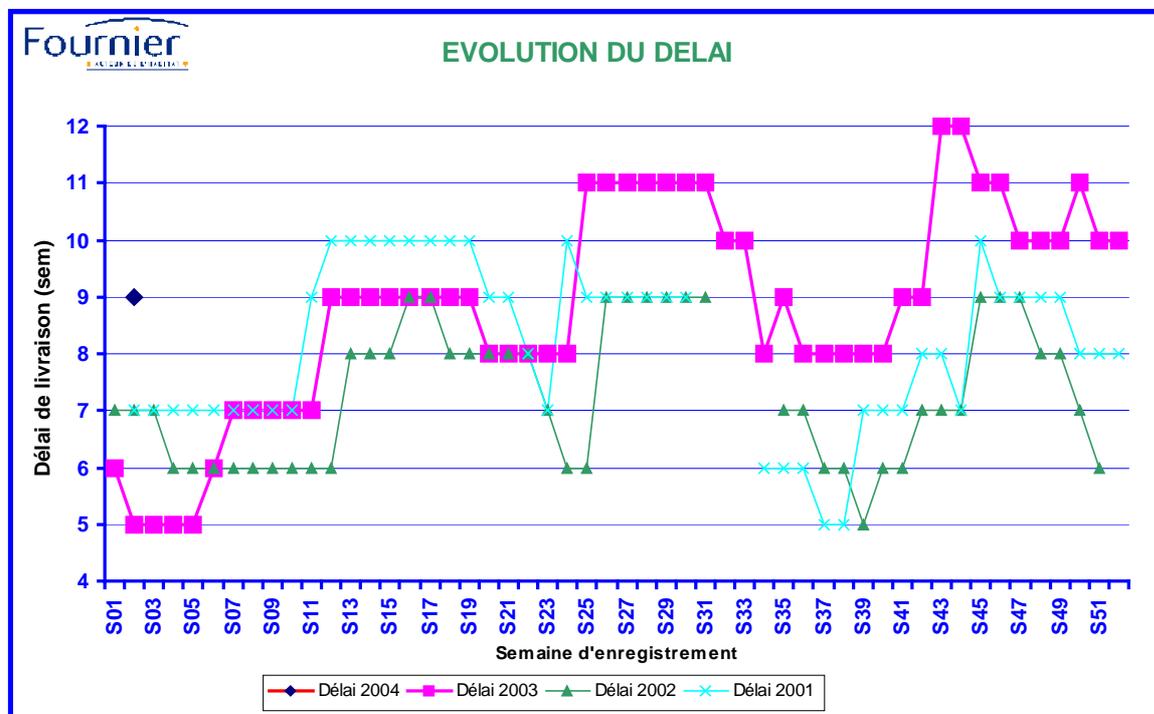
*Fréquence d'élaboration de l'indicateur (Déterminer la fréquence : mensuelle, trimestrielle, annuelle)*

*Destinataire des indicateurs (Préciser les destinataires, nom, service, panneau d'affichage ...)*

### ***Exploitation de l'indicateur***

*Définir la démarche d'exploitation de l'indicateur : quand sera-t-il analysé ? A quelle occasion ? Par qui et à qui les résultats sont expliqués et commentés ?*

Annexe IV-C : L'indicateur Délai Commercial (§ 3.1.1)



Document Fournier

Annexe IV-D : Interview du Directeur des Achats (§ 3.2.2)

Fournier ACTEUR DE L'HABITAT		Enquête sur la pratique des indicateurs de performance										listic LABORATOIRE D'ANALYSE ET DE TRAITEMENT DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION	
Identifiant												Récapitulatif Processus (FDX 176)	
Interview de	Le	Fonction	Service	Processus managé	Objectif	Evènement déclencheur	Sortie du processus	Décideur	Acteurs	Utilisateur	Ressources		
Jean Yves Sylvestre	01.03.03	Directeur achats	Achats	Approvisionnement et traitement des commandes	Approvisionner production en temps 0 rupture de stock, 0	Dossier achats	Facture contrôlée et différents bordereaux	Directeur achat	Fournisseurs, Acheteurs, Service transport, Lancement, Magasins, Comptabilité fournisseurs		GPAO		
				Achats	Sélectionner les fournisseurs	Sortie ou modification de gammes, fournisseur de failant, renégociation de marché	Dossier achat	Directeur achat	Chefs de produit, Responsable BET, Laboratoire, Qualité		Base de données fournisseurs, Tableau		
Récapitulatif Indicateurs de Performance (FDX 171)													
IP	Mesure (fréquence)	Source de la mesure	Objectif	Calcul de la performance	Représentation	Destination	Variable						
IP1 Rupture de stock (processus approvisionnement)	Nombre de références Mensuelle	Etat informatique, si stock = 0, tableau renseigné par acheteurs	0 rupture	Mesure Emetteur Contrôle de gestion	Histogramme annuelle, évaluation de la performance,	Interne directeur, approvisionneur Lotus notes, DG reporting	Approvisionneur (Ss, échange d'expériences, analyse des états de stock)						
IP2 Couverture stock (processus approvisionnement)	Mensuelle	Contrôle de gestion (déclencheur et incrémentation de stock)	4 semaines	Valeur stock / Valeur achetée mensuelle	Histogramme annuelle, évaluation de la performance,	Interne directeur, approvisionneur Lotus notes, DG reporting	Approvisionneur (Ss, échange d'expériences, analyse des états de stock)						
IP3 Bilan qualité fournisseurs (processus achats)	Mensuelle Non conformité fournisseurs	AS 400 production (quantité et prix commandés)	0%	Evolution mensuelle (cumul annuelle)	Histogramme annuelle, évaluation de la performance,	Interne directeur, acheteurs Lotus notes, DG reporting	Acheteurs (appel d'offres)						
IP4 Evolution des prix (processus achat)	Mensuelle	Contrôle de gestion	< 0 %	Prix actuels / prix année écoulée	Histogramme annuelle, évaluation de la performance,	Interne directeur, acheteurs Lotus notes, DG reporting	Acheteurs						
Etude des liens entre indicateurs de performance													
Liens de subordination (même processus)						Liens de coordination (processus différents)							
IP Niveau supérieur	Liens	IP Niveau inférieur	Liens	IP même niveau	Liens	Processus concerné(s)	Connaissance OG	Connaissance contribution					
Revue de direction (IP1)	Taux de Service (non explicité)	Même IP mais par approvisionneur		Rupture et qualité	Non explicités	Production	Oui bien sûr	Pas précisément (coût, qualité)					
Revue de direction (IP2)	Taux de Service (non explicité)				Non explicités	Gestion de production (grosse production), A.DV (grosse commande)							
Revue de direction (IP3)	Taux de Service (non explicité)	Même IP mais par acheteur		Qualité intrinsèque	Non explicités	Développement de gamme							
Revue de direction (IP4)	Taux de Service (non explicité)				Non explicités	Développement de gamme							

## Annexe IV-E : Sommaire rapport PQE 2002 (§ 4.5.2)



PLAN QUALITÉ / ENVIRONNEMENT 2003  
(compte-rendu de revue de direction du 27 février 2003)

Ce plan qualité / environnement comporte les points suivants :

- 1) Audits
- 2) Retours d'information des clients
- 3) Fonctionnement des processus et conformité des produits
- 4) Etat des actions préventives et correctives
- 5) Actions issues des revues de direction précédentes
- 6) Changements pouvant affecter le Système de Management de la Qualité et de l'Environnement
- 7) Données pour l'environnement
- 8) Point sur l'efficacité du SMQE
- 9) Fiches objectifs qualité / environnement (1 à 6)
- 10) Plans d'actions environnementaux
  - plan d'action réglementaire site du Bray
  - plan d'action réglementaire site unité 6
  - plan d'action réglementaire site transport
  - plan d'action volontaire site du Bray
  - plan d'action volontaire site unité 6
  - plan d'action volontaire site transport

### Annexe IV-F : Calcul simplifié des poids dans MACBETH (§ 5.3)

Soit la matrice de comparaison d'un ensemble de vecteurs d'expressions de performance rangés par importance décroissante pour l'expression de performance agrégée  $p^{ag}$ .

	(1, 1, 1)	(1, 0, 0)	(0, 1, 0)	(0, 0, 1)	(0, 0, 0)
(1, 1, 1)	0	P	P	P	P
(1, 0, 0)		0	$k_1$	P	P
(0, 1, 0)			0	$k_2$	P
(0, 0, 1)				0	$k_3$
(0, 0, 0)					0

A partir de ces préférences de type  $k_i$ , il est possible de déterminer les poids  $w_i$  des différentes expressions de performance. On rappelle que l'expression de performance agrégée calculée à partir des vecteurs est du type :  $p^{ag.1} = w_i$

La lecture de la matrice permet d'écrire les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} 1-w_1 > 0 \\ w_1 - w_2 = \alpha k_1 \\ w_2 - w_3 = \alpha k_2 \\ w_3 - 0 = \alpha k_3 \\ w_1 + w_2 + w_3 = 1 \end{array} \right.$$

En réorganisant les équations on obtient le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} w_1 = \alpha(k_1 + k_2 + k_3) \\ w_2 = \alpha(k_2 + k_3) \\ w_3 = \alpha(k_3) \\ w_1 + w_2 + w_3 = 1 = \alpha(k_1 + 2k_2 + 3k_3) \end{array} \right.$$

En constatant que  $\alpha = \frac{1}{(k_1 + 2k_2 + 3k_3)}$ , on a alors :

$$w_1 = \frac{k_1 + k_2 + k_3}{\alpha} = \frac{k_1 + k_2 + k_3}{(k_1 + 2k_2 + 3k_3)}$$

$$w_2 = \frac{k_2 + k_3}{\alpha} = \frac{k_2 + k_3}{(k_1 + 2k_2 + 3k_3)}$$

$$w_3 = \frac{k_3}{\alpha} = \frac{k_3}{(k_1 + 2k_2 + 3k_3)}$$

On peut étendre ce raisonnement à n vecteurs d'expressions de performance et dans ce cas, on obtient le coefficient  $\alpha$  et les poids  $w_{(i)}$  rangés par ordre décroissant grâce aux formules suivantes :

$$\alpha = \sum_{j=1}^n \frac{1}{j \times k_j} \text{ et } w_{(i)} = \alpha \times \sum_{j=i}^n k_j = \frac{\sum_{j=i}^n k_j}{\sum_{j=1}^n j \times k_j}$$

## Résumé

L'intérêt des indicateurs de performance pour le pilotage des processus est bien établi, et diverses méthodes de conception d'indicateurs sont proposées. Ces approches ne se situent toutefois pas dans une approche *système* suffisamment globale et exhaustive et ne proposent que des solutions partielles au problème de l'aide au pilotage.

Nous proposons ainsi un modèle systémique permettant la définition d'un *système d'indicateurs*, situé par rapport à son environnement, tenant compte des interactions entre indicateurs et parcourant les différentes étapes de son cycle de vie (conception, exploitation, révision et suppression).

Si la conception de l'indicateur est maîtrisée, sa cohérence avec la structure n'est que partiellement traitée. En effet, comment hiérarchiser des indicateurs à partir d'une hiérarchisation des objectifs ? comment agréger des expressions de performance ? Pour répondre à ces questions, nous adoptons une « mécanisation » du système d'indicateurs qui intègre respectivement la décomposition des objectifs, l'élaboration des expressions de performance et leur agrégation. La cohérence de ces différentes étapes repose sur les notions de commensurabilité des expressions de performance d'une part et de signifiante des opérateurs d'agrégation d'autre part. Par ailleurs, un opérateur d'agrégation autre que la moyenne pondérée, insuffisante à cause des interactions entre indicateurs, est proposé, en l'occurrence l'intégrale de Choquet, dans sa forme 2-additive.

Pour rendre opérationnelle cette mécanisation, la méthode MACBETH d'aide au choix multicritère a été adaptée aux spécificités du système d'indicateurs. Cette méthode, fondée sur une expertise humaine, permet de définir en cohérence les expressions de performance suivant des échelles d'intervalle et les paramètres de l'opérateur d'agrégation. Enfin, les idées avancées sont mises en œuvre pour concevoir le système d'indicateurs dans le cadre de la politique « Qualité Environnement » de la Société Fournier.

## Mots clés

Système d'indicateurs de performance - Pilotage d'entreprise - Modèle systémique - MACBETH - Agrégation d'informations – Intégrale de Choquet

## Abstract

The interest for the performance indicators is now well-established for the process controlling, and various approaches to design these indicators are proposed. However these approaches are not global and exhaustive enough and suggest only partial solutions for the control support.

So, we propose a systemic model able to define a performance indicator system placed in its environment, taking the interactions between the indicators into account and describing the different steps of its life cycle (design, operating, updating and cancel).

If the indicator's design is well controlled, its consistency with the structure is only partially dealt. Indeed, how can the indicators be graded from an objective hierarchy? How can some performance expressions be aggregated? To answer these questions, we adopt a "mechanization" of the indicator system, which integrates respectively the objective deployment, the elaboration of the performance expressions and their aggregation. The consistency of the different steps is based on the two main notions:

- the commensurability of the performance expressions,
- the aggregation operator significance.

Otherwise, an aggregation operator different from a weighted arithmetic mean which is unable to take into account the interactions between indicators, is proposed: the Choquet-integral in its 2-additive form.

MACBETH, a multicriteria decision aid method, is modified according to the indicator system specificities in order to get this mechanization operational. This method, built upon the human expertise, allows the pilots to define consistently the performance expressions among interval scales and the parameters of the aggregation operator. Lastly, the propositions are implemented to design the indicator system in the case of the « Quality Environment » policy of Société Fournier.

## Key words:

Performance indicator system – Enterprise control - Systemic model - MACBETH - Information aggregation – Choquet integral