HAL
open science

Aide à la décision pour les entreprises industrielles inscrites dans une démarche de développement durable

Bastien Rizzon

To cite this version:

Bastien Rizzon. Aide à la décision pour les entreprises industrielles inscrites dans une démarche de développement durable. Recherche opérationnelle [math.OC]. Communauté Université Grenoble Alpes, 2016. Français. NNT : . tel-01320385v1

HAL Id: tel-01320385

https://hal.science/tel-01320385v1

Submitted on 23 May 2016 (v1), last revised 1 Jun 2016 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Communauté UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **STIC - Traitement de l'Information**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Bastien RIZZON

Thèse dirigée par **Sylvie GALICHET**
et co-encadrée par **Vincent CLIVILLÉ**

préparée au sein du **Laboratoire LISTIC**
et de l'**École Doctorale "SISEO"**

Aide à la décision pour les entreprises industrielles inscrites dans une démarche de développement durable.

Thèse soutenue publiquement le **26 avril 2016**,
devant le jury composé de :

M. Salvatore GRECO
University of Catania, Président
M. Lyes BENYOUCEF
Université Aix-Marseille - LSIS, Rapporteur
M. Patrick BURLAT
Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Rapporteur
M. Eric DARLOT
ADEME, Examinateur
Mme Elodie RATAJCZAK
adixen Vacuum Products, Examinateur
Mme Lamia BERRAH
Université Savoie Mont Blanc, Examinateur
Mme Sylvie GALICHET
Université Savoie Mont Blanc, Directeur de thèse
M. Vincent CLIVILLÉ
Université Savoie Mont Blanc, Co-Encadrant de thèse

Remerciements

Je souhaite d'abord remercier l'*Assemblée des Pays de Savoie* (APS), l'*Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie* (ADEME) et *THESAME* pour m'avoir accordé leur confiance et le soutien financier indispensables durant le déroulement de ce travail de thèse.

Cette thèse a été menée au sein du Laboratoire d'Informatique, Systèmes et Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC), de l'Université Savoie Mont Blanc (USMB), dont l'équipe et l'ambiance m'ont été d'un grand soutien.

Je remercie M. Lyes BENYOUCEF et M. Patrick BURLAT d'avoir bien voulu rapporter mes travaux ainsi que les membres du jury M. Salvatore GRECO, M. Eric DARLOT, Mme Elodie RATAJCZAK et Mme Lamia BERRAH pour les remarques, conseils et échanges qui ont grandement contribué à consolider cette thèse.

Merci à l'entreprise adixen Vacuum Products pour son accueil et notamment les personnes des services HSE, généraux et entretien avec qui j'ai pu pleinement développer ma proposition de thèse.

La soutenance d'une thèse est un événement qui clôture une étape d'une expérience qui est très enrichissante. Ainsi je tiens à remercier chaleureusement Mme Sylvie GALICHET et M. Vincent CLIVILLÉ qui m'ont accompagné tout au long de cette thèse.

Mes derniers remerciements vont à ma famille qui m'a soutenu sur les plans affectif et logistique et qui m'a permis d'aller jusqu'au bout de ce projet de thèse.

Table des matières

Acronymes **3**

Introduction **5**

1 Performance industrielle, démarche d'amélioration et développement durable **7**
1.1 Le contexte de la performance industrielle 8
1.1.1 De la productivité au développement durable 8
1.1.2 Principes du développement durable 13
1.2 La démarche d'amélioration continue de la performance 17
1.2.1 La théorie mathématique des systèmes, exploitée en automatique . . 18
1.2.2 Des systèmes de gestion vers une vision unifiée des systèmes d'information 21
1.2.3 Les indicateurs et systèmes d'indicateurs de la performance 24
1.2.4 Démarche d'amélioration industrielle 26
1.3 Spécificités de l'amélioration dans le contexte du DD 29
1.3.1 Les travaux communautaires 29
1.3.2 Les travaux académiques 31
1.4 Conclusion 31

2 Approches multicritères **33**
2.1 Principes généraux et attentes de l'aide à la décision multicritère 34
2.1.1 Notations et notions préliminaires 34
2.1.2 Les attentes sur l'aide à la décision 37
2.1.3 Le déroulement d'un processus MCDA 42
2.2 Etat de l'art MCDA dans le contexte industriel 54
2.2.1 Méthode 55
2.2.2 Analyse 55
2.3 La méthode choisie : UTA 58
2.3.1 Une méthode de désagrégation de préférence 58
2.3.2 *Analytic Center* UTA : ACUTA 62
2.3.3 Développements actuels sur UTA 63
2.4 Conclusion 65

3 Inscrire l'aide à la décision multicritère dans une démarche PDCA **67**
3.1 Inscrire l'aide à la décision dans le cycle PDCA 68
3.1.1 Les mots-clés du cycle PDCA 68
3.1.2 Les mots-clés du processus MCDA 69
3.1.3 Recherche de similarités 69
3.1.4 Discussion sur l'apport du modèle au cycle PDCA 72

3.1.5 Intégration de la construction du modèle de préférence et son utilisation dans l'Exemple . . . 74
3.2 Analyse de la robustesse d'un rang en rapport avec l'imprécision . . . 79
3.2.1 Principe . . . 79
3.2.2 Méthodologie . . . 81
3.2.3 Application à l'Exemple . . . 84
3.3 Faisabilité . . . 88
3.3.1 Intérêt de la faisabilité pour l'aide à la décision . . . 88
3.3.2 Formalisation . . . 90
3.3.3 Utilisation . . . 96
3.3.4 Bilan sur la faisabilité . . . 100
3.4 Conclusion . . . 101

4 Application industrielle 103
4.1 Présentation de l'entreprise *adixen Vacuum Products* (aVP) . . . 104
4.1.1 Généralités . . . 104
4.1.2 Organisation de l'activité . . . 107
4.1.3 La démarche d'amélioration de la performance pratiquée chez aVP 107
4.2 Prérequis pour construire un système de management de l'énergie compatible avec les principes de l'ISO 50001 . . . 111
4.2.1 Instrumentation . . . 112
4.2.2 Tableau de bord . . . 113
4.3 État des lieux sur la maîtrise des besoins énergétiques chez aVP . . . 115
4.3.1 Les énergies consommées par aVP . . . 115
4.3.2 Instrumentation chez aVP . . . 116
4.3.3 Tableau de bord chez aVP . . . 118
4.4 Application du processus de décision MCDA . . . 121
4.4.1 Aide à la décision pour l'instrumentation . . . 121
4.4.2 Identification du problème de décision . . . 121
4.4.3 Structuration du problème de décision . . . 122
4.4.4 Construction du modèle . . . 129
4.4.5 Utiliser le modèle pour informer et remettre en question . . . 131
4.4.6 Utilisation du modèle pour le problème de décision sur le Poste H5 134
4.5 Compléments d'information du modèle . . . 137
4.5.1 Prise en compte de l'imprécision . . . 137
4.5.2 Prise en compte de la faisabilité . . . 139
4.6 Conclusion . . . 142

Conclusion 145

Annexe A 147

Annexe B 149

Annexe C 151

Annexe D 153

Publications associées à la thèse 157

Bibliographie 159

Acronymes

- ABC : Activity Based Costing
- ABM : Activity Based Management
- ACUTA : Analytic Center UTA (une post-optimisation de la méthode MCDA UTA)
- ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (co-financeur de la thèse)
- AHP / ANP : Analytic Hierarchy / Network Process (méthode MCDA)
- APS : Assemblée des Pays de Savoie (co-financeur de la thèse)
- aVP : adixen Vacuum Products (l'entreprise partenaire dans la réalisation du cas d'étude présenté dans cette thèse)
- BPR : Business Process Reengineering
- B to B : Business to Business
- B to C : Business to Client
- DAI : Démarche d'Amélioration Industrielle
- DD : Développement Durable
- ELECTRE : ELimination Et Choix Traduisant la REalité (méthode MCDA)
- ERP : Entreprise Ressource Planning (voir PGI pour la traduction française)
- FCS : Facteurs Clés de Succès
- FCP : Facteurs Clés de Progrès
- GDT : Grand Dictionnaire Terminologique
- GRI : Global Reporting Initiative
- HSE : Hygiène, Sécurité et Environnement
- MACBETH : Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (méthode MCDA)
- MAUT / MAVT : Multi-Attribute Utility / Value Theory (famille de méthode MCDA)
- MCDA : MultiCriteria Decision Analysis (Aiding)
- MOD : Main d'Œuvre Directe

- PDCA : Plan, Do, Check, Act (le cycle illustrant une méthode d'amélioration continue en 4 étapes dit de la roue de Deming)
- PGI : Progiciel de Gestion Intégrée
- PROMETHEE : Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations (méthode MCDA)
- ROI : Return On Investment
- RSE : Responsabilité Sociale des Entreprises
- SACM : Société Alsacienne de Constructions Mécaniques
- SIP : Système d'Indicateurs de performance
- tep : tonne équivalent pétrole (la quantité d'énergie dégagée par la combustion d'une tonne de pétrole)
- TOPSIS : Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (méthode MCDA)
- UTA : UTilités Additives (méthode MCDA)
- WCED : World Commission on Environment and Development

Introduction

Bien qu'il soit reconnu depuis longtemps que les activités humaines ont un effet tangible sur la planète, le modèle de développement de notre société s'est construit en supposant des ressources infinies. Ainsi, ce n'est que récemment que l'on se préoccupe des conséquences de notre développement sur la qualité de vie, la santé et la préservation des espèces animales et végétales. Aujourd'hui l'impact des agissements humains est révélé et fait l'objet d'une large diffusion. Le risque d'un épuisement des ressources et d'un réchauffement climatique pose question. Cette prise de conscience est à l'origine d'une évolution importante de nos sociétés avec l'apparition d'une économie dite « verte, responsable, équitable ou durable » s'appuyant sur des produits, technologies, ingénieries, activités, services, etc. étiquetés « vert, équitable ou durable ». Les questions environnementales et sociétales prennent d'autant plus d'importance que la pérennité de notre propre espèce et de son mode de vie se trouve remise en question. Le problème n'est alors plus uniquement d'assurer des conditions de vie acceptables aux générations actuelles, mais également de garantir des conditions de vie acceptables aux générations futures. Qu'en-est-il des entreprises, parties prenantes majeures de nos sociétés, dans ce contexte ? Bien sûr, les entreprises ont l'obligation de produire des résultats économiques positifs pour ne pas disparaitre dans un marché aujourd'hui mondialisé. Pour de nombreuses raisons (image, prévention des risques, possibilités de marketing, etc.), les entreprises intègrent aujourd'hui le DD (et ses trois piliers, économique, environnemental et sociétal) dans leur stratégie et prennent désormais leurs décisions dans ce cadre. L'idée est de proposer une aide aux entreprises pour prendre des décisions qui satisfont les besoins et valeurs de l'entreprise ainsi que les principes et enjeux du DD.

Dans le **chapitre 1**, nous prenons le point de vue de la performance industrielle pour caractériser les besoins de l'entreprise dans une démarche de Développement Durable (DD). La performance industrielle, à travers son histoire, doit prendre en compte de plus en plus de critères jusqu'aux actuels piliers du DD. Nous proposons de voir le DD comme la démarche d'amélioration mise en place par l'entreprise. Dans ce sens nous proposons une aide au décideur humain qui permet de répondre aux exigences du DD et en particulier sa nature holistique et cyclique.

Dans le **chapitre 2**, nous nous sommes intéressés à l'existant concernant l'aide à la décision multicritère (MCDA). Le principe des approches MCDA est d'aborder la décision multicritère comme une problématique consistant à choisir, ordonner, trier, quantifier, voire caractériser l'ensemble des actions, objets ou alternatives considérés dans le problème de décision, à partir des différents critères retenus et de la modélisation des préférences du décideur. L'étude des spécificités DD d'un problème de décision dans un cadre du génie industriel nous permet de nous orienter vers l'utilisation d'une méthode UTA et plus spécifiquement vers ACUTA.

Dans le **chapitre 3**, nous développons notre proposition. Nous partons du constat que les entreprises déploient dores et déjà des approches d'amélioration continue à l'aide de

standards et de méthodes comme le cycle PDCA. L'idée est alors d'enrichir cette pratique par un processus MCDA qui aide le décideur à formuler ses préférences et leur appliquer un traitement d'information adapté afin de fournir une aide à la décision qui serve la démarche d'amélioration. Pour intégrer l'imprécision des données disponibles dans la décision à prendre, nous proposons une méthodologie qui permet de caractériser la robustesse du résultat d'une méthode MCDA en fonction de l'imprécision des valeurs d'un critère. Pour prendre en compte l'aspect « réalisation opérationnelle » d'une action, en plus de son intérêt pour la performance de l'entreprise, nous avons développé un modèle de « faisabilité » associé aux actions en nous fondant sur la méthode ACUTA. L'idée est de proposer au décideur une information complémentaire à l'information d'utilité afin d'offrir une perspective autorisant un compromis *Utilité/Faisabilité* sur la décision à prendre.

Enfin, dans le **chapitre 4**, nous déclinons notre proposition sur un cas pratique industriel mené dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise *adixen Vacuum Products* (aVP) d'Annecy. Ce partenariat a permis le déploiement de notre proposition pour un problème de décision portant sur les besoins d'instrumentation pour construire un système de management de l'énergie, conformément à la norme ISO 50001. Notre démarche a conduit à la construction d'un modèle de préférence (correspondant aux spécificités et valeurs de l'entreprise et du décideur) sur le choix des équipements à instrumenter. Les résultats apportés par la mise en place de notre approche chez aVP ont contribué à convaincre de l'intérêt de l'aide à la décision multicritère et à enrichir les connaissances de l'entreprise.

Ce travail de thèse a pu être accompli grâce aux financements de l'Assemblée de Pays de Savoie, l'ADEME et THESAME innovation.

Chapitre 1

Performance industrielle, démarche d'amélioration et développement durable

Sommaire

1.1 Le contexte de la performance industrielle 8
1.1.1 De la productivité au développement durable 8
1.1.2 Principes du développement durable 13
1.2 La démarche d'amélioration continue de la performance 17
1.2.1 La théorie mathématique des systèmes, exploitée en automatique . . 18
1.2.2 Des systèmes de gestion vers une vision unifiée des systèmes d'information 21
1.2.3 Les indicateurs et systèmes d'indicateurs de la performance 24
1.2.4 Démarche d'amélioration industrielle 26
1.3 Spécificités de l'amélioration dans le contexte du DD 29
1.3.1 Les travaux communautaires 29
1.3.2 Les travaux académiques 31
1.4 Conclusion 31

Les entreprises industrielles, de toutes tailles, s'inscrivent aujourd'hui dans une approche de Développement Durable (DD). Il se pose alors la question du maintien ou de l'évolution du pilotage de l'entreprise, en particulier dans le cadre de sa démarche d'amélioration. Ce chapitre est structuré de la façon suivante : dans la première partie nous dressons un historique de la pratique du pilotage industriel jusqu'à l'émergence du DD. Nous choisissons de considérer que le DD n'est rien d'autre que la démarche d'amélioration continue de la performance qui intègre les aspects environnementaux et sociétaux de la performance. Nous détaillons ensuite la démarche d'amélioration de la performance avant d'identifier les spécificités de cette amélioration dans le DD. Un certain nombre de besoins sont identifiés ([Rizzon 2013c], [Rizzon 2013a], [Rizzon 2013b]) tels que, la nécessité d'éclairer le décideur confronté à la complexité de ce contexte de décision, le besoin de prendre en compte tous les aspects de la performance (économique, environnemental, sociétal), l'incertitude des données dont il/elle dispose, la nécessité de tenir compte de la facilité/difficulté de mise en œuvre des actions d'amélioration. Ce travail se limite à considérer les aspects « techniques » de la performance sans considérer les aspects psycho-sociaux.

A partir de ce constat, nous concluons sur la nécessité de développer un outil d'aide à la décision qui répond à ces besoins.

1.1 Le contexte de la performance industrielle

1.1.1 De la productivité au développement durable

Comme pour tout système, une des finalités poursuivie par l'entreprise, quelle que soit sa taille, est d'assurer sa pérennité [Morin 1977]. Dans ce sens elle se fixe des buts et des objectifs et met en œuvre des actions, à tous les niveaux de décision, afin de les atteindre. En accord avec les principes de la systémique [Le Moigne 1990], ces buts et objectifs ainsi que les actions qui leur sont liées sont dépendants de l'environnement de l'entreprise. Une entreprise sera alors dite performante si elle atteint les objectifs qu'elle se fixe sous réserve que ces objectifs aient été définis de façon pertinente [Berrah 2001].

La première section de ce paragraphe rappelle l'évolution du contexte industriel en quatre périodes significatives depuis l'immédiat après-guerre jusqu'à aujourd'hui. La nature des objectifs et actions de l'entreprise est ainsi adaptée selon la période concernée.

Période 1 (1945-1975) : Jusqu'au milieu des années 1970, le contexte taylorien de la production industrielle est caractérisé par une forte pénurie de biens de consommation, une forte croissance de la productivité liée à la mécanisation des moyens de production et une relative fermeture des marchés. La demande est supérieure à l'offre et le client (client final ou autre entreprise) a un choix restreint. Il doit se satisfaire de l'offre de ses fournisseurs. La « voix du client » étant alors faible, la performance industrielle se résume à la productivité de la Main d'œuvre Directe (MOD) [Taylor 1911] [Pouget 1998]. Pour satisfaire ses actionnaires, l'objectif de l'entreprise est de diminuer le prix de revient de ses produits. Elle y parvient en faisant d'une part des économies d'échelle, ce qui conduit à des tailles de lot de production dites « économiques » [Hadley 1966]. Elle engage d'autre part des actions pour améliorer sa productivité dans la logique taylorienne. Ainsi les opérations de production sont analysées et optimisées selon les standards de cadence *Methods-Time-Measurement* [Gilbreth 1921].

La performance est mesurée par des indicateurs de coût, de productivité et de rentabilité (*Return On Investment* (ROI)) comme dans la pyramide de Dupont de Nemours [Chandler 1977]. Le pilotage de l'entreprise s'appuie sur le contrôle de gestion dans une logique de contrôle *a posteriori* et des outils de comptabilité qui identifient les coûts et recettes de l'entreprise. Cette logique correspond bien à la nature des coûts (essentiellement la MOD) et à l'indépendance des unités de production.

Période 2 (1975-1990) : Au milieu des années 70 la crise, dite pétrolière, coïncide avec un équilibre entre l'offre, qui augmente très vite grâce à la poursuite de la mécanisation et du développement de l'automatisation, et la demande qui croît dans de moindres proportions. A cet équilibre va succéder rapidement un excédent de l'offre qui met pour la première fois depuis le début de l'ère industrielle le client en avant. Le client non satisfait peut désormais choisir d'autres fournisseurs. L'ouverture des marchés (Union Européenne

(UE), l'*Association of Southeast Asian Nations* (ASEAN), etc.) et la circulation de l'information sans cesse croissante vont également contribuer à l'accroissement progressif des exigences des clients communément identifiés aux critères de Qualité, Coût et Délai connus sous la forme du triangle QCD.

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 1982], puis de façon plus générale à la satisfaction du client [Schneiderman 1988],

- 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 [Sullivan 1986].

Dans ces conditions on parle désormais de performance multicritère [Globerson 1985], que nous appréhendons en sa signification la plus simple : une performance fondée sur plusieurs points de vue. La notion de valeur est utilisée pour rendre compte de la performance hors coût de l'entreprise [Porter 1982]. Cette valeur peut être appréhendée comme étant tout ce pourquoi le client est prêt à payer.

Pour être performante, l'entreprise doit donc réaliser des produits dont le rapport valeur/coût lui permet de réaliser des marges suffisantes. Les actions engagées par les entreprises vont concerner la productivité avec la généralisation des processus automatisés et robotisés qui diminuent de façon très importante la part de la MOD et l'identification des goulets de production [Goldratt 1986], le développement des outils d'analyse de la valeur et de maîtrise de la qualité [Delafollie 1991], la gestion des données techniques et plus globalement la mise en place de systèmes d'information permettant de proposer une variété de produits toujours plus grande sans détériorer le coût de revient, l'externalisation qui permet à l'entreprise de se focaliser sur son cœur de métier et de s'approvisionner aux meilleures conditions QCD, la logistique interne et externe qui permet de répondre aux demandes du client dans des délais acceptables tout en limitant les immobilisations et en évitant les ruptures [Lee 1993].

La notion de gestion de projet [AFITEP 1998] se développe et permet de formaliser les activités « exceptionnelles » de l'entreprise en maîtrisant le budget, les délais et l'utilisation des ressources.

Dans ce nouveau contexte le contrôle de gestion rencontre certaines limites. Ainsi la diminution de la part de la MOD rend moins légitime les clés de répartition des « charges » qui augmentent par ailleurs [Berliner 1988]. L'usage d'indicateurs financiers n'est pas adapté au pilotage d'actions destinées à améliorer la valeur du produit en termes de qualité ou de délai [Cross 1988]. A partir de ces considérations vont émerger d'une part la notion d'indicateur technique permettant de mesurer la performance non-financière de l'entreprise [Fortuin 1988] et d'autre part des alternatives à la comptabilité classique. Ainsi la méthode *Activity Based Costing* prend en compte toutes les activités de l'entreprise (production et hors production) afin de connaitre leur coût réel. D'autres méthodes plus ciblées sur un objectif particulier voient également le jour comme la méthode de Coût de Non Efficacité d'un Equipement [Boucly 1988] qui permet de chiffrer le coût des pertes de production où

la méthode des coûts et performance cachés de Savall qui évaluent les conséquences financières de tous les dysfonctionnements de l'entreprise [Savall 1992].

Période 3 (1990-2000) : La fin du XXème siècle voit l'offre excéder très largement la demande, l'ouverture des marchés s'accentuer encore avec l'intégration des économies européennes et la mise en place de l'Organisation Mondiale du Commerce et enfin le numérique se généraliser, ce qui permet aux entreprises et particuliers d'être informés très facilement sur l'offre et la demande quasiment partout sur la planète. Dans ce contexte, la concurrence s'intensifie encore ce qui oblige les entreprises à proposer des produits ayant sans cesse plus de valeur pour le client sachant un prix de vente, un niveau de qualité et un délai globalement fixés par le marché. La performance continue de se décliner sur le triangle QCD mais avec des exigences sans cesse plus élevées. Dans l'esprit du modèle de Kano [Evans 2012], l'innovation devient un des Facteurs Clés de Succès (FCS) de l'entreprise.

Au-delà du triangle QCD les critères de performance sont complétés par l'innovation, la personnalisation du produit pour l'adapter au besoin du client, l'offre de caractéristiques (fiabilité, sécurité) et de services (mise en route, maintenance, reprise après usage) qui le satisferont sur tout le cycle de vie du produit.

Les actions engagées poursuivent celles de la période précédente avec la recherche de techniques d'ordonnancement visant à assurer un taux de service conforme aux attentes des clients. Le *Product LifeCycle Management* permet la gestion d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie [Stark 2011]. Le recours à des fournisseurs pour tout ce qui n'est pas au cœur des compétences de l'entreprise se généralise et le *Supply Chain Management* intègre la logistique de l'entreprise dans une chaîne qui va de ses fournisseurs jusqu'au client final [API]. La maîtrise de la qualité des produits et des processus permet de structurer la démarche dans l'esprit de la version 1994 des normes ISO 9000 [ISO c]. Une réponse complémentaire voit le jour avec le développement des techniques de « Juste à Temps » qui permettent de se rapprocher du besoin du client en termes de délai [Ōno 1988] et de management visuel visant à simplifier le pilotage des systèmes de production en privilégiant un affichage « naturel » des informations de production [Greif 1998]. Cette évolution aboutit à la mise en place de démarches d'amélioration de la performance héritées des réflexions entamées au Japon dans les années 60 puis reprises et analysées aux Etats-Unis dans la décennie 80 dans le rapport du MIT "*The Machine that changed the world*" qui parle pour la première fois de *Lean Manufacturing* [Womack 1990]. Parmi les approches proposées on trouve en particulier l'amélioration continue au *Kaizen*, [Imai 1986], et l'amélioration par rupture (ou *Business Process Reenginnering* [Hammer 1993]).

Le contrôle de gestion reste prépondérant dans l'entreprise mais l'emploi des outils de gestion apparus dans la période précédente se généralise. Ainsi la méthode ABC initialement destinée à l'identification des coûts est étendue aux autres critères de performance (*Activity Based Management*) [Brimson 1994]. L'indicateur technique est déployé dans l'entreprise pour mesurer la qualité, la disponibilité, la sécurité, le niveau des stocks etc.

Ils sont désormais regroupés en tableaux de bord qui rassemblent l'ensemble des informations utiles à un manager pour prendre ses décisions et suivre leurs effets. Ces indicateurs deviennent « de processus » et sont désormais pensés dans une logique de pilotage, avant, pendant et après le déroulement d'une action [Lorino 1996] [Bond 1999]. Ils s'intègrent à une logique de déploiement de la stratégie de l'entreprise qui construit un Système d'Indicateurs de Performance (SIP) sur ses différents niveaux de décision en cohérence avec sa stratégie et son organisation [Bitton 1990] [Berrah 1997]. Cette logique se concrétise dans le *Balanced Scorecard* de Norton et Kaplan qui organise ces indicateurs selon quatre axes et les décline sur autant de niveaux que nécessaire. Chaque indicateur est construit à partir d'un objectif auquel est rapportée une mesure. Une « initiative » lui est associée dans une logique d'amélioration et des indicateurs avancés (de processus) sont éventuellement définis pour piloter cette initiative [Kaplan 1992]. Cette nécessité d'organiser les indicateurs de performance donne lieu à une abondante littérature qui permet de faire émerger la notion de *Performance Measurement System*, qui a débuté durant la période précédente et se poursuit avec [Neely 1995], [Bititci 1995] et [Ghalayini 1997]. Une synthèse très complète sur les *Performance Measurement Systems* est disponible dans « *Performance measurement system design : a literature review and research agenda* » de [Neely 2005].

Période 4 (depuis 2000) : Le début du XXIème siècle voit les tendances du dernier quart du XXème siècle se confirmer. Pour sans cesse améliorer sa performance établie à partir de critères de plus en plus nombreux l'entreprise se dote de cadres structurés pour sa démarche d'amélioration qu'elle inscrit dans son organisation et son management [Maruta 2012]. Cette démarche s'appuie sur la définition d'objectifs cohérents avec la stratégie de l'entreprise, l'analyse de l'existant afin d'identifier les entités ou fonctions à améliorer, le choix des actions à engager, leur réalisation et suivi [Berrah 2001]. Elle est aidée en cela par les versions successives de la norme ISO 9000 qui offre à l'entreprise une méthodologie de déploiement de sa stratégie Qualité où les indicateurs et tableaux de bord ont un rôle prééminent [ISO 9000 2008] [ISO 9000 2015]. Cette recherche de performance multicritère se traduit par une innovation dans toutes les activités de l'entreprise, le développement de nouveaux produits et processus, l'organisation de son système d'information, le management des ressources humaines et de leurs compétences [OCD]. Sur ce dernier point les méthodes de *Lean Management* mais aussi du *Hoshin Kanri* insistent sur le management des ressources humaines pour apporter des solutions aux problématiques rencontrées par l'entreprise [Tennant 2003] [Dombrowski 2014] [Kassicieh 1998].

Dans cette période les aspects sociétaux et environnementaux de l'activité économique constituent une préoccupation croissante des entreprises [Franks 2014]. Elles doivent intégrer les conséquences environnementales et sociétales des actions qu'elles mettent en œuvre pour améliorer leur performance. L'ISO définit progressivement des normes afin d'aider les entreprises à tenir compte de ces nouveaux aspects de la performance : norme environnementale ISO 14001 en 2000 [ISO a], norme sur le développement durable ISO 26000 en 2011 [ISO b], norme ISO 50001 sur la maîtrise de l'énergie en 2014 [ISO d]. Deux évolutions notables sont à souligner [Steurer 2005] :

- les critères de performance s'étendent à ces nouveaux aspects environnementaux et sociétaux ;

- le renforcement de la notion de partie prenante[1] qui demande à l'entreprise de composer avec de nombreux acteurs (tels que les actionnaires, les clients, les fournisseurs et prestataires déjà pris en compte, mais aussi les salariés, les pouvoirs publics, les riverains et d'une façon générale l'ensemble des populations sur lesquels l'activité de l'entreprise peut avoir un impact).

Par exemple, en chimie industrielle notamment, le protocole établi par l'UE REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of CHemicals*) fixe un cadre, pour les entreprises qui utilisent ou émettent des produits chimiques, concernant leurs émissions (CO2, Composés Organiques Volatiles (COV), etc.) afin de prévenir les risques sur la santé et l'environnement [Askham 2012]. Si l'entreprise ne s'y conforme pas, elle ne peut pas vendre ses produits sur le marché UE.

La pratique industrielle consiste alors à intégrer dans son SIP des indicateurs sur ces nouveaux critères de performance ([GRI i]) et à définir les objectifs correspondant au niveau des différents processus de l'entreprise. D'une façon plus globale, les entreprises adoptent une démarche de Responsabilité Sociale des Entreprises (RSE, en anglais : *Corporate Social Responsibility* ou *CSR*, voir [ISO b]), qui au-delà des points précédents insiste sur la transparence du pilotage et la communication des indicateurs aux parties prenantes.

Dans ce contexte, le décideur doit choisir entre des options plus ou moins bien définies dont la réalisation est difficile à évaluer, prendre en compte des critères de plus en plus nombreux et hétérogènes, se soucier de nombreuses parties prenantes ayant des objectifs divers voire contradictoires. Il/elle est alors demandeur d'information qui l'aide dans son processus de prise de décision, conformément à la philosophie de l'aide à la décision multicritère ([Roy 2005], [Saaty 2005]).

En synthèse, nous retenons qu'aujourd'hui la performance industrielle se définit selon de multiples critères répondant à des exigences internes et externes à l'entreprise, implique l'ensemble des parties prenantes de l'entreprise et s'inscrit dans une démarche structurée d'amélioration. Nous retenons aussi que la performance industrielle s'inscrit aujourd'hui dans un contexte marqué par le DD. La question que nous nous posons maintenant, pour comprendre le DD plus profondément que sous forme de contexte, est de déterminer comment le DD est intégrable aujourd'hui dans la performance industrielle à travers ses enjeux, sa définition et les pratiques DD des entreprises.

[1] Au sens strict, les parties prenantes sont les groupes ou individus identifiables sur lesquels repose la survie de l'organisation. Au sens large, les parties prenantes sont les groupes ou individus qui peuvent influencer ou être influencés par la performance de l'organisation en termes de produits, de politiques et de procédés de travail [Freeman 1984].

1.1.2 Principes du développement durable

Bien qu'il soit reconnu depuis longtemps que les activités humaines ont un effet tangible sur le monde, le modèle de développement de notre société s'est construit en supposant des ressources infinies. Ainsi, ce n'est que depuis récemment que l'on se préoccupe des conséquences de notre développement sur la qualité de vie, la santé et la préservation des espèces animales et végétales. Aujourd'hui l'impact de nos agissements est révélé et fait l'objet d'une large diffusion (sommets de Rio (1992 et 2012), sommet de Johannesburg (2002), conférence de Copenhage (2009), etc.). Le risque d'un épuisement des ressources et d'un réchauffement climatique pose question. Cette prise de conscience est à l'origine d'une évolution importante de nos sociétés avec l'apparition d'une économie dite « verte, responsable, équitable ou durable » s'appuyant sur des produits, technologies, ingénieries, activités, services, etc. étiquetés « vert, équitable ou durable ». Les questions environnementales et sociétales prennent d'autant plus d'importance que la pérennité de notre propre espèce et de son mode de vie se trouve remise en question. Le problème n'est alors plus uniquement d'assurer des conditions de vie acceptables aux générations actuelles, mais également de garantir des conditions de vie acceptables aux générations futures.

Le fait de limiter l'utilisation de ressources pour assurer qu'une ressource exploitée aujourd'hui soit encore accessible demain n'est ni une nouveauté ni un effet de mode. Ainsi le concept de DD, présent dans de nombreuses organisations depuis très longtemps, apparait dès le 18ème siècle en sylviculture. Les exploitants de l'époque avaient déjà compris que pour pouvoir produire une quantité stable de bois d'une génération d'exploitants à la suivante, il fallait limiter à un quota le nombre d'arbres coupés afin d'être en équilibre avec la croissance de nouveaux arbres [Ebner 2006].

Cependant, dans un contexte marqué par une économie où les échanges internationaux étaient très limités, de telles pratiques étaient restreintes à une échelle locale et n'étaient pas discutées à une échelle globale. Aujourd'hui dans une économie mondialisée, ce sujet doit être abordé à l'échelle de la planète. Un organisme tel que les Nations Unies et les commissions que cette organisation mandate offrent un cadre adapté, comme l'a montré la COP21 ([COP]), pour mener cette réflexion et définir les orientations stratégiques d'un développement durable.

Aujourd'hui, la plupart des articles traitant du DD dans différents cadres ([Azapagic 2000] [Spangenberg 2002] [Baumgartner 2010] [Brilius 2010]) s'appuient sur la définition établie par la *World Commission on Environment and Development* (WCED). Celle-ci est rappelée ci-dessous dans sa forme originale (article 1 - Chapitre 2 de [on Environment 1987]) :

> *Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.*

Sa traduction en français pourrait être : Un développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Au-delà de cette définition, la commission déclare dans un aperçu général (article 27) : « L'humanité a la capacité de rendre durable son développement afin de répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations

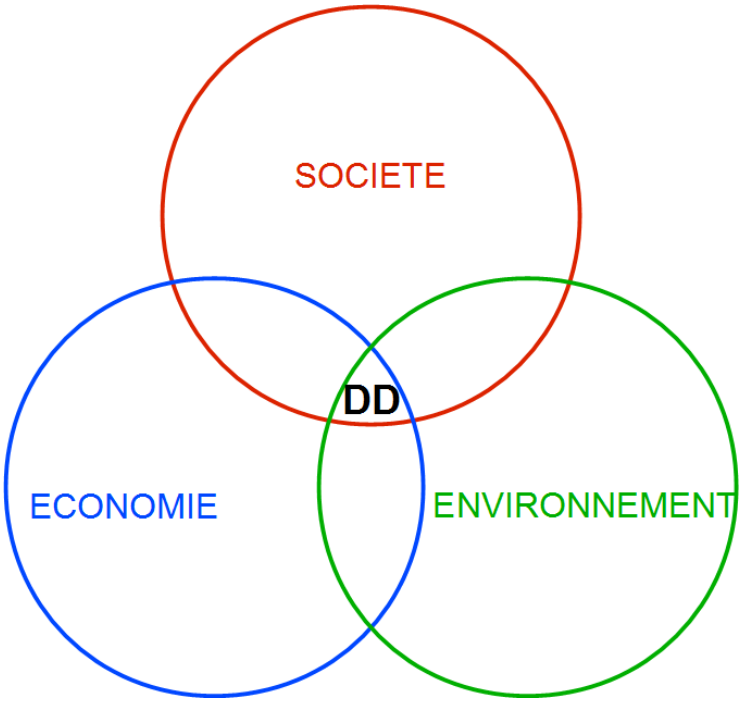

FIGURE 1.1 – Les 3 piliers du développement durable

futures de répondre aux leurs. Le concept de développement durable comporte certainement des limites, pas des limites absolues mais des limitations imposées par les avancées actuelles des technologies et des organisations sociales relatives aux ressources environnementales et par la capacité de la biosphère à absorber les effets des activités humaines. Mais les technologies et les organisations sociales peuvent être améliorées pour ouvrir la voie à une nouvelle ère de croissance économique. La Commission croit que la pauvreté généralisée n'est plus une fatalité. La pauvreté est un mal en soi, mais le développement durable nécessite de répondre aux besoins de base de tous et d'ouvrir à tous la possibilité de satisfaire leurs aspirations à une vie meilleure. Un monde où la pauvreté est endémique sera toujours enclin aux catastrophes écologiques ou autres. » Aujourd'hui le fait que le DD doive être fondé sur les trois piliers ou aspects que sont l'Economie, l'Environnement et la Société est largement accepté. Les piliers du DD sont fréquemment représentés tels que sur la figure 1.1.

S'agissant des entreprises, pourquoi s'impliquent-elles dans le DD ? D'après [Azapagic 2000], lors de discussions ou entretiens avec des cadres d'entreprises, la plupart des justifications de la prise en compte du DD concernent

- l'image de l'entreprise ;
- la prévention des risques ;
- la pratique volontaire avant qu'une loi l'impose ;
- les possibilités de marketing.

Ces raisons expliquent en partie que des actions soucieuses du DD aient été mises en œuvre dans les entreprises depuis de nombreuses années. Il faut y ajouter des considérations purement financières. Ainsi la lutte contre les gaspillages énergétiques et de matières premières ou la réduction des coûts liés aux problèmes de santé et de sécurité des personnels, ou des actions plus drastiques comme le changement de matière première ou une nouvelle conception du produit ont un double impact, environnemental ou sociétal d'une part, et économique d'autre part [Hanssen 1999].

Le management de ces actions est aujourd'hui encore imparfait. Par exemple de nombreuses actions ont pour origine des initiatives personnelles de membres de l'entreprise qui soumettent leurs préoccupations durant les réunions de travail. Ce peut être également des sollicitations extérieures émises par des associations, des acteurs économiques et sociaux, des entreprises partenaires qui favorisent par exemple le transport collectif, le covoiturage, le non fauchage des espaces verts, la mise en place de ruches sur les sites industriels, etc. Le choix de ces actions relève souvent du bon sens qui permet de décider trivialement de certaines actions évidentes comme détecter et informer sur le gaspillage dans l'objectif de le diminuer. Cependant le bon sens a des limites quand le sujet est complexe (par exemple la définition de la part d'énergie électrique issue d'une ressource renouvelable à acheter au fournisseur est un problème délicat où le choix du renouvelable représente un surcoût par rapport à de l'électricité produite à partir d'une source « classique » et les variations des prix des matières premières combustibles complexifient les décisions) et difficile à argumenter devant l'ensemble des parties prenantes liées à l'entreprise.

Pour structurer ces préoccupations d'entreprise liées au DD, les entreprises de grande taille se sont mises à la pratique du *Reporting* inspirée par les principes émis par la RSE, développée dans l'ISO 26000. Le cadre de la RSE a émergé dans les années 1950. Bowen a donné une première définition de la notion de RSE comme une « obligation à poursuivre des politiques, à prendre des décisions et à suivre les lignes de conduite qui sont compatibles avec les objectifs et les valeurs de la Société » [Ebner 2006]. Actuellement l'ISO 26000, parue en 2010, peut être considéré comme la référence pour la RSE [ISO b]. Elle a pour but de fournir des lignes directrices aux organisations engagées dans une démarche de RSE. Ainsi, d'après [ISO b] la responsabilité d'une organisation vis-à-vis des impacts de ses décisions et activités, sur la société et sur l'environnement, se traduisent par un comportement éthique et transparent qui

- contribue au développement durable, y compris à la santé et au bien-être de la société ;
- prend en compte les attentes des parties prenantes ;
- respecte les lois en vigueur tout en étant en cohérence avec les normes internationales de comportement ;
- est intégré dans l'ensemble de l'organisation et mis en œuvre dans ses relations.

Dans la pratique la distinction entre DD, utilisé de façon très large dans nos sociétés, et RSE, limitée aux seules entreprises, peut sembler ténue. Peut-on positionner ces deux

notions ?

S'appuyant sur une analyse bibliographique de 43 articles traitant du DD et/ou de la RSE, publiés entre 1998 et 2006 dans différents journaux, [Ebner 2006] présente une étude synthétique des lien DD/RSE. Ainsi, les auteurs identifient cinq groupes d'articles correspondant à cinq façons d'aborder conjointement DD et RSE.

groupe 1 : le DD sans référence explicite à la RSE (9 articles sur 43)

Ces articles se concentrent uniquement sur le DD et ne font pas mention de la RSE. Ils suivent la définition du DD proposée par la WCED en 1987, considérant le DD comme un concept éthique qui repose sur les trois piliers sans privilégier un aspect particulier.

groupe 2 : la RSE comme pilier sociétal du DD (12 articles sur 43)

Ces articles considèrent la RSE comme le pilier sociétal du DD dans le cadre des entreprises. Les entreprises sont responsables de leurs impacts sur les personnes avec lesquelles elles interagissent ou la Société. Initialement, la RSE ne cherche pas à traiter les aspects économiques et environnementaux des activités d'une entreprise. Il s'agit alors uniquement d'introduire une gestion tenant compte des parties prenantes. Si l'attention portée aux parties prenantes est au centre des discussions sur le DD [Howarth 2006] ou dans les principes mis en avant dans les documents tels que le [GRI f] ou le [ISO b], elle n'est pas réservée au pilier sociétal. Par exemple dans [Tseng 2009], le pourcentage de fournisseurs participant à l'analyse du cycle de vie des matériaux bruts ou des emballages est classé sous l'étiquette « Performance Economique ».

groupe 3 : le DD comme base éthique de la RSE (3 sur 43)

Ces articles avancent que les concepts éthiques du DD sont à la base de la RSE. Il en ressort une vision de la RSE comme le DD à l'échelle des entreprises [Zwetsloot 2003]. Si cette position est confortée par l'ISO 26000, il faut cependant souligner que les principes de la RSE émis dans l'ISO 26000 pourraient s'appliquer à d'autres types d'organisations que des entreprises. De plus, une application du DD « enfermée » dans un contexte précis, et inutile ailleurs, ne respecte pas les principes de diffusion et de communication universels qui sont propres au DD.

groupe 4 : DD et RSE utilisés comme synonymes (16 sur 43)

Que ce soit dans la bibliographie ou dans les entreprises, un grand nombre d'articles ne font pas de distinction entre les deux termes. Selon Ebner, cela peut s'expliquer par la tendance des entreprises à qualifier de RSE leurs démarches DD. En fait, si l'on reconnait les acceptions restrictives des groupes 2 et 3, il est tout aussi légitime d'ouvrir le groupe 4 en considérant le DD et la RSE comme analogues puisque les deux tendent vers le même but. Ce mélange des termes est d'autant plus cohérent du point de vue des cadres d'entreprises.

groupe 5 : divers (3 sur 43)

Ces articles n'ont pas pu être classés dans les autres groupes. Dans [Daub 2005], la proposition est que la RSE construit un cadre éthique pour le DD. La Responsabilité des Entreprises est une responsabilité éthique appliquée aux trois dimensions du DD. La RSE ne serait pas alors une partie du DD mais un moyen de construire un DD.

Nous terminons cette étude sur les liens entre DD et RSE par quelques remarques et réflexions.

- D'après l'ISO 26000, l'objectif de la RSE est de contribuer au DD.
- Le DD est un « principe » de développement.
- L'évolution des technologies et des organisations sociales, la difficulté à évaluer les besoins présents et encore plus les besoins futurs, font que le DD est plus une finalité qu'un objectif atteignable.
- Plutôt qu'un objectif, le DD représente une direction à suivre et la RSE une façon de procéder.

En résumé, nous comprenons la RSE comme un moyen, adapté à l'organisation générale d'une entreprise, pour atteindre la fin qu'est le DD. Dans le cadre d'une entreprise il n'y a pourtant pas vraiment de raison de distinguer les deux approches. Ainsi, pour faciliter la compréhension et la diffusion des principes du DD au sens large, dans la suite de cette thèse nous mélangerons parfois, sans plus de précaution, des travaux issus des communautés DD et RSE car équivalents en termes de problématique.

En synthèse, nous retenons du DD deux facettes qui concernent les entreprises industrielles :

- une définition qui établit ses principes en temps que démarche de « développement responsable », qui nous fait nous interroger sur la démarche de développement/ d'amélioration en entreprise ;
- une perspective holistique fondée sur trois piliers, qui nous fait nous interroger sur les spécificités du DD en termes d'information nécessaire.

La partie suivante est donc consacrée à la **démarche** d'amélioration généralement déployée aujourd'hui en entreprise et ses bases structurantes.

1.2 La démarche d'amélioration continue de la performance

Le sportif de haut niveau, aussi performant soit-il, qui ne s'entraîne plus rejoint rapidement la catégorie des sportifs amateurs. Il est même probable que notre sportif doive modifier la pratique de son sport favori pour améliorer ses performances et ainsi peut-être gagner face

à la concurrence. Il en est de même pour l'entreprise qui doit donc évoluer « positivement » en permanence pour demeurer performante, atteindre les objectifs qu'elle se fixe. Une des questions alors posée concerne le cadre dans lequel l'entreprise doit se situer pour faire en sorte que cette amélioration continue de la performance devienne systématique. Deux approches principales ont été jusqu'alors exploitées pour définir ce cadre :

- la théorie mathématique des systèmes, exploitée en automatique,
- la vision moderne unifiée des systèmes d'informations émanant du contrôle de gestion.

Ces deux approches sont présentées ci-après ainsi que leurs limites pour le pilotage de l'entreprise inscrite dans une démarche d'amélioration continue.

1.2.1 La théorie mathématique des systèmes, exploitée en automatique

Dans son utilisation de la théorie des systèmes, l'automatique vise à analyser le comportement des systèmes dynamiques de façon à élaborer des stratégies de commande permettant d'imposer des comportements souhaités aux systèmes étudiés. Si d'un point de vue pratique l'automatique s'est essentiellement intéressée aux systèmes physiques (mécaniques, électriques, électroniques, hydrauliques, chimiques, biologiques, etc.), d'un point de vue théorique la notion de systèmes recouvre une large diversité de systèmes plus abstraits comme les systèmes économiques, financiers, sociaux, etc. Ainsi, pris au sens large, un système est une combinaison de composants (ou sous-systèmes) interconnectés pour atteindre un objectif commun en réponse à différents besoins exprimés. Un système, tout comme ses composants, est alors assimilé à un organe fonctionnel représenté par une équation d'évolution.

La commande des systèmes a pour objectif de modifier le comportement naturel du système considéré. Il est donc indispensable de disposer de moyens d'action sur ce système. Parmi les grandeurs mises en jeu dans le fonctionnement d'un système, on distinguera donc celles qui, provenant de l'environnement extérieur du système, agissent sur ce dernier. Parmi celles-ci, on différenciera les grandeurs dont l'Homme a la maîtrise (les entrées) de celles qui échappent à son contrôle (les perturbations). De l'extérieur, le système est uniquement visible par ses sorties (ses réponses). D'un point de vue schématique (figure 1.2), un système S est alors représenté par un bloc fonctionnel rectangulaire et des flèches symbolisant ses entrées et ses sorties. Lorsqu'une entrée de S est effectivement générée par un autre système C (dit système de commande ou simplement contrôleur), le système global CS (système de commande + système à piloter) devient un système piloté dont le comportement dynamique a été modifié par rapport à celui du système initial S. La figure 1.2 illustre l'architecture d'un système commandé en boucle ouverte.

L'entrée du système de commande C (consigne c) représente l'objectif fixé pour le système commandé. La sortie du système de commande (commande u) est transmise en entrée du système à piloter S qui répond par la sortie y. Si y est égal à c, le système commandé CS a effectivement le comportement entrée/sortie désiré. Malheureusement, ce cas idéal

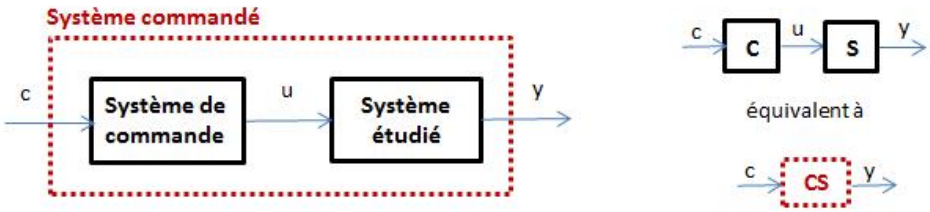

FIGURE 1.2 – Commande en boucle ouverte

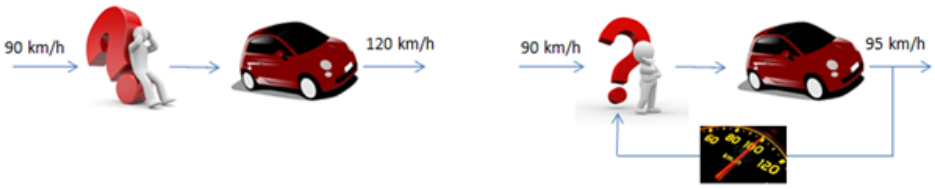

FIGURE 1.3 – De la boucle ouverte à la boucle fermée

est très difficilement atteignable.

Pour illustrer ce propos, imaginons une réalisation d'un système commandé en boucle ouverte dans laquelle le système S est une voiture à piloter en vitesse et le système de commande C un conducteur humain à qui une consigne de vitesse de 90 km/h est donnée. Par malchance, le tableau de bord de notre voiture est défaillant et ne fournit plus aucun affichage de la vitesse du véhicule. Notre pilote doit donc utiliser frein et accélérateur en « aveugle ». On comprendra aisément que si notre chauffeur ne connaît pas parfaitement sa voiture, il n'a pratiquement aucune chance de rouler effectivement à 90 km/h. Habituellement, notre chauffeur exploite l'information de vitesse que lui fournit son tableau de bord pour décider de l'action qu'il fera pour régler la vitesse du véhicule. Le conducteur est en fait intégré dans une architecture de commande en « boucle fermée » dite « boucle de rétro-action ». La figure 1.3 illustre le passage de la boucle ouverte à la boucle fermée.

La commande en boucle fermée est l'approche conventionnelle de l'automaticien. Si l'on se réfère au schéma classique de la figure 1.4, la consigne c est comparée à la sortie y du système de façon à fermer la boucle de rétroaction. L'erreur e produite par le comparateur devient alors l'entrée du contrôleur ce qui lui permet de réagir en fonction de l'écart entre la sortie désirée et la sortie réelle.

Le choix d'une commande en boucle fermée étant établi, reste à concevoir et réaliser le contrôleur C qui confère au système bouclé les performances statiques et dynamiques souhaitées (stabilité, précision, rejet de perturbations, etc.). Pour ce faire, l'automaticien dispose d'outils de synthèse efficaces dans le cas où le système à piloter S est linéaire et parfaitement connu. En effet dans ce contexte idéal, une transposition dans le domaine de Laplace des équations différentielles (représentation de l'évolution dynamique des systèmes), conduit à l'obtention de fonctions de transfert entrée /sortie manipulables par calcul

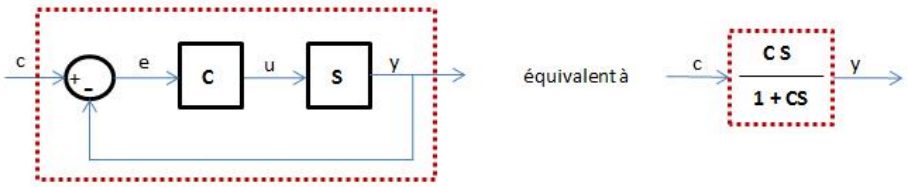

FIGURE 1.4 – Commande en boucle fermée et système équivalent

algébrique ou de façon équivalente par transformation de schémas-blocs. Ainsi, la fonction de transfert du système commandé selon le schéma bloc de la figure 1.4 est donné par l'expression algébrique $\frac{CS}{1+CS}$ où S et C sont respectivement les fonctions de transfert du système et du contrôleur. Si S est connu et les propriétés souhaitées du système bouclé exprimées par le biais d'une fonction de transfert G, le contrôleur C peut être synthétisé par « inversion » de la relation d'équivalence $G \equiv \frac{CS}{1+CS}$.

Cette approche algébrique (et son pendant graphique par transformation de schémas-blocs) est largement exploitée par l'automaticien qui conçoit alors une architecture de commande globale par insertion de multiples composants fonctionnels (stabilisateur, observateur, prédicteur, filtre, planificateur de trajectoire, etc.). Cette intégration de composants est fréquemment associée à la spécification de boucles fermées internes. Quoi qu'il en soit, la détermination du contrôleur nécessite de connaître parfaitement le système puisque C est calculé à partir de S . Dans le cas de systèmes physiques, il est possible de modéliser le système à étudier en utilisant les lois de la physique puis d'identifier les paramètres du modèle établi à partir de données mesurées. Le succès de l'automatisation dépend d'ailleurs très fortement de la qualité des modèles identifiés. Dans le cas de systèmes de type entreprise ou organisation, il n'est pas envisageable de construire des modèles suffisamment représentatifs pour être exploités directement dans une structure de décision. Si une approche de modélisation de l'entreprise n'est pas à exclure complètement, elle ne peut être envisagée qu'avec des outils de représentation spécifiques tels par exemple le diagramme de Forrester ([Forrester 1994]) et les cartes cognitives ([Eden 2004]) qui s'insèrent probablement mieux dans une démarche pas-à-pas structurante de type PDCA qui sera présentée dans la suite de ce manuscrit (cf. 1.2.4).

Enfin, dans le cadre de l'automatique, la synthèse du contrôleur n'a de sens que si elle se poursuit par une phase de réalisation matérielle de celui-ci. Cette dernière étape conduit à complètement sortir l'Homme de la structure de commande de façon à garantir le comportement du système bouclé. Si l'on revient à l'exemple du contrôle de vitesse, le conducteur est tout bonnement remplacé par un régulateur de vitesse. L'intervention humaine est alors ramenée en amont de la commande (spécification de la consigne) ou au choix de reprendre la main sur le régulateur.

De cette sous-section, nous retiendrons deux éléments essentiels qui nous conduisent à rejeter une approche purement automatique de l'amélioration des systèmes, à savoir la nécessité de disposer d'un modèle du système étudié et l'impossibilité d'inclure l'humain

dans le processus de construction du système d'amélioration. A contrario, nous retiendrons deux concepts qui à nos yeux ont toute leur place dans un contexte d'amélioration de la performance, à savoir la modularité basée sur le principe de composition/décomposition des systèmes et la boucle de rétroaction avec son mécanisme de comparaison. Ces deux notions sont d'ailleurs présentes dans de nombreux travaux abordant le pilotage industriel [Mélèse 1991], [Lorino 1991], [Bitton 1990], [Pujo 2002]. Ainsi, en tenant compte à la fois des aspects structurels et conjoncturels de la performance, [Mélèse 1991] propose un schéma de principe modulaire du pilotage en entreprise exploitant la rétroaction. Modularité et rétroaction sont également au cœur des travaux présentés dans [Jelali 2006] qui traitent de l'évaluation des systèmes de pilotage. Plus généralement, ce que la plupart des auteurs appellent le pilotage industriel permet de lier les résultats obtenus aux actions mises en œuvre conformément aux principes de la boucle de rétroaction.

1.2.2 Des systèmes de gestion vers une vision unifiée des systèmes d'information

Bouquin définit le contrôle de gestion comme étant « un ensemble de dispositifs utilisant les systèmes d'information et qui visent à assurer la cohérence des actions des managers » [Bouquin 2014]. Cette définition récente du contrôle de gestion prolonge les définitions plus anciennes nées avec le Taylorisme qui voient la mission du Contrôle de gestion comme étant le perfectionnement du système et de l'organisation. Anthony donne la définition suivante du contrôle de gestion (*management control*) : le contrôle de gestion est le processus par lequel les managers obtiennent l'assurance que les ressources sont utilisées de manière efficace et efficiente pour la réalisation des objectifs de l'organisation [Anthony 1965]. Il s'agit donc de fournir aux décideurs de l'entreprise des standards et objectifs à atteindre ainsi que les moyens de vérifier leur respect afin d'orienter les actions entreprises d'une façon efficiente. Dans ce sens se sont développés un certain nombre d'outils dont le premier fut la pyramide de construction du *Return On Investment* chez Dupont de Nemours. Aujourd'hui le contrôle de gestion rassemble la comptabilité générale, la comptabilité analytique, le contrôle des opérations par les coûts, le contrôle des investissements à travers la rentabilité et depuis une vingtaine d'années les indicateurs de performance et tableaux de bord [Berrah 1997].

Revenons sur les informations fournies par les outils traditionnels du contrôle de gestion en nous concentrant sur la mission d'aide à la prise décision, la mission d'aide à la délégation n'étant pas l'objet de ce travail.

Les outils traditionnels du contrôle de gestion reposent sur les notions de comptabilité générale et de comptabilité analytique [Engel 2005].

Pour recueillir les données nécessaires à l'établissement des outils traditionnels de la comptabilité générale particulièrement du bilan et du compte de résultat, il est nécessaire d'identifier les flux monétaires (encaissements, salaires, impôts, dividendes, etc.) et physiques (biens et services) entre l'entreprise et ses parties prenantes. Au final la comptabilité

générale fournit des informations globales sur l'entreprise, généralement une fois par an.

Le Grand Dictionnaire Terminologique définit la comptabilité analytique comme étant la « comptabilité dont l'objet est, d'une part, de connaître, de calculer, de classer et d'enregistrer les coûts des activités de production et de distribution de biens et de services de l'entité et, d'autre part, d'établir des prévisions de charges et de produits (par exemple coûts préétablis et budgets d'exploitation), d'en constater la réalisation et d'expliquer les écarts qui en résultent (contrôle des coûts et budgets). » Reprenant les principes de la comptabilité générale le but est cette fois d'identifier les sources de coûts relatives à une « partie » de l'entreprise, c'est une comptabilité à usage interne. Cette partie de l'entreprise peut être un centre de responsabilité, un processus, une activité, une opération, un produit ou une famille de produits.

La comptabilité analytique a comme intérêt d'apporter un éclairage sur la rentabilité, le chiffre d'affaires, la marge etc. de chaque structure pour constater les points négatifs et les corriger et les points positifs pour les généraliser. Selon [Engel 2005] les usages possibles de ces informations permettent principalement de :

- justifier/calculer des prix de vente ;
- donner des éléments permettant de décider ;
- fournir des paramètres de contrôle ;
- évaluer des biens et des services.

Le problème est qu'aucune comptabilité ne permet de répondre complètement à ces quatre usages. Se sont donc développés plusieurs modalités de calcul telles que les coûts complets, les coûts variables, le *direct costing* (paragraphe 1.1). La comptabilité analytique demande donc une grande compétence pour le choix de la méthode adaptée à l'usage envisagé. Elle est donc réservée à des structures d'une certaine taille car le coût généré par du personnel formé en comptabilité, par le temps nécessaire à la collecte, l'analyse des informations et leur application est significatif.

Concernant les éléments permettant de décider, il faut reconnaître une certaine difficulté à fournir les données utiles, la mesure d'un coût de production est par exemple complexe à établir, et à interpréter à partir des informations délivrées par la comptabilité analytique. En effet comment interpréter un écart si son mode de calcul est compris des seuls spécialistes ?

De nombreux auteurs ont souligné les limites et difficultés rencontrées dans la pratique du contrôle de gestion. Ils constatent la difficulté de prendre en compte les critères non financiers et la notion de valeur, l'absence de lien clair avec le pilotage opérationnel, le contrôle *a posteriori*, la difficulté de rapprocher le modèle de coût du système de production. De nombreuses propositions ont donc vu le jour pour améliorer ou compléter le contrôle de gestion. Il s'agit principalement des approches technico-économiques et techniques d'une part que nous évoquons ci-après et des indicateurs de performance d'autre

part qui seront présentés au paragraphe 1.2.3.

Les approches technico-économiques ont pour but de fournir des informations adaptées aux besoins du décideur, elles ont été évoqués dans la mesure de la performance de la période 3 du paragraphe 1.1. Les principales approches sont des méthodes d'évaluation de la performance/contreperformance (Coûts d'Obtention de la Qualité (COQ), Coûts et performances cachées (CPC), Coûts de Non Efficacité des Equipements (CNEE)) et des approches de modernisation du système comptable (méthode des Unités de Production, méthode de la Valeur Ajoutée Directe (VAD), *Activity Based Costing/Activity Based Management* (ABC/ABM) [Berliner 1988]).

Les approches techniques ont clairement vocation à gérer les activités de production ou périphériques à la production. On trouve ainsi la gestion des opérations de production par le *Material Requirement Planning* (MRP) et le *Manufacturing Resource Planning* (MRP 2) ou « planification des ressources de production ». Cette méthode a pour mission de permettre la planification de la production en fonction des ressources en personnel, matières premières, machines, etc. et en temps par rapport à un besoin à date ou un besoin de stock. Les derniers développements comme DD MRP [Ptak 2011] permettent de mieux articuler les lancements de production et niveaux de stocks avec les besoins commerciaux. On peut citer également les méthodes de flux tirés comme le *Kanban* ou le *Constant Work In Progress* (ConWIP) [Spearman 1990] qui gèrent la production à partir de la consommation des postes avals.

Dans tous les cas la coordination de ces approches qui concernent progressivement toutes les activités de l'entreprise (marketing, conception, industrialisation, production, ventes, logistique, qualité, maintenance, ressources humaines, etc.) demande une gestion cohérente des données et informations de l'entreprise. On parle donc désormais de système d'information de l'entreprise [Reix 2002] appelés *Entreprise Ressource Planning* (ERP), en français Progiciel de Gestion Intégrée (PGI), dans le cadre des entreprises industrielles. Selon le Grand Dictionnaire Terminologique (GDT), un ERP est un « progiciel qui permet de gérer l'ensemble des processus d'une entreprise en intégrant l'ensemble de ses fonctions, dont la gestion des ressources humaines, la gestion comptable et financière, l'aide à la décision, mais aussi la vente, la distribution, l'approvisionnement et le commerce électronique ». L'adoption de ces ERP pose un certain nombre de difficultés aux entreprises. Leur mise en place suppose un travail préalable d'identification et de modélisation des processus et activités de l'entreprise (*Business Process Modelling* BPM [Aguilar-Saven 2004]) et voit le développement des cartographies de processus (Norme ISO 9000 version 2000). L'intégration de toutes les activités de l'entreprise est délicate, voire illusoire, surtout dans le cadre des chaînes logistiques ou de métiers très particuliers ayant développé leurs propres progiciels. La notion d'interopérabilité entre l'ERP de l'entreprise et ceux de ses partenaires ou avec des logiciels métiers spécialisés émerge alors. Elle permet à « des systèmes informatiques hétérogènes de fonctionner conjointement, grâce à l'utilisation de langages et de protocoles communs, et d'avoir accès à leurs ressources de façon réciproque ».

Dans ce cadre l'information pour le pilotage de l'entreprise est l'indicateur de performance [Berrah 1997]. Il est défini selon les critères de performance de l'entreprise, tant financiers que techniques, tant externes (Facteurs Clés de Succès (FCS)), qu'internes (Facteurs Clés de Progrès (FCP)). Ils jouent un rôle similaire aux capteurs de la boucle de l'automatique. La performance s'exprime donc au travers de ces d'indicateurs dont la construction et l'organisation au sein de systèmes est abordé dans la section qui suit.

1.2.3 Les indicateurs et systèmes d'indicateurs de la performance

Au milieu des années 70, il devient nécessaire de prendre en compte la distorsion croissante entre les coûts réels et les coûts théoriques dans le contexte alors encore monocritère de la performance. En effet, la répartition subjective des charges indirectes rend ces coûts calculés moins justes et en conséquence le contrôle de gestion moins pertinent [Gervais 2009]. 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 [Johnson 1975]. 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 1977]).

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 suffisait donc d'optimiser les différentes productions locales pour optimiser la performance globale. Cependant il est établi aujourd'hui que la performance d'une entreprise ou d'une quelconque activité porte sur de multiples critères dont un seul indicateur ne peut pas rendre compte. Dans ce contexte, l'expression de la performance doit être également multicritère, ce qui a conduit l'entreprise à s'intéresser aux notions de tableau de bord et de systèmes d'indicateurs de performance pour répondre au problème.

Sachant que l'évaluation de la performance de tout type d'organisations est un problème multicritère, l'indicateur pris en tant que tel doit être intégré dans un système, en cohérence avec une stratégie globale qui prend en compte les FCS et FCP de l'entreprise et d'une façon générale ses différents critères de performance [Berrah 1997]. En effet, dans la nécessaire vision systémique de l'entreprise, les multiples indicateurs de la performance identifiés aux critères des différentes entités (fonctions, activités, atelier, etc.) sont désormais dépendants. Chaque entité de l'entreprise ne doit plus rechercher à optimiser sa seule performance propre (la productivité d'un atelier ou d'une ligne par exemple) sachant que cela va à l'encontre de la performance globale : un commercial qui remplit son carnet de commandes sans s'assurer que la production pourra suivre, augmente sa performance propre mais dégrade celle de l'entreprise qui perd alors les clients. La norme ISO 9000

ajoute que les indicateurs et les tableaux de bord sont des outils indispensables au pilotage d'un organisme, d'une équipe, d'un processus pour atteindre les objectifs visés [ISO c]. En effet, si un indicateur de performance fournit une information (pertinente) à propos d'un paramètre d'un processus, un système d'indicateurs (ou un tableau de bord) regroupe et synthétise l'ensemble des informations (monocritères) sur la performance d'un processus.

[Clivillé 2007] propose de définir le SIP comme un outil multicritère, réalisé à partir d'un ensemble d'expressions de la performance, aussi appelées *metrics* [Cook 2001] [Melnyk 2004], c'est-à-dire des mesures physiques aussi bien que des évaluations de la performance. Il doit être organisé de façon cohérente avec les objectifs de l'entreprise. En général, les objectifs globaux considérés sont décomposés en objectifs élémentaires répartis suivant les niveaux organisationnels (stratégique, tactique ou opérationnel).

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 dont l'objet était la maîtrise des moyens de production, par la mise en procédure de conduite des équipements et de contrôle des opérations effectuées.

« 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 » [Giard 2003]. 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.

L'exemple de la figure 1.5, en place dans l'entreprise partenaire *adixen Vacuum Products* (aVP), illustre cette notion de tableau de bord.

Ces indicateurs sont ensuite exploités par les pilotes des processus afin de prendre des décisions qui permettent d'atteindre les objectifs fixés dans un mécanisme comparable à celui réalisé par le contrôleur de la boucle de l'automatique [Bitton 1990]. Cette vision unifiée a abouti au *Business Process Management* (gestion des processus métiers) [Harmon 2015] et la *Business Intelligence* [Sauter 2014] au début des années 2000. Pour autant si ces nouveaux outils remplissent parfaitement leur fonction pour le « fonctionnement » de l'entreprise, leur utilisation pour le pilotage des « transformations » est plus difficilement exploitable. Suivre les ordres de fabrications soldées pour en lancer de nouveaux est différent de suivre le taux de rebut pour passer de 30 ppm à 3 ppm. Pour pallier cette faiblesse les entreprises vont intégrer progressivement des approches, méthodes et outils issus du domaine de la Qualité et de la résolution de problème qui sont dédiés spécifiquement à la démarche d'amélioration industrielle.

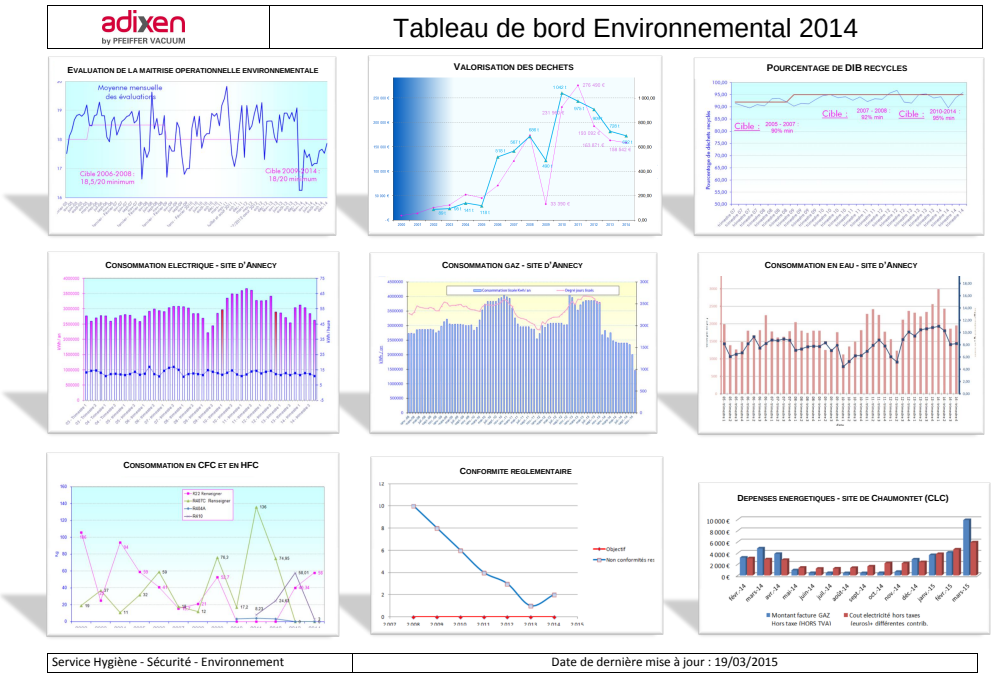

FIGURE 1.5 – Exemple de Tableau de Bord Environnemental [source documentaire aVP]

1.2.4 Démarche d'amélioration industrielle

Cette idée d'amélioration de la performance est très ancienne et l'évolution du prix de vente de la Ford T entre son lancement (850 $ en 1908) et la fin de sa production (290 $ en 1927) en est une illustration. Il est aujourd'hui commun de distinguer deux grandes approches pour cette Démarche d'Amélioration Industrielle (DAI) :

- l'amélioration par rupture ou *Kaikaku* dont un développement est le *Business Process Reengineering* (BPR),
- l'amélioration continue aussi appelée *Kaizen* qui a été popularisée dans le cadre du *Toyota Production System*.

L'amélioration par rupture est une démarche de remise en question et de redéfinition en profondeur des processus d'une organisation en vue de la restructurer pour la rendre plus efficace tout en réduisant les coûts. Ainsi pour Hammer et Champy [Hammer 1993] dans un contexte d'émergence des nouvelles technologies, l'adaptation de systèmes conçus en leur absence ne peut pas aboutir à un système satisfaisant. Leur devise est "*Don't automate, obliterate*" , il faut donc innover pour réorganiser, restructurer les processus de l'entreprise. Ainsi cette réorganisation des méthodes de travail constitue souvent la première phase d'un projet d'informatisation : on commence par rationaliser une activité de l'entreprise (la prise en compte d'une commande d'un client) afin de bien cerner tous les cas de figure et de pouvoir déclencher des actions adéquates de manière automatique et

sans ambiguïté. Le développement de cette amélioration radicale a été discuté suite à une proportion importante d'échecs de ces projets, de l'ordre de 70% dans la décennie 1990. Elle doit être combinée à une analyse des risques permettant de mieux évaluer l'intérêt d'investissement souvent importants.

L'expression « Amélioration Continue » est la traduction française de *Kaizen* en japonais, signifiant littéralement « changement pour améliorer ». Le *Kaizen* est avant tout une philosophie, un état d'esprit, une culture du changement et de l'amélioration au quotidien. Il repose sur le principe selon lequel il faut faire de petites améliorations chaque jour en opposition à l'approche *Kaikaku*. Le *Kaizen* est une approche permanente, très proche du terrain (Gemba), axé sur la remontée des problèmes simples et des actions directement prises en charge par le personnel. Le *Kaizen* s'adresse surtout aux ressources humaines dont il structure la manière d'agir et d'interagir. Il est bien adapté à l'élimination des gaspillages (Mudas) et abrite sous son « parapluie » un grand nombre d'outils qualité et de résolution de problèmes. Il est souvent assimilé au *Toyota Production System* et au *Lean Management* même si ces deux approches peuvent aussi utiliser le *Kaikaku* dans le cadre du *Value Stream Design* en particulier [Holweg 2014] dont l'objet d'obtenir une tension du flux de valeur mesuré par le *Lean index* [Cezar Lucato 2014].

Pour assurer la continuité de l'amélioration, le *Kaizen* a un caractère cyclique qui permet de faire le bilan des améliorations réalisées pour les corriger éventuellement afin de lancer les actions suivantes. Pour respecter ce caractère cyclique l'adoption de la roue de Deming (voir figure 1.6) dans sa déclinaison PDCA (*Plan Do Check Act*) s'est généralisée fournissant ainsi un cadre méthodologique à la DAI.

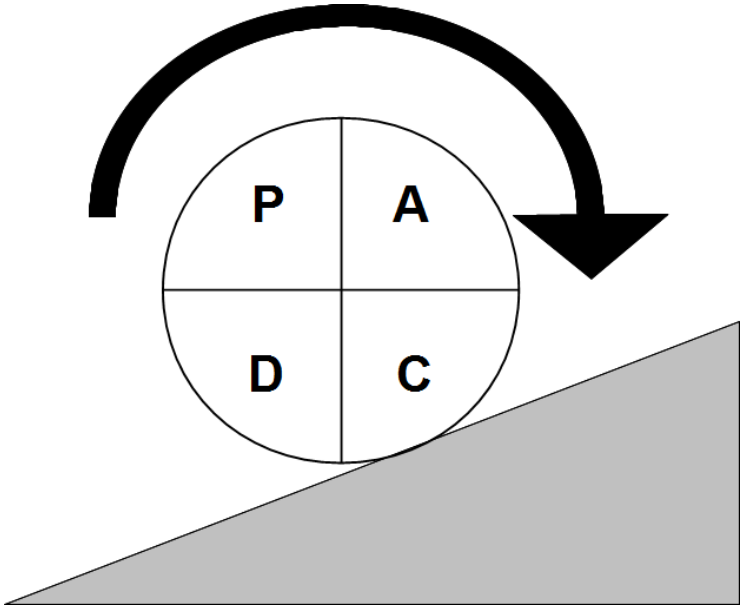

FIGURE 1.6 – Roue de Deming

Un cycle PDCA (ou tour de roue de Deming) est composé des étapes suivantes :

- Plan, analyser la situation de l'organisation, définir les objectifs globaux, fixer des

jalons intermédiaires et développer le plan pour y parvenir

- Do, mettre en oeuvre le plan par une action
- Check, mesurer le résultat
- Act, corriger et améliorer le plan et sa mise en pratique (corriger et apprendre des erreurs pour améliorer le plan afin de parvenir à de meilleurs résultats à la prochaine itération).

Il s'agit d'une démarche pas à pas qui permet d'aborder l'amélioration de la performance progressivement. Le caractère cyclique de la démarche autorise une continuité d'un pas à l'autre, assurant la cohérence entre les actions visant à l'amélioration de la performance. Grâce à cela l'entreprise peut maîtriser l'amélioration de sa performance par une approche à la fois pragmatique (pas à pas) et pertinente avec le principe général du pilotage industriel (retour d'information grâce aux indicateurs de performance sur les actions réalisées et les actions en cours).

Pour servir de jalon, un objectif associé à la performance d'une entreprise est défini à l'aide d'une valeur ou de plusieurs valeurs. Nous appelons « valeur » les variables qui permettent à l'entreprise de pouvoir caractériser son état vis-à-vis d'un critère de sa performance. Ces valeurs peuvent concerner des données quantifiables (masse de déchets à la fin d'un processus, émissions atmosphériques, taux de *turnover*, etc.) ou non quantifiables (satisfaction au travail, perception du client sur le produit, etc.). Pour pouvoir piloter l'amélioration de sa performance l'entreprise doit pouvoir comparer des valeurs en l'état aux valeurs associées aux objectifs fixés.

L'approche managériale et gestionnaire s'est depuis longtemps accordée pour dire que l'on ne gère que ce que l'on mesure "*What you measure is what you get*" [Kaplan 1992] [Lorino 1996]. Ce principe est évidemment pertinent ici et pour que s'opère la boucle de rétroaction nécessaire au pilotage de l'amélioration de la performance, il faut pouvoir décrire une action selon les critères de la performance à l'aide de valeurs homogènes avec celles des objectifs. Ce que nous appelons « mesure » est le relevé d'une valeur ou le calcul réalisé à l'aide d'une ou de plusieurs valeurs. Il peut s'agir de ce que relève un capteur, un compteur, une étude, une expertise, une estimation, une tendance, un quotient, etc.

Pour que le pilotage soit opérant, il faut parvenir à établir le lien entre action et modifications des mesures résultantes de l'action. Lorsqu'il existe une loi de comportement qui englobe totalement la relation de cause à effet entre action et mesure, le processus de décision peut éventuellement être délégué à un système automatisé. Par exemple la mise en veille d'une machine en fonction de l'heure ou de l'absence de charge pendant un délai peut être déléguée à un automate dans le but de réduire les consommations inutiles. Ce cas de figure est simple car il s'agit d'une situation où la mesure de l'atteinte de l'objectif est simple et la réaction facilement programmable. En effet la mesure peut être facilement interprétée et sachant la loi de comportement pour le système la décision sur l'action à réaliser est simple. Mais dans le cas des entreprises, et particulièrement dans le cadre des démarches d'amélioration, une telle loi ne peut être complètement synthétisée sous une

forme mathématique. On a alors recours à un modèle qualifié de cognitif reposant sur de l'expertise comme la *cognitive map* par exemple [Ramakrishnan 2014]. 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) [Cliville 2004].

Pour piloter l'entreprise dans le cadre de cette DAI les décideurs doivent donc disposer d'indicateurs de performance et d'outils de traitement de l'information permettant de diagnostiquer l'état de l'entreprise suite aux actions réalisées, et décider des actions à lancer pour atteindre les objectifs fixés. La section suivante est consacrée à l'identification de tels outils de pilotage qui intègrent les spécificités du DD.

1.3 Spécificités de l'amélioration dans le contexte du DD

Le contexte de la performance dans le cadre général des démarches d'amélioration industrielles étant posé, il reste à identifier les spécificités liées à la problématique du DD présentée dans le 1.1.2. A cet effet, deux types de sources bibliographiques sont considérées : d'une part les propositions généralistes telles que le *Global Reporting Initiative* et la norme ISO 26000 et d'autre part des contributions publiées dans des revues scientifiques.

1.3.1 Les travaux communautaires

Le *Global Reporting Initiative* (GRI) propose un cadre global pour la mesure de la performance du développement durable selon tous ses aspects. Il met à la disposition de tous des documents techniques concernant d'une part, les indicateurs dédiés au DD, et d'autre part, un guide méthodologique pour construire ces indicateurs. Ces documents ayant été réalisés à partir des rapports mis à la disposition du GRI par différentes organisations, les raisons d'être de ces indicateurs et leur appropriation par les utilisateurs sont mis en avant [GRI h]. Les 6 documents *Indicator Protocols Set* ([GRI a] [GRI b] [GRI d] [GRI c] [GRI g] [GRI e]) développent plus en profondeur ces éléments pour chaque indicateur.

Les indicateurs sont structurés sur 3 niveaux et en 6 groupes principaux qui couvrent l'ensemble des aspects du DD qui sont explicités afin de faciliter la vision d'ensemble pour l'utilisateur. Ces 6 groupes principaux sont les suivants :

- le pilier économique est représenté par les « indicateurs de performance économique » [GRI a],
- le pilier environnemental est représenté par les « indicateurs de performance environnementale » [GRI b],
- le pilier sociétal est représenté par :
  - les « indicateurs de performance sur les pratiques de travail et d'un travail décent » [GRI d],
  - les « indicateurs de performance sur les droits de l'Homme » [GRI c],

- les « indicateurs de performance sur la Société » [GRI g],
- les « indicateurs de la performance sur la responsabilité quant au produit » [GRI e].

Deux types d'indicateurs sont distingués : les plus généraux qui s'appliquent dans la plupart des organisations et sont qualifiés d'indicateurs de base (*core*) et des indicateurs plus spécifiques à un contexte donné, qualifiés eux de supplémentaires (*additional*). Ces documents offrent un support de référence pour la construction d'une méthode d'évaluation de la performance du DD.

Cependant, aujourd'hui, il n'y a pas de préconisations sur les objectifs (globaux ou non) à se fixer. Les valeurs de seuils pour les indicateurs sont laissées à l'appréciation des utilisateurs. En l'état, les indicateurs contenus dans ces documents, traitent en profondeur et en détails des nombreux aspects concernant le DD mais sans proposer de synthèse ou de prise en considération des interactions entre ces indicateurs.

Dans la continuité des normes ISO 9000 et du Système de Management de la Qualité, l'ISO 26000 encourage les organisations à recourir aux indicateurs de performance, à se définir des objectifs et à réagir pour progresser vers ces objectifs conformément au principe de l'amélioration continue. Ces indicateurs sont établis de manière à contrôler les aspects de la RSE au sein d'une entreprise donnée ce qui la distingue des indicateurs pour le DD où le système considéré peut dépasser le cadre d'une entreprise donnée. La problématique de la RSE est répartie en 7 questions centrales comme le montre la figure 1.7. Chaque question centrale comprend un ensemble de domaines d'actions propres à la RSE. Le document explicite les thèmes et les principes qui sont abordés par les questions centrales et domaines d'actions.

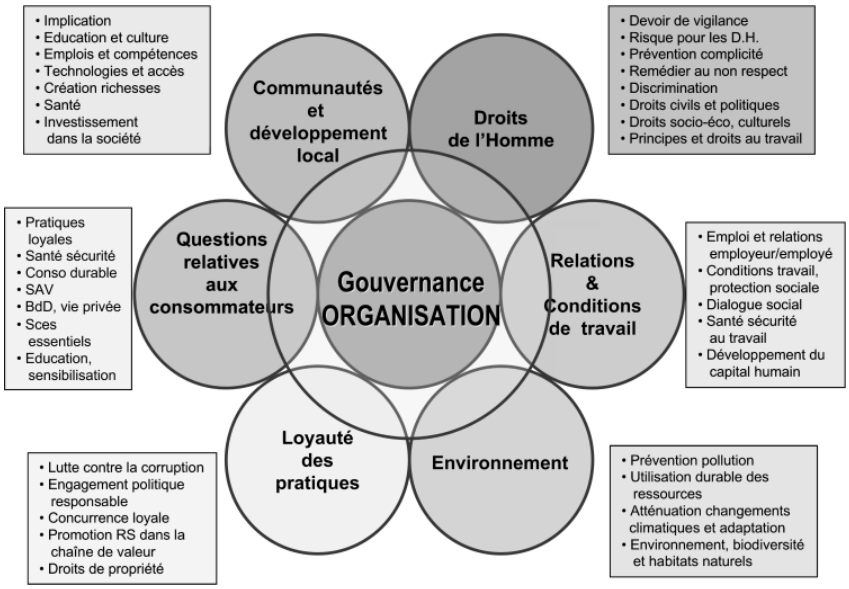

FIGURE 1.7 – Les 7 questions centrales et leurs domaines d'actions de la RSE [ISO 26000]

Comme illustré sur la figure 1.7 les aspects de la RSE devraient être traités dans une approche holistique, mais aucune approche n'est pour l'heure proposée dans ce sens.

1.3.2 Les travaux académiques

Selon [Gasparatos 2009] les progrès au sens du développement durable sont habituellement évalués par une mesure unique de durabilité. Cette mesure biophysique ou financière, ne peut pas rendre compte de la globalité du développement durable. Les indicateurs composites comme le *Human Development Index* ne sont pas non plus satisfaisants car les méthodes retenues pour réaliser leur agrégation reposent sur des hypothèses non vérifiées. L'auteur argumente pour une appréhension holistique en considérant un ensemble d'indicateurs « systèmes d'évaluation du progrès » pour le DD.

[Boons 2013], dans le cadre des modèles commerciaux, soutient le besoin en innovations « radicales et systémiques » pour le DD. L'objectif est toujours de fournir aux entreprises un cadre holistique afin d'implémenter et de contrôler les innovations durables. Selon l'auteur ce cadre a également un intérêt pour les chercheurs dans le sens où un tel outil analytique permet d'évaluer les interactions entre les différents aspects qu'une entreprise combine pour générer de la valeur économique, environnementale et sociétale.

[Goosen 2012] considère que les aspects économiques, sociétaux et environnementaux du DD sont interdépendants et doivent être appréhendés de façon coordonnée. Sa mise en oeuvre doit s'appuyer sur une démarche progressive : lorsque les problèmes environnementaux sont traités, l'entreprise s'intéresse au pilier économique, puis si la durabilité environnementale et économique est maintenue il est possible de traiter le pilier sociétal. Cette mise en oeuvre s'appuie sur la négociation entre les différents acteurs du développement sur la base de 12 indicateurs bien définis [Omer 2007] et des outils existants comme le *Triple Bottom Line Reporting* [El-Kafafi 2008] en les adaptant. Ainsi un 5ème axe « Environnement » complète les 4 axes existants (Financier, Client, Processus et Apprentissage organisationnel) du *Balanced Scorecard*.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu comment les dernières décennies sont marquées par une évolution constante de la recherche de performance industrielle fondée sur des exigences de plus en plus larges jusqu'à l'émergence du DD. Autrefois fondé et appliqué au niveau des sensibilités individuelles, le DD, souvent appelé RSE dans le contexte des entreprises, constitue un cadre global qui concerne toutes les organisations donc *a fortiori* les entreprises. Ce cadre de DD présente selon nous deux facettes :

- une philosophie sur un mode de développement responsable qui nous renvoie à la structuration de la DAI ;

- la prise en compte de points de vue spécifiques au DD, particulièrement ceux associés aux piliers Environnement et Société.

Concernant la facette DAI nous retenons qu'il s'agit de se fixer des objectifs cohérents avec la stratégie, d'agir pour les atteindre selon le principe de l'amélioration permanente et de mesurer leur degré d'atteinte afin de piloter cette démarche (au sens des cycles PDCA). Cette démarche est pilotée par un décideur qui doit intégrer toute cette information pour décider d'une action d'amélioration. Le rôle de l'indicateur de performance dans cette démarche d'amélioration ainsi que la nécessité de traiter l'ensemble de l'information destiné à piloter cette démarche a été souligné.

Pour la seconde facette, le fait que le DD introduise de nouveaux FCS et FCP, ou plus simplement de nouveaux critères de performance concernant les aspects sociétaux et environnementaux, ne change pas fondamentalement les besoins en aide à la décision de la démarche d'amélioration. Il existe dores et déjà des ressources documentaires et bibliographiques qui offrent aux entreprises des indicateurs cohérents avec les principes du DD et les besoins spécifiques de l'entreprise. Ainsi, des approches telles que le GRI qui propose des dizaines d'indicateurs dans ce sens ou la norme ISO 26000 qui structure la RSE en sept *questions centrales* existent déjà.

A la lumière de ce chapitre, nous concluons que les outils de pilotage actuels (GRI, indicateurs spécifiques au DD) doivent être complétés pour constituer une aide à la décision qui répond aux besoins de mise en œuvre d'une démarche d'amélioration DD. Cette aide à la décision doit intégrer le point de vue holistique du DD, l'imprécision des données relatives aux actions considérées, l'aspect cyclique de ce développement et les aspects pratiques des actions à engager.

Suite à ce bilan nous allons dans le chapitre 2 de ce mémoire présenter l'aide à la décision multicritère pour choisir une méthode adaptée à notre problématique. Nous opérerons dans le chapitre 3 certains développements spécifiques pour adapter cette méthode afin de répondre aux exigences du DD. Enfin cette proposition sera appliquée à un cas industriel dans le chapitre 4.

CHAPITRE 2

Approches multicritères

Sommaire

2.1 Principes généraux et attentes de l'aide à la décision multicritère 34

2.1.1 Notations et notions préliminaires 34

2.1.2 Les attentes sur l'aide à la décision 37

2.1.3 Le déroulement d'un processus MCDA 42

2.2 Etat de l'art MCDA dans le contexte industriel 54

2.2.1 Méthode 55

2.2.2 Analyse 55

2.3 La méthode choisie : UTA 58

2.3.1 Une méthode de désagrégation de préférence 58

2.3.2 *Analytic Center* UTA : ACUTA 62

2.3.3 Développements actuels sur UTA 63

2.4 Conclusion 65

Ce chapitre a pour but de présenter au lecteur l'aide (ou analyse) à la décision multicritère (MCDA : *MultiCriteria Decision Aiding*) ainsi que la méthode spécifique retenue dans ces travaux afin de répondre aux besoins établis dans le chapitre 1.

Ce chapitre présente tout d'abord les principes généraux, notations et attentes d'une démarche d'aide à la décision multicritère. Il s'agit d'une perspective générale sur la MCDA qui présente sa philosophie et son application à travers un processus détaillé ici. Les spécificités dans les approches MCDA poussent à un choix quant à la méthode déployée en fonction de leurs caractéristiques théoriques.

Ensuite, ce chapitre pratique une analyse de la bibliographie qui associe MCDA et pratiques industrielles. L'idée est de se servir de cette analyse de la pratique pour compléter l'analyse préliminaire sur les caractéristiques des méthodes et finir par sélectionner une méthode qui nous semble adéquate : UTA.

Enfin la méthode UTA est présentée dans ses détails et plus particulièrement sa version ACUTA qui répond bien à nos besoins et qui sera déployée pour étayer nos propositions du chapitre 2. D'autres méthodes, dont nous présentons les principes, pourraient être envisagées parmi les développements issus de UTA. Nous ne les abordons pas d'avantage dans ces travaux pour des raisons de simplicité.

2.1 Principes généraux et attentes de l'aide à la décision multicritère

Le principe des approches MCDA est d'aborder la décision multicritère comme une problématique consistant à choisir, ordonner, trier, quantifier, voire caractériser l'ensemble des actions, objets ou alternatives considérés dans le problème de décision, à partir des différents critères retenus ([Roy 2005]). Nos travaux se situant dans le cadre de l'amélioration de la performance industrielle, nous retiendrons le terme **action**. Un critère est un outil construit afin d'évaluer et comparer des actions entre elles selon un point de vue, aussi bien défini que possible, qui a une influence sur la décision.

Depuis environ cinquante ans, la communauté du multicritère a proposé plusieurs approches afin de soutenir les prises de décision dans un contexte multicritère dans un cadre rigoureux [Keeney 1976] [Saaty 1977] [Roy 1996] [Eom 2006] [Guitouni 1998]. Les livres [Figueira 2005a] [Greco 2010b] constituent une bonne synthèse des approches MCDA utilisées aujourd'hui.

Pour faciliter la communication et la diffusion des principes de la MCDA, les travaux relatifs à ce domaine s'articulent autour de notations mathématiques et de notions préliminaires.

2.1.1 Notations et notions préliminaires

2.1.1.1 Notations

Ensemble d'actions et critères :

L'ensemble des actions a considérées dans un problème de décision est noté A.

D'après [Roy 2005] un critère g est une fonction qui, $\forall a \in A$, associe une valeur $g(a)$, afin de prendre en compte tous les effets ou attributs pertinents associés au point de vue considéré. $g(a)$ est appelée la *performance* de a selon ce critère. Il s'agit souvent d'un nombre réel, mais dans tous les cas, il est nécessaire de définir explicitement un ensemble de toutes les évaluations possibles associées à un critère. Pour éviter la confusion avec la *performance industrielle*, nous préférons employer le terme *valeur*.

Dans l'ensemble de la bibliographie associée aux problèmes de décision multicritères, les différents critères retenus sont souvent appelés les critères g_i ou i. Nous appellerons le i^{eme} critère considéré dans un problème de décision le critère i et $g_i(a)$ la valeur associée à l'action a selon le critère i.

Relations binaires (voir [Tsoukias 2005]) :

Soit A un ensemble fini d'éléments, une relation binaire $\mathcal{R}$ sur l'ensemble A est un sous-ensemble du produit cartésien $A \times A$, plus précisément, un ensemble de paires ordonnées (a, b) tel que a et b appartiennent à A ($\mathcal{R} \subseteq A \times A$).

Une paire ordonnée (a, b) qui appartient à $\mathcal{R}$ est indifféremment notée

- $(a, b) \in \mathcal{R}$,
- $a\mathcal{R}b$ ou
- $\mathcal{R}(a, b)$.

Nous préférons la notation $a\mathcal{R}b$.

$\mathcal{R}^c$, le complémentaire de $\mathcal{R}$ est tel que $a\mathcal{R}^c b$ ssi $\neg(a\mathcal{R}b)$.

La relation binaire $\mathcal{R}$ est dite :

- Réflexive, si $a\mathcal{R}a,\ \forall a \in A$;
- Non réflexive, si $a\mathcal{R}^c a,\ \forall a \in A$;
- Symétrique, si $a\mathcal{R}b \Rightarrow b\mathcal{R}a,\ \forall a, b \in A$;
- Antisymétrique, si $(a\mathcal{R}b, b\mathcal{R}a) \Rightarrow a = b,\ \forall a, b \in A$;
- Asymétrique, si $a\mathcal{R}b => b\mathcal{R}^c a,\ \forall a, b \in A$;
- Complète, si ($a\mathcal{R}b$ ou $b\mathcal{R}a$), $\forall a \neq b \in A$;
- Fortement complète, si $a\mathcal{R}b$ ou $b\mathcal{R}a,\ \forall a, b \in A$;
- Transitive, si $(a\mathcal{R}b, b\mathcal{R}c) \Rightarrow a\mathcal{R}c,\ \forall a, b, c \in A$.

Soit $\mathcal{R}$ et $\mathcal{T}$ deux relations binaires sur le même ensemble A. Quelques opérations d'ensemble communes sont :

- l'inclusion : $\mathcal{R} \subseteq \mathcal{T}$ ssi $a\mathcal{R}b \Rightarrow a\mathcal{T}b$;
- l'union : $a(\mathcal{R} \cup \mathcal{T})b$ ssi $a\mathcal{R}b$ ou (inclusif) $a\mathcal{T}b$;
- l'intersection : $a(\mathcal{R} \cap \mathcal{T})b$ ssi $a\mathcal{R}b$ et $a\mathcal{T}b$;
- le produit relatif : $a(\mathcal{R}.\mathcal{T})b$ ssi $\exists\ c \in A$ tel que $a\mathcal{R}c$ et $c\mathcal{T}b$ ($a\mathcal{R}^2 b$ ssi $a\mathcal{R}.\mathcal{R}b$).

La relation d'équivalence $\mathcal{E}$ associée à la relation $\mathcal{R}$ est une relation réflexive, symétrique et transitive, définie par :

- $a\mathcal{E}b$ ssi $\forall a \in A$, $\begin{cases} a\mathcal{R}c \Leftrightarrow b\mathcal{R}c \\ c\mathcal{R}a \Leftrightarrow c\mathcal{R}b \end{cases}$

2.1.1.2 Relations de préférence (voir [Tsoukias 2005])

Le modèle de préférence traditionnel considère que le décideur confronté à une paire d'éléments de A soit :

- préfère clairement un élément à l'autre ou
- ressent de l'indifférence entre eux.

Le sous-ensemble de paires ordonnées $(a, b) \in A \times A$ tel que la déclaration « a est préférée à b » est vraie, est appelé relation de préférence, notée P. Le sous-ensemble de paires $(a, b) \in A \times A$ tel que la déclaration « a et b sont indifférents » est vraie, est appelé relation d'indifférence,notée I (I étant considéré comme le complément de $(P \cup P^{-1})$ par rapport à $A \times A$).

Une structure $\langle P, I \rangle$ sur l'ensemble A est une paire $\langle P, I \rangle$ de relations sur A telle que :

- P est asymétrique ;
- I est réflexif et symétrique.

La relation caractéristique $\mathcal{R}$ d'une structure $\langle P, I \rangle$ peut être définie comme la combinaison des relations P et I telle que $a\mathcal{R}b$ ssi $a(P \cup I)b$. Dans ce cas P et I peuvent être définies comme suit :

- $a\mathcal{P}b$ ssi $a\mathcal{R}b$ et $b\mathcal{R}^c a$;
- $a\mathcal{I}b$ ssi $a\mathcal{R}b$ et $b\mathcal{R}a$.

2.1.1.3 Relations d'ordre (voir [Tsoukias 2005])

La construction d'ordres est particulièrement intéressante en aide à la décision car les ordres facilitent la prise en main de telles structures de préférence. Pour les définir, des propriétés sont ajoutées aux relations P et I.

Ordre total (*total order*) :

Soit $\mathcal{R}$ une relation binaire sur l'ensemble A, $\mathcal{R}$ étant une relation caractéristique de $\langle P, I \rangle$, les définitions suivantes sont équivalentes :

- $\mathcal{R}$ est un ordre total ;
- $\mathcal{R}$ est réflexive, antisymétrique, complète et transitive ;
- $\begin{cases} I = \{(a, a), \forall a \in A\} \\ P \text{ est transitive} \\ P \cup I \text{ est réflexive et complète} \end{cases}$

- $\begin{cases} P \text{ est transitive} \\ PI \subset P \text{ (ou de manière équivalente } IP \subset P) \\ P \cup I \text{ est réflexive et complète} \end{cases}$

Avec cette relation, il n'y a indifférence entre deux actions que si elles sont identiques. La structure de l'ordre total correspond à un arrangement d'actions de la meilleure à la pire sans aucun *ex aequo*.

Dans la littérature, on peut trouver différents termes associés à cette structure : ordre total, ordre complet, ordre simple et ordre linéaire.

Ordre faible (*weak order*) :

Soit $\mathcal{R}$ une relation binaire sur l'ensemble A, $\mathcal{R}$ étant une relation caractéristique de $\langle P, I \rangle$, les définitions suivantes sont équivalentes :

- $\mathcal{R}$ est un ordre faible
- $\mathcal{R}$ est réflexive, fortement complète et transitive
- $\begin{cases} I \text{ est transitive} \\ P \text{ est transitive} \\ P \cup I \text{ est réflexive et transitive} \end{cases}$

Cette structure est aussi appelée préordre complet (*complete preorder*) ou total (*total preorder*). Dans cette structure, l'indifférence est une relation d'équivalence. L'ordre associé est un ordre total des classes d'équivalence (indifférence) de A.

Dans le cadre de la MCDA, il est possible pour des paires d'actions de A de ne pas pouvoir être caractérisées par la structure $\langle P, I \rangle$. Dans un tel cas de figure, un ordre n'est donc pas complet par définition, on parlera alors d'ordre ou de préordre partiel. Les actions concernées sont déclarées comme « incomparables » ou « non comparables ».

Les relations de préférence et les ordres associés sont les bases sur lesquelles se fonde un travail de modélisation des préférences, attente majeure d'une aide à la décision.

2.1.2 Les attentes sur l'aide à la décision

Selon [Roy 2005], une définition de l'aide à la décision pourrait être : « l'activité d'une personne qui, à partir de modèles explicites mais pas nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions posées par une partie prenante au processus de décision. Ces éléments servent à clarifier la décision et, d'ordinaire, à recommander ou simplement encourager un comportement qui augmentera la cohérence entre l'évolution du processus et les objectifs et systèmes de valeurs de cette partie prenante. »

Que retirons nous de cette définition ?

Qui est concerné ? La première des parties prenante à laquelle cette définition fait référence est le décideur qui engage sa responsabilité, son expertise, ses objectifs, ses motivations, etc. dans le processus de décision. Il est possible, voire fréquent, que le décideur soit en réalité un groupe de personnes (conseils, jurys, bureau des directeurs, etc.). Cette problématique de décision de groupe ne sera pas abordée dans ce travail. L'idée est en effet que c'est l'entreprise qui prend une décision même si les avis, retours et discussions avec les différentes parties prenantes alimenteront l'expertise du décideur et auront une influence dans le processus d'aide à la décision.

Dans la suite de ce travail de thèse, nous distinguerons le décideur, expert de l'entreprise, de la personne experte en aide à la décision, même si *a priori* rien n'empêche le décideur ou une autre partie prenante au processus de décision de jouer ce rôle. Aussi nous ferons référence à cette personne par le terme analyste afin de la distinguer du décideur.

Au delà du couple décideur/analyste, il est également attendu qu'un travail d'aide à la décision puisse, *a minima*, servir à justifier de la décision prise par le décideur devant les parties prenantes à la décision. Il s'agit alors de pouvoir rendre compte de façon satisfaisante des éléments qui ont motivé ou qui motivent une décision.

Comment apporter une aide à la décision ? D'après la définition il s'agit de proposer des modèles explicites qui apportent des éléments de réponse aux questions que peuvent se poser les parties prenantes. Roy stipule explicitement que la modélisation n'a pas à être complètement formalisée. Il est donc admissible qu'un modèle puisse être incomplet ou peu robuste, au sens des relations de préférence. Si ce modèle est construit à partir de bases scientifiques, considérations, motivations, *etc*. bien établies alors il s'agit d'une aide à la décision. Concrètement, les modèles de décision discutés ici sont des modèles de préférences du décideur, fondés sur la notion de comparaison entre deux actions de l'ensemble A à l'aide de la structure $\langle P, I \rangle$.

La traduction directe de la synthèse de [Roy 2005] sur la contribution de l'aide à la décision est :

- Analyser le contexte dans lequel s'opère la décision par l'identification des acteurs, les possibilités variées d'action, leurs conséquences, les enjeux, etc.

  Nous le comprenons comme l'appropriation par les personnes concernées des éléments variés, complexes, qui engagent la réflexion et forment en quelque sorte la *problématique* du problème de décision.

- Organiser et/ou structurer le déroulement du processus de décision afin d'augmenter la cohérence parmi, d'une part, les valeurs sous-jacentes des objectifs et buts, et, d'autre part, la décision qui en résulte. Ce point est développé par Keeney dans [Keeney 1976] qui montre à quel point la définition des objectifs de l'entreprise est une condition importante de la création de valeur de l'entreprise.

  Nous le comprenons comme la mise en forme du processus de décision afin d'apporter une rigueur qui aide à valider/légitimer/justifier le processus de décision depuis l'objectif à atteindre pour parvenir au résultat de la décision.

- Parvenir à une coopération entre les acteurs en proposant des clés pour améliorer la compréhension mutuelle et un cadre pour favoriser les échanges.

  Nous le comprenons comme un support à la communication entre des parties prenantes à la décision qui ont des motivations, objectifs, etc. divergents voire contradictoires.

- Elaborer des recommandations à partir des résultats issus des modèles et des procédures de calculs construits à partir d'hypothèses valides.

- Participer à la légitimation de la décision.

  Nous comprenons ces deux derniers points comme une « finalité » de l'aide à la décision qui est liée à la rigueur et au travail accompli lors des points abordés précédemment.

Selon [Saaty 2005], « la finalité du processus d'aide à la décision est d'aider les gens à élaborer des décisions selon leur propre compréhension. Ils auront ainsi senti qu'ils ont construit la décision eux-mêmes, justifiée complètement selon leurs valeurs, croyances et convictions individuelles ou collectives. Parce que la prise de décision est une activité fréquente pour tous et depuis toujours, les techniques utilisées aujourd'hui pour aider à prendre des décisions doivent s'imprégner du comportement humain et rester proches de disciplines comme la biologie et de la psychologie. Ceci suppose que des méthodes proposées pour aider à la décision tendent vers une approche descriptive et la plus transparente possible. Elles doivent également être capables de fixer des standards et de caractériser des décisions normatives. »

De cette analyse, nous comprenons qu'une aide à la décision consiste avant tout à assister le décideur tout le processus de décision. Certains éléments peuvent être issus de règles et d'axiomes, comme la législation ou le « bon sens ». Mais le cadre des décisions prises aujourd'hui n'est pas toujours aussi standardisé et il faut donc pouvoir tirer de l'information utile à la décision au-delà de ce qui est imposé. Par la suite, il est possible de pouvoir se fixer des règles non pas issues d'une hiérarchie, mais issues des résultats de processus de décision (les modèles mentionnés précédemment).

Toujours selon [Saaty 2005], une mesure, aussi précise et objective soit-elle, aura à être interprétée par une personne pour avoir un sens. Ainsi la lecture d'une mesure peut être objective, son interprétation et donc son usage pour la décision sera surtout subjective. Un expert, capable de proposer une valeur proche de ce qu'un instrument de mesure donnerait comme lecture, dispose d'une plus grande puissance de calcul pour traiter des problèmes complexes qu'un instrument, incapable lui de mesurer la complexité. Le problème consiste alors à examiner la possibilité et la validité de ce postulat.

Nous comprenons que l'aide à la décision devrait apporter de l'information utile à la validation du processus de décision.

Selon [Bell 1988], [Bouyssou 2000] et de nombreux autres auteurs (voir [Dias 2003]), quatre approches MCDA peuvent être distinguées : normative, descriptive, prescriptive

et constructive. Il est souvent difficile de clairement pouvoir déterminer quelle approche est déployée pour un problème de décision donné, surtout confronté à l'exercice pratique. [Dias 2003] expose les caractéristiques et différences notables entre ces approches tout en mentionnant la difficulté à clairement les distinguer. Les différences entre ces approches concernent le type du modèle de préférence et son utilisation :

- les approches normatives obtiennent des modèles universels à partir de normes établies *a priori* et dévier de ces normes relève d'erreurs et de lacunes du décideur qui devrait être aider pour apprendre à décider de façon rationnelle ;
- les approches descriptives obtiennent des modèles généraux à partir de l'observation de prises de décision du décideur pour relier sa façon de décider à la qualité des résultats qui en découlent ;
- les approches prescriptives découvrent des modèles spécifiques au contexte d'un problème de décision donné en fonction des réponses d'un décideur donné à des questions relatives à ses préférences ;
- les approches constructives construisent des modèles spécifiques au contexte d'un problème de décision donné en fonction des réponses d'un décideur donné sur des questions orientées afin de structurer et formuler le problème de décision dans son ensemble. Dans ce cas de figure le travail de structuration et de formulation du problème est aussi important que « résoudre » le problème.

Le tableau 2.1 synthétise les différences entre ces approches.

Approche	Caractéristiques	Procédé pour obtenir le modèle
Normative	Rationalité exogène[1], comportement économiquement idéal[2]	Postuler
Descriptive	Rationalité exogène[1], modèles de comportement empiriques[3]	Observer
Prescriptive	Rationalité endogène[4], cohérence avec le contexte de la décision	Découvrir
Constructive	Processus d'apprentissage, cohérence avec le processus de décision	Atteindre un consensus

Tableau 2.1 – Différences entre les approches normative, descriptive, prescriptive et constructive ([Munda 1993])

[1] Le modèle de préférence est absolu, il ne dépend pas du contexte.
[2] La connaissance est parfaite.
[3] La connaissance est imparfaite.
[4] Le modèle de préférence est contextuel.

Ces analyses sur l'aide à la décision offrent une perspective générale sur les idées et les principes sous-jacents à l'aide à la décision et nous orientent pour traiter la problématique de ce travail de thèse vers une approche *constructive*.

Dans ce sens, [Belton 2002] schématise le processus de la MCDA en une suite de phases accomplies au cours du processus de décision (voir figure 2.1). Nous considérons que ce processus englobe bien les attendus et principes formulés précédemment dans une approche constructive.

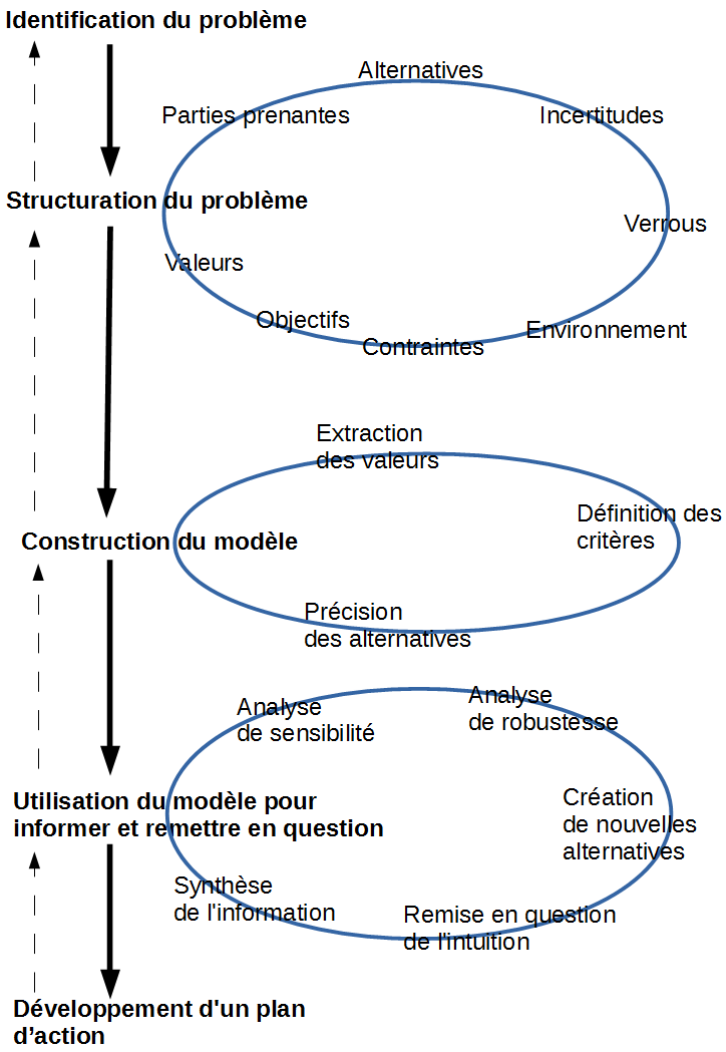

FIGURE 2.1 – Le Processus MCDA selon Belton

Ce processus est itératif et incrémental, figurant des aller-retours entre les différentes phases du processus de l'aide à la décision. Cela favorise l'interaction entre l'analyste, le décideur et les parties prenantes durant l'ensemble du processus. Cette interactivité est une caractéristique de la MCDA puisque, selon nous, elle participe fortement à la légitimation de la décision en permettant au décideur, aux parties prenantes et éventuellement à

l'analyste d'intervenir durant tout le processus.

Ainsi, quand bien même le modèle fourni par le processus présente des lacunes (manque de robustesse, données incomplètes, etc.), les acteurs disposent d'un modèle de décision et connaissent ses limites.

Nous nous servirons de la terminologie proposée par Belton dans le développement des différentes phases attendues dans le déroulement d'un processus MCDA dans la partie suivante.

2.1.3 Le déroulement d'un processus MCDA

Afin d'expliciter le déroulement d'un processus MCDA par phase, nous allons développer les principes de chacune selon notre compréhension de la MCDA en pratique et l'illustrer par un exemple.

2.1.3.1 Identification du problème

Le premier point abordé dans le processus est celui de l'*identification du problème*. [Roy 2005] distingue quatre types de problèmes (ou problématiques) communément abordées :

Choice problematic (P.α) : l'aide consiste à restreindre l'ensemble des actions potentielles à un nombre, aussi petit que possible, de « bonnes » actions afin de pouvoir isoler celle qui devrait être choisie. Cela ne signifie pas que la sélection est nécessairement orientée vers la détermination d'une ou de toutes les actions qui soient considérées comme optimales, la procédure de sélection peut aussi, plus modestement, être fondée sur des comparaisons entre actions afin de justifier l'élimination du plus grand nombre d'entre elles. Ainsi l'ensemble des actions qui restent (pouvant être vu comme un choix) contient toutes les actions les plus satisfaisantes et qui ne sont pas comparables entre elles.

Sorting problematic (P.β) : l'aide consiste à attribuer chaque action à une catégorie qui est considérée comme la plus appropriée parmi un ensemble de catégories prédéfinies. Cet ensemble de catégories doit être basé sur les différents types de traitements ou de jugements à accorder aux différentes actions et qui motivent ce tri. Par exemple, une famille de quatre catégories peut être basée sur une appréciation globale de l'action qui conduit à distinguer les actions entre : les actions dont la mise en œuvre est pleinement justifiée, les actions qui pourraient être recommandées sous réserve de modifications mineures, les actions qui pourraient être recommandées sous réserve de modifications majeures, les actions à éviter. Dans cet exemple les catégories sont ordonnées mais ce n'est pas une obligation dans ce type de problématique.

Ranking problematic (P.γ) : l'aide consiste à réaliser un préordre complet ou partiel sur l'ensemble des actions. Ce préordre peut être considéré comme un instrument de comparaison des actions entre elles. Il s'agit d'une procédure de classification qui classe ensemble les actions jugées comme indifférentes entre elles, et de hiérarchisation de ces classes. Il

est important de souligner qu'une partie ou toutes ces classes peuvent être incomparables entre elles.

Description problematic (P.δ) : l'aide consiste à élaborer un ensemble approprié d'actions potentielles, la construction d'une famille de critères et la détermination des valeurs de toutes ou certaines actions, avec parfois un complément d'information (valeurs seuils, poids, etc.). L'objectif n'est pas de chercher à établir des recommandations ou des indications mais de mieux comprendre les actions, leurs forces et leurs faiblesses relatives en particulier.

Exemple :

La direction de l'entreprise X, spécialisée dans le lavage de pièces pour moteurs électrique, a fixé comme objectif stratégique d'inverser la tendance de son taux de *turnover*, en augmentation depuis 18 mois. Une « rumeur » est remontée auprès de la direction concernant le départ de salariés en raison d'une image de l'entreprise « désordonnée » et au fonctionnement « archaïque ».

Conformément aux préconisations de la RSE, l'entreprise X intègre à sa performance industrielle un objectif en termes de « responsabilité » tant interne qu'externe. Le décideur doit proposer un plan d'action pour atteindre cet objectif, sous la contrainte de ne pas dégrader la productivité de l'entreprise.

L'entreprise X n'est pas la seule à avoir été confrontée à ce problème et, consciente que de bonnes pratiques existent dans ce domaine, cherche à déployer l'action la plus adaptée à ses spécificités. Pour ce faire, l'entreprise souhaite pouvoir établir un ordre de préférence sur des alternatives qui correspondent aux actions identifiées par les collaborateurs ou *benchmark* avec des entreprises similaires.

Ainsi le problème de décision consiste à appliquer un ordre à l'ensemble des actions envisagées par l'entreprise afin, à terme, de diminuer son taux de *turnover*. Il s'agit d'une problématique (P.γ).

Une fois le problème de décision identifié, la suite du processus concerne la mise en forme du problème de décision par un travail de structuration de ses éléments constitutifs. Le même exemple sera repris dans la suite du processus selon Belton.

2.1.3.2 Structuration du problème

Le deuxième point abordé dans le processus est celui de la *structuration du problème*. Il s'agit d'identifier explicitement les éléments qui participent à la décision pour formaliser le problème de décision.

Ces éléments, interdépendants, sont de diverses natures et nous en avons identifié trois types selon leur rôle dans le processus de décision :

- les éléments qui aident à formuler un cadre au processus de décision :
  - l'objectif, c'est-à-dire la motivation du problème de décision ;

  - les contraintes et les verrous, c'est-à-dire les limites ou les obligations auxquelles les actions sont soumises et qui donc influencent le processus de décision ;

- les éléments qui aident à établir une lecture aussi objective que possible du processus de décision :
  - l'ensemble des actions du problème de décision A ;
  - les critères qui constituent un ensemble vérifiant ces trois propriétés :
    * exhaustivité : tous les points de vue à prendre en compte sont explicitement développés en critères du problème de décision ;
    * non redondance : les critères n'ont pas à être indépendants mais une satisfaction donnée à une action selon un critère ne doit pas se retrouver portée par un autre critère ;
    * cohérence : à toute chose égale, si l'évaluation apportée à un critère s'améliore alors l'évaluation globale apportée à l'action ne peut que s'améliorer ;
  - les valeurs $g_i(a)$, qui permettent d'apporter la rigueur attendue dans le processus de décision ;

- les éléments qui aident à rendre compte des préférences, des motivations et des valeurs qui influencent le processus de décision au-delà de la part objective dans la décision et qui traduisent la complexité derrière le processus de décision :
  - les parties prenantes ;
  - le contexte ;
  - les incertitudes ;
  - etc.

Exemple (suite) :
Le décideur, qui doit proposer une action à déployer pour répondre au problème de *turnover*, s'approprie le problème ainsi :

- l'objectif est d'agir dans un sens qui améliorera l'image « durable » de l'entreprise auprès de ses salariés ;

- les contraintes et verrous sont de ne pas dégrader la production et la productivité de l'entreprise, tenir compte des plans d'actions validés par l'entreprise sur les six prochains mois ;

- l'ensemble des actions A, identifié après un *benchmark* :
  - Former au DD les employés (a_{01})
  - Acheter des nouveaux équipements (a_{02})
  - Faire appel à des compétences externes (a_{03})

  - Modifier son process de lavage (a_{04})
  - Déménager le site de son activité (a_{05})
  - Modifier les produits utilisés (a_{06})
  - Verser une compensation financière (a_{07})
  - Développer un service de communication (a_{08})
  - Modifier son *planning* d'activité (a_{09})
  - Ne rien faire (a_{10})

- Le décideur responsable du développement de ce plan d'action pour l'entreprise X est conscient des trois piliers du DD : Economie, Environnement et Société. Pour tenir compte des trois piliers dans son choix, le décideur détermine trois critères représentatifs des piliers :
  - le gain économique escompté (g_1), compris dans un intervalle de 7000 € à 70000 € ;
  - le Ratio de l'énergie électrique fournie contractuellement issue d'une source renouvelable (g_2), qui dépendra de la nouvelle configuration des installations de l'entreprise, compris dans un intervalle de 5 % à 50 % ;
  - les heures de formations des employés au DD (g_3), qui dépendra de la disponibilité des employés suite à la mise en œuvre de l'action, compris dans un intervalle de 0 h/pers./an à 30 h/pers./an.
- les valeurs ($g_i(a_j)$) sont issues d'expertises et de *benchmarks* ;
- les parties prenantes sont : le responsable de l'atelier, les représentants du personnel et un responsable commercial du fournisseur d'énergie électrique ;
- l'environnement est l'image de l'entreprise auprès du public local ;
- le décideur estime les gains escomptés avec une imprécision de l'ordre de 10%.

A ce niveau du processus d'aide à la décision, le problème de décision est constitué au niveau élémentaire. Ce travail préliminaire accompli, il s'agit ensuite de parvenir à un modèle des préférences du décideur par une phase de construction.

2.1.3.3 Construction du modèle

Pour construire le modèle des préférences d'un décideur à l'aide des éléments qui structurent le problème de décision il existe différentes méthodes d'aide à la décision. Quelle que soit la méthode retenue plusieurs invariants demeurent :

- une matrice de décision (voir tableau 2.2), qui est un tableau de toutes les valeurs $g_i(a)$ du problème ;

Action	g_1	...	g_m
a_1	$g_1(a_1)$	...	$g_m(a_1)$
...	...	...	...
a_n	$g_1(a_n)$	...	$g_m(a_n)$

Tableau 2.2 – Forme générale d'une matrice de décision

La matrice de décision de l'exemple est représentée par le tableau 2.3.

Action	g_1	g_2	g_3
Former au DD les employés (a_{01})	41100	19	25
Acheter des nouveaux équipements (a_{02})	25000	42	15
Faire appel à des compétences externes (a_{03})	40030	27	2
Modifier son process de lavage (a_{04})	27840	29	10
Déménager le site de son activité (a_{05})	10670	49	7
Modifier les produits utilisés (a_{06})	47200	22	5
Verser une compensation financière (a_{07})	32600	15	20
Développer un service de communication (a_{08})	47300	26	18
Modifier son *planning* d'activité (a_{09})	21800	32	10
Ne rien faire (a_{10})	38000	15	0

Tableau 2.3 – Matrice de décision de l'exemple

- une expression des préférences, valeurs et expertises du décideur qui traduit ses préférences à propos des éléments du problème de décision. Le traitement d'information qui permet d'obtenir cette expression des préférences est réalisé par une méthode MCDA. Chaque méthode propose un traitement qui lui est spécifique.

Pour nous résumer, les méthodes MCDA se distinguent par l'information demandée au décideur et le modèle de préférence produit. La figure 2.2 schématise l'information traitée par une méthode MCDA.

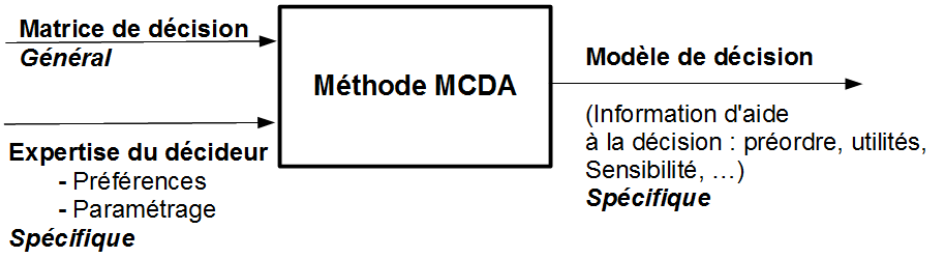

FIGURE 2.2 – Information traitée par une méthode MCDA

D'autres distinctions peuvent être soulignées comme :

- la possibilité de décrire les actions de façon qualitative ou « comparative » ;
- des préférences qui peuvent être relatives aux actions (elles sont globales) ou aux critères (elles sont locales),
- la possibilité de structurer hiérarchiquement les critères,
- la possibilité de nuancer les préférences (il est possible de qualifier la préférence entre deux actions d'une paire donnée),
- des fonctionnalités supplémentaires intégrées (analyse de sensibilité, analyse de robustesse, etc.).

Les méthodes MCDA sont souvent identifiées selon trois catégories couramment trouvées dans la littérature :

- Les méthodes de surclassement
- Les méthodes MAVT/MAUT
- Les méthodes « non conventionnelles »

A la lecture de la matrice de décision, il est possible qu'une action (a) ait une meilleure évaluation sur tous les critères qu'une autre action (b). Dans ce cas de figure, l'action a *domine* l'action b, établir la relation de préférence entre a et b est trivial et il n'y a pas lieu de recourir aux méthodes MCDA. Lorsqu'il n'existe pas de telles relations de dominance il faut pouvoir établir de façon rigoureuse des relations de préférences entre des actions. Ainsi, il faut adopter une démarche méthodique afin de fournir une information à même d'établir ces relations de préférences.

Les méthodes de surclassement ([Roy 1991]) :

Les méthodes de surclassement apparaissent dans les années 1960 par B. Roy et al. alors que le modèle dominant est la moyenne pondérée. Leurs auteurs soulignent certains dangers de la méthode de la « moyenne pondérée » comme la compensation implicite entre

les critères (un score faible peut équilibrer un score fort), la non prise en compte des interactions entre les critères et la nécessité de définir des échelles et des poids cohérents [Krantz 1971]. Ces écueils sont évités dans les méthodes par surclassement (*outranking*). Elles sont fondées sur la synthèse de relations de préférences deux à deux établies sur les actions contenues dans A (grâce à la matrice de décision) afin de construire un ordre sur les actions de A.

Ainsi chaque action considérée est comparée à toutes les autres de l'ensemble. Concrètement, cette relation de préférence entre actions peut prendre quatre formes : « est strictement préféré à » (a est considérée comme meilleure que b), « surclasse » (a est considérée comme au moins aussi bonne que b), « est indifférente de » (a et b sont considérées aussi bonnes l'une que l'autre) et « est incomparable à » (on ne sait rien conclure sur la comparaison entre a et b). Il est alors possible de construire un graphe des relations de préférence sur l'ensemble des actions considérées.

Pour y parvenir, des règles mathématiques permettent au décideur d'apporter une définition de relations de préférences pour chaque critère en définissant des seuils en fonction de la valeur d'une action associée au critère donné. En outre une logique d'agrégation de cette information est utilisée sous la forme de pondérations intrinsèques aux critères sans tenir compte des valeurs associées aux actions de A afin de construire (paire d'actions par paire d'actions) la relation de préférence globale entre deux actions.

Les principales méthodes de surclassement sont ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) et PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations).

ELECTRE :

La méthode ELECTRE ([Roy 1991], [Govindan 2016]) trouve ses origines dans les années 1965 ([Figueira 2005b]) afin d'aborder une problématique de recherche dans le cadre du multicritère, concernant les décisions pratiques associées au développement de nouvelles activités dans les entreprises. Roy part du constat qu'une quantification des actions n'est pas toujours nécessaire pour aider le décideur dans la mesure où les problèmes d'ordonnancement (*ranking*) ou de classification (*sorting*) peuvent se satisfaire d'une information ordinale. La Méthode ELECTRE s'attache donc à comparer des paires d'actions afin de définir un préordre partiel sur l'ensemble des actions en retenant trois types de comparaison : la préférence (notée $\succ$, équivalent à P), l'indifférence (notée $\sim$, équivalent à I) et l'incomparabilité.

Pour établir ces relations, ELECTRE s'inspire du principe de Condorcet qui énonce qu'une action a est réputée meilleure qu'une action b si une majorité de critères appuient cette proposition sans qu'une minorité la contredise fortement. ELECTRE construit un modèle de préférence par interrogation du décideur sur ces préférence pour chaque critère. Il faut ainsi définir trois seuils (préférence, indifférence et veto) fondés sur l'expertise du décideur. Chaque critère est alors pondéré afin d'établir les relations de préférence deux à deux. Dans la méthode ELECTRE III, des indices de concordance (quelles sont les valeurs qui étayent la proposition a préférée à b) et discordance (quelles sont les valeurs

qui contredisent la proposition a préférée à b) sont calculées pour définir la crédibilité de la proposition a préférée à b. Cet indice de crédibilité est alors comparé à un seuil pour valider ou non la proposition a préférée à b.

L'implémentation d'une méthode ELECTRE dans des problèmes de décision concrets peut s'appuyer sur des outils logiciels comme ELECTRE IS, ELECTRE III-IV, ELECTRE TRI, IRIS. Le modèle ELECTRE est également disponible sur la plateforme DIVIZ ([Div]).

PROMETHEE :

La méthode PROMETHEE [Brans 2005] a été développée par J.P. Brans et présentée pour la première fois en 1982. Elle partage la même philosophie que ELECTRE à savoir proposer un ordre de préférence sur les actions envisagées. Une échelle de préférence est définie suivant chaque critère. Six possibilités sont offertes au décideur (usuel, en « U », en « V », à palier, linéaire ou gaussien). Les degrés de préférence ainsi obtenues sont ensuite agrégés sur la base d'une pondération des critères afin d'établir trois grandeurs : le flux sortant (puissance) qui étaie la proposition a préférée à b, le flux entrant qui étaie la proposition b préférée à a, et le flux net qui synthétise les deux flux précédents. Deux informations d'aide à la décision sont ensuite proposées : un préordre partiel fondé sur le flux sortant, un pré ordre total fondé le flux net qualifié de compromis. Le logiciel GAIA proposé en 1988 par J.P. Brans et B. Mareschal fournit une procédure pour traiter les problèmes de décision et permet de traiter automatiquement les données et préférences fournies par le décideur. Il dispose également de nombreux développements graphiques qui éclairent encore davantage le décideur dans son choix.

L'implémentation d'une méthode PROMETHEE-GAIA dans des problèmes de décision concrets qui impliquent un décideur peut s'appuyer sur des outils logiciels comme le DECISION LAB.

Les méthodes MAVT/MAUT :

Les méthodes MAUT (Multi Attribute Utility Theory) ou MAVT (Multi Attribute Value Theory) ([Keeney 1976]) sont fondées sur une valeur de synthèse unique relative à une action $a \in A$: l'utilité de a, soit $u(a)$. Cette valeur peut être précise, réduite à une valeur, on parle alors de MAVT comme la méthode AHP ou ACUTA, ou définie sur un intervalle on parle alors de MAUT comme les méthodes MACBETH ou UTA^{GMS}.

Pour chaque action considérée, une utilité globale est calculée à partir des utilités élémentaires relatives à chaque critère. En comparant l'utilité globale (valeur unique généralement comprise entre 0 et 1) il est possible d'établir les relations de préférences « est préférée à », « est indifférente à » pour toutes les comparaisons de paire d'actions. Il est alors possible de construire un graphe des relations de préférence sur l'ensemble des actions considérées.

Avec cette catégorie de méthodes, les utilités globales $U(a), a \in A$, représentent les préférences du décideur sous forme d'un préordre, et le problème mathématique consiste à déterminer U de façon rigoureuse.

Toutes les méthodes MAUT/MAVT sont fondées sur la notion d'utilité marginale ou élémentaire notée $u_i(a)$ qui représente la satisfaction du décideur concernant une action a

du point de vue du critère i, puis l'agrégation de ces utilités élémentaires en une utilité globale $U(a)$. C'est dans l'élicitation des utilités marginales et de l'opérateur d'agrégation que les méthodes divergent.

Parmi les méthodes de MAVT/MAUT nous présentons AHP (Analytic Hierarchy Processes), UTA (UTilités Additives), et MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation TecHnique).

AHP :

La méthode AHP ([Saaty 2005]) a été développée dans les années 1970 par T.L. Saaty. Le problème était d'élaborer une méthode qui autorise la formulation de comparaisons de critères définis sur des dimensions différentes qu'ils soient « tangibles » ou « intangibles ». Ce qui se traduit avec cette méthode par une hiérarchie des critères du problème de décision issue par décomposition de l'objectif [Keeney 1976].

Avec AHP, l'utilité globale d'une action résulte d'une moyenne pondérée des utilités marginales définies au niveau le plus bas de la hiérarchie de critères. Le décideur exprime ses préférences sous forme d'intensité de préférence d'une part sur l'ensemble complet des paires d'actions ($n.(n-1)/2$ comparaisons, n étant le nombre d'actions à considérer), et d'autre part sur l'ensemble des critères ($m.(m-1)$, m étant le nombre de critères) de plus bas niveau. Les intensités de préférence sont prédéfinies selon une échelle de 5 à 9 niveaux proposés par la méthode. Ce choix des niveaux d'intensités de préférence se fonde sur les apports de la psychologie. Les intensités de préférence sont alors transformées en ratios dans une matrice de comparaison afin de calculer des utilités marginales ou des poids. Le traitement d'information consiste à rechercher les valeurs propres de cette matrice de comparaison sachant les conditions de définition (somme des poids = 1, utilités marginales définies sur $[0, 1]$). Les éventuelles incohérences (problème d'inversion des rangs [Schenkerman 1994]) sont traitées en cherchant à limiter le coefficient d'incohérence entre les préférences exprimées par le décideur et l'ordre obtenu par le modèle. Première méthode MAUT proposée, AHP a connu une rapide diffusion dans la communauté scientifique où elle est aujourd'hui la méthode la plus utilisée. Dans de nombreux cas AHP est utilisé pour identifier les poids de la moyenne pondérée. Dans ce cas l'utilisateur doit être vigilant car les utilités marginales agrégées doivent respecter les conditions de la théorie du mesurage, précaution négligée par de nombreux auteurs.

La méthode a connu de nombreux développement et en particulier ANP (*Analytical Network Process*) qui considère les critères sous forme de réseaux [Saaty 2005] ou Fuzzy AHP qui permet de définir les utilités sur des intervalles flous [Van Laarhoven 1983].

De nombreux outils logiciels comme Expert Choice, MakeItRational sont disponibles pour automatiser le traitement d'information dans AHP et éclairer le décideur dans son choix.

UTA :

Contrairement à une méthode comme AHP qui identifie de façon indépendante les utilités marginales et les poids de la moyenne pondérée, la méthode UTA identifie le modèle de préférence de façon holistique. Cette méthode dite de désagrégation apparait en 1978 avec UTA présentée dans les *Cahiers du LAMSADE* et formalisée par Jacquet-Lagrèze et Siskos ([Jacquet-Lagreze 1982]). Ce développement s'inscrit dans les modèles de régression ordinale qui identifient des fonctions linéaires par morceaux pour déterminer des utilités marginales à partir des préférences du décideur comparant des actions sur leur globalité. L'utilité globale est ensuite déduite de ces utilités marginales en les additionnant. L'idée alors est d'utiliser la programmation linéaire pour déduire des échelles d'utilité marginales respectant les préférences holistiques du décideur et les conditions propres à la méthode (fonctions monotones et linéaires par morceaux, valeurs $g_i(a)$ définies sur des intervalles $[\alpha_i, \beta_i]$, utilité globale définie sur $[0, 1]$).

En pratique, le décideur donne une information de préférence ($\succ$, équivalent à P) ou d'indifférence ($\sim$, équivalent à I) sur une partie de l'ensemble des actions considérées dans le problème (par exemple : « je préfère l'action a à l'action b » ou « les actions a et b sont indifférentes »). A partir de cette information, la méthode cherche à calculer pour chaque valeur $g_i(a)$ une utilité marginale $u_i(g_i(a))$ (ou plus simplement $u_i(a)$). Ces utilités marginales sont ensuite additionnées en une utilité globale $U(a)$. A partir des valeurs d'utilités globales un ordre ou préordre (partiel ou complet) est associé à A.

Des outils logiciels libres comme UTA Plus, Visual UTA sont disponibles pour automatiser les traitements. Plusieurs versions de UTA sont disponibles sur la plate forme DIVIZ.

MACBETH :

Les travaux de recherches sur MACBETH [Bana E Costa 1997] ont débuté dans les années 1990 ([Bana E Costa 2005]). La méthode reprend deux idées fortes du MAUT initiées par AHP : la hiérarchie de critères et la notion d'intensité de préférence. La méthode permet de répondre à la question suivante : comment construire une utilité globale sur A, à la fois ayant un sens quantitativement et qualitativement, sans contraindre un décideur (ou groupe de décideurs) à donner des représentations numériques directes de ses préférences et en impliquant seulement deux actions de A pour chaque jugement demandé au décideur. Il s'agit donc de traduire au mieux la connaissance qu'à le décideur de son problème sans que les valeurs dans la matrice de décision soient toujours complètement quantifiées.

Avec MACBETH les préférences du décideurs sont données par critère sur l'ensemble des couples d'actions de A, soit $n.(n-1)/2$ comparaisons pour n actions. Si les deux actions n'ont pas la même attractivité, il est demandé au décideur de préciser cette préférence sous forme qualitative en six catégories sémantiques : *very weak*, *weak*, *moderate*, *strong*, *very strong* ou *extreme*. Ces intensités de préférence sont traduites sous forme de différences $u_i(a) - u_i(b) \geq u_i(c) - u_i(d)$ et donnent lieu à une résolution par programmation linéaire appliquée au système de contraintes pour aboutir à des utilités marginales et des poids définis sous forme d'intervalles (les intensités de préférences exprimées, les utilités marginales et globales sont définies sur l'intervalle $[0, 1]$). Une valeur particulière de cet intervalle

est privilégiée pour faciliter l'utilisation par le décideur. Les études complémentaires de robustesse apportent un éclairage supplémentaire au décideur.

Le logiciel m-MACBETH calcule des utilités marginales et globales et offrent de nombreuses fonctionnalités qui renforcent l'interactivité de la méthode pour aider le décideur dans son processus de choix.

Les méthodes non conventionnelles :

Parmi les très nombreuses méthodes non conventionnelles nous en choisissons deux qui nous paraissent significatives : TOPSIS et les ROUGH SETS.

TOPSIS :

La méthode TOPSIS a été développée par [Yoon 1995]. Elle s'appuie sur la définition de deux actions particulières :

- une action dite « idéale » obtenue en choisissant la meilleure valeur pour un critère donné,
- une action dite « anti-idéale » obtenue en choisissant la pire valeur pour le même critère.

L'algorithme de TOPSIS calcule alors des préférences normalisées « élémentaires » pour chaque valeur de la matrice de décision. Une préférence « globale » est ensuite calculée par la moyenne pondérée des préférences normalisées et associée à une action. Les solutions (actions) idéales et anti-idéales sont alors identifiées. La distance euclidienne entre chaque action et les actions idéales et anti-idéales est alors calculée, et un index de similarité (avec la solution idéale) est calculé pour chaque action. Les actions sont alors rangées par index décroissant, la meilleure action ayant l'index le plus fort. La méthode répond donc aux problématiques de choix ($P.\alpha$) et d'ordonnancement ($P.\gamma$). Il est à noter que cet index de similarité dépend de l'ensemble des valeurs de la matrice de décision, la modification d'une action existante modifie non seulement son index mais également celui de toutes les autres actions. A noter que la méthode TOPSIS autorise la formulation des préférences du décideur à l'aide de la théorie des ensembles flous [Saghafian 2005]. La méthode est supporté par le logiciel Topsis 3.1 et a vu également des développements sur tableur comme Triptych : TOPSIS.

ROUGH SETS :

Introduite par Pawlak [Pawlak 1982], la théorie des *rough sets* est bien adaptée à l'analyse d'objets décrits de façon vague, c'est-à-dire avec de l'ambiguïté et de l'inconsistance. L'hypothèse de base est qu'à un objet donné est associée une certaine quantité d'information qui peut être exprimée au travers d'attributs. Les objets ayant la même description sont dits « similaires ». Cette relation de similarité est la base mathématique des *rough sets*. Elle induit une partition de l'univers des objets en classes d'objets similaires. En MCDA la relation de dominance entre les objets, en l'occurrence les actions, est substituée à la

relation de similarité [Greco 2001] afin de traiter les problèmes d'inconsistance typique des problèmes d'aide à la décision. On parle alors de *Dominance-based Rough Set Approach* (DRSA)([Kadziński 2015]). Il est alors possible d'inférer le modèle de préférence de type « si... alors » à partir d'exemples de décision, l'action a domine l'action b, ou a est équivalent à b. La distinction entre connaissance certaine et vague sur les préférences du décideur est établie à partir de différents types de règles de décision. La génération des règles de décision est complexe. Plusieurs algorithmes ont été proposés ([Słowiński 2000]) basés sur une des stratégies suivantes : génération d'un nombre minimal de règles recouvrant toutes les actions de la matrice de décision, génération d'un ensemble exhaustif de toutes les règles déductibles de la matrice de décision, génération d'un ensemble de règles « fortes » ne recouvrant pas obligatoirement toute les actions de la matrice de décision. Le modèle est interprété par le décideur qui applique les règles pour classer les actions à partir de ces relations de dominance. Au final, le modèle de préférence obtenu est plus général que les modèles issus des méthodes MAUT ou de surclassement.

L'illustration de cette phase de construction d'un modèle de préférence sera réalisée dans le chapitre 3 puisqu'elle dépend de la méthode choisie. Décideur et analyste ayant le choix entre de nombreuses méthodes, il convient maintenant d'étudier comment le modèle construit peut être utilisé.

2.1.3.4 Utilisation du modèle pour informer et remettre en question

A partir des éléments du problème de décision et du modèle construit à partir des préférences émises par le décideur, le décideur peut remettre en question le modèle de ses préférences produit par l'ensemble de la démarche accomplie jusque là. Pour ce faire, le décideur et l'analyste peuvent échanger sur :

- la synthèse de l'information tirée du modèle ;
- une remise en question de l'intuition ;
- la création de nouvelles actions ;
- des analyses de sensibilité et de robustesse ;
- etc.

Cette liste n'est pas exhaustive mais elle permet d'illustrer ce qui est entendu derrière « remettre en question » le modèle. La démarche structurée permet de relier un modèle considéré comme « gauche » par le décideur à un des éléments de la décision. Cette phase se conclut par la validation ou l'invalidation du modèle par le décideur et consolide les connaissances associées aux éléments du problème de décision, ce qui est un enjeu pour une approche constructive.

Si le modèle est validé, il permet de fournir une indication au décideur (plus ou moins explicite) sur la réponse à la problématique de décision concernée.

Méthode	Spécifique DD			Générique MCDA				Synthèse
	Holistique	Incertitude	Faisabilité	Niveau de connaissance	Compensation	Progiciels	Accessibilité du modèle	
Surclassement :								
ELECTRE	Possible	Possible	*a priori* Oui	Modéré	Non	M	Facile	Bon
PROMETHEE	Possible	Possible	*a priori* Oui	Modéré	Non	B	Facile	Bon
MAUT/MAVT :								
AHP	Non	Possible	*a priori* Oui	Très élevé	Oui	TB	Modérée	Faible
MACBETH	Non	Intégrée	*a priori* Oui	Elevé	Oui[5]	B	Modérée	Moyen
UTA	Oui	Intégrée	Oui	Assez élevé	Oui[5]	M	Modérée	Bon
Autres :								
TOPSIS	Non	Possible	Non	Aucun	Oui	B	Difficile	Faible
Rough Set	Oui	?[6]	?[6]	Assez élevé	Non	M	Difficile	Bon[6]

Tableau 2.4 – Estimations de la satisfaction relative aux besoins du DD de différentes méthodes MCDA

2.1.3.5 Développement d'un plan d'action

L'information issue du modèle doit pouvoir répondre à la problématique du problème de décision. La raison d'être de ce modèle est de pouvoir choisir, ordonner, trier, quantifier, voire caractériser un ensemble d'action A. Une fois appliqué à A, le modèle (plus ou moins complet) présente au décideur les actions de A sous un angle qui permet au décideur de retenir une action et pouvoir lancer son plan d'action.

Pour élaborer nos propositions, nous avons à choisir une méthode MCDA qui convient au contexte du DD et de l'entreprise, c'est-à-dire qui répond aux besoins énoncés au chapitre 1. Le tableau 2.4 récapitule les besoins à satisfaire dans ce contexte et la pertinence des différentes méthodes. En ce qui concerne le développement de la *faisabilité*, aucune méthode n'intègre de préoccupation concernant la faisabilité. Pour autant nous évaluons dans cette colonne, l'aptitude de la méthode à intégrer cette notion.

La dernière colonne du tableau 2.4 qualifie la satisfaction globale espérée de chacune des méthodes vis-à-vis du DD. Nous retenons quatre méthodes qui se démarquent, les deux méthodes de surclassement ELECTRE et PROMETHEE, la méthode UTA et la méthode des *Rough sets*. Afin d'affiner notre choix la partie suivante traite de l'application de ces méthodes en entreprise et procède à une revue ciblée de l'état de l'art des méthodes MCDA utilisées dans le domaine du Génie Industriel.

2.2 Etat de l'art MCDA dans le contexte industriel

La bibliographie traitant de l'aide à la décision dans le domaine industriel comprend plusieurs centaines d'articles. Nous avons choisi de nous focaliser sur une période relativement récente, concernant des revues reconnues dans le domaine du génie industriel et autour de

[5]Certains développement de ces méthodes ([Clivillé 2007], [Angilella 2012]) permettent de nuancer cet aspect compensatoire en introduisant des interactions (de préférence) entre les critères.

[6]Notre expertise sur la méthode des *Rough sets* n'est pas suffisante pour le renseigner.

problèmes typiques du pilotage industriel. Dans cette étude bibliographique, nous commençons par donner les grands points de la méthode suivie avant de procéder à l'analyse proprement dite.

2.2.1 Méthode

Le choix de la période

Nous avons cherché des articles sur la période de 1990 à 2014 en se concentrant sur les articles les plus récents et donc *a priori* au plus proche des problématiques actuelles.

Le choix des méthodes MCDA

Les méthodes MCDA étant au cœur de ce chapitre nous avons choisi de considérer un ensemble de méthodes MCDA étudiées et développées aujourd'hui (sans distinction de leurs variantes).

Il s'agit des méthodes présentées auparavant : ELECTRE, PROMETHEE, AHP, UTA, MACBETH, TOPSIS et les *Rough sets*.

L'identification des problématiques de décision

L'idée est de pouvoir se rendre compte si certaines problématiques de décision multicritère sont plus fréquemment traités à l'aide de méthodes MCDA que d'autres et quelle famille de méthodes a été déployée sur cette problématiques. Les problématiques considérées sont *Choosing*, *Sorting*, *Ranking*, *Descripting* (cf. 2.1.3.1) auxquelles s'ajoutent des problématiques de "*Designing*" et d'"*Optimizing*" qui à nos yeux ne pouvaient être classées dans les problématiques conventionnelles.

L'identification des problèmes de décision industriels

Nous avons retenus huit problèmes industriels pour lesquels il existe un besoin fort en aide à la décision. Ces problèmes sont la démarche d'amélioration, la qualité, la productivité, la logistique, la mesure de la performance, l'environnement, l'énergie et les inventaires.

L'idée est de pouvoir se rendre compte si certains problèmes sont plus fréquemment traités à l'aide d'une méthode MCDA que les autres.

2.2.2 Analyse

Afin de faciliter l'analyse de cet état de l'art, le nombre d'articles qui concernent une méthode MCDA déployée dans un problème de décision type est présenté dans le tableau 2.5. Le nombre d'articles qui concernent une méthode MCDA déployée afin de répondre à un problème industriel type est présenté dans le tableau 2.6.

La liste de tous les articles retenus et les méthodes MCDA, problématiques de décision et problèmes industriels abordés dans chaque article se trouve dans l'annexe A.

Méthodes	Ranking	Choosing	Sorting	Descripting	Optimizing	Designing
MAUT/MAVT :						
AHP	19	8	2	6	6	3
MACBETH	1	0	1	0	0	0
UTA	0	0	0	0	0	0
Surclassement :						
ELECTRE	2	0	0	0	0	0
PROMETHEE	2	0	0	0	0	0
Autres :						
TOPSIS	0	0	0	1	0	1
Rough Set	0	0	1	1	0	0

Tableau 2.5 – Nombre d'article selon *Méthodes* et *Problèmes de décision* traités

Méthodes	Dém. d'amé-lio.	Qual.	Prod.	SC	Perf. Meas.	Energie	Envir.	Invent.
MAUT/MAVT :								
AHP	9	3	3	21	12	0	8	1
MACBETH	0	0	0	1	1	0	0	0
UTA	0	0	0	0	0	0	0	0
Surclassement :								
ELECTRE	0	0	0	1	0	0	1	0
PROMETHEE	1	0	0	1	0	0	0	0
Autres :								
TOPSIS	0	0	0	1	1	0	0	0
Rough Set	1	0	0	0	1	0	1	0

Tableau 2.6 – Nombre d'article selon *Méthodes* et *Problèmes industriels* traités

- Les méthodes MAVT/MAUT à travers AHP sont les plus représentées : ceci peut s'expliquer par la facilité d'interprétation d'un « score » associé à chaque action et par la notoriété de AHP qui est d'un certain point de vue devenu un standard pour définir les poids de la moyenne pondérée.
- Beaucoup de problèmes de décision sont traités comme des problèmes de *ranking* (total ou partiel) d'une liste d'action.
- De nombreux problèmes de décision relèvent de l'optimisation (une liste d'actions

sur laquelle un décideur apporte son expertise afin de « calculer » l'action idéale selon les jugements de ce décideur). Dans ce cas un modèle à utilités additives permet de lier les utilités élémentaires, les variables sont toutes ou partie des valeurs décrivant les actions dans la matrice de décision et la fonction objectif est basée sur l'utilité globale.

- Les méthodes MCDA sont essentiellement déployées afin d'aborder des questions de logistique (et la *supply chain*) puis d'améliorations, de performance et d'environnement.

- En considérant le contexte de ces travaux de thèse, une approche MAVT/MAUT semble pertinente afin d'apporter de l'aide à la décision pour les entreprises industrielles inscrites dans une démarche de développement durable.

Le tableau 2.4 donnait un avantage à quatre méthodes MCDA quant à la prise en compte des exigences de l'aide à la décision dans un contexte DD. L'étude bibliographique ciblée sur le MCDA pour le Génie Industriel montre l'intérêt des industriels pour les méthodes MAUT/MAVT qui les rassurent (quantification) et s'appuient sur une importante culture « moyenne pondérée ». Il est nécessaire de dégager un compromis entre ces deux points de vue. La méthode AHP qui est plébiscitée dans les articles n'est pas la plus adaptée aux besoins spécifiques liés au DD (étude de robustesse non intégrée à la méthode, nécessité d'un haut niveau d'expertise pour bâtir les échelles de ratio, étude séparée des poids et des utilités, pas de possibilité de prise en compte des interactions de préférence). Malgré ces limites, elle indique une très forte culture quantification et moyenne pondérée des décideurs dans le domaine industriel. C'est pourquoi nous privilégions une méthode MAUT/MAVT plutôt qu'une méthode de surclassement encore peu pratiquée en entreprise. Parmi les méthodes restantes la méthode des *Rough sets* privilégie une vision holistique et une expression sous forme de règles de la connaissance des décideurs. Nous l'excluons cependant, sa compréhension par les décideurs réclamant un important effort conceptuel (les algorithmes de construction des règles sont difficiles à maîtriser). De plus l'argumentation auprès des parties prenantes reste délicate car fondée sur ces règles difficiles à expliquer.

Au final nous faisons le choix de la méthode UTA, qui nous semble bien correspondre à notre problème et dont le déploiement en entreprise répond au souci de quantification. Certes cette méthode est aujourd'hui encore peu employée ([Bouchery 2012]), mais elle nous parait prometteuse tant dans sa capacité à construire un modèle de préférence fidèle au point de vue du décideur que dans son utilisation conforme à la philosophie définie par Bernard Roy.

Le choix de la méthode UTA nous amène à la présenter en détails dans la partie suivante.

2.3 La méthode choisie : UTA

2.3.1 Une méthode de désagrégation de préférence

Contrairement aux autres méthodes MAUT/MAVT, UTA demande au décideur des informations de préférence relatives aux utilités globales plutôt que des utilités marginales. Le traitement de ces informations sera exécuté dans un processus que Jacquet-Lagrèze appellera « désagrégation ». Selon [Doumpos 2014], « les techniques de désagrégation de préférence sont utilisées afin de faciliter la construction de modèles de décision, à partir d'approches fondées sur la régression ordinale qui permettent d'obtenir de l'information de préférence à partir d'un ensemble représentatif d'exemples de décision fourni par le décideur. » Ces techniques sont intéressantes « dans les situations où, pour des raisons cognitives ou de temps, le décideur ne veut ou ne peut pas fournir à l'analyste l'information spécifique sur un certain nombre de paramètres techniques (qui sont souvent difficiles à comprendre) nécessaires à la formalisation du modèle d'évaluation. »

Selon [Jacquet-Lagreze 2001], « la philosophie de la désagrégation de préférence en MCDA est d'évaluer/déduire des modèles de préférence globaux à partir des structures de préférence données et de répondre aux activités de l'aide à la décision. » En effet dans le cadre de la MCDA, « le problème de base posé par les analystes et les décideurs concerne la manière dont la décision finale devrait être élaborée. Dans de nombreux cas, cependant, ce problème est posé à l'inverse : en supposant que la décision est prise, comment est-il possible de trouver la base rationnelle sur laquelle la décision s'est construite ? Ou autrement dit, comment est-il possible d'apprécier le modèle de préférence du décideur qui mène à exactement la même décision que celle prise ou au moins la plus « similaire » ? »

L'ensemble des actions pour lesquelles le décideur sait établir des comparaisons par paire d'actions, c'est-à-dire l'ensemble de référence du problème de décision, est noté A_R ou A^R (nous retiendrons A^R). D'après [Jacquet-Lagreze 2001], A^R peut être :

- un ensemble d'actions considérées dans un problème antérieur ;
- un sous-ensemble des actions considérées dans le problème de décision ($A^R \subset A$) ;
- un ensemble d'actions fictives, dont les valeurs relatives aux critères peuvent être facilement jugées par le décideur afin de produire des comparaisons globales.

Dans chaque cas ci-dessus il est demandé au décideur d'exprimer et/ou confirmer ses préférences globales sur l'ensemble A^R, en prenant en compte les valeurs des actions de référence pour tous les critères. D'ordinaire, la forme des préférences globales suit cette typologie :

- des jugements mesurables sur A^R ,
- un *ranking* (relation d'ordre faible) sur A^R (problématique γ) ,
- une relation de préférence portant sur des paires d'actions ;

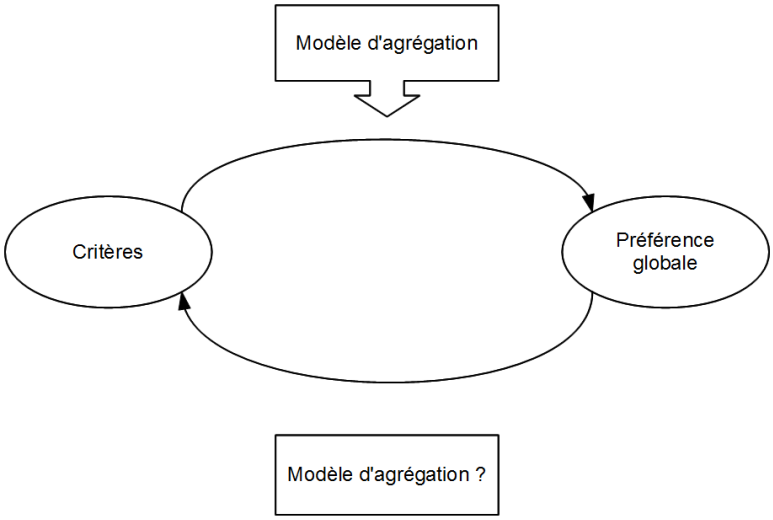

FIGURE 2.3 – Les paradigmes de l'agrégation et de la désagrégation en MCDA [Siskos 2005]

- une classification des actions de référence (problématique β).

Selon [Siskos 2005], le but d'une telle approche est d'analyser le comportement cognitif du décideur : « Des procédures spéciales, itératives et interactives sont mises en œuvre, de façon à analyser les composantes du problème et les préférences globales du décideur pour ensuite les agréger en un système de valeur. Le but de cette approche est d'aider le décideur à améliorer sa connaissance sur le contexte de la décision et l'expression de ses préférences pour aboutir à une décision cohérente. »

Ainsi, dans le cadre d'un processus d'aide à la décision, il s'agit *in fine* de déployer une approche de désagrégation et d'agrégation (*disaggregative-aggregative*) pour produire un modèle de préférence.

Les figures 2.3 et 2.4 illustrent respectivement les paradigmes et l'approche de la désagrégation-agrégation.

Nous retenons de ces points de vue sur la désagrégation de préférence en MCDA que sa philosophie est d'être une approche constructive fondée sur les déductions issues d'une résolution « en partie » du problème de décision global. Nous pensons qu'il s'agit d'une philosophie qui se prête bien au travail des décideurs en entreprise qui sont souvent capables de produire une décision sur un sous-ensemble des actions considérées dans le problème de décision, grâce à leur expertise. En d'autres termes, afin de répondre à la problématique de ce sujet de thèse, puisque nous cherchons à apporter une aide à la décision pour les entreprises contemporaines confrontées à la complexité de la performance industrielle qui

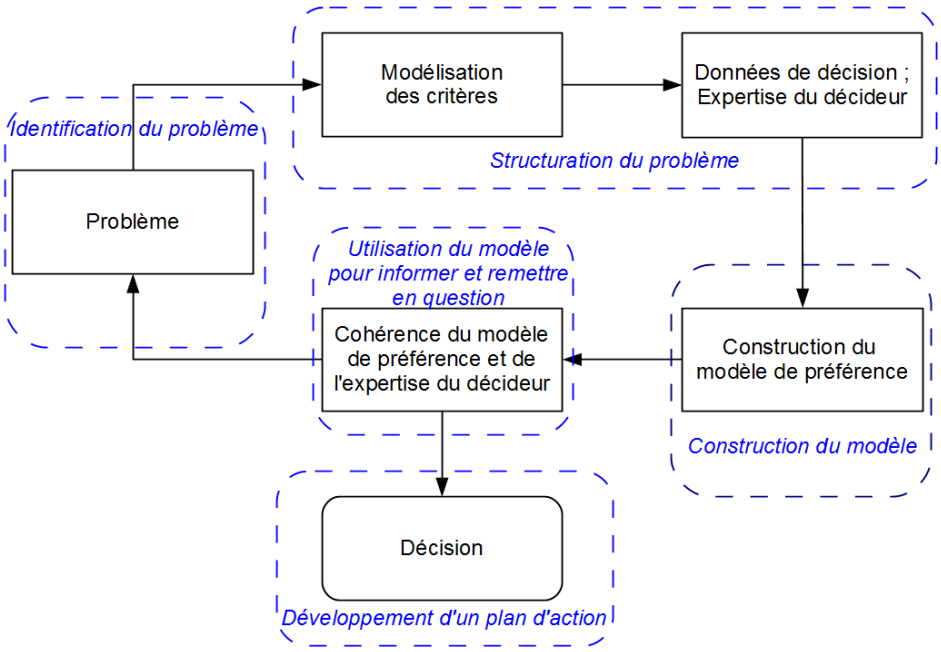

FIGURE 2.4 – L'approche de désagrégation-agrégation [Siskos 2005] et le *processus MCDA* [Belton 2002]

s'inscrit désormais dans un contexte de DD, nous pensons qu'une approche MCDA fondée sur « l'expérience présente et passée » dont dispose l'entreprise à travers l'expertise de son/ses décideur(s) a du sens.

De plus, en fondant l'aide à la décision sur une information issue des préférences globales du décideur, c'est-à-dire holistique, nous pensons que ce type d'approche convient aux principes du DD qui, explicitement, demandent d'adopter une vision d'ensemble à un problème. Le décideur n'a alors pas à fixer un cadre de décision pré-établi qui fait encore défaut aujourd'hui concernant le DD. Mais cette démarche demeure rigoureuse et le décideur peut « décomposer » sa prise de décision selon les éléments de décision retenus.

Enfin, en comparant les illustrations du processus MCDA selon Belton (voir figure 2.1) et de l'approche de désagrégation-agrégation (voir figure 2.4), des analogies apparaissent qui, à notre sens, facilitent l'appréhension de la technique en pratique (approches déployées) et des principes (processus MCDA) :

- *Identification du problème* avec *Problème* ;
- *Structuration du problème* avec *Données de décision ; Expertise du décideur* ;
- *Construction du modèle* avec *Construction du modèle de préférence* ;
- *Utilisation du modèle pour informer et remettre en question* avec *Cohérence du modèle de préférence et de l'expertise du décideur* ;
- *Développement d'un plan d'action* avec *Décision* (sous-entendu « Prise » de décision).

En conclusion de ce travail d'analyse, nous nous sommes donc intéressés à une approche MAUT/MAVT qui se fonde sur la désagrégation-agrégation de préférence, c'est-à-dire la méthode UTA.

A partir de la matrice de décision le décideur exprime ses préférences sous une forme globale (« je préfère l'action a à l'action b » ou « l'action e est indifférente de l'action c ») sur un sous-ensemble d'actions de A ($A^R \subset A$). Deux actions fictives complètent A^R de façon à intégrer dans la méthode un couple d'actions dont les valeurs critère par critère font d'elles l'action d'utilité globale maximale (= 1) et d'utilité globale minimale (= 0) qui fixent les limites du problème. Ces actions fictives sont éludées par la suite, il faut juste retenir que $\forall a \in A$, la *Meilleure action fictive* est préférée à a et a est préférée à la *Pire action fictive*.

Le modèle de préférence du décideur se calcule à partir du système de contraintes suivant :

$$\text{Max} \quad \varepsilon \tag{2.1}$$

avec :

$$\begin{cases} U(a) \geq U(b) + \varepsilon, \text{ si } a \succ b, \ (a,b) \in A^R \times A^R \\ U(a) = U(b) = 0, \text{ si } a \sim b, \ (a,b) \in A^R \times A^R \end{cases} \tag{2.1a}$$

$$\begin{cases} u_i(x_i^h) \leq u_i(x_i^{h+1}), \ \forall i = 1, ..., n, \ \forall h = 0, ..., l_i - 1 \\ u_i(x_i^0) = u_i(\alpha_i) = 0, \ \forall i = 1, ..., n \\ \sum_{i=1}^n u_i(x_i^{l_i}) = 1 \end{cases} \tag{2.1b}$$

tel que les fonctions d'utilités élémentaires $\begin{cases} [\alpha_i, \ \beta_i] \rightarrow [0, \ u_i(\beta_i)] \\ g_i(x) \ \mapsto \quad u_i(x) \end{cases}$ sont des fonctions linéaires par morceaux, continues et monotones, avec :

- (2.1a) les contraintes relatives aux préférences du décideur sur les actions de A^R,
- (2.1b) les contraintes relatives à la cohérence du modèle de préférence par additivité,
- l_i le nombre de segments de la fonction d'utilité élémentaire u_i.

Sont appelées *compatibles* les fonctions d'utilités répondant au système de contraintes formant ainsi le modèle de préférence du décideur. Grâce à ce modèle de préférence, il est possible de calculer les utilités élémentaires et globale de chaque action de A et de définir un ordre tel que :

$$\forall (x,y) \in A \times A \ \begin{cases} U(x) > U(y) \Leftrightarrow x \succ y \\ U(x) = U(y) \Leftrightarrow x \sim y \end{cases}$$

En général, lorsque le problème (mathématique) admet une solution, il n'y a pas unicité de la solution, c'est-à-dire qu'il existe un ensemble de modèles de préférence compatibles avec les préférences du décideur, souvent nommé le polyèdre de solutions $\mathcal{P}$. Lorsque différents modèles compatibles sont appliqués aux actions de A, il est possible d'aboutir à des

contradictions sur la préférence relative entre des actions. Ce cas de figure est gênant pour proposer un résultat qui constitue une aide à la décision.

A partir de ce constat il existe deux orientations pour aborder cette difficulté [Bous 2010] :

- déterminer tous les modèles compatibles avec les préférences du décideur (UTA^{GMS}, GRIP) ;
- procéder à une analyse *post-optimal* de l'ensemble de solutions compatibles afin de choisir parmi tous les modèles compatibles un unique modèle *représentatif* ([Kadziński 2012]) de l'ensemble de solutions au problème (UTA, ACUTA, UTA*).

Nous avons fait le choix de proposer aux entreprises une approche fondée sur une analyse *post-optimal*, qui est plus parlante selon nous pour le décideur, donc qui ne nécessite pas un travail d'analyse supplémentaire portant sur un ensemble de solutions au problème de décision.

2.3.2 *Analytic Center* UTA : ACUTA

ACUTA ([Bous 2010]) applique l'idée d'utiliser le centre analytique du polyèdre de solutions $\mathcal{P}$, délimité par le système de contraintes (2.1), comme une représentation de toutes les solutions compatibles avec les contraintes du problème. L'adaptation du problème (2.1) à la formulation du centre analytique de $\mathcal{P}$ se fait par l'association d'une variable relâchée (*slack variable*) à chaque contrainte élémentaire, c'est-à-dire, $s_j = U(a_{(j)}) - U(a_{(j+1)})$ pour chacune des préférences du décideur et $s_i^h = u_i(x_i^{h+1}) - u_i(x_i^h)$ pour chaque contrainte associée à la monotonie des fonctions d'utilité élémentaires. La définition des variables s_j contraint le décideur à choisir et ordonner ses préférences de façon à formuler ses préférences telles que $a_{(j)} \geq a_{(j+1)}$, $\forall j = 1, ..., r-1$ où $r = |A^R|$. En introduisant ces variables relâchées dans la fonction objectif et en imposant le respect de toutes les contraintes au sens large, le problème (2.2) est obtenu.

$$\text{Max} \qquad G = \sum_{j=1}^{r-1} ln(s_j) + \sum_{i=1}^{n} \sum_{h=1}^{l_i-1} ln(s_i^h) \tag{2.2}$$

avec :

$$\begin{cases} \forall j \in \{1, ..., r-1\} \\ U(a_{(j)}) - U(a_{(j+1)}) = s_j \text{ si } a_{(j)} \succ a_{(j+1)} \\ U(a_{(j)}) - U(a_{(j+1)}) = 0 \text{ si } a_{(j)} \sim a_{(j+1)} \end{cases} \tag{2.2a}$$

$$\begin{cases} u_i(x_i^{h+1}) - u_i(x_i^h) = s_i^h, \ i = 1, ..., n, \ h = 0, ..., l_i - 1 \\ \sum_{i=1}^{n} u_i(x_i^{l_i}) = 1 \end{cases} \tag{2.2b}$$

En supposant que $\mathcal{P} \neq \emptyset$, la solution au problème (2.2) est unique et bien définie. Grâce à la fonction objectif non linéaire G, la formulation ACUTA permet la sélection de la solution centrale en une seule étape, ce qui évite d'avoir à résoudre de multiples problèmes linéaires et à moyenner leurs solutions extrêmes comme le propose l'étape *post-optimal* de UTA ou UTA*. De plus, en demandant explicitement que la solution sélectionnée soit située « aussi loin que possible » des limites de $\mathcal{P}$, de petites imprécisions dans la détermination des fonctions d'utilité ne conduiraient pas, *a priori*, à une violation des préférences

du décideur ou des contraintes de monotonie. Selon l'étude expérimentale présentée dans [Bous 2010], ACUTA produit des modèles de préférence robustes et stables vis-à-vis des préférences du décideur et de son paramétrage du problème. En outre ACUTA est disponible comme programme de la plateforme Diviz [Div] du consortium *Decision Deck* qui garantit un accès facile et libre à la méthode ACUTA.

En conclusion, la méthode ACUTA permet de construire assez aisément un ordre total sur A facile à interpréter. Ainsi, l'élaboration de nos propositions dans la suite de ce mémoire est fondée sur la méthode MCDA ACUTA/Diviz.

2.3.3 Développements actuels sur UTA

35 ans après l'article fondateur de Jacquet-Lagreze et Siskos, la recherche autour des méthodes de désagrégation est très active. Rassemblées sous le vocable de la Robust Ordinal Regression nous en soulignons trois développements :

- la prise en compte de fonctions d'agrégation non additives,
- la prise en compte de la seule information fournie par le décideur en proposant de fonctions d'utilités définies sous forme d'intervalles,
- la prise en compte d'une connaissance plus riche que l'expression des préférences du décideur.

Les travaux de Angilella et al. [Angilella 2012] ont pour objet de proposer une adaptation du principe de désagrégation à l'intégrale de Choquet. Cet opérateur permet de prendre en considération les critères de façon conjointe ce qui relâche l'hypothèse d'indépendance des critères. L'idée est alors de déterminer l'importance des coalitions de critères. La coalition de 0 critère a une importance nulle : $U(\emptyset) = 0$, la coalition de tous les critères a une importance totale $U(N) = 1$ avec N l'ensemble de tous les critères.

L'identification complète de l'intégrale de Choquet, demande davantage de connaissances que pour l'opérateur de moyenne pondérée. Le décideur donne donc de l'information supplémentaire, soient : un ordre partiel sur l'importance de chaque critère, l'importance des interactions sur les couples de critères, le signe de ces interactions suivant qu'elle renforce la coalition ou qu'elle l'affaiblit. Le système de contraintes est établie dans la même logique que pour UTA, un certain nombre de conditions étant propres à l'intégrale de Choquet, en particulier pour assurer la monotonie des utilités marginales. Le lecteur intéressé trouvera les détails de la méthode dans l'article cité et pourra consulter [Grabisch 1996] pour avoir plus de détails sur l'Intégrale de Choquet.

Les travaux menés par Greco et al. [Greco 2008] sur la méthode UTA visent à étendre les utilités marginales et globale vues comme des fonctions linéaires par morceaux dans UTA à des fonctions par intervalle. L'idée est de transcrire complètement mais seulement les connaissances fournies par le décideur. La méthode est alors rebaptisée UTA^{GMS} et utilise la notion de *Robust Ordinal Regression*. Dans ces conditions le polyhèdre des solutions donne pour chaque valeur prise par un critère un encadrement entre une valeur minimale et une valeur maximale (figure 2.5).

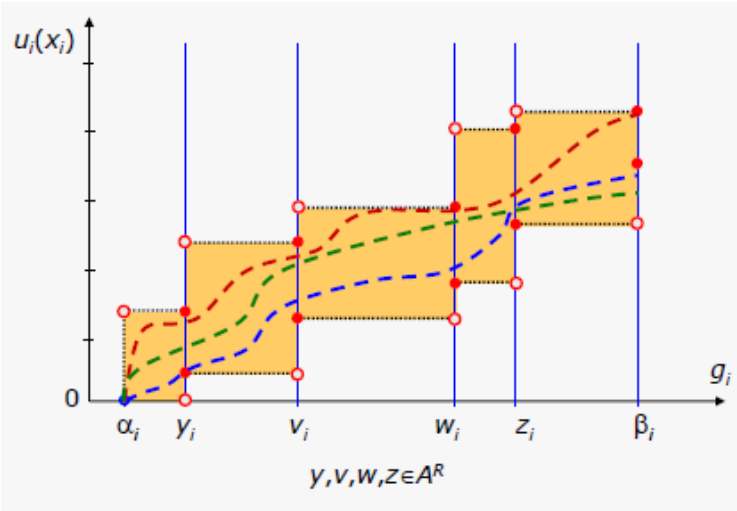

FIGURE 2.5 – Fonction d'utilité marginale $u_i(x_i)$ par Greco, Mousseau et Slowinski

En conséquence c'est un domaine d'existence des fonctions d'utilité qui est fourni sachant que la condition de monotonie doit continuer à être respectée. Les utilités globales sont elles aussi définies sur un intervalle ce qui donne un ordre des actions plus complexes à représenter. Les auteurs proposent alors la notion de préférence Possible (P) et Nécessaire (N) :

- $a \succ^N b$ si $U(a)_{min} > U(b)_{max}$,
- $a \succ^P b$ si $U(a)_{max} > U(b)_{max}$ et $U(a)_{min} \leq U(b)_{max}$.

Une préférence Nécessaire est dite robuste, si quelles que soient les utilités marginales choisies dans le domaine d'existence cette préférence est maintenue. Si elle dépend du choix des fonctions d'utilités marginales elle est dite possible. Cette nuance sur la préférence est une aide supplémentaire pour le décideur. Le système de contrainte reste donc semblable à celui de UTA, seulement la post-optimisation n'est pas réalisée. A noter que des conditions peuvent être posées pour les utilités marginales qui peuvent limiter leur domaine d'existence. La plateforme Diviz intègre un outil intégrant préférences Nécessaire et Possibles au sens de la *Robust Ordinal Regression* fondée sur UTA.

La méthode GRIP [Figueira 2009] est la dernière née des méthodes de désagrégation. Elle reprend le principe de UTA^{GMS} mais elle autorise une expression de la connaissance des décideurs sous d'autres formes que la préférence. Ce nouveau type de connaissance s'exprime sous forme d'intensités de préférence dans une vision proche de MACBETH même si aucune échelle d'intensité de préférence n'est proposée. Il peut s'agir d'intensités de préférence sur les utilités globales. Le décideur est alors interrogé pour ranger (éventuellement) ses préférences comme suit. « Je préfère a à b ($U(a) > U(b)$), je préfère c à d ($U(c) > U(d)$), mais ma préférence de a par rapport à b est plus intense que ma préférence de c par rapport à d » ce qui peut s'écrire $U(a) - U(b) > U(c) - U(d)$.

Il peut s'agir également d'intensités de préférence sur les utilités marginales. Le décideur est alors interrogé pour ranger (éventuellement) ses préférences comme suit. « Je préfère a à b sur le critère i ($u_i(a) > u_i(b)$), je préfère c à d sur le critère i ($u_i(c) > u_i(d)$), mais ma préférence de a par rapport à b sur i est plus intense que ma préférence de c par rapport à d sur i » ce qui peut s'écrire $u_i(a) - u_i(b) > u_i(c) - u_i(d)$. Ces contraintes sont intégrées au programme linéaire et permettent de définir les fonctions d'utilités sur des intervalles plus restreint que pour UTA^{GMS}. A noter que des relations de préférence de même nature (Nécessaire et Possible) peuvent s'appliquer aux intensités de préférences de toute paire d'action.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié comment l'aide à la décision multicritère, à travers ses principes, ses approches, ses méthodes et ses outils, peut apporter un éclairage au décideur confronté à un problème de décision. Un décideur peut se tourner vers différentes méthodes ou approches en fonction de ses besoins, de l'information dont il/elle dispose, du type précis du problème, etc.

En tenant compte des spécificités du contexte du DD et de la pratique actuelle d'aide à la décision dans le domaine industriel, nous avons choisi la méthode ACUTA. L'idée est de demander au décideur de l'expertise en termes de préférence sur la globalité des actions plutôt que sur des critères, ce qui nous parait plus conforme au point de vue holistique nécessaire au DD. L'information utile à la décision est présentée sous forme de « scores » d'utilités pour caractériser les actions envisagées, les comparer et éventuellement les améliorer. Au delà de ces informations, la pratique du processus de décision doit permettre au décideur de s'approprier plus aisément son problème de décision afin de mieux le formuler et proposer des actions qui apportent des solutions satisfaisantes selon lui/elle.

Dans le cadre de la performance industrielle telle que décrite dans le chapitre 1, le décideur doit, théoriquement, parvenir à proposer une action qui permette d'atteindre les objectifs fixés par l'entreprise. Il doit le faire en fonction de ses spécificités, des retours d'expérience sur les actions antérieures, de l'interactivité avec son environnement et de ses parties prenantes. Dans ce sens nous allons dans le chapitre suivant proposer d'inscrire l'aide à la décision dans le cycle PDCA.

CHAPITRE 3

Inscrire l'aide à la décision multicritère dans une démarche PDCA

Sommaire

3.1 Inscrire l'aide à la décision dans le cycle PDCA 68
3.1.1 Les mots-clés du cycle PDCA 68
3.1.2 Les mots-clés du processus MCDA 69
3.1.3 Recherche de similarités 69
3.1.4 Discussion sur l'apport du modèle au cycle PDCA 72
3.1.5 Intégration de la construction du modèle de préférence et son utilisation dans l'Exemple 74
3.2 Analyse de la robustesse d'un rang en rapport avec l'imprécision 79
3.2.1 Principe 79
3.2.2 Méthodologie 81
3.2.3 Application à l'Exemple 84
3.3 Faisabilité 88
3.3.1 Intérêt de la faisabilité pour l'aide à la décision 88
3.3.2 Formalisation 90
3.3.3 Utilisation 96
3.3.4 Bilan sur la faisabilité 100
3.4 Conclusion 101

Ce chapitre développe les propositions issues de ce travail de thèse sur l'*Aide à la décision pour les entreprises industrielles inscrites dans une démarche de développement durable*.

Notre proposition concerne la structuration de l'aide à la décision dans une démarche de développement durable. Les entreprises disposent déjà d'une approche structurée de l'amélioration continue de la performance à l'aide de standards ou de méthodes comme le cycle PDCA notamment. Dans ce cadre nous proposons un traitement de l'information adaptée à la prise de décision dans ce type de démarche et en particulier dans sa dimension holistique, caractéristique du développement durable. Dans ce sens nous proposons d'utiliser une méthode MCDA, la méthode ACUTA, pour aider un décideur à s'approprier et renforcer ses décisions.

Notre proposition prend également en compte les données imprécises de la matrice de décision. En effet dans le cadre de telles démarches il est fréquent que le décideur donne des valeurs approximatives dans cette matrice. L'idée est de fournir une information pratique au décideur permettant d'évaluer la robustesse de l'ordre issu de ACUTA en fonction de l'imprécision.

Enfin, nous proposons de compléter l'information produite par la méthode ACUTA par une information de faisabilité relative à la plus ou moins grande facilité de mise en œuvre des actions envisagées.

3.1 Inscrire l'aide à la décision dans le cycle PDCA

Le cycle PDCA, tel que présenté au chapitre 1, et le processus MCDA, tel que présenté au chapitre 2, proposent respectivement un cadre pour construire une démarche d'amélioration continue et un processus pour développer une aide à la décision multicritère.

Chaque entreprise étant spécifique selon sa taille, son activité, son environnement, ce cadre et ce processus sont davantage des lignes directrices que des directives. Chaque entreprise, chaque décideur doit donc se les approprier.

Notre idée dans la première partie de ce chapitre est d'identifier les similarités entre le cycle PDCA et le processus MCDA afin de mieux inscrire ce processus dans la démarche d'amélioration.

3.1.1 Les mots-clés du cycle PDCA

Pour identifier les mots-clés des étapes PDCA, nous nous appuyons sur la description générique des principes à adopter et de l'information nécessaire dans un cycle PDCA. Afin d'éviter des ambiguïtés liées à la traduction, nous avons conservé les termes en version originale.

- Plan : establish objectives and make plans
  - analyze your organization's situation,
  - establish your overall objectives and set your milestone targets,
  - and develop plans to achieve them.
- Do : implement your plans
  - do what you planned to.
- Check : measure your results
  - measure/monitor how far your actual achievements meet your planned objectives.
- Act : analyze causes on success or failure and improve your plans
  - i.e. correct and learn from your mistakes to improve your plans in order to achieve better results next time

3.1.2 Les mots-clés du processus MCDA

Les mots-clés des phases MCDA sont directement renseignés dans la schématisation du processus MCDA par Belton (figure 2.1). Afin d'éviter des ambiguïtés liées à la traduction, nous avons conservé les termes en version originale ([Belton 2002]).

- Identification of the problem/issue (ID)
- Problem Structuring (PS)
  - Stakeholders
  - Alternatives
  - Uncertianties
  - Key issues
  - External Environment
  - Constraints
  - Goals
  - Values
- Model Building (MB)
  - Eliciting values
  - Defining criteria
  - Specifying alternatives
- Using the model to inform and challenge thinking (UM)
  - Sensitivity analysis
  - Robustness analysis
  - Creating new alternatives
  - Challenging intuition
  - Synthesis of information
- Developing an action plan (AP)

Il s'agit maintenant d'identifier les similarités entre le cycle PDCA et le processus MCDA.

3.1.3 Recherche de similarités

Notre constat est que les entreprises, en général, se sont appropriées de façon formelle le cycle PDCA mais pas le processus MCDA. Nous allons donc conserver le cycle PDCA comme cadre général et chercher à y inscrire le processus MCDA en pointant leurs similarités.

PDCA	MCDA
Objectives (P)	Goals (PS)
Make plans (P)	Developing an action plan (AP)
Organization situation (P)	Identification of the problem (ID)
	Stakeholders (PS)
	Alternatives (PS)
	Key issues (PS)
	External Environment (PS)
	Constraints (PS)
	Values (PS)
Milestone target (P)	Goals (PS)
	Values (PS)
Implement your plans (D)	*Empty*
Measure actual achievements (C)	Values (PS)
Objectives (C)	
Analyze causes on success or failure (A)	Uncertainties (PS)
	External environment (PS)
	Constraints (PS)
	Values (PS)
	Sensitivity Analysis (UM)
	Robustness Analysis (UM)
	Synthesis of the information (UM)
Improve your plans (A)	Goals (PS)
	Creating new alternatives (UM)
	Challenging Intuittion (UM)
	Key issues (PS)
	External environment (PS)
	Constraints (PS)

Tableau 3.1 – Similarités entre les étapes PDCA et les phases MCDA

Nous obtenons le tableau 3.1 qui présente cette analyse de similarités.

Cependant cette étude des similarités ne rend pas compte de l'aspect itératif du cycle PDCA ni des possibles retours en arrière du processus MCDA. Pour poursuivre cette analyse nous proposons donc de détailler comment le processus MCDA peut s'inscrire dans une succession de cycles PDCA.

Notre hypothèse est que l'entreprise utilise le cycle PDCA sans aide à la décision multicritère formalisée. L'évènement déclencheur pour inscrire ce processus est l'insatisfaction que l'entreprise ressent de sa pratique actuelle du PDCA. Cette pratique ne lui permet pas de réaliser correctement l'étape *Check* "How far your actual achievements meet your planned objectives", et d'analyser dans l'étape *Act* cet écart afin de corriger les actions pour mieux réaliser les objectifs.

Le processus MCDA débute par cette identification du problème (ID) au terme de ce que l'on peut considérer comme le cycle PDCA initial. La structuration du problème (PS) peut être vue comme l'étape *Plan* d'un nouveau cycle PDCA où le décideur s'approprie le problème de décision et commence à définir ses objectifs et alternatives envisagées.

La construction du modèle (MB) correspond à l'étape *Do* de ce cycle. Elle consiste à identifier la matrice de décision (actions, critères, valeurs), recueillir les préférences du décideur et éliciter le modèle de préférence.

Il est alors possible d'utiliser le modèle (UM) pour fournir l'aide à la décision (utilités, robustesse, sensibilité, etc.), de le valider et éventuellement remettre en question les intuitions du décideur. Cette utilisation du modèle correspond aux étapes *Check* et *Act* du cycle PDCA en cours. Il est possible de corriger le modèle de préférence obtenu si le décideur remet en question l'aide à la décision produite.

Le décideur peut alors poursuivre sa démarche d'amélioration (AP). Il dispose désormais pour les cycles PDCA à venir d'une aide à la décision multicritère. La figure 3.1 illustre cette inscription du processus MCDA dans les cycles PDCA de l'entreprise.

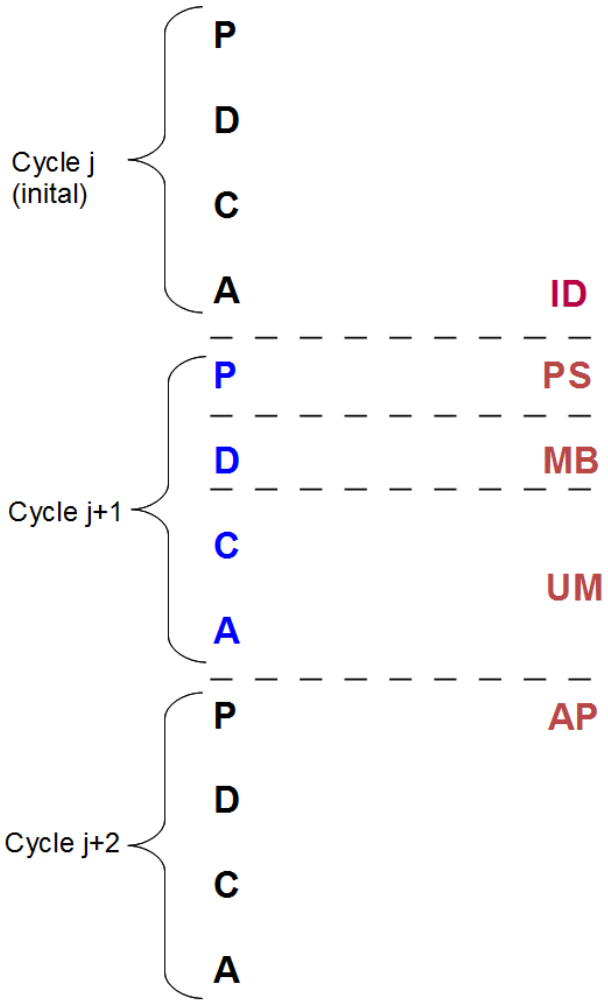

FIGURE 3.1 – Inscrire le processus MCDA dans les cycles PDCA de l'entreprise

3.1.4 Discussion sur l'apport du modèle au cycle PDCA

Rappelons une définition de l'aide à la décision selon [Roy 2005] qui pourrait être : « l'activité d'une personne qui, à partir de modèles explicites mais pas nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions posées par une partie prenante au processus de décision. Ces éléments servent à clarifier la décision et, d'ordinaire, à recommander ou simplement encourager un comportement qui augmentera la cohérence entre l'évolution du processus et les objectifs et systèmes de valeurs de cette partie prenante. »

Le premier apport de la mise en place d'une aide à la décision est la construction d'un modèle de préférence. Caractériser les actions considérées par des utilités globales et marginales permet au décideur de définir les objectifs, choisir l'action à enclencher (*Plan*), mieux interpréter les résultats obtenus (*Check*) et d'analyser les écarts (*Act*) afin de corriger

l'exécution de l'action lors du prochain cycle.

Mais au-delà de cet apport fonctionnel, la construction du modèle de préférence permet de :

- systématiser la démarche avec la recherche d'un ensemble d'actions et l'identification des critères ;
- mieux comprendre le problème posé en s'interrogeant sur sa formalisation sous forme d'objectifs et en informant/consultant les différentes parties prenantes pour l'appréhender de façon plus globale ;
- s'interroger sur les véritables motivations du décideur et sur son système de valeurs par le questionnement sur ses préférences.

La construction du modèle permet au décideur d'approfondir la connaissance qu'il a de son problème par une investigation méthodique des points clés du processus MCDA, en parfaite cohérence avec la philosophie de l'amélioration continue du cycle PDCA. Ce modèle de préférence lui permet également de discuter de façon éclairée avec les autres parties prenantes pour écouter, argumenter et négocier. Ainsi, il est possible d'aboutir à des actions réalisant des compromis acceptables par toutes les parties. Cette dimension est très importante dans le cadre des démarches d'amélioration où la motivation des personnes sur le long terme ne peut s'obtenir que sur des bases transparentes et partagées.

Le deuxième apport concerne selon nous l'aspect continu de l'amélioration. En effet, le problème de décision posé, le modèle de préférence, les actions envisagées, les parties prenantes, etc. évoluent avec les itérations successives du cycle PDCA. Le processus MCDA permet de tenir compte de cette évolution permanente par le mécanisme de retour en arrière proposé par Belton (voir figure 2.1). Cela signifie que lors de l'étape *Act* du cycle PDCA, le décideur doit s'interroger sur la pertinence des points clés du processus MCDA et les remettre éventuellement en question. Ce peut être un objectif qui est modifié, la prise en compte d'un nouveau critère, la révision des valeurs attachées à une action, etc. Cela peut aboutir à une reconsidération totale du problème de décision et dans ce cas c'est un nouveau cycle PDCA « Processus MCDA » (à l'instar de la figure 3.1) qui doit être réalisé.

Cette systématisation de la reconsidération du problème de décision nous semble être une des spécificités fortes du MCDA inscrit dans la démarche d'amélioration. En effet, cet aspect est moins présent dans les problèmes plus classiques de type *One Shot* souvent traités en MCDA. Cette systématisation bien que moins visible que le calcul des utilités, nous semble tout aussi utile au bon déroulement de la démarche d'amélioration.

La partie suivante concerne l'illustration de cette proposition en construisant un modèle de préférence dans une démarche type cycles PDCA d'amélioration continue.

3.1.5 Intégration de la construction du modèle de préférence et son utilisation dans l'Exemple

Nous reprenons l'exemple du chapitre 2 et l'utilisons pour illustrer notre proposition. Le décideur pilote la démarche d'amélioration de la performance selon le cycle PDCA. Il/elle constate une certaine difficulté à interpréter et analyser les résultats obtenus en terme de diminution du taux de turnover. A l'issue du cycle PDCA présenté ci-dessous, il conclut à la nécessité de développer une aide à la décision multicritère.

Cycle j (en cours) :

- Plan : *Diminuer le taux de turnover en dessous de* 9% ;
- Do : Mise en place des actions d'améliorations ;
- Check : Taux de *turnover* annuel = 12%, valeur inacceptable qui ne s'améliore plus depuis plusieurs mois.
- Act : Le taux de *turnover* annuel ne diminue pas suffisamment car seul le critère économique est pris en compte dans la démarche d'amélioration ; L'action d'amélioration choisie pour le cycle suivant est *Développer une aide à la décision multicritère*.

Le décideur choisit de traiter ce problème à l'aide de la méthode ACUTA. Conformément à la figure 3.1, il/elle réalise les différentes étapes du processus MCDA dans le cycle PDCA suivant. La phase d'identification du problème, réalisée à la fin du cycle PDCA précédent, a été explicitée dans la partie 2.1.3.1. La phase de structuration du problème a été explicitée dans la partie 2.1.3.2. Le cycle correspondant est présenté ci-dessous.

Cycle $j + 1$:

- Plan : Structurer le problème ;
- Do : Construire le modèle (Matrice de décision, Méthode MCDA choisie, Préférences du décideur, Paramètres du modèle, Elicitation du modèle de préférence) ;
- Check : Calcul des utilités marginales et globales ;
- Act : Validation de l'information issue de l'aide à la décision (pas de remise en question du modèle pour cet Exemple).

Nous détaillons maintenant la construction du modèle.

3.1.5.1 Construction du modèle

Matrice de décision :

La matrice de décision du problème (voir tableau 2.3) est développée dans la partie 2.1.3.3.

Méthode MCDA choisie :

La méthode choisie par le décideur et l'analyste est la méthode ACUTA telle que développée dans la partie 2.3.2.

Préférences du décideur :

Le décideur, pour pouvoir utiliser la méthode ACUTA, doit exprimer ses préférences sous forme d'une relation d'ordre complète sur un sous-ensemble $A^R \subset A$. L'expertise du décideur concernant le problème et les actions de A lui permet de formuler ses préférences pour quatre actions : $A^R = \{a_{01}, a_{02}, a_{06}, a_{07}\}$, telles que

$$a_{06} \succ a_{01} \succ a_{02} \succ a_{07}$$

Paramètres du modèle :

Le décideur accepte la proposition de l'analyste de considérer un modèle de préférence à deux segments par critère pour aboutir à un modèle « moins rigide » qu'un modèle linéaire et relativement simple à s'approprier.

Elicitation du modèle de préférence :

La méthode ACUTA est exécutée et produit un modèle de préférence (voir tableau 3.2 (les inconnues du problème mathématique sont indiquées en rouge) et figure 3.2) représentatif des préférences du décideur et des contraintes du problème de décision.

g_i	α_i	$u_i(g_i(\alpha_i))$	γ_i	$u_i(g_i(\gamma_i))$	β_i	$u_i(g_i(\beta_i))$
g1	7000	0	38500	0.41	70000	0.71
g2	5	0	27.5	0.18	50	0.26
g3	0	0	15	0.02	30	0.03

Tableau 3.2 – Le modèle de préférence du décideur calculé avec la méthode ACUTA de la plateforme Diviz [Div]

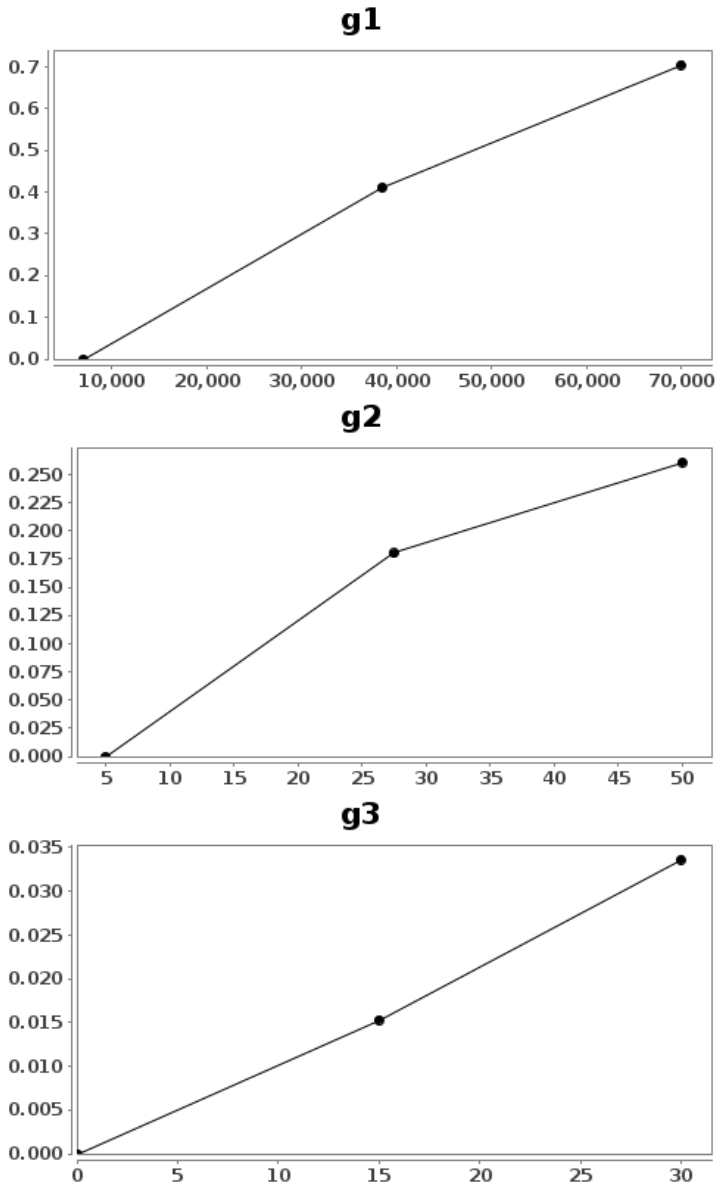

FIGURE 3.2 – Le graphe du modèle de préférence du décideur calculé avec la méthode ACUTA de la plateforme Diviz [Div]

3.1.5.2 Utiliser le modèle pour informer et remettre en question

Avant de discuter de l'information fournie par le modèle de préférence, il faut d'abord vérifier que le modèle est bien *compatible* avec les préférences du décideur. En effet s'il n'est pas attendu qu'un modèle soit complètement formalisé et qu'une part non négligeable de l'exercice d'aide à la décision consiste à interpréter des « zones d'ombres », un modèle non compatible avec les préférences du décideur ne pourrait être que *faux* et invalidant de ce fait la rigueur attachée au processus d'aide à la décision. Il faut donc d'abord vérifier que la relation d'ordre proposée par le décideur est conservée par le modèle de préférence.

Dans ce cas d'étude, le modèle est compatible puisque (voir tableau 3.3) :

$$U(a_{08}) > U(a_{06}) > U(a_{03}) > U(a_{01}) > U(a_{10}) > U(a_{02}) > U(a_{04}) > U(a_{07}) > U(a_{09}) > U(a_{05})$$

.

Actions	Utilité Globale	Rang
a_{08}	0.68	1
a_{06}	0.63	2
a_{03}	0.60	3
a_{01}	0.58	4
a_{10}	0.49	5
a_{02}	0.48	6
a_{04}	0.47	7
a_{07}	0.44	8
a_{09}	0.40	9
a_{05}	0.31	10

Tableau 3.3 – Les utilités globales et le *ranking* des actions considérées

Selon le modèle en l'état, le choix du décideur de mettre en œuvre a_{08} est *a priori* justifié puisque a_{08} est l'action de meilleur rang, selon ses préférences et les trois critères retenus.

En outre la *Construction du modèle* révèle que :

- sur les 3 critères retenus par le décideur, le critère économique g_1 est prépondérant ;
- sur les 3 critères retenus par le décideur, le critère sociétal g_3 joue faiblement sur les préférences du décideur.

Cette information se visualise facilement en analysant l'importance des utilités élémentaires dans le calcul de l'utilité globale de chaque action (voir figure 3.3).

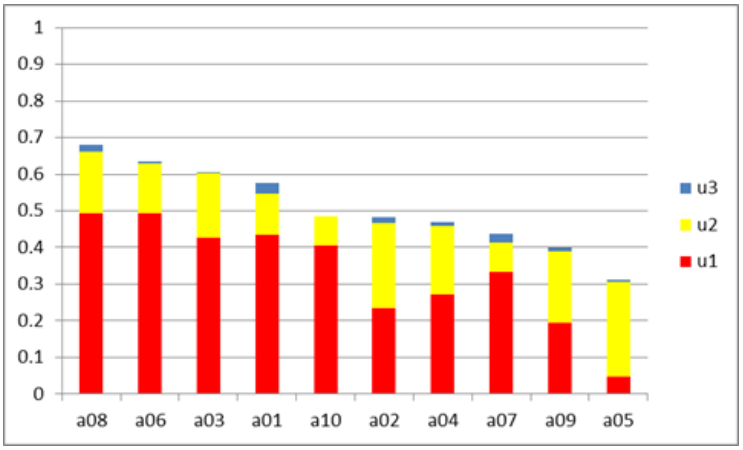

FIGURE 3.3 – Illustration des utilités élémentaires pour chaque action

Pour vérifier l'importance du critère 1 dans ses préférences, le décideur compare la relation d'ordre sur A établie avec la méthode MCDA ACUTA avec la relation d'ordre sur A établie sur l'unique critère g_1 (voir tableau 3.4, les rangs non modifiés sont indiqués en rouge).

Actions	g_1	Rang
a_{08}	47300	1
a_{06}	47200	2
a_{01}	41100	3 (au lieu de 4)
a_{03}	40030	4 (au lieu de 3)
a_{10}	38000	5
a_{07}	32600	6 (au lieu de 8)
a_{04}	27840	7
a_{02}	25000	8 (au lieu de 6)
a_{09}	21800	9
a_{05}	10670	10

Tableau 3.4 – Le *Ranking* des actions de A selon l'unique critère g_1

Il apparait que malgré la prise en compte de trois critères significatifs des piliers du développement durable, le choix de l'action *a priori* à mettre en œuvre (a_{08}) est essentiellement justifié selon le critère économique.

Néanmoins, le modèle n'est pas *faux* en termes de logique et l'information issue de l'aide à la décision est validée.

3.1.5.3 Développer un plan d'action

Une fois le modèle (ou l'information qui en est retirée) validé, la problématique de décision ($P.\gamma$) est résolue : les utilités marginales de chaque action de A pour chaque critère sont déterminées, les utilités globales de chaque action de A sont calculées par addition, et en les rangeant par ordre décroissant, un ordre total est associé à $A \times A$ (ces opérations sont intégrées dans les outils de la plateforme Diviz). L'action de meilleur rang selon ce modèle est *Développer un service de communication* (a_{08}) et est donc l'*action d'amélioration* à déployer au prochain cycle PDCA.

Cycle $j+2$:

- Plan : Planification de *Développer un service de communication* pour diminuer la taux de *turnover* sous la valeur de 9%

En l'état, notre proposition permet d'inscrire un processus MCDA dans un cycle PDCA. Ce processus est fondé sur la méthode ACUTA. La suite de notre proposition concerne la prise en compte de données imprécises.

3.2 Analyse de la robustesse d'un rang en rapport avec l'imprécision

Les données des problèmes de décision dans le cadre des démarches d'amélioration soucieuses de durabilité sont souvent imprécises. Nous proposons dans cette partie de prendre en compte cette imprécision pour remettre en question les informations d'aide à la décision et en particulier le « ranking » de l'ensemble des actions envisagées ([Rizzon 2014a], [Rizzon 2014b]).

3.2.1 Principe

La méthode ACUTA permet au décideur d'obtenir un ordre complet sur un ensemble d'actions A en utilisant un modèle de préférence appris à partir des préférences du décideur sur un sous-ensemble d'actions A^R. Cependant, une imprécision dans la matrice de décision peut modifier les rangs des actions établis à partir du modèle de préférence identifié. Il nous parait intéressant de connaitre les conséquences d'une telle imprécision, ce qui nous conduit à nous interroger sur la question de la robustesse de rangs d'actions.

Selon [Vincke 1999], examiner ce problème dans le domaine de l'agrégation de préférence pourrait être vu comme étudier la robustesse d'une solution, c'est-à-dire, le modèle de préférence, en tenant compte de différents ensembles de données vraisemblables, par exemple des matrices de décision différentes. De nombreux travaux ont été publiés depuis lors, qui tendent à élargir le cadre probabiliste dans lequel les problèmes de décision soumis à de l'incertitude sont formulés, par exemple en utilisant des probabilités imprécises [Troffaes 2007]. En particulier, des généralisations de la dominance stochastique ont été proposées, ce qui a conduit à des *credal orderings* dans le cadre des fonctions de croyance [Denoeux 2009]. La même approche est appliquée dans [Montes 2014]

afin d'étendre le cas des mesures de croyance et de vraisemblance aux ensembles arbitraires de mesures de probabilité. Toutes les théories avancées ici sont fondées sur les méthodes ensemblistes. D'une certaine façon, l'évolution d'UTA suit ce fil d'idée en cherchant à considérer des ensembles de fonctions obtenus par *Robust Ordinal Regression* [Greco 2010a],[Greco 2010b],[Corrente 2013] (le *Robust* dans ce cas est relatif aux préférences du décideur).

Dans le cas qui nous concerne nous partons de l'hypothèse que l'imprécision de l'information est mal connue et que le décideur ne dispose que d'un ordre de grandeur de l'imprécision qui impacte les données qu'il a à traiter. Selon [Roy 2010], la robustesse dans ce domaine concerne la capacité à faire face à des « approximations vagues » ou des « zones d'ignorance » pour prévenir d'impacts indésirables, à savoir la dégradation de propriétés à maintenir. Dans le cas qui nous concerne les « propriétés à maintenir » font référence aux relations de préférence entre toute paire d'actions considérées dans le problème et les « approximations vagues » et « zones d'ignorances », autrement dit le terme « imprécision », incluent toutes les imperfections qui peuvent affecter les valeurs. Autrement dit, si $a \succ b$ est produit par une méthode MCDA, ACUTA dans nos travaux, comment garantir cette relation si les données traitées sont imprécises.

Nous appréhendons les données imprécises sous forme d'intervalles de valeurs dans la matrice de décision, centrés sur la valeur précise, qui sont censés représenter les limites inférieure et supérieure des valeurs possibles. De plus, nous considérons que ces intervalles sont représentés par deux points, c'est-à-dire la représentation usuelle fondée sur les limites des intervalles. Par abus de langage, nous appelons « action imprécise » une action dont au moins une valeur dans la matrice de décision est une donnée imprécise (c'est-à-dire un intervalle) et « action précise » une action dont toutes les valeurs sont précises (c'est-à-dire des scalaires). Par abus de langage nous appelons « matrice de décision imprécise » une matrice dont au moins une action est imprécise et « matrice de décision précise » une matrice dont toutes les actions sont précises. Lorsque l'imprécision est nulle toutes les actions et matrices sont précises. Le tableau illustre 3.5 une matrice de décision imprécise.

Action	g_1	...	g_m
a_1	$\left[g_1(a_1)^{inf},\ g_1(a_1)^{sup}\right]$	...	$\left[g_m(a_1)^{inf},\ g_m(a_1)^{sup}\right]$
...	...	...	...
a_n	$\left[g_1(a_n)^{inf},\ g_1(a_n)^{sup}\right]$	...	$\left[g_n(a_m)^{inf},\ g_n(a_m)^{sup}\right]$

Tableau 3.5 – Forme générale d'une matrice de décision imprécise

Pour comparer les intervalles, nous considérons la modélisation d'un ordre d'intervalles bien connue telle qu'une préférence *stricte* correspond au cas où un intervalle est « complètement à droite » (dans le sens des intervalles réels) d'un autre [Ozturk 2011].

Notre proposition sur l'étude de la robustesse d'un rang en rapport avec l'imprécision des données porte sur deux axes :

- l'étude de la robustesse de rangs d'actions avec des données imprécises en compa-

raison avec les données précises à l'aide d'une analyse de corrélation fondée sur l'indice τ de Kendall, les rangs sont issus d'un modèle construit avec ACUTA sur les données supposées précises ;

- puis la définition d'un *seuil* pour l'imprécision tel que « sous ce seuil » cette imprécision n'est pas un problème pour le décideur en ce qui concerne la robustesse des rangs qu'il/elle utilise pour aider sa décision.

Pour développer notre proposition sur ces deux axes, une méthodologie en 4 étapes est présentée dans la partie suivante.

3.2.2 Méthodologie

Le but est de proposer au décideur la connaissance d'un seuil pour l'imprécision, tel qu'une imprécision « en dessous de ce seuil » ne modifie pas les rangs produits par le modèle de préférence identifié et utilisé avec des données précises. Ces rangs sont dits « rangs de référence » dans la mesure où ils respectent les préférences du décideur exprimées sur A^R et validées sur A.

Le seuil est défini à partir d'une étude de corrélation de rangs entre les rangs de référence et ceux qui sont issus des mêmes données mais impactées par de l'imprécision sur un critère. L'indice τ de Kendall, basé sur toutes les comparaisons deux-à-deux possibles entre actions, est utilisé pour étudier cette corrélation :

- lorsque $\tau = 1$, l'imprécision est en dessous du seuil susmentionné et n'est pas un problème pour le processus d'aide à la décision (établi sur des données précises afin de simplifier la tâche du décideur),

- lorsque $\tau < 1$, l'imprécision est au dessus du seuil et impacte les rangs des actions considérées, ce qui altère le processus d'aide à la décision.

Les étapes de l'analyse de robustesse du modèle de préférence initial sont décrites ci-après. Dans un premier temps, il s'agit simplement d'ignorer l'imprécision et de traiter le problème de décision comme vu précédemment pour construire un modèle de préférence initial. L'idée est de se servir de ce modèle « précis » pour servir de référence à l'évaluation de la robustesse de la relation d'ordre sur A en fonction de l'imprécision qui impacte un critère. Nous présumons que malgré le doute sur la pertinence d'un modèle de préférence initial établi sur des données précises dans un contexte d'imprécision, ce modèle peut servir de base pour discuter de la robustesse de l'ordre établi. De cette manière, le décideur n'a pas à proposer un ordre de référence à partir d'une matrice d'intervalles mais à partir d'une matrice de scalaires qui est considérée comme plus adéquate pour cet exercice cognitif.

3.2.2.1 Appliquer le modèle de préférence initial aux données imprécises

Afin de modéliser l'imprécision et pour des raisons de simplicité, les hypothèses suivantes sont faites :

- au lieu de valeurs scalaires $g_i(a)$, la matrice de décision est remplie avec des intervalles,
- ces intervalles ne sont caractérisés que par leurs limites inférieures et supérieures (respectivement $g_i(a)^-$ et $g_i(a)^+$),
- seul un critère j est affecté par de l'imprécision, tel que :

$$\begin{cases} \forall i \neq j, & g_i(a)^- = g_i(a)^+ = g_i(a) \\ & g_j(a)^- = g_j(a) \times (1 - \Delta) \\ \text{et} & g_j(a)^+ = g_j(a) \times (1 + \Delta) \end{cases} \tag{3.1}$$

avec $g_i(a)$ les valeurs précises dans la matrice de décision soumise au décideur et Δ une valeur en pourcentage.

Pour analyser la robustesse, l'approche proposée par [Corrente 2012], dans le cas particulier d'intervalles décrits par deux points, est déployée :

- une division fictive de chaque action a représentée par $[g_i(a)^-, g_i(a)^+]$, pour tous les critères g_i, en deux sous-actions a^- et a^+ représentée respectivement par $g_i(a)^-$ et $g_i(a)^+$,
- la définition de préférences *Strong* (S) et *Weak* (W) telles que : $\begin{cases} x \succ^S y \Leftrightarrow x^- \succ y^+ \\ x \succ^W y \Leftrightarrow x^+ \succ y^- \end{cases}$

Concrètement une action imprécise est transformée en deux actions fictives précises représentant le pire et le meilleur cas de l'action au sens de l'imprécision. L'astuce que nous exploitons est de transformer des valeurs sous forme d'intervalle en deux valeurs scalaires pour se ramener à des actions (fictives) précises et donc une matrice de décision précise que nous savons traiter. Une matrice de décision « transformée » de cette manière, s'écrit, avec nos hypothèses, comme illustré par le tableau 3.6.

Action	g_1	...	g_m
a_1^-	$g_1(a_1)^-$	...	$g_m(a_1)$
a_1^+	$g_1(a_1)^+$	...	$g_m(a_1)$
...	...	...	...
a_n^-	$g_1(a_n)^-$	...	$g_m(a_n)$
a_n^+	$g_1(a_n)^+$	...	$g_m(a_n)$

Tableau 3.6 – Matrice de décision transformée avec l'imprécision affectant le critère 1

Grâce à la nature additive des fonctions marginales, $a^+ \succ a \succ a^-$ est toujours vrai. Ainsi, les préférences *Strong* peuvent être lues comme des préférences robustes malgré

l'imprécision. Les décideurs fondant leur décision sur la robustesse de comparaisons deux-à-deux, il est donc crucial de connaître les conditions telles qu'une préférence soit *Strong* (robuste).

3.2.2.2 Analyser la concordance entre rangs d'actions précises et imprécises

Cette analyse est réalisée, par analogie avec [Bous 2010], à l'aide du τ de Kendall pour établir la corrélation entre la relation de préférence d'une paire d'action (établie dans le cas dit précis) et le maintien de cette relation en fonction de l'imprécision :

$$\tau_X = \frac{N_c - N_d}{N} \tag{3.2}$$

avec :
$X \subset A$ le sous-ensemble d'actions de A dont la robustesse vis-à-vis de l'imprécision intéresse le décideur
N = nombre total de relations de préférences deux-à-deux dans l'ensemble X
N_c = nombre de concordances
N_d = nombre de discordances

Plus précisément, pour se concentrer sur la robustesse, nous nous sommes seulement intéressés aux relations de préférences *Strong*. Par exemple, si les rangs initiaux établis dans le cas précis sont comme suit : $a_1 \succ a_2 \succ \ \ldots \ \succ a_p$ il y a $p \times (p-1)/2$ relations *Strong* lorsque $\Delta = 0\%$.

3.2.2.3 Calculer un seuil pour l'imprécision

Rappelons que le modèle de préférence et la matrice de décision imprécise (ou transformée) sont connus. Il est donc possible, comme montré ci-dessous, de déterminer pour chaque paire d'actions un seuil à l'imprécision qui garantisse la robustesse de cette relation spécifique.

Soit $x \succ y$ une relation d'ordre déterminée dans le cas précis. Maintenant, l'imprécision (Δ) sur un critère est prise en compte. Est-ce-que cette relation d'ordre est robuste malgré l'imprécision ? C'est le cas si $x \succ^S y$ dans le cas imprécis. Ainsi, pour calculer le seuil d'imprécision Δ_{lim} pour une relation, il faut vérifier :

$$x \succ^S y \Leftrightarrow \Delta < \Delta(x,y)_{lim} \tag{3.3}$$

Pour calculer $\Delta(x,y)_{lim}$ il suffit de résoudre le problème suivant :

$$\text{Max} \quad \Delta \tag{3.4}$$

avec :

$$U(x) - U(y) \geq 0$$

S'il s'agit de calculer un seuil pour un ensemble d'action $A^* \subset A$ dont la robustesse à l'imprécision est caractérisée par l'indice de Kendall τ_{A^*} il suffit de résoudre le problème :

$$\text{Max} \quad \Delta \tag{3.5}$$

avec :

$$\tau_{A^*} = 1$$

S'il s'agit de calculer un seuil pour toutes les comparaisons deux à deux qui concerne une action jugée importante par le décideur pour sa décision, il suffit de répéter (3.4) $\forall y \in A$ (ou $\in A^*$) et de conserver la valeur minimale comme seuil.

L'idée est que la connaissance d'un seuil à l'imprécision, tel que l'information exploitée par le décideur pour prendre sa décision n'est pas impactée, permet au décideur de savoir s'il/elle doit investir dans l'amélioration des valeurs concernées dans la matrice de décision ou non.

Pour illustrer notre proposition, nous déployons cette méthodologie sur l'exemple.

3.2.3 Application à l'Exemple

3.2.3.1 Appliquer le modèle de préférence initial aux données imprécises

Afin de prendre en compte l'imprécision, il est proposé d'étudier l'impact d'une imprécision Δ (en %) globale, c'est-à-dire, qui affecte toutes les actions de A, centrée sur la valeur précise pour toutes les évaluations des actions concernant le critère 1 de l'exemple.

L'intention est de vérifier la robustesse du *ranking* produit par le modèle des préférences du décideur en rapport avec l'imprécision des valeurs des données. Il s'agit alors d'appliquer le modèle de préférence produit par ACUTA sans tenir compte de l'imprécision à la matrice de décision transformée montrée par le tableau 3.7 avec une imprécision $\Delta = 10\%$.

Action	g_1	g_2	g_3
a_{01}^-	36990	19	25
a_{01}^+	45210	19	25
a_{02}^-	22500	42	15
a_{02}^+	27500	42	15
a_{03}^-	36027	27	2
a_{03}^+	44033	27	2
a_{04}^-	25056	29	10
a_{04}^+	30624	29	10
a_{05}^-	9603	49	7
a_{05}^+	11737	49	7
a_{06}^-	42480	22	5
a_{06}^+	51920	22	5
a_{07}^-	29340	15	20
a_{07}^+	35860	15	20
a_{08}^-	42570	26	18
a_{08}^+	52030	26	18
a_{09}^-	19620	32	10
a_{09}^+	23980	32	10
a_{10}^-	34200	15	0
a_{10}^+	41800	15	0

Tableau 3.7 – Matrice de décision transformée avec une imprécision $\Delta = 10\%$ affectant le critère 1

La figure 3.4 montre qu'une imprécision de de 10% soulève des questions sur la robustesse de la relation de préférence qui caractérise les actions de meilleurs rangs de l'exemple. Il est utile d'analyser l'impact de la valeur de l'imprécision sur la robustesse de l'ordre des actions de A.

3.2.3.2 Analyser la concordance entre rangs d'actions précises et imprécises

Cette analyse s'appuie sur le calcul de l'indice de Kendall τ pour les rangs des actions concernées. Le résultat pour une imprécision Δ incrémentée par 1% de 0 à 20% est illustré par la figure 3.5.

Etudier la robustesse sur le sous-ensemble des actions de référence A^R est nécessaire car les préférences globales initialement exprimées par le décideur peuvent être compromises. Dans un tel cas de figure, ces préférences devraient être remises en question. C'est pourquoi, toute analyse à venir sur la robustesse des relations de comparaisons deux-à-deux

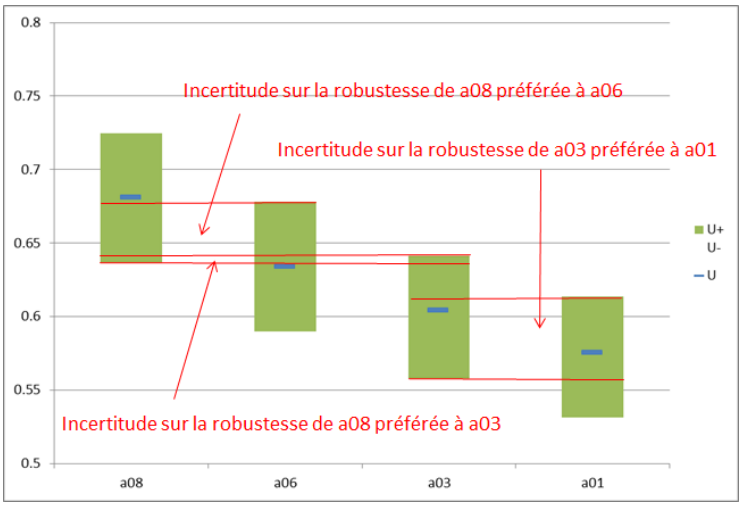

FIGURE 3.4 – Intervalles d'utilités globales pour une imprécision de 10%

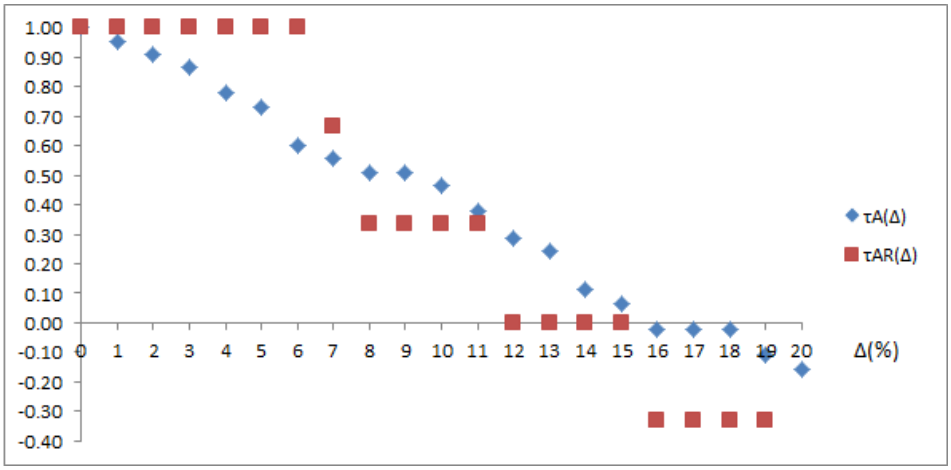

FIGURE 3.5 – L'indice τ de Kendall des préférences *Strong* (sur A^R et sur A)

dans A ne peut que porter sur un domaine d'imprécision tel que $\tau_{A^R} = 1$, c'est-à-dire ici, $\Delta \in [0\%, 6\%]$.

En l'état, quand bien même l'imprécision serait de l'ordre de 5% (ce que le décideur considère comme une imprécision raisonnable pour le critère 1), le calcul de τ_A montre que le *ranking* issu de son modèle de préférence est impacté par l'imprécision. La question est de savoir si cela devrait affecter sa décision.

3.2.3.3 Calculer un seuil pour l'imprécision

Maintenant nous abordons le problème avec un point de vue différent : dans le cas précis, il a été établi que a_{08} serait la meilleure des actions considérées selon les préférences du décideur. Le décideur sait que les données sont soumises à de l'imprécision et avant de valider le déploiement de a_{08} il/elle veut savoir s'il/elle peut avoir confiance dans la robustesse de son choix malgré l'imprécision. Le décideur sait, à partir de l'analyse précédente, que l'imprécision sur le critère g_1 ne doit pas excéder 6% pour que son modèle de préférence ait du sens. Cependant il/elle ne sait pas encore ce qui arrive pour $a_{08} \notin A^R$.

Afin d'illustrer cette approche, nous considérons la comparaison entre a_{08} et a_{06} puisqu'il s'agit des actions potentiellement de rangs 1 et 2 respectivement. En procédant comme décrit auparavant dans la partie 3.2.2.3, il résulte que $\Delta(a_{08}, a_{06})_{lim} = 5.3\%$ ($< 6\%$ donc l'analyse a du sens). En répétant ce processus pour chaque comparaison deux-à-deux dans A qui implique a_{08}, le seuil apparait comme la plus faible des valeurs $\Delta(a_{08}, a)_{lim}$, $\forall a \in A$. Dans cet exemple il s'agit de $\Delta(a_{08}, a_{06})_{lim}$. La figure 3.6 montre la distinction entre les utilités globales calculées dans le cas précis et les intervalles associés lorsque la valeur d'imprécision est égale au seuil $\Delta(a08, a06)_{lim}$. Ainsi le décideur sait que s'il/elle veut garantir sa décision malgré l'imprécision, il/elle doit juste savoir si l'imprécision sur le critère 1 est inférieure ou égale à 5%.

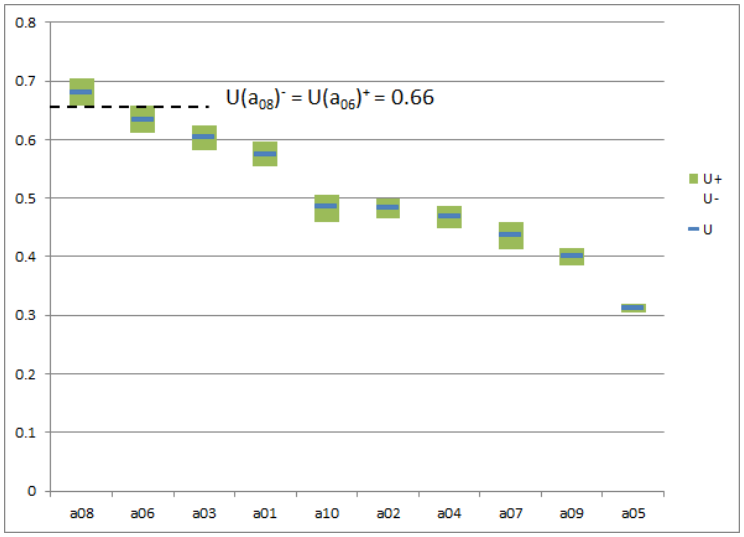

FIGURE 3.6 – Actions rangées selon leur valeur précise d'utilité globale et les intervalles de valeurs d'utilités globales pour une imprécision = $\Delta(a08, a06)_{lim}$

Cette proposition permet de prendre du recul sur la pratique de la MCDA, dans le cadre des méthodes MAUT/MAVT où des utilités ou valeurs sont associées aux actions de A, en autorisant une analyse sur l'impact de l'imprécision des données de la matrice de décision (concernant les valeurs associées à un unique critère en l'état).

La troisième partie de notre proposition porte sur l'intégration d'un point de vue complémentaire à l'utilité d'une action. Il s'agit de développer une aide à la décision qui intègre la faisabilité (aptitude à la mise en pratique) d'une action dans le processus de décision.

3.3 Faisabilité

Dans le chapitre 1, la démarche d'amélioration continue d'une entreprise, à travers ses critères de performance, est présentée comme une démarche pour favoriser l'amélioration de la performance d'un système complexe qui se transforme par la mise en œuvre d'actions. Dans la première partie du chapitre 3 nous avons proposé une méthodologie afin de déterminer l'utilité globale pour chaque action ce qui représente une aide précieuse pour le décideur. Cette utilité permet de savoir si une action peut être retenue, en comparaison avec les autres actions envisagées ou de façon absolue par rapport aux objectifs que se fixe l'entreprise. Nous avons souligné les limites d'interprétation de cette information dans la deuxième partie de ce chapitre en étudiant la robustesse de cette information sachant l'imprécision sur les données de la matrice de décision, typique des actions liées au développement durable. Dans cette troisième partie nous nous interrogeons sur une autre limite de l'information d'utilité : suffit-elle au décideur ? Notre opinion est que cette information ne peut pas rendre compte de la mise en œuvre d'une action. En effet l'utilité ne se préoccupe *a priori* que de l'intérêt de l'action (vis-à-vis des objectifs) mais pas du comment elle sera déployée. Il est fréquent de constater que des actions à faible impact (utilité faible ou moyenne) sont malgré tout privilégiées car leur mise en œuvre est jugée plus facile que des actions à fort impact (utilité élevée ou très élevée) mais jugées difficiles à mettre en œuvre. C'est cet aspect que se propose de traiter la dernière partie de notre contribution en développant la notion de faisabilité de façon complémentaire à la notion d'utilité ([Clivillé 2015a], [Clivillé 2015b]).

3.3.1 Intérêt de la faisabilité pour l'aide à la décision

Jusqu'à présent, nous avons abordé les apports de la MCDA pour le pilotage industriel avec la perspective de la MCDA suivante : apporter une information, construite à partir de la déduction de relations de préférence sur un ensemble d'actions A, fondée sur une matrice de décision et les structures de préférences du décideur. La recommandation/indication qui en résulte dépend du type de problématique (voir 2.1.3.1 pour la description des problématiques α, β, γ ou δ), cependant, d'un point de vue général, il s'agit du résultat de la formulation des préférences du décideur. Le but est de chercher à comparer les actions de A (voire dans certains cas de figure des paquets d'actions) entre elles de façon singulière : l'action (ou paquet) « meilleure » que les autres est sélectionnée et « on passe à autre chose ».

Maintenant, l'idée est d'enrichir cette information sur la satisfaction d'une action par une information complémentaire sur la mise en œuvre de cette action. Cette idée de faisabilité de la mise en œuvre est présente en gestion de projet où pour les projets d'une certaine envergure une étude de faisabilité permet aux décideurs de se préoccuper de cette mise en œuvre. Ainsi pour transporter les tronçons d'Airbus A380, le projet de transport des tronçons par dirigeable bien que jugé très intéressant (forte utilité) a été abandonné au vu de sa faisabilité jugée mauvaise. La faisabilité doit permettre de rendre compte du problème du décideur confronté à la situation suivante : l'action a est plus intéressante que l'action b ($U(a) > U(b)$) mais sa mise en œuvre est plus difficile. La lecture de la seule utilité incitait le décideur à choisir a, mais la facilité/difficulté de mise en œuvre peut remettre en cause ce choix. Pour compléter l'aide à la décision nous proposons donc d'associer à toute action de A, dans le même esprit que l'utilité, une information sur sa facilité/difficulté à être mise en œuvre au travers de la notion de **faisabilité**.

Pour prendre cette notion en considération deux options sont envisageables :

- Considérer l'information de faisabilité, telle que nous la décrivons, comme un critère de préférence i caractérisé par la fonction g_i et conserver l'approche MCDA classique décrite jusqu'alors. L'avantage est que la faisabilité d'une action de A vis-à-vis des autres est directement intégrée dans les relations de préférence déduites de l'utilité globale de chaque action. L'inconvénient est que le décideur doit fournir cette information sans qu'elle soit mesurable, quantifiable à l'instar des critères classiques du modèle de préférence. De plus cette intégration de la faisabilité dans l'utilité rend la perception de la mise en œuvre moins évidente.

- Considérer l'information de faisabilité d'une action indépendamment de l'information de d'utilité. Une action a serait alors caractérisée par le couple $(U(a), F(a))$ au lieu de $U(a)$ seule. L'avantage est que l'utilité globale d'une action, reflet des préférences du décideur sur l'action à déployer, est complétée par la faisabilité globale d'une action, reflet de la facilité/difficulté d'une action à être déployée. L'inconvénient est que pour avoir un intérêt, la construction d'un modèle de faisabilité doit pouvoir se distinguer clairement de la construction d'un modèle de préférence, ce qui alourdit le processus.

En considérant la définition de l'aide à la décision selon [Roy 2005](rappel de 2.1.2), c'est-à-dire :

« l'activité d'une personne qui, à partir de modèles explicites mais pas nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions posées par une partie prenante au processus de décision. Ces éléments servent à clarifier la décision et, d'ordinaire, à recommander ou simplement encourager un comportement qui augmentera la cohérence entre l'évolution du processus et les objectifs et systèmes de valeurs de cette partie prenante »,

nous pensons qu'une information finale unique sur l'utilité globale limite la liberté d'interprétation du décideur. En effet, *a priori*, une fois le modèle de préférence validé il

n'y a pas de compromis ou négociation possible si deux actions ont des utilités (suffisamment) différentes. En revanche, une aide à la décision apportée par deux informations, les utilités globales et les faisabilités globales, est selon nous plus proche d'une recommandation ou un encouragement. Le but n'est pas de surcharger le décideur avec l'information qu'il/elle a à interpréter, ce qui serait contreproductif avec la finalité de l'aide à la décision. Or, traiter une information caractérisée selon deux axes de lecture est une forme de compromis classique que traite fréquemment un décideur sans l'aide d'outils spécifiques. Pour ce faire, nous proposons de conserver la perspective générale de la MCDA : apporter une information fondée d'une part sur une matrice de décision et d'autre part sur l'expertise du décideur concernant la faisabilité de tout ou partie des actions de A. Ainsi comme l'utilité, la faisabilité « globale » est vue comme une fonction additive agrégeant des faisabilités marginales définies suivant chacun des critères précédemment identifiés pour déterminer les utilités marginales. Afin de conserver l'approche holistique adoptée pour la détermination des utilités nous optons pour le même principe de désagrégation afin d'éliciter le modèle de faisabilité. La méthode en tout point conforme aux principes et des contraintes « types » ACUTA[1] est présentée dans la section suivante.

3.3.2 Formalisation

Puisque la détermination des faisabilités est fondée sur la méthode de MCDA ACUTA, nous structurons le formalisme, hypothèses et notations relatives à la faisabilité selon les quatre éléments clés de la construction d'un modèle de la MCDA :

- la matrice de décision (*input*) ;
- l'expertise du décideur et le paramétrage (*input*) ;
- le système de contraintes (la méthode ou outil MCDA) ;
- le modèle issue de la méthode (*output*).

3.3.2.1 La matrice de décision

L'ensemble des actions considérées est le même que le celui du problème de décision, c'est-à-dire A. En effet, l'idée est d'associer aux actions $a \in A$ une faisabilité globale $F(a)$ en plus d'une utilité globale $U(a)$ pour apporter une information qui aide à la décision. Rappelons que tous les critères i considérés sont les mêmes que pour le modèle de préférence des utilités. L'idée est donc que la faisabilité globale résulte des faisabilités marginales établies suivant les mêmes critères que ceux retenus pour les utilités marginales. Dans cette première formalisation d'un modèle de « préférence » concernant la faisabilité (plus simplement appelé « modèle de faisabilité ») nous avons fait le choix de proposer un modèle aussi simple que possible. Cependant rien n'interdit dans de futurs travaux de considérer un ensemble de critères de faisabilité différent de l'ensemble des critères d'utilité.

[1] La méthode devrait s'appeler ACFEA pour *Analytic Center Feasability Additive* mais nous faisons le choix de conserver le terme ACUTA en l'appliquant au calcul de faisabilité

Dans cet esprit de simplicité, les domaines de définition des valeurs $g_i(a)$, c'est-à-dire $[\alpha_i, \beta_i]$, sont conservés de façon à considérer le même champ d'actions potentielles que pour le problème de décision classique.

Les valeurs $g_i(a)$ associées à chaque action $a \in A$, et donc la matrice de décision du problème de décision « étendu » à la faisabilité, sont conservées.

3.3.2.2 L'expertise du décideur et le paramétrage

La formulation de l'expertise du décideur est du même type que pour le modèle de préférence d'utilité. Son implémentation est identique :

- le décideur sélectionne un sous-ensemble d'actions de référence $A^R \subset A$;
- le décideur explicite une relation d'ordre totale sur le sous-ensemble qui est implémentée dans la méthode. Cette relation d'ordre est construite à partir d'une expertise exprimée sous la forme : il est possible (faisable) de passer de l'action a à l'action b.

En revanche, l'information d'expertise demandée au décideur est différente.

Dans le cas classique, l'aide à la décision consiste à déduire un modèle des préférences du décideur applicable à A à partir des préférences du décideur formulées à partir d'une relation d'ordre $\mathcal{R} \subseteq A^R \times A^R$ telle que :

- $a \succ b$ signifie « a est préférée à b » ;
- $a \sim b$ signifie « a est indifférente de b ».

Dans le cas de la faisabilité, l'aide à la décision consiste à déduire un modèle de faisabilité du point de vue du décideur applicable à A à partir des « possibilités de passage de a à b » du décideur formulées à partir d'une relation d'ordre $\mathcal{R}' \subseteq A^{R^*} \times A^{R^*}$ telle que :

- $A^{R^*} \subset A$;
- $\mathcal{R}' \neq \mathcal{R}$:
  - $a \rhd b$ signifie « il est possible de passer de l'action a à l'action b », la réciproque n'est pas vraie ;
  - $a - b$ signifie « il est possible de faire l'action b à partir de l'action a et réciproquement ».

Explicitement :
$a \rhd b \Leftrightarrow F(a) > F(b)$,
$a - b \Leftrightarrow F(a) = F(b)$.
Afin d'éviter des ambiguïtés entre utilités et faisabilités nous noterons :

- $A^{R_U} (\subset A)$ l'ensemble des actions de référence sur lesquelles le décideur exprime ses préférences globales ;
- $A^{R_F} (\subset A)$ l'ensemble des actions de référence sur lesquelles le décideur exprime ses potentiels de faisabilité globaux.

3.3.2.3 Le système de contraintes

Les *inputs* de la méthode proposée ici étant analogues à ceux de la méthode ACUTA, le système de contraintes est mathématiquement le même et consiste à résoudre le problème (3.6) :

$$\text{Max} \qquad G = \sum_{j=1}^{r-1} ln(s_j) + \sum_{i=1}^{n} \sum_{h=1}^{l_i-1} ln(s_i^h) \tag{3.6}$$

sachant que :

$$\begin{cases} \forall j \in \{1, ..., r-1\} \\ F(a_{(j)}) - F(a_{(j+1)}) = s_j \text{ if } a_{(j)} \rhd a_{(j+1)} \\ F(a_{(j)}) - F(a_{(j+1)}) = 0 \text{ if } a_{(j)} - a_{(j+1)} \end{cases} \tag{3.6a}$$

$$\begin{array}{l} f_i(x_i^{h+1}) - f_i(x_i^h) = s_i^h, \ i = 1, ..., n, \ h = 0, ..., l_i - 1 \\ \sum_{i=1}^{n} f_i(x_i^{l_i}) = 1 \end{array} \tag{3.6b}$$

avec :

- l_i le nombre de segments de la fonction de faisabilité élémentaire f_i,
- (3.6a) les contraintes relatives aux préférences du décideur sur les actions de A^{R_F} et la variable relâchée associée s_j,
- (3.6b) les contraintes relatives à la cohérence du modèle de préférence par additivité et la variable relâchée associée s_i^h,
- $r = |A^{R_F}|$.

En ce qui concerne les paramètres du modèle de faisabilité :

- le nombre de segments pour les fonctions de faisabilité marginales (ou élémentaires) demeure du choix du décideur en fonction de la « souplesse » du modèle de faisabilité demandée ;
- l'orientation des fonctions de faisabilité marginales dépend de l'augmentation (fonction gain) ou à l'inverse de la diminution (fonction coût) de la satisfaction du décideur associée à une valeur g_i plus grande, au sens de la faisabilité, qui peut être différent de celui de l'utilité.

Dans le cas des actions d'amélioration on peut noter qu'en général les fonctions d'utilité et de faisabilité ont des sens de variation opposés. Pour un critère donné la fonction d'utilité est de type gain quand la fonction de faisabilité est de type coût et réciproquement.

3.3.2.4 Le modèle issu de la méthode

En toute logique le modèle de faisabilité issu de la désagrégation est de même type qu'un modèle de préférence ACUTA. Donc il s'agit, lorsqu'il existe, d'un modèle compatible

avec les préférences du décideur, représentatif (*Analytic Center*) de l'ensemble des solutions au problème mais relatif à la faisabilité au lieu de l'utilité.

Tout comme l'utilité globale d'une action $U(a) = \sum_{i=1}^{n} u_i(g_i(a))$ est directement obtenue par addition des utilités marginales de l'action $a \in A$, l'utilité globale d'une action $F(a) = \sum_{i=1}^{n} f_i(g_i(a))$ est directement obtenue par addition des faisabilités marginales de l'action $a \in A$.

L'agrégation par addition, en respectant les systèmes de contraintes de (3.6), produit les mêmes valeurs extrêmes pour la faisabilité globale d'une action que pour son utilité globale : 0 et 1.

Ces valeurs ont un sens pour l'utilité, il faut donc donner un sens à ces valeurs pour la faisabilité :

- $F(a) = 1$ signifie qu'à partir du déploiement de l'action a, toutes les autres actions sont possibles à réaliser ;
- $F(a) = 0$ signifie qu'à partir de l'action a, aucune action n'est possible à réaliser.

Comme nous l'avons dit précédemment quand les fonctions d'utilité et de faisabilité ont des sens de variation opposés, l'action idéale $a*$ au sens de l'utilité ($U(a*) = 1$) conduit à la faisabilité $F(a*) = 0$. Autrement dit aucune action n'est faisable à partir de l'action idéale en termes d'utilité.

Exemple

Nous appliquons maintenant notre proposition sur la faisabilité à l'exemple. L'exemple est repris au niveau de la phase de *construction du modèle* en cherchant cette fois à déterminer un modèle de faisabilité.

Par respect des hypothèses énoncées précédemment, la matrice de décision est conservée (voir tableau 2.3), les trois fonctions marginales sont à deux segments et de type coût. La tâche supplémentaire demandée au décideur est d'exprimer une relation de potentiels de faisabilité sur un sous-ensemble d'actions de référence $A^{R_F} \subset A$, différente de sa relation de préférences qui porte sur un sous-ensemble d'actions de référence $A^{R_U} \subset A$.

Pour aider le décideur à exprimer son expertise différemment que pour le calcul du modèle de préférence, l'analyste suggère au décideur de choisir les actions de A_{R_F} et à penser les relations de potentiels de faisabilité comme « s'il fallait déployer toutes les actions de A^{R_F} successivement, dans quel ordre les mettriez vous en œuvre ? ».

La formulation des potentiels de faisabilité selon le décideur est telle que :

$$a_{10} \rhd a_{09} \rhd a_{04} \rhd a_{03} \rhd a_{05}$$

.

La méthode ACUTA est exécutée sur la plateforme Diviz et produit un modèle de faisabilité (voir tableau 3.8 et figure 3.2) représentatif des potentiels de faisabilité selon le décideur et des contraintes du problème de décision.

g_i	α_i	$u_i(g_i(\alpha_i))$	γ_i	$u_i(g_i(\gamma_i))$	β_i	$u_i(g_i(\beta_i))$
g1	7000	0.36	38500	0.11	70000	0
g2	5	0.47	27.5	0.26	50	0
g3	0	0.17	15	0.01	30	0

Tableau 3.8 – Le modèle de préférence du décideur

Avant de discuter de l'information fournie par le modèle de faisabilité, il faut d'abord vérifier que le modèle est bien *compatible* avec les potentiels de faisabilité du décideur. Pour ce faire, il faut vérifier que la relation d'ordre proposée par le décideur est conservée par le modèle de faisabilité.

Dans ce cas d'étude, le modèle est compatible puisque (voir tableau 3.9) :

$$F(a_{10}) > F(a_{07}) > F(a_{09}) > F(a_{04}) > F(a_{06}) > F(a_{03}) > F(a_{05}) > F(a_{01}) > F(a_{08}) > F(a_{02})$$

.

Actions	Faisabilité Globale	Rang
a_{10}	0.66	1
a_{07}	0.60	2
a_{09}	0.57	3
a_{04}	0.56	4
a_{06}	0.54	5
a_{03}	0.53	6
a_{05}	0.48	7
a_{01}	0.47	8
a_{08}	0.43	9
a_{02}	0.41	10

Tableau 3.9 – Les faisabilités globales et le *ranking* des actions considérées

Les actions a_{10} *Ne rien faire*, autrement dit l'existant, et a_{02} *Acheter des nouveaux équipements* sont respectivement les actions de meilleur et de pire rang au sens de la faisabilité. En outre l'action de meilleur rang au sens de l'utilité (a_{08}) est de rang faible au sens de la faisabilité. Le modèle apparait donc comme cohérent vis-à-vis des hypothèses faites sur la faisabilité et sa perception par rapport à l'utilité.

Une fois les modèles de préférence et de faisabilité du décideur validés, un couple $(U(a), F(a)) \in [0,1] \times [0,1]$ est maintenant associé à chaque action $a \in A$, comme illustré par le tableau 3.10 et le graphe 3.8.

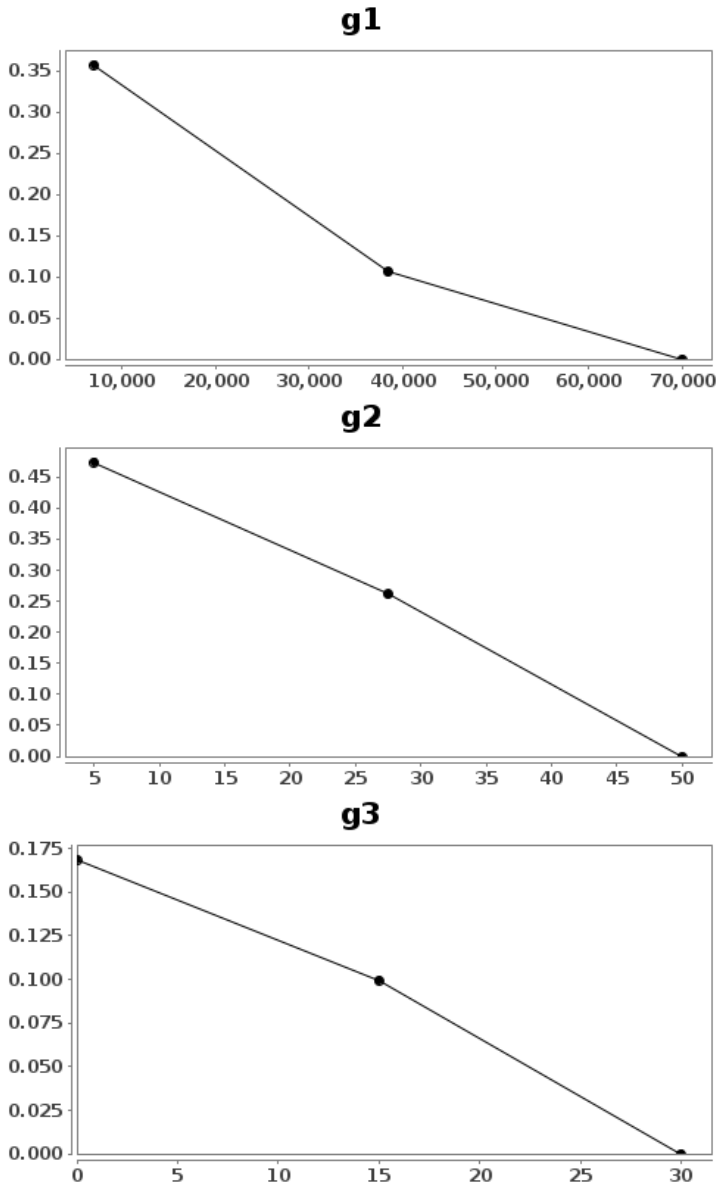

FIGURE 3.7 – Le graphe du modèle de faisabilité du décideur

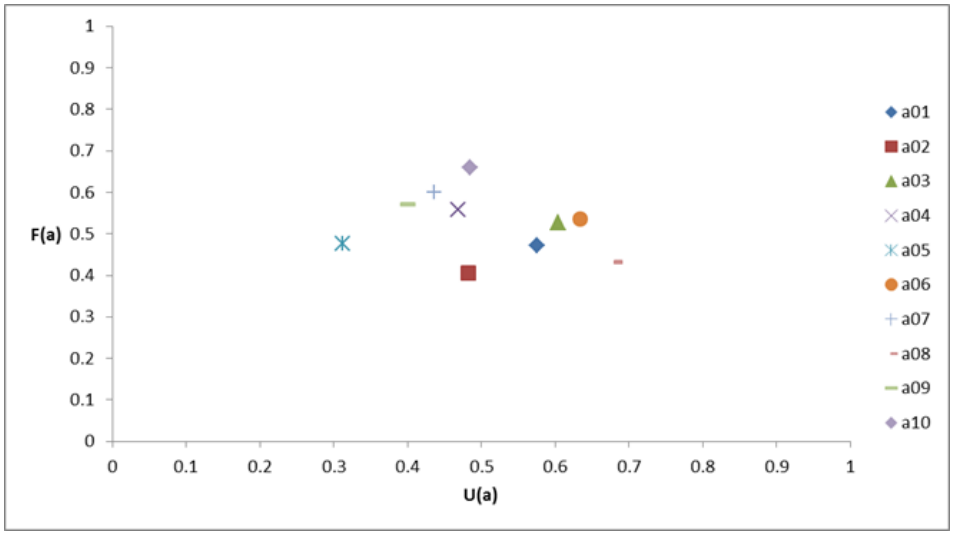

FIGURE 3.8 – Utilité et Faisabilité de chaque action de A

Actions	Utilité Globale	Faisabilité Globale
a_{01}	0.58	0.47
a_{02}	0.48	0.41
a_{03}	0.60	0.53
a_{04}	0.47	0.56
a_{05}	0.31	0.48
a_{06}	0.63	0.54
a_{07}	0.44	0.60
a_{08}	0.68	0.43
a_{09}	0.40	0.57
a_{10}	0.49	0.66

Tableau 3.10 – Utilité et Faisabilité de chaque action de A

3.3.3 Utilisation

Un certain nombre d'exploitations de ces deux informations d'aide à la décision nous semblent intéressant, nous les listons ci-dessous avant de les développer.

- Que peut-on faire de la connaissance $(U(a), F(a))$?
- Amélioration de l'utilité (sachant une faisabilité donnée)
- Amélioration de la faisabilité (sachant une utilité donnée)

- Recherche d'un compromis entre utilité et faisabilité

Exploitation : que peut-on faire de la connaissance $(U(a), F(a))$?

Le premier usage de cette information de $F(a)$ est de fournir au décideur une aide supplémentaire à la décision. Par exemple imaginons que deux actions a et b aient des utilités très proches $U(a) \simeq U(b)$. Dans ce cas des faisabilités différentes $F(b) >> F(a)$ peut inciter le décideur à privilégier b plutôt que a au vu de sa facilité de mise en œuvre et le potentiel de faisabilité résiduel, c'est-à-dire l'ensemble des actions faisables à partir de b est plus grand que l'ensemble des actions faisables à partir de a. D'une façon générale il nous semble que le décideur privilégiera la notion d'utilité, synonyme d'efficacité dans une démarche d'amélioration. Pour autant dans certains cas, comme par exemple la phase initiale concernant un problème nouveau pour l'entreprise ce qui est très fréquent dans le cadre du DD, le décideur peut privilégier la faisabilité. Ainsi une action avec un impact faible en termes d'utilité peut être retenue pour sa faisabilité élevée. Le décideur pourra ainsi faire la démonstration que la démarche d'amélioration donne « facilement » des résultats avec une action dite « pilote ».

Exemple :

L'idée est de considérer le couple $(U(a), F(a))$ plutôt que seulement $U(a)$ qui met en avant l'action a_{08} ou seulement $F(a)$ qui met en avant l'action a_{10}, ce qui n'est pas dans les attentes de l'aide à la décision. Par exemple le décideur peut choisir de procéder à une sélection pour aboutir à un compromis satisfaisant entre l'utilité d'une action (vue comme un gain pour la performance en fonction du présent) et la faisabilité d'une action (vue comme un gain pour les actions futures visant à l'amélioration de la performance).

En visualisant le graphe 3.8, le décideur sait que la mise en œuvre de a_{08} est recommandée au sens de l'utilité. Pour autant nous constatons que des actions ont une faisabilité supérieure, par exemple a_{06}. Le décideur peut conserver son choix de l'action a_{08} ou bien il peut vouloir mettre en œuvre l'action la plus facile, a_{07} (l'action a_{10} a une faisabilité plus grande mais cette action correspond à ne rien faire et ne présente donc aucun intérêt). Cependant dans la plupart des cas, il/elle souhaite effectuer un compromis et dans ce cas les meilleurs compromis sont les actions a_{08}, a_{06} et a_{07}, puisqu'elles ne sont dominées (pour le couple $(U(a), F(a))$) par aucune autre solution.

Plaçons nous maintenant dans une perspective d' « amélioration » (en termes d'utilité ou de faisabilité) des actions.

Sous hypothèse que les valeurs g_i sont indépendantes au niveau de la définition d'une action, une autre piste d'exploitation est la possibilité de concevoir des actions $x \notin A$ mais telles que $x \in [\alpha_1, \beta_1] \times [\alpha_2, \beta_2] \times [\alpha_3, \beta_3]$ en cherchant à jouer sur $U(x)$ sous la contrainte de la faisabilité ou sur $F(x)$ sous la contrainte de l'utilité.

Amélioration de l'utilité globale sachant une faisabilité donnée

Une piste d'application de la notion de faisabilité concerne l'amélioration de l'utilité pour un niveau de faisabilité donnée. Autrement dit, existe-t-il une action x ayant une faisabilité au moins aussi bonne que l'action considérée y, $F(x) \geq F(y)$ mais dont l'utilité serait meilleure, $U(x) > U(y)$?

Pour répondre à cette question, nous proposons de rechercher l'action virtuelle, x^* telle que $U(x^*) = U(x)_{max}$ sous la contrainte que $F(x^*) \geq F(y)$. L'idée est alors de partir de cette action virtuelle (qui peut ne pas exister) pour imaginer une transformation de y vers une action x_{am} à faisabilité comparable mais à utilité supérieure inspirée de x^*. Quand nous disons inspiré nous entendons que quelque soit $g_i(x_{am})$, $u_i(x^*) \geq u_i(x_{am}) \geq u_i(y)$, avec $\{g_1(x_{am}), ..., g_i(x_{am}), ..., g_n(x_{am})\}$ réaliste.

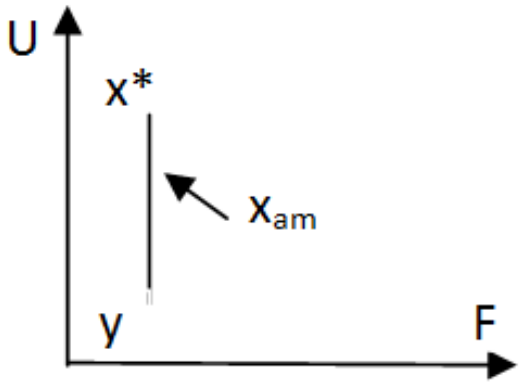

FIGURE 3.9 – Maximiser U sachant F

Le programme linéaire permettant de déterminer $x^* = \{g_1(x), ..., g_i(x), ..., g_n(x)\}$ peut alors s'écrire de la façon suivante :

$Max \quad U(g_1(x), ..., g_n(x)),$

avec :

$F(g_1(x), ..., g_n(x)) \geq F(g_1(y), ..., g_n(y))$

$(g_1(x), ..., g_n(x)) \in A.$

Exemple :

Nous cherchons à modifier a_{06} en visant une meilleure utilité que $U(a_{06})$ sans dégrader la faisabilité $F_{a_{06}}$. Auquel cas il faut résoudre (3.7) :

$$\begin{cases} Max \quad U(x) \\ F(x) \geq F(a_{06}) \end{cases} \tag{3.7}$$

L'action $x*$ produite alors est telle que :

$$\begin{cases} x^* : & g_1(x^*) = 70000 \quad g_2(x^*) = 16 \quad g_3(x^*) = 0 \\ & F(x^*) = F(a_{06}) = \quad 0.54 \\ & U(x^*) = 0.80 > \quad U(a_{06}) = 0.63 \end{cases}$$

Dans ce cas de figure, x^* serait une action à la fois meilleure en utilité que a_{08} tout en conservant la faisabilité de a_{06}. Mais il s'agit d'une action virtuelle qui n'a peut être pas de correspondant réel. Il s'agit alors pour le décideur d'explorer l'espace des solutions telles que $u_i(x^*) \geq u_i(x_{am}) \geq u_i(a_{06})$, avec $\{g_1(x_{am}), \ ..., \ g_i(x_{am}), \ ..., \ g_n(x_{am})\}$ réaliste.

Amélioration de la faisabilité globale sachant une utilité globale donnée

La piste corollaire concerne l'amélioration de la faisabilité pour un niveau d'utilité donné. Autrement dit existe-t-il une action z ayant une utilité au moins aussi bonne que l'action considérée y, $U(z) \geq U(y)$, mais dont la faisabilité serait meilleure, $F(z) > F(y)$.

Pour répondre à cette question nous proposons de rechercher l'action virtuelle, z^* telle que $F(z^*) = F(z)_{max}$ sous la contrainte que $U(z^*) \geq U(y)$. L'idée est alors de partir de cette action virtuelle (qui peut ne pas exister) pour imaginer une transformation de z vers une action z_{am} à utilité comparable mais à faisabilité supérieure, inspirée de z^*. Quand nous disons inspiré nous entendons que quelque soit $g_i(z_{am})$, $f_i(y) \leq f_i(z_{am}) \leq f_i(z^*)$, avec $\{g_1(z_{am}), \ ..., \ g_i(z_{am}), \ ..., \ g_n(z_{am})\}$ réaliste.

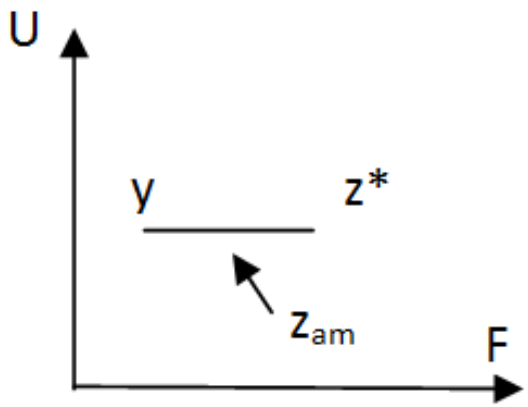

FIGURE 3.10 – Maximiser F sachant U

Le programme linéaire permettant de déterminer $z* = \{g_1(z), \ ..., \ g_i(z), \ ..., \ g_n(z)\}$ peut alors s'écrire de la façon suivante :

$Max \quad F(g_1(z), \ ..., \ g_n(z))$,

avec :

$U(g_1(z), \ ..., \ g_n(z)) \geq U(g_1(y), \ ..., \ g_n(y))$

$(g_1(z), \ ..., \ g_n(z)) \in A$.

Exemple

L'idée est de vérifier si une modification de a_{08} permet de ne pas dégrader l'utilité de a_{08} tout en augmentant la faisabilité de a_{08}.

$$\begin{cases} Max \quad F(z) \\ U(z) \geq U(a_{08}) \end{cases} \tag{3.8}$$

Résoudre (3.8) produit l'action $z*$ suivante :

$$\begin{cases} z^* : & g_1(z^*) = 67365 & g_2(z^*) = 5 & g_3(z^*) = 0 \\ & U(z^*) = U(a_{08}) = & 0.68 & \\ & F(z^*) = 0.65 > & F(a_{08}) = 0.43 & \end{cases}$$

Dans ce cas de figure l'action z^* n'est pas « crédible » si on suppose qu'il s'agit d'une modification de l'action a_{08}, de plus il s'agit d'une action qui n'est pas respectueuse des trois piliers du DD puisqu'un seul critère n'est pas à la valeur minimum.

Recherche d'un compromis en utilité globale et faisabilité globale

Les deux pistes précédentes consistaient à modifier l'action en jouant exclusivement sur l'utilité ou la faisabilité. Si le décideur souhaite s'appuyer sur ces deux informations il nous semble intéressant de rechercher un compromis entre ces deux optimums. En poursuivant sur cette voie, il est possible de calculer des « fronts » d'utilité (faisabilité) qui donnent les meilleurs compromis, ces actions virtuelles w^* ne sont pas dominées au sens de Pareto. En poursuivant l'idée précédente, une action de compromis w_{am} est caractérisé par un couple $(F(w_{am}), U(w_{am}))$ qui n'est pas dominée par l'action initiale y et qui ne domine pas les actions w^* du front de Pareto. La figure 3.11 montre le domaine d'existence d'une telle action w_{am}.

Les utilités et faisabilités d'une telle action w_{am} issues des valeurs $g_i(w_{am})$ devront être réalistes à l'instar de x_{am} et z_{am}.

3.3.4 Bilan sur la faisabilité

La faisabilité d'actions, telle que développée ici, enrichit l'aide à la décision en apportant un deuxième point de vue sur lequel le décideur peut juger. Il est fréquent en MCDA, avec les valeurs d'utilité, que la préférence de a par rapport à b soit justifiée par une différence guère significative au regard des imprécisions ou autres incertitudes qui affectent le modèle de préférence. En complétant l'information sur l'utilité d'une action par une information sur la faisabilité d'une action, le décideur peut confirmer son choix de a ou quand même préférer b pour sa facilité de mise en œuvre.

De plus, lorsque « n'importe quelle » configuration d'action (au sens des valeurs $g_i(a)$ admises dans le problème de décision) est admissible dans le problème, la faisabilité en plus de l'utilité permet de concevoir des actions, en cherchant à jouer sur l'utilité sous contrainte de faisabilité ou sur la faisabilité sous contrainte d'utilité.

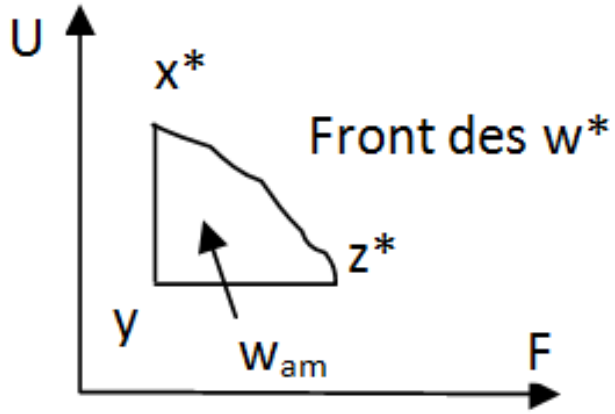

FIGURE 3.11 – Illustration du domaine d'existence de w_{am}

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé une proposition en trois points sur l'*Aide à la décision pour les entreprises inscrites dans une démarche de développement durable*.

Pour aider les entreprises dans leur démarche d'amélioration continue, à travers le cycle PDCA, à décider d'une action d'amélioration, nous proposons d'utiliser une méthode MCDA, à travers la méthode ACUTA, dans une approche constructive du problème de décision. Au delà du modèle de préférence, produit par la méthode MCDA, l'exercice de construction du problème de décision dans son ensemble offre un support rigoureux sur lequel le décideur peut « fixer » les raisons, motivations, perspectives, etc. de sa décision.

En pratique, les données disponibles, concernant le DD, sont fréquemment imprécises et mal-connues. De plus les données relatives au DD disponibles pour l'entreprise sont relativement récentes et il n'existe pas encore de socle de référence à valeur historique. Nous proposons une approche méthodologique qui permet de quantifier l'imprécision admissible pour satisfaire des conditions de robustesse que le décideur juge acceptables en prenant en compte des intervalles de valeur pour un critère de décision.

En termes de décision en entreprise, une difficulté consiste à planifier (niveau stratégique) une action (ou un paquet d'actions) à réaliser (niveau opérationnel). Le DD est aussi concerné par cette difficulté, les objectifs propres au DD (au sens de sa définition) étant compliqués à décliner en termes d'actions « durables » réalisables. Pour aider le décideur à intégrer la mise en pratique d'une action nous proposons de compléter l'information sur la comparaison de l'utilité d'actions par une comparaison de leur faisabilité relative. L'idée est de profiter du cadre structurant de la MCDA pour établir ces comparaisons de faisabilité.

Ces propositions ont été établies en cherchant à garder un point de vue le plus large possible en termes de pilotage industriel dans un contexte de DD. Cependant, par expérience,

il faut bien comprendre que pour que s'opère l'aide à la décision en pratique industrielle, il est nécessaire de tenir compte des spécificités de l'entreprise, de ses objectifs, du décideur, de l'analyste, etc. Ainsi pour terminer la présentation de nos travaux, le chapitre suivant est consacré au déploiement de nos propositions sur un cas d'étude.

CHAPITRE 4

Application industrielle

Sommaire

4.1 Présentation de l'entreprise *adixen Vacuum Products* (aVP) 104
4.1.1 Généralités 104
4.1.2 Organisation de l'activité 107
4.1.3 La démarche d'amélioration de la performance pratiquée chez aVP 107
4.2 Prérequis pour construire un système de management de l'énergie compatible avec les principes de l'ISO 50001 111
4.2.1 Instrumentation 112
4.2.2 Tableau de bord 113
4.3 État des lieux sur la maîtrise des besoins énergétiques chez aVP 115
4.3.1 Les énergies consommées par aVP 115
4.3.2 Instrumentation chez aVP 116
4.3.3 Tableau de bord chez aVP 118
4.4 Application du processus de décision MCDA 121
4.4.1 Aide à la décision pour l'instrumentation 121
4.4.2 Identification du problème de décision 121
4.4.3 Structuration du problème de décision 122
4.4.4 Construction du modèle 129
4.4.5 Utiliser le modèle pour informer et remettre en question 131
4.4.6 Utilisation du modèle pour le problème de décision sur le Poste H5 134
4.5 Compléments d'information du modèle 137
4.5.1 Prise en compte de l'imprécision 137
4.5.2 Prise en compte de la faisabilité 139
4.6 Conclusion 142

Le sujet de ce chapitre est le cas d'étude mené en partenariat avec l'entreprise adixen Vacuum Products (aVP) sur un problème de choix d'équipements à doter de compteurs électriques. Cette phase d'instrumentation s'inscrit dans la démarche cyclique d'amélioration continue de la performance énergétique de l'entreprise. La planification d'instrumentation adaptée aux besoins de l'entreprise est un problème de décision complexe auquel nous avons apporté une contribution par le support d'un processus méthodologique MCDA ([Rizzon 2015b], [Rizzon 2015a], [Rizzon 2016]). L'idée est de pouvoir bénéficier de l'information qui résulte de l'application de ce processus méthodologique pour les

cycles d'amélioration suivants.

Ce chapitre débute par une présentation de l'entreprise partenaire. Il s'agit de présenter le développement et la complexité de l'activité de l'entreprise, de son organisation ainsi que les démarches et la philosophie associées à l'amélioration continue dans cette entreprise, qui s'est fixé comme objectif la mise en place d'un système de management de l'énergie selon les principes de l'ISO 50001 sur un horizon de trois ans.

Pour pouvoir définir cet objectif, les principes de l'ISO 50001 sont ensuite étudiés afin d'en extraire un cadre nécessaire à la structuration d'un système de management de l'énergie. Ce cadre s'articule autour de deux axes : l'instrumentation pour collecter les données nécessaires et la réalisation d'un tableau de bord pour appréhender l'information issue de ces données.

Ensuite, nous décrivons l'état des lieux de l'entreprise dans sa démarche d'amélioration de la performance énergétique du point de vue des principes de l'ISO 50001. L'usage (le type) d'énergie prépondérant chez aVP est l'électricité, sur laquelle nous nous sommes concentrés dans ce cas d'étude. Cet état des lieux révèle un besoin en données relatives au comptage en temps réel de la consommation électrique de différents équipements de l'entreprise.

Pour répondre à ce besoin, une stratégie d'instrumentation est nécessaire. L'entreprise s'inscrit dans une démarche d'instrumentation pas à pas où chaque pas concerne l'instrumentation d'un poste électrique majeur de l'entreprise en commençant par le plus consommateur. Afin d'améliorer le déploiement d'instruments pour chaque pas consécutif, dans l'idée du cycle PDCA, nous déployons un processus MCDA fondé sur l'outil ACUTA afin de produire un modèle des préférences du décideur et analysons l'information qui ressort de la démarche.

Enfin, nous développons l'utilisation du modèle pour aider à la décision sur l'instrumentation du deuxième poste électrique le plus consommateur afin d'évaluer le modèle. En outre, nous soumettons le modèle à une analyse de robustesse vis-à-vis de l'imprécision sur un des critères du problème de décision et nous appliquons les idées développées sur la faisabilité dans le but d'enrichir l'information de décision.

4.1 Présentation de l'entreprise *adixen Vacuum Products* (aVP)

4.1.1 Généralités

En 1952, la SACM (Société Alsacienne de Constructions Mécaniques) basée à Graffenstaden en Bas-Rhin, usine dépendant de la Défense Nationale, choisit Annecy en Haute-Savoie pour y implanter une unité de fabrication, le tunnel ferroviaire sous la montagne du Semnoz lui donne en effet la possibilité de mettre à l'abri l'unité de production en cas de conflit. De plus , la réputation du savoir-faire local en mécanique de précision milite en

faveur d'une implantation en Haute-Savoie.

En 1961, l'usine d'Annecy, qui emploie alors environ 400 personnes, choisit d'utiliser le potentiel technologique de l'établissement (mécanique de précision et électronique de qualité) pour développer des pompes à vide pour l'industrie.

Deux ans plus tard, la SACM devient l'ALsacienne de Construction Atomique et de TELécommunications (ALCATEL). Cette même année, la société introduit la première pompe primaire à palette à joint d'huile.

Alcatel Annecy invente la première pompe à palette à entraînement direct tournant à 1500 tours/min. Par ailleurs, elle développe son premier détecteur de fuite à hélium et le commercialise en 1966.

Le projet de développement de pompes turbo-moléculaires sur paliers à gaz, aboutit à la production des premières pompes en 1971. Alcatel introduit sa première pompe turbo-moléculaire de 450 l/s sur roulements à billes en 1978 et produit sa 100000ème pompe à palettes en 1983.

L'année 1992 est marquée par le lancement de la première pompe sèche *Alcatel Dry pump* (ADP 80). Dans le même temps, Alcatel renforce sa position dans ce marché par l'introduction de son premier détecteur sec et de sa première pompe turbo-moléculaire à paliers magnétiques pour les applications de gravure.

Elle renforce son dispositif industriel et de recherche et met en place un service applications, afin de développer les technologies du vide et répondre aux besoins croissants du Semi-conducteur.

L'introduction de la gamme de petites pompes sèches (ACP) et les succès des ventes de pompes turbo-moléculaires à paliers magnétiques sur de nouveaux marchés comme le dépôt sur verre architectural vont renforcer la position de la société dans les marchés hors Semi-conducteur. Elle s'affirme notamment dans les applications industrielles (instrumentation analytique, recherche appliquée, spatial, aéronautique, automobile, etc.).

En 2008, Alcatel Vacuum développe une gamme de pompes sèches à grande capacité (série ADK) dédiée au marché des écrans plats et du photovoltaïque, qui permettra les premiers succès commerciaux en 2010 auprès des acteurs majeurs de ce marché.

Fin 2010, Pfeiffer Vacuum, inventeur Allemand de la pompe turbo-moléculaire, acquiert Alcatel Vacuum Technology ainsi que ses filiales. L'entreprise d'Annecy deviendra adixen Vacuum Products (aVP).

La complémentarité des portefeuilles de produits situe le Groupe Pfeiffer Vacuum AG en position de leader sur le marché international du vide, avec la plus large gamme de solutions de pompage, de systèmes de détection de fuite et de chambres à vide.

A propos de Pfeiffer Vacuum :

Pfeiffer Vacuum (bourse PFV, ISIN DE0006916604) est un fournisseur leader mondial de solutions de techniques de vide. Outre une large gamme de pompes turbo-moléculaires hybrides et à paliers magnétiques, son portefeuille produits comporte des pompes à vide primaire, des appareils de mesure et d'analyse, différents composants ainsi que des chambres

et des systèmes à vide.

Depuis l'invention de la pompe turbo-moléculaire par Pfeiffer Vacuum, la société a développé des solutions produits innovantes de haute technologie utilisées dans les domaines suivants : analytique, Recherche & Développement, dépôt sous vide, semi-conducteur et autres secteurs industriels.

Fondée en 1890, la société Pfeiffer Vacuum intervient aujourd'hui à l'échelle internationale. L'entreprise emploie environ 2300 employés et dispose de plus de 20 filiales.

En termes de volume, les activités économiques d'aVP peuvent être définies de la manière suivante :

- activités principales : Toutes activités de technologie du vide ;
- activités secondaires : Instrumentation, détection de fuite et équipements de mesure et de contrôle pour réduire la contamination moléculaire.

Le tableau 4.1 apporte des précisions sur l'identité d'aVP.

Marché	Localisation : internationale
	Concurrence : quelques acteurs principaux sur un marché restreint
	Mode de réponse : production standard ou personnalisée, répétitif
	Mode de vente : assemblage à la commande
Type de conception	Elaboration du cahier des charges : marketing, R&D, industrialisation
Type de production	Processus : usinage, assemblage, lavage, ébavurage à la soude, test
	Type de flux : produit
	Temps d'ouverture : 2x8, 3x8 SD
	Organisation : par produit
	Délai de réalisation : de 2/3 jours à 4 semaines
	Degré d'automatisation : cellule flexible d'usinage, cellule robotisée lobe
Type de distribution	Plateforme logistique : externe au site de production (localisée à Chautmontet)
Produits	Complexité : environ 150 pièces, plusieurs technologies
	Variété : tous les produits sont configurables
	- Des gammes de pompes à paliers magnétiques
	- Des pompes sèches
	- Des pompes de grand volume
	- Des pompes primaires
	- Des détecteurs de fuites à hélium
	- Des solutions de gestion de la contamination moléculaire (métrologie et procédés)
	Fréquence du changement : 3 à 7 ans
Nature de la valeur ajoutée	Savoir faire d'étude : domaine du vide, mécanique, spectrographie
	Savoir faire technique : mécanique des fluides, rotation haute vitesse
	Service : SAV
Certification	ISO 9001 (1993)
	ISO 14001 (2003)

Tableau 4.1 – Fiche d'identité de adixen Vacuum Products

4.1.2 Organisation de l'activité

L'organisation de l'entreprise, illustrée par l'annexe B, s'est construite au fil de son histoire, de manière à pouvoir superviser l'ensemble de l'activité, concentrée sur le développement et la réalisation de pompes, qui requiert une infrastructure adaptée. C'est-à-dire que pour suivre le développement de l'infrastructure, la superstructure de l'entreprise s'est développée en réponse afin de pouvoir piloter l'ensemble des processus de aVP.

Il est attendu du management de chaque processus un pilotage global. Par exemple le responsable de la ligne d'assemblage doit pouvoir rendre compte de la maîtrise du processus « en soit » (qualité, efficacité, etc.), de son impact sur l'environnement, de la gestion des déchets, etc.

L'entreprise se transformant dans le temps, il faut pouvoir maintenir un pilotage satisfaisant malgré l'ajout ou la transformation de bâtiments, de lignes de production, de locaux dédiés à la R&D, etc.

Le site d'aVP regroupe plusieurs secteurs d'activité complémentaires qui contribuent au fonctionnement de l'entreprise et sont inclus dans le périmètre général de la stratégie d'amélioration continue de l'entreprise. Pour être opérationnelle, la stratégie globale doit pouvoir être appréhendée par chaque responsable de processus.

4.1.3 La démarche d'amélioration de la performance pratiquée chez aVP

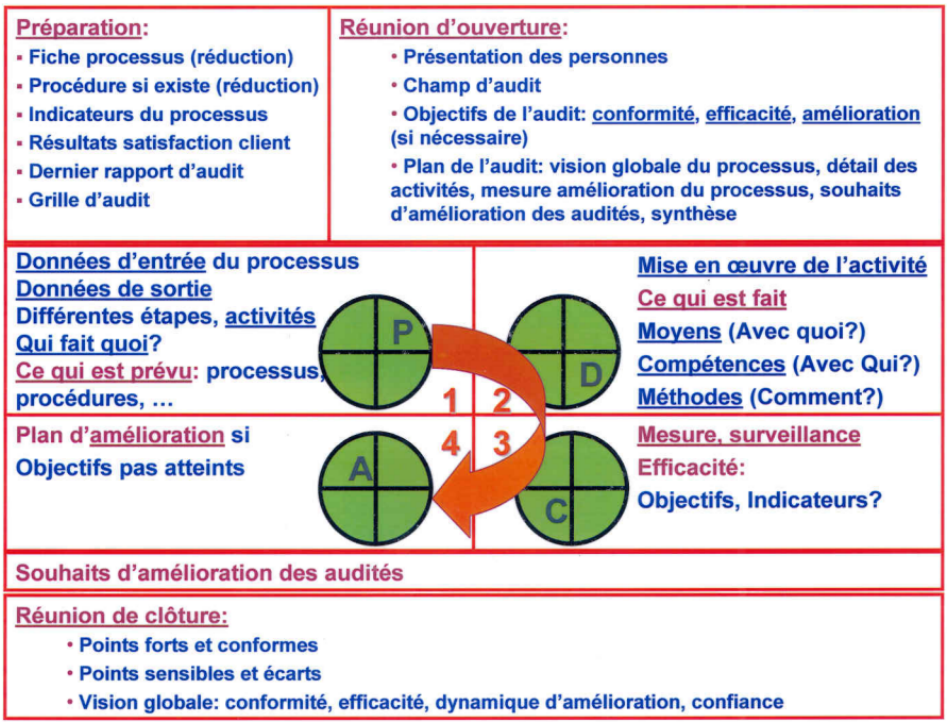

FIGURE 4.1 – Appropriation du cycle PDCA par aVP [source documentaire aVP]

Le management de l'amélioration continue chez aVP, contrôlé par le bureau *Adixellence*, s'inscrit explicitement, à travers sa communication, dans un cycle PDCA (voir figure 4.1). On y retrouve les principes fondamentaux de la démarche d'amélioration continue de la performance décrits en 1.2 à savoir :

- l'expression d'un objectif à atteindre ;
- la transformation du système *Champ d'audit* par l'action ;
- la définition recourt à des données d'entrée et de sortie du système à contrôler ;
- la comparaison entre un résultat et un attendu fondé sur ces données et sur l'expertise humaine (*Réunion d'ouverture* et *Réunion de clôture*) ;
- la proposition d'un *plan d'amélioration* (par l'action) pour « corriger le tir » ;
- l'itération de ces étapes pour former des cycles.

Dans sa démarche, aVP suit un « cap » déterminé par son étoile polaire, qui place le client (externe ou interne) au centre de l'étoile et les critères associés à la satisfaction du client dans les différentes branches de l'étoile (voir figure 4.2).

FIGURE 4.2 – L'étoile polaire qui fixe la direction de l'amélioration continue chez aVP [source documentaire aVP]

Dans le but de se doter d'un support rigoureux et approuvé par un grand nombre d'entreprises, aVP a mis en œuvre les démarches nécessaires à la certification ISO 9001. Celle-ci, obtenue en 1993 concerne la performance de l'entreprise sur la qualité de sa production (essentielle à la valeur ajoutée par l'activité de l'entreprise) et les moyens mis en œuvre afin de piloter cette performance.

De plus, la contrainte forte découlant de la prise en compte des enjeux environnementaux de l'activité humaine et notamment industrielle impacte la production, qui se trouve placée face à des responsabilités nouvelles et toujours croissantes envers le personnel d'aVP et les parties prenantes dans l'activité de l'entreprise. L'entreprise doit pouvoir justifier de sa performance environnemental (déchets, émissions de particules, énergie) et des moyens mis en œuvre afin de piloter cette performance. Ainsi, aVP a mis en œuvre les démarches nécessaires à la certification ISO 14001, obtenue en 2003.

Poursuivant dans cet esprit de responsabilités environnementales, aVP identifie aujourd'hui le problème de la performance énergétique comme un enjeu propre conformément à la directive 2012/27/UE du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique.

Soulignons quelques aspects importants de cette directive. Une loi du 16 juillet 2013 oblige les grandes entreprises à réaliser, tous les 4 ans, un audit énergétique de leurs activités.

L'audit énergétique, réalisé par un auditeur interne ou externe, consiste en une analyse méthodique des flux et des consommations énergétiques d'un site, d'un bâtiment ou d'un organisme.

Il a pour objectif de permettre aux entreprises d'identifier les domaines ou secteurs dans lesquels des économies d'énergie sont possibles et de proposer des solutions d'amélioration.

La norme européenne NF EN 16247-1[1], qui peut servir de base à un cahier des charges, décrit le contenu d'une prestation d'audit énergétique, en détaille la méthodologie et en précise chaque étape : définition de l'objectif et du périmètre, profil de l'auditeur énergétique (compétences, objectivité, etc.), modalités de la visite sur site, recueil des données, rapport, présentation des résultats, etc. »

Les entreprises qui emploient plus de 250 salariés tout comme celles qui réalisent un chiffre d'affaires hors taxe annuel de plus de 50 millions d'euros ou un total de bilan de plus de 43 millions d'euros sont concernées par cette directive nationale, à l'échéance de fin 2015. C'est le cas de aVP.

Néanmoins, les entreprises certifiées ISO 50001 (système de management de l'énergie certifié) sont exemptées de cette obligation. En effet, la certification ISO 50001 couvre le périmètre des audits énergétiques. Au delà de l'aspect législatif, en raison des coûts relatifs à sa consommation énergétique et l'inclusion de ce volet dans son système de management environnemental, aVP est intéressée par le pilotage de sa performance énergétique.

Le but de aVP est de se doter d'un système de management de l'énergie en accord avec les principes de l'ISO 50001 pour faciliter la réalisation de l'audit énergétique à venir, disposer des premiers jalons vers un éventuel objectif stratégique de certification ISO 50001, dégager des gisements d'économie et poursuivre sa démarche d'amélioration de la performance dans le contexte du DD.

[1] que la norme ISO 50001 [ISO d] remplace

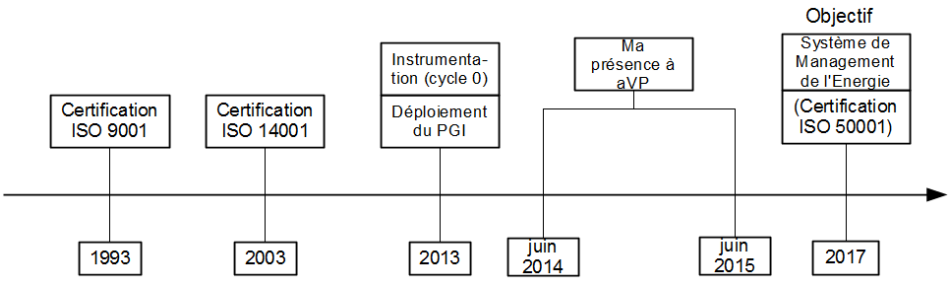

FIGURE 4.3 – Chronologie des travaux en partenariat avec aVP et leur mise en situation

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre collaboration avec aVP qui a conduit à l'étude de cas présentée dans ce chapitre de thèse. La figure 4.3 synthétise la chronologie des travaux sur les systèmes de management chez aVP et situe mon intégration dans le projet de développement du système de management énergétique d'aVP. Ma participation à ce projet m'a donné l'opportunité d'expérimenter ma proposition d'aide à la décision dans le cadre d'une démarche industrielle de DD en bénéficiant de la longue expérience d'aVP sur les pratiques de l'amélioration continue.

Dans l'objectif de proposer un plan d'action à l'horizon 2017 pour la réalisation d'un système de management de l'énergie, une équipe de travail s'est constituée autour de ce projet.

- Pascal OCHALEK (aVP) : Responsable Procédés Industriels, Services Généraux et HSE[2], [décideur au sens du processus MCDA] ;
- Elodie RATAJCZAK (aVP) : Responsable Adjointe du service HSE ;
- Alexandre GOURDOU (aVP) : Responsable Industrialisation des Procédés ;
- Didier ROUPIOZ (aVP) : Responsable service Entretien ;
- Benjamin MAURICE (aVP) : Alternant service HSE ;
- Mickael BOURBI (aVP) : Alternant service Entretien ;
- Bastien RIZZON (ADEME, APS) : Doctorant en Génie Industriel, [analyste au sens du processus MCDA].

L'équipe se réunit toutes les semaines de juin 2014 à juin 2015, les réunions et le projet sont animés par moi-même.
Avant de présenter le cas d'étude de ce travail de thèse, il convient de présenter les prérequis pour construire un système de management de l'énergie compatible avec les principes de l'ISO 50001.

[2]Hygiène Sécurité et Environnement

4.2 Prérequis pour construire un système de management de l'énergie compatible avec les principes de l'ISO 50001

L'ISO 50001 [ISO d], *Systèmes de management de l'énergie*, publiée en 2011 « a pour objectif de permettre à tout organisme de parvenir, par une gestion méthodique, à l'amélioration continue de sa performance énergétique, laquelle inclut l'efficacité, l'usage et la consommation énergétiques. Il permet également à l'organisme de s'assurer qu'il se conforme à la politique énergétique qu'il s'est fixée et en apporter la preuve. »

Cette approche est similaire à l'approche de l'amélioration continue, vue en 1.2.4, illustrée dans la norme ISO 50001 par la figure 4.4.

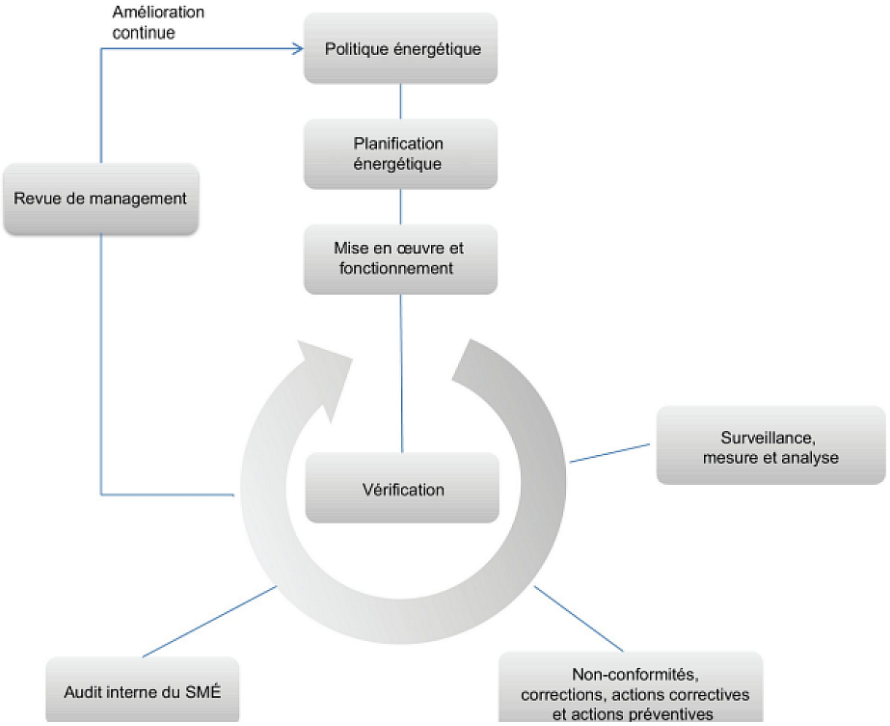

FIGURE 4.4 – Le processus de la planification énergétique selon l'ISO 50001

En effet, l'approche de l'ISO 50001 est explicitement fondée sur le cycle PDCA. Nous y retrouvons les étapes *Plan, Do, Check, Act* et notamment, à travers l'enchaînement de celles-ci, le souci de vérifier la cohérence entre ce qui est accompli au niveau opérationnel et l'objectif au niveau stratégique à travers une démarche explicitement pas à pas et cyclique. Néanmoins, tout comme pour le cycle PDCA, il faut disposer d'une information adéquate pour « faire tourner la roue » et donc réaliser la collecte, le traitement et l'analyse des données nécessaires à l'étape de vérification.

Ainsi, [le document de la norme ISO 50001] spécifie les exigences applicables aux usages et à la consommation énergétiques, y compris le mesurage, la documentation et le

reporting, la conception et les achats d'équipements et de systèmes, les processus et le personnel qui contribuent à la performance énergétique.

Nous traiterons les besoins auxquels répondent ces prérequis, d'une part « le mesurage, la documentation et l'achat d'équipements » dans la partie 4.2.1, et d'autre part « le *reporting*, la conception, l'achat de systèmes, le processus et le personnel » dans la partie 4.2.2.

4.2.1 Instrumentation

Ce qui est entendu ici par « instrumentation » est la planification des moyens de comptage de l'énergie (achat, installation, mise en service) dans un objectif de réalisation d'un système de management de l'énergie. Ces moyens peuvent varier d'une entreprise à l'autre en fonction de leurs ressources et de leurs besoins et constituent, selon notre compréhension, les prérequis mentionnés précédemment comme « le mesurage, la documentation et l'achat d'équipements ».

L'instrumentation est essentielle au processus de la planification énergétique selon l'ISO 50001 afin de pouvoir répondre aux exigences (voir figure 4.4) de surveillance, de mesures, de détection des non conformités, etc. Plus précisément, le paragraphe 4.6.1 de l'ISO 50001, intitulé *Surveillance, mesure et analyse*, stipule que l'entreprise « doit s'assurer que les caractéristiques essentielles de son fonctionnement qui déterminent la performance énergétique sont surveillées, mesurées et analysées à intervalles planifiés. Ces caractéristiques essentielles doivent inclure au moins :

- les usages énergétiques significatifs et autres données de sortie de la revue énergétique ;
- les facteurs pertinents associés à des usages énergétiques significatifs ;
- les indicateurs de performance énergétique ;
- l'efficacité des plans d'actions dans l'atteinte des objectifs et cibles ;
- l'évaluation de la consommation énergétique réelle par rapport à la consommation attendue.

Les résultats de la surveillance et de la mesure des caractéristiques essentielles doivent être enregistrés.

Ces principes sont tels que l'instrumentation doit permettre de collecter de l'information non seulement suffisamment « large » pour couvrir l'ensemble de la performance énergétique de l'entreprise, mais aussi de « qualité » pour extraire de l'information pratique sur la performance énergétique.

Ainsi, il est judicieux de considérer une instrumentation fondée sur des prises de mesure en temps réel (au sens de l'acquisition la plus fine possible selon l'axe temporel) afin

- de disposer d'une quantité suffisante de données pour les analyser statistiquement, c'est-à-dire, pouvoir réaliser des profils de l'usage de l'énergie à valeur d'historiques ;
- de pouvoir analyser ces données sur des intervalles temporels différents, c'est-à-dire, pouvoir identifier différents phénomènes qui se manifestent sur des périodes temporelles différentes.

Cette étape clé de la réalisation d'un système de management de l'énergie, qui est l'instrumentation nécessaire à la collecte d'information, nous conduit naturellement à l'étape suivante de traitement de l'information collectée afin d'appréhender la performance énergétique de l'entreprise. Dans l'esprit des normes ISO 9001 et 50001 il s'agit de réaliser un tableau de bord.

4.2.2 Tableau de bord

La finalité d'un système de management de l'énergie, au sens de [ISO d], est de servir de support à l'amélioration continue de la performance énergétique de l'entreprise. Nous avons vu dans le chapitre 1 que les entreprises pilotent l'amélioration continue de leur performance (énergétique ou autre) par des transformations qu'elles cherchent à contrôler. Pour se transformer, les entreprises mettent en œuvre des actions. Ainsi, un système de management de l'énergie peut être vu comme un *facilitateur* dans la compréhension des écarts entre l'objectif d'amélioration de la performance (défini au niveau stratégique de l'entreprise) et l'action d'amélioration ou de correction de la performance (définie au niveau opérationnel de l'entreprise).

Dans la partie 1.2.3 nous avons vu qu'un tableau de bord rassemble les indicateurs de performance nécessaires pour mettre en évidence les actions qui s'imposent pour atteindre les objectifs et améliorer les processus. Un tableau de bord constitue donc un délivrable satisfaisant dans la réalisation d'un système de management énergétique dans l'idée de l'ISO 50001, construit avec les mêmes bases que l'ISO 9001. Pour ce faire il faut choisir, définir, créer, etc. des indicateurs de performance pour constituer ce tableau de bord.

Un indicateur de performance énergétique s'appuie sur des mesures (problème d'instrumentation du 4.2.1) et inclut de l'information sur l'objectif, les contraintes, la satisfaction, etc. associés à une forme de la performance énergétique illustrée par l'indicateur en question. Il s'agit ici de s'atteler à la tâche des prérequis concernant « le *reporting*, la conception, l'achat de systèmes, le processus et le personnel.

Les mesures fournissent de l'information sous forme de données, il faut maintenant transformer ces données en information utile aux échanges et à l'expression de la satisfaction associée à la performance énergétique.

Pour ce faire, l'ISO 50001 fait un inventaire des informations qui doivent apparaitre à travers un indicateur de performance énergétique (voir figure 4.5). Il s'agit de :

- l'*usage énergétique*, c'est-à-dire, le mode ou le type d'énergie concerné (exemples : éclairage, chauffage, ventilation, etc.) ;

- la *consommation énergétique*, c'est-à-dire, la quantité d'énergie utilisée (exemples : 1 kW.h = $3,6.10^6$ J = $2,25.10^25$ eV = $8,6.10^{-5}$ tep) ;
- l'*efficacité énergétique*, c'est-à-dire, un ratio, ou une autre relation quantitative, entre une performance, un service, un bien ou une énergie produit et un apport en énergie (exemple : l'efficacité de conversion, le rapport « énergie nécessaire/énergie utilisée », le rapport « sortie/entrée », le rapport « énergie théoriquement utilisée pour fonctionner/énergie effectivement utilisée pour fonctionner ») ;
- l'*intensité énergétique*, c'est-à-dire, le rapport entre la consommation énergétique et le PIB (exemple : 0,01 tep/€) ;
- et *autres* (exemples : information datée sur la mise en route d'une machine outil, cible figurant l'objectif fixé, vacances, etc.).

FIGURE 4.5 – Représentation conceptuelle de la performance énergétique selon l'ISO 50001

Nous comprenons, dans le contexte du génie industriel, ces informations respectivement comme des éléments pour :

- faire le lien entre l'énergie et les besoins de l'entreprise qui y sont associés ;
- fonder le management de l'énergie sur des données quantifiées ;
- quantifier la part utile à l'activité de l'énergie consommée ;
- quantifier la valeur ajoutée de l'activité en fonction de l'énergie investie ;

- apporter toute information utile (au cas par cas) à la compréhension de la performance énergétique.

En pratique, définir l'usage énergétique se fonde sur l'expertise des techniciens de l'entreprise. Définir la consommation énergétique se fonde sur la phase d'instrumentation (voir 4.2.1). Définir l'efficacité énergétique se fonde potentiellement sur les données techniques disponibles, l'instrumentation, le *benchmark*, etc. Définir l'intensité énergétique se fonde sur l'efficacité énergétique, la consommation énergétique et l'usage énergétique (l'usage jouant indirectement, voire directement lorsque l'usage peut être monétisé, le rôle du PIB par rapport à la définition donnée plus haut). Les autres informations sont laissées au cas par cas.

Cette phase de réalisation d'indicateurs de performance afin de construire un tableau de bord de la performance énergétique s'articule autour du traitement de l'information issue des mesures définies lors de la phase d'instrumentation. Pour pouvoir mettre en œuvre l'ensemble de cette démarche, l'instrumentation proposant des mesures en temps réel nous semble appropriée (le coût de stockage est relativement faible voire négligeable par rapport aux autre coûts associées à une démarche d'amélioration continue de la performance en règle générale).

Mais nous venons de voir qu'il est nécessaire d'opérer un traitement de l'information pour aller au-delà de la simple mesure, rendant compte uniquement de la consommation, et pouvoir appréhender la performance énergétique associée à cette mesure. Pour gérer ces données en temps réel, il semble pertinent d'associer à l'instrumentation un outil support au traitement de ces données (voir [Vikhorev 2013]), de type progiciel de gestion de l'information.

Selon nous la planification de l'instrumentation et la construction du tableau de bord sont des tâches interdépendantes qui doivent être réalisées conjointement. La norme ISO 50001 est rédigée dans cet esprit.

Nous adoptons dans cette section une méthodologie qui considère d'une part les attendus de la *collecte de l'information* et d'autre part les attendus du *traitement de l'information* qui sont au cœur des problématiques relatives aux systèmes de management.

Après s'être approprié les principes de la norme ISO 50001, nous avons réalisé un état des lieux d'aVP à la lumière de ces principes. Cet état des lieux a constitué la première phase de mon intervention chez aVP. Elle est développée dans la suite de ce chapitre.

4.3 État des lieux sur la maîtrise des besoins énergétiques chez aVP

4.3.1 Les énergies consommées par aVP

L'entreprise aVP est consommatrice de deux types d'énergie : l'électricité et la chaleur. Nous parlerons de consommation pour qualifier les besoins ou appels en *énergie* (kW.h)

d'un équipement, poste, atelier, etc. Après un entretien avec les personnes travaillant sur la maintenance et le développement des réseaux relatifs à ces deux types d'énergie, nous avons recueilli les informations suivantes :

- la chaleur consommée par aVP sert quasi-uniquement au chauffage des locaux pour le confort des personnes au sein de l'entreprise (la seule exception consiste dans l'alimentation d'un four industriel dont le contrôle de température n'est pas associé à la qualité du process),

- l'électricité ne sert pas à chauffer des locaux.

Ainsi, ces types d'énergies sont indépendants dans leur usage. L'entreprise aVP peut donc distinguer dans son système de management énergétique (à inclure *in fine* dans un système de management global de son activité) l'électricité et la chaleur sans risquer des redondances dans le traitement de l'information. Pour pouvoir proposer des plans d'action acceptés au niveau stratégique, il a été décidé de travailler dans une première phase sur un unique type et usage d'énergie. Ainsi, il a fallu établir une priorité entre les deux types d'énergie pour choisir lequel intégrer dans le système de pilotage.

En étudiant les factures mensuelles sur les années 2013 et 2014, il apparait que l'électricité représente près de 90% des coûts de la facture énergétique globale d'aVP. Ainsi, les perspectives de gain sont donc bien plus importantes sur l'électricité que sur la chaleur.

En outre, aVP a mis en œuvre une restructuration de sa fourniture en chaleur déployée au deuxième semestre 2014 :

- avant, la chaleur était fournie sous forme de gaz que l'entreprise brûlait dans ses propres chaudières ;

- depuis, la chaleur est directement fournie sous forme d'eau chaude produite par les chaudières biomasse de son fournisseur.

Cette restructuration étant récente au regard de l'historique de l'entreprise, les informations à traiter avec un système de management sont encore relativement pauvres et difficiles à interpréter.

C'est pourquoi, dans les premiers cycles d'amélioration, l'équipe a choisi de se focaliser sur la maîtrise de ses besoins en électricité.

4.3.2 Instrumentation chez aVP

L'état des lieux des instruments de comptage relatifs aux consommations en électricité est représenté sous forme de schéma dans la figure 4.6.

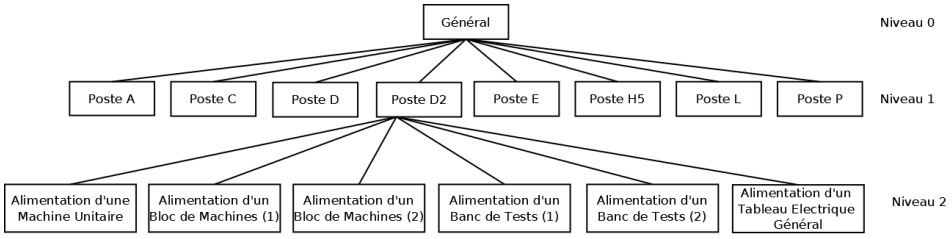

FIGURE 4.6 – Points équipés de compteurs temps réel

Le réseau électrique chez aVP est tel qu'à partir du poste électrique Général, huit Postes électriques (répartis géographiquement sur le site de aVP) sont alimentés. Chacun de ces points du réseau électrique est équipé d'un compteur qui enregistre les consommations électriques en temps réel. En principe et en vérifiant les données relevées par les instruments de comptage la somme des consommations électriques sur ces 8 postes est égale à la consommation générale.

Derrière le Poste D2, six alimentations d'équipements (unitaires ou non) sont équipées des mêmes compteurs que le Poste D2. Lors du plan d'action établi et réalisé en 2012 par aVP, le décideur avait jugé important de surveiller ces points et donc de les équiper de compteurs. En effet, ces six alimentations concernent les équipements de consommation électrique, affiliés au poste D2, jugés clairement identifiables, énergivores et sur lesquels une action de correction peut être planifiée.

Cette phase d'instrumentation antérieure à nos travaux et les données ainsi obtenues sont importantes pour la suite. Elle nous permet d'étudier le cas, générique, des entreprises qui disposent de données horodatées sur leurs consommations au niveau général (niveau 0 de l'instrumentation existante). Elle nous permet également d'étudier le gain d'information obtenu au niveau suivant avec une décomposition exhaustive et non redondante des consommations sur différents secteurs géographiques du site d'une entreprise (niveau 1). Enfin, elle nous permet d'étudier le gain d'information obtenu au niveau le plus bas (niveau 2, équipement consommateur final) du réseau électrique.

En pratique un compteur électrique mesure une tension (V), une intensité (A) par phase, calcule une puissance électrique (W) et en déduit la consommation électrique (W.h) par intégration temporelle. Ainsi une consommation d'énergie (W.h) et une puissance (W) électrique sont duales, par intégration (puissance vers énergie) ou dérivation (énergie vers puissance) par rapport au temps (en secondes).

Les problématiques relatives à l'énergie électrique s'articulent autour de l'énergie mais aussi de la puissance. Par exemple, deux entreprises peuvent consommer la même quantité d'énergie sur une journée mais peuvent représenter des charges (en fonction de leur puissance appelée) différentes pour le réseau électrique. Cette distinction est la clé derrière le découpage temporel en tranches *Heures Pleines* ou *Heures Creuses*, *Heures d'Ete* ou *Heures d'Hiver*, tel que pour une même consommation d'énergie, le tarif du kW.h varie selon la tranche horaire. Il faut donc être rigoureux dans la formulation de ses objectifs visant à améliorer la performance énergétique, afin de surveiller ce qui est pertinent vis-à-vis de l'objectif.

Horodatage jj/mm/aaaa hh :mm :ss	Consommation en kW.h
...	...
27/04/2014 05 :50 :01	206
27/04/2014 06 :00 :01	198
27/04/2014 06 :10 :00	205
27/04/2014 06 :20 :00	205
27/04/2014 06 :30 :00	207
27/04/2014 06 :40 :00	209
27/04/2014 06 :50 :00	205
...	...

Tableau 4.2 – Données « brutes » sur la consommation électrique générale

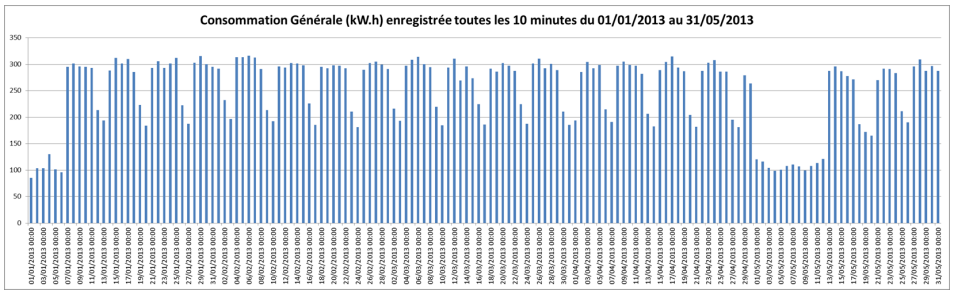

FIGURE 4.7 – Illustration d'un suivi graphique générique de la consommation électrique

4.3.3 Tableau de bord chez aVP

Les données issues du compteur de chacun des éléments équipés sont automatiquement transmises (par le réseau interne de aVP) au progiciel de gestion dont l'entreprise s'est dotée et qui les enregistre toutes les 10 minutes.

Les données ainsi collectées constituent les éléments de base sur lesquels il faut extraire de l'information utile au management de la performance énergétique. Le tableau 4.2 illustre l'archivage de données horodatées (ici des mesures au niveau 0 de l'instrumentation existante).

En pratique, l'utilisateur interroge une base de donnée pour extraire l'information d'un point de comptage donné sur une période donnée (au plus fin toutes les 10 minutes), soit sous une forme telle qu'illustrée par le tableau 4.2 soit sous une forme graphique telle qu'illustrée par la figure 4.7 pour la période du 01/01/2013 au 31/05/2013.

Au mieux, à la lecture de 4.7, les périodes d'activité hebdomadaires sont identifiables et en croisant l'information de ce graphique avec un calendrier, la baisse notable de la consommation au début du mois de mai est imputable aux *ponts du mois de mai*. Il est

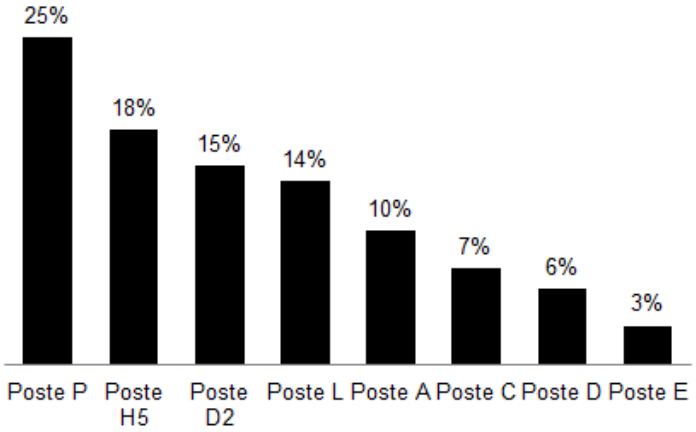

FIGURE 4.8 – Répartition de la consommation électrique moyenne entre février et aout 2014 des huit postes électriques

difficile d'appréhender la performance énergétique à partir d'un tel graphique. C'est pourquoi nous avons procédé à un traitement de l'information disponible afin d'illustrer ce que données issues de compteurs temps réels peut apporter au management de la performance énergétique. Ce traitement de l'information est développé dans l'annexe C.

Cependant il est difficile à partir de ce point de vue (général, niveau 0) d'enclencher un plan d'action ciblé au niveau opérationnel.

En l'état, huit postes électriques (niveau 1 de l'instrumentation existante) sont équipés de compteur et l'information qui est extraite des mesures permet de connaitre la répartition moyenne des besoins en énergie électrique des différents « lieux » de l'entreprise (voir figure 4.8). Seuls des équipements du troisième poste le plus consommateur (D2) sont équipés de compteurs, et donc l'instrumentation du site d'aVP ne concerne que très peu d'équipements. Ce niveau de lecture est jugé insatisfaisant par l'équipe pour construire un système de management de l'énergie. La raison est double. D'une part, les postes électriques de aVP alimentent plusieurs secteurs d'activité (usinage, R&D, etc.), jouant des rôles différents dans la stratégie et la performance de l'entreprise. D'autre part, les postes électriques alimentent en règle générale d'autres composants de distribution de l'énergie électrique avant d'alimenter un équipement particulier. En revanche, le Poste D2 a la spécificité d'alimenter essentiellement un atelier d'usinage et d'être « proche » (au sens de la parenté dans un réseau) d'équipements identifiables et sur lesquels il est possible d'agir.

C'est pourquoi nous n'avons pas procédé à une analyse plus poussée au niveau 1 de l'instrumentation mais nous nous sommes concentrés sur l'analyse du niveau 2 disponible pour promouvoir l'intérêt d'une instrumentation « type Poste D2 » pour le reste des postes électriques.

Comme précédemment, il est possible à partir de l'information disponible de connaitre

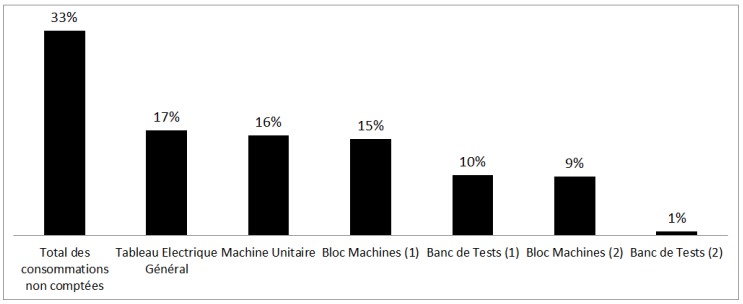

FIGURE 4.9 – Répartition de la consommation électrique moyenne entre février et aout 2014 d'équipements en dépendance du Poste D2

la répartition moyenne des besoins en énergie électrique des différents équipements équipés de compteurs et dépendants du Poste D2 (voir figure 4.9). Il en ressort que sur l'ensemble de la consommation électrique du Poste D2, les deux-tiers sont comptés. L'attention s'est portée sur la machine unitaire : une machine à laver industrielle, qui représente à elle toute seule 16% de la consommation électrique du Poste D2 (soit 2,4% du Général) et qui constitue un poste goulot du point de vue de l'activité de production. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés à l'information qui peut être extraite à partir du suivi de sa consommation électrique. Le traitement de cette information est détaillé dans l'annexe D.

Ces premières analyses permettent de mettre en avant l'importance du traitement de l'information qui peut être réalisé à partir de données disponibles. Un frein important dans le développement des systèmes de management que nous avons pu identifier est le manque de perspective sur l'exploitation des données issues de mesures. Dans le cas du comptage de la consommation en énergie électrique, les données (des mesures) sont directement visualisées sous forme d'un graphique qui permet généralement de se figurer une différence (les fameux « Δ » journaliers, hebdomadaires, mensuels, etc.) et/ou une tendance. En considérant, d'une part, les coûts de l'instrumentation nécessaire aux systèmes de management et, d'autre part en règle générale, la « pauvreté » de l'exploitation des données issues de cette instrumentation, l'intérêt des systèmes de management pour l'amélioration de la performance semble faible en comparaison des coûts pour l'entreprise.

Ce travail a permis de montrer aux décideurs de l'entreprise l'intérêt pratique de l'acquisition de mesures en temps réel par la valorisation de l'instrumentation existante, difficilement appréhendé avec le traitement classique de cette information à valeur de bilan gestionnaire.

C'est pourquoi, à partir de cet état des lieux, l'équipe conclut que

- les graphiques mis en place (tels que 4.7) ne conviennent pas à la réalisation d'un tableau de bord pour piloter la performance énergétique de l'entreprise en ce qui concerne l'électricité ;
- les perspectives apportées par les nouvelles visualisations bien qu'encourageantes portent, en l'état de l'instrumentation, sur un niveau d'analyse de la performance

énergétique complexe et éloigné du niveau opérationnel ;

- l'instrumentation existante est certainement insuffisante pour construire un tableau de bord représentatif de la performance énergétique de aVP.

C'est pourquoi l'attention se porte sur le développement de l'instrumentation des équipements de aVP en tenant compte de l'information issue de l'existant. Ce développement de l'instrumentation constitue le problème de décision sur lequel appliquer notre proposition du chapitre 3.

4.4 Application du processus de décision MCDA

4.4.1 Aide à la décision pour l'instrumentation

Depuis quelques mois l'équipe s'est investie dans le choix des équipements à instrumenter, en particulier le Poste P. Aujourd'hui elle n'est pas satisfaite de sa procédure de choix qui n'est ni systématique ni rigoureuse. Conformément à la figure 3.1, elle décide de consacrer le cycle d'amélioration continue à venir à la mise en place d'une aide à la décision fondée sur la méthode ACUTA. Après la mise en place de cette méthode, l'entreprise se servira de ses expériences précédentes (instrumentation du Poste P) pour construire son modèle de préférence qui sera ensuite réutilisable pour l'instrumentation des autres postes de consommation.

4.4.2 Identification du problème de décision

En l'état, les équipements consommateurs d'énergie électrique dotés d'un compteur individuel et leurs relations dans le réseau sont identifiés et rapportés sur la figure 4.6. Parmi les équipements ainsi outillés, seuls des équipements associés au Poste D2 sont dotés d'un compteur individuel qui mesure leurs besoins en énergie électrique.

Cet état de l'instrumentation du réseau électrique de l'entreprise aVP est jugé trop partiel pour pouvoir réaliser un tableau de bord afin de piloter l'amélioration de la performance énergétique par des actions. En raison de la taille physique de l'entreprise et donc de la quantité d'équipements associée, l'instrumentation de l'entreprise se déroulera sur plusieurs cycles.

Le coût d'un compteur est de l'ordre de 500 à 800 €. Il faut aussi prendre en compte l'installation du compteur, son ajout au réseau informatique de l'entreprise et sa mise en service. L'entreprise ne peut donc pas planifier d'installer des compteurs « partout » et aborder la problématique de l'instrumentation comme un problème d'ordonnancement de tâches. Il lui faut décider d'une instrumentation adéquate à l'ensemble de ses besoins pour construire son système de management de l'énergie.

Ainsi le problème de décision « général » de aVP concerne le choix des équipements à instrumenter pour contrôler leur consommation électrique et, à terme, construire un système de management de l'énergie compatible avec les principes de l'ISO 50001. La stratégie adoptée est de diviser ce problème en une démarche d'instrumentation pas à pas, ici

poste électrique à poste électrique. Ceci dans l'idée de bénéficier du retour d'information de chaque pas, vu comme un cycle d'amélioration continue sur le problème de décision spécifique à l'instrumentation, pour aider à l'instrumentation du poste suivant au pas suivant et ainsi de suite.

Le poste électrique P alimente l'ensemble d'équipements le plus consommateur (voir figure 4.8) et cet ensemble concerne tous les secteurs d'activité de l'entreprise. En prenant en compte l'existant du Poste D2 et de ses dépendances, l'équipe souhaite considérer l'instrumentation du Poste P, correspondant au cycle 1 du plan d'instrumentation de l'entreprise, avec une perspective enrichie par la méthode MCDA ACUTA pour bénéficier d'une démarche de choix rigoureuse et systématique.

L'idée est de considérer différentes stratégies d'instrumentation comme les actions du problème MCDA afin d'établir une relation d'ordre entre ces actions. Il s'agit donc d'aborder ce problème « local » d'instrumentation du Poste P comme un problème de *ranking* (voir partie 2.1.3.1) avec le but de se servir de l'information issue de l'ensemble du processus pour pouvoir servir de support aux cycles suivants.

D'une façon plus générale, le décideur est intéressé par l'identification des critères de performance d'une stratégie d'instrumentation et de leur importance respective.

4.4.3 Structuration du problème de décision

L'objectif, dans le cas d'étude présenté ici, est de pouvoir aborder le problème d'instrumentation du Poste P comme un problème MCDA sur lequel déployer la méthode ACUTA.

A minima, cette phase du problème de décision doit permettre de réaliser la matrice de décision propre au problème et une aide ou base de comparaison pour pouvoir disposer des préférences du décideur exprimées sous la forme d'une relation d'ordre entre les actions considérées dans le problème.

Pour réaliser une matrice de décision il faut :

- identifier l'ensemble A des actions a considérées dans le problème ;
- identifier l'ensemble des critères g_i sur lesquels le décideur fonde son choix ;
- recueillir les valeurs associées à chaque action pour chaque critère (soit $g_i(a)$).

Pour offrir une base de comparaison (ou une aide) au décideur il faut :

- la matrice de décision (*a minima* sans les valeurs $g_i(a)$) ;
- un cadre pour l'expression des préférences du décideur.

Pour disposer de ces éléments, il nous faut dans un premier temps appréhender le Poste P et son réseau électrique. L'équipe a donc procédé à une schématisation des équipements dépendants électriquement du Poste P. La schématisation doit identifier ces équipements et apporter en outre de l'information sur le caractère « clairement identifié comme énergivore ». Il s'avère qu'il n'y a pas une correspondance claire du réseau électrique avec une structure secteur d'activité par secteur d'activité, qui permette le management de l'énergie

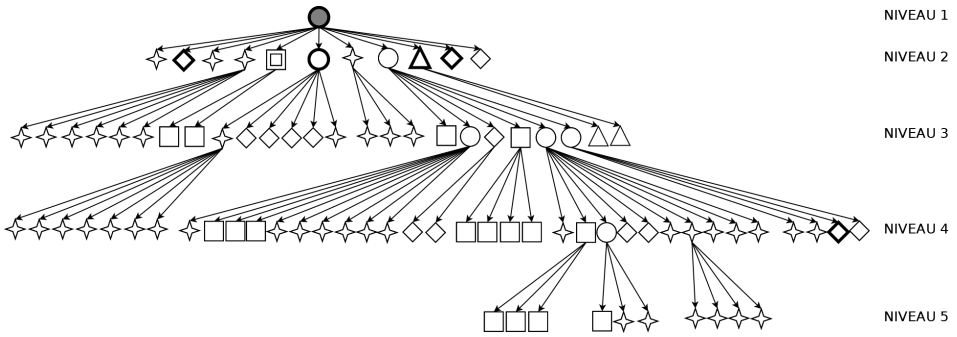

FIGURE 4.10 – La *Pieuvre Electrique* du Poste P

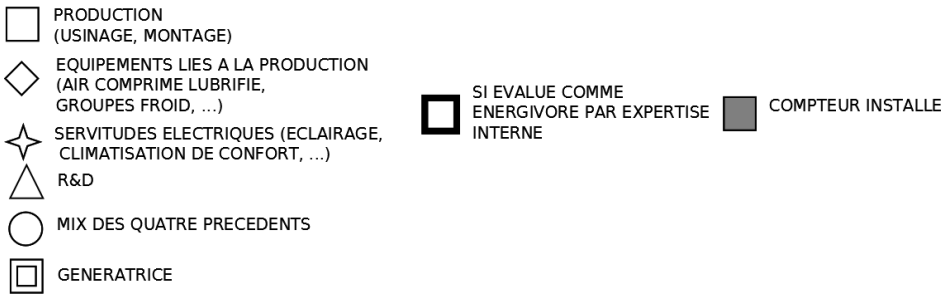

FIGURE 4.11 – Légende de la pieuvre électrique

en cohérence avec le management existant par processus/secteurs d'activité de l'entreprise. En effet, le réseau électrique s'est construit au fur et à mesure des 50 ans d'histoire de l'entreprise, c'est-à-dire sans chercher à refléter la structure d'organisation du travail et des responsabilités. Rappelons qu'un responsable de processus gère tous les aspects du processus (volume, ressources, qualité, déchets, etc. et désormais l'énergie). Pour planifier et mettre en œuvre les actions, il est donc indispensable de mettre à sa disposition les futurs indicateurs de performance énergétique relatifs à son processus.

Afin de permettre un tel management de la performance énergétique nous avons décidé d'élaborer une *pieuvre électrique* (voir figure 4.10 et sa légende 4.11) du réseau dépendant du Poste P.

Il s'agit de visualiser à la fois la structure du réseau et de lui faire correspondre les différents secteurs d'activité de l'entreprise.

Descriptions des actions considérées dans ce problème d'instrumentation :

Les points instrumentés sont grisés sur les illustrations de la pieuvre électrique pour chaque action.

Instrumentation initiale (a_{01}) :

Il s'agit de l'instrumentation en l'état. Cette action est considérée par le décideur qui pourrait choisir de *Ne rien faire* si les autres actions n'en valaient pas la peine.

Cette instrumentation consiste en un unique point de mesure (déjà en place) à la racine

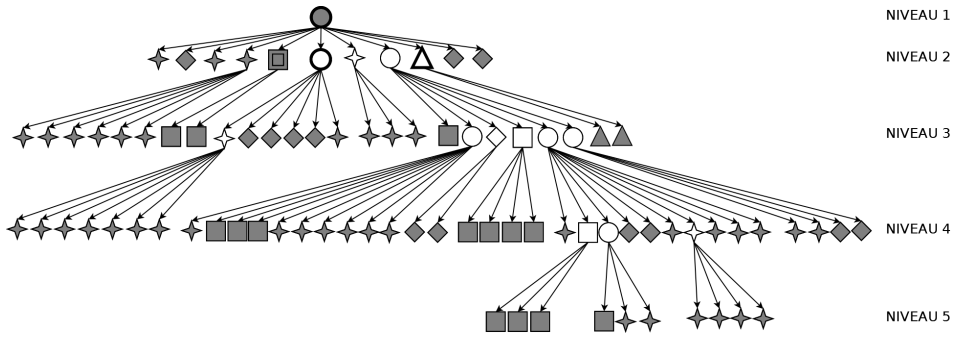

FIGURE 4.12 – Instrumentation exhaustive (a_{02})

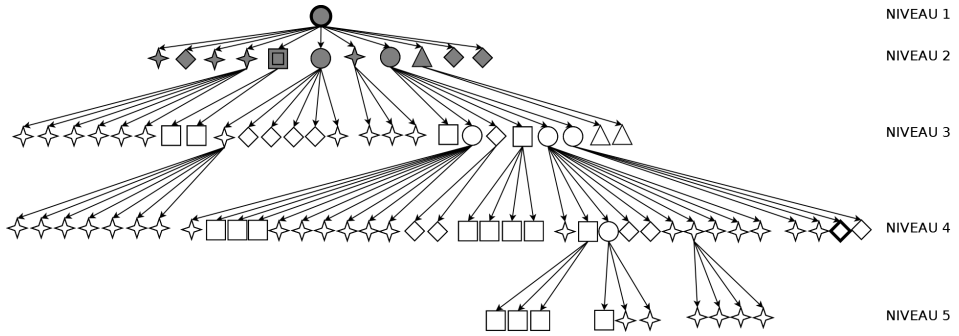

FIGURE 4.13 – Instrumentation du Niveau 2 (a_{03})

de la pieuvre électrique (voir figure 4.10).

Instrumentation exhaustive (a_{02}) : L'idée derrière cette action est de fournir une information sur les besoins en énergie électrique des équipements du Poste P le plus finement possible en équipant de compteurs chaque élément consommateur d'électricité final.

En sommant les valeurs issues des compteurs, en fonction de la structure du réseau, chaque nœud du réseau peut être contrôlé.

Cette instrumentation consiste en un déploiement de points de mesure sur chaque feuille du réseau (voir figure 4.12), sauf dans le cas d'une génératrice (située au niveau 2 du réseau) pour laquelle il est souhaité de mieux connaitre son comportement.

Instrumentation du Niveau 2 (a_{03}) : L'idée derrière cette action est de fournir une information sur les besoins en énergie électrique pour le niveau du réseau correspondant au niveau juste après le niveau 1 qui correspond au niveau « général » du Poste P.

Cette action est considérée par le décideur qui veut évaluer si la décomposition de la consommation du Poste P, au niveau immédiatement inférieur du niveau général du poste, serait satisfaisant.

Cette instrumentation consiste en un déploiement de points de mesures sur tous les nœuds du niveau 2 du réseau (voir figure 4.13).

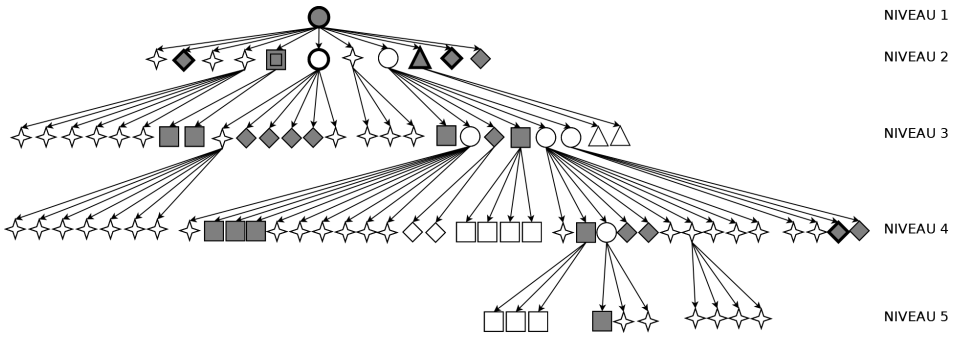

FIGURE 4.14 – Instrumentation par secteur d'activité (a_{04})

Instrumentation par secteur d'activité (a_{04}) : L'idée derrière cette action est de fournir une information sur les besoins en énergie électrique de telle sorte à pouvoir associer ces besoins aux différents secteurs d'activité de l'entreprise.

Cette action est considérée par le décideur pour faciliter le transfert d'information d'un dysfonctionnement identifié de la consommation électrique vers la gouvernance qui « à la main » sur le secteur d'activité concerné.

Cette instrumentation consiste en un déploiement de points de mesures de façon à pouvoir discriminer les mesures réalisées en fonction d'un secteur d'activité donné (voir figure 4.14).

En pratique : si un nœud parent est considéré comme différent de la catégorie MIX (un cercle dans la pieuvre électrique) alors ce nœud est instrumenté et les nœuds enfants ne sont pas considérés, sinon l'opération est répétée pour les nœuds enfants et ainsi de suite. Sauf dans le cas d'une génératrice (située au niveau 2 du réseau) pour laquelle il est souhaité de mieux connaitre son comportement.

Instrumentation concentrée sur l'activité de production (a_{05}) : L'idée derrière cette action est de fournir une information sur les besoins en énergie électrique du fondement de la valeur ajoutée apportée par l'entreprise, c'est-à-dire son activité de production.

Cette action est considérée par le décideur car elle relève d'un aspect critique de la stratégie de l'entreprise qui est d'équilibrer les besoins énergétiques avec la qualité de son activité lucrative.

Cette instrumentation consiste en un déploiement de points de mesures sur les nœuds associés à l'activité de production au niveau le plus fin possible (voir figure 4.15).

En pratique : chaque nœud de type feuille qui appartient aux catégorie de *Production* ou *Lié à la Production* sont instrumentés. Sauf dans le cas d'une génératrice (située au niveau 2 du réseau) pour laquelle il est souhaité de mieux connaitre son comportement.

Instrumentation spécifique (a_{06}) :

L'idée derrière cette action est de fournir une information sur les besoins en énergie

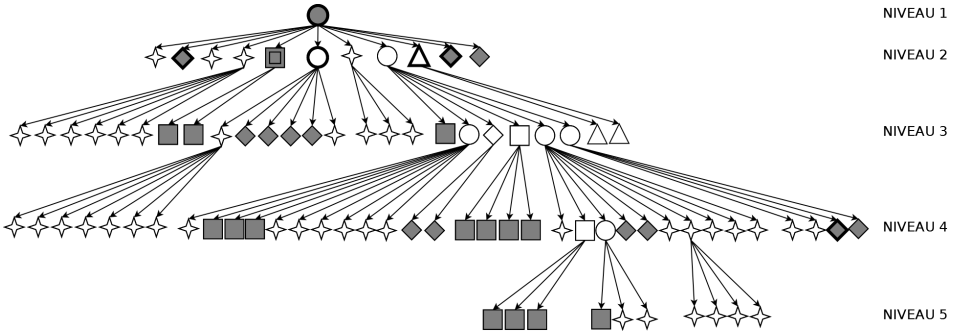

FIGURE 4.15 – Instrumentation concentrée sur l'activité de production (a_{05})

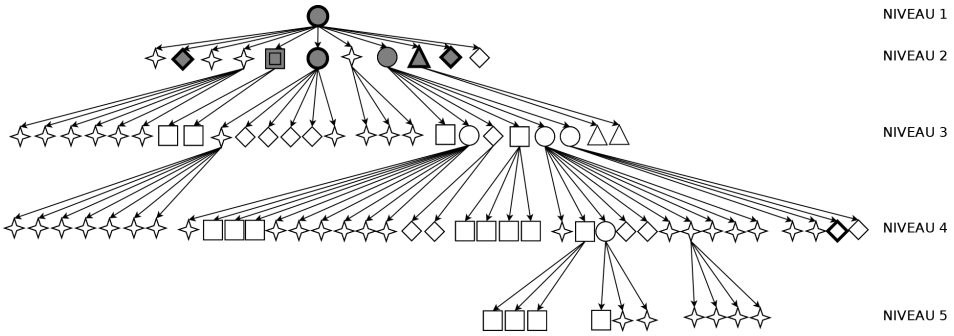

FIGURE 4.16 – Instrumentation spécifique (a_{06})

électrique pour un ensemble de nœuds choisis par le décideur un par un.

Cette action est considérée par le décideur qui veut considérer une approche non-systématique pour l'instrumentation et fondée sur son expertise et sa compréhension de la pieuvre électrique.

Cette instrumentation consiste en un déploiement de points de mesures spécifiquement discutés, débattus puis rejetés ou validés par l'équipe de travail sur la construction du système de management de l'énergie (voir figure 4.16).

Instrumentation des équipements énergivores (a_{07}) :

L'idée derrière cette action est de fournir une information sur les besoins en énergie électrique des équipements identifiés comme énergivore sur la pieuvre électrique.

Cette action est considérée par le décideur qui veut pouvoir définir un profil de consommation de ces équipements « gourmands » en électricité, afin de pouvoir les surveiller et être alerté selon leur fonctionnement.

Cette instrumentation consiste en un déploiement de points de mesures sur les équipements identifiés comme énergivores (voir figure 4.17).

Instrumentation intermédiaire entre le niveau 2 et le niveau 3 (a_{08}) :

L'idée derrière cette action est de fournir une information sur les besoins en énergie électrique d'équipements aux niveaux 2 et 3.

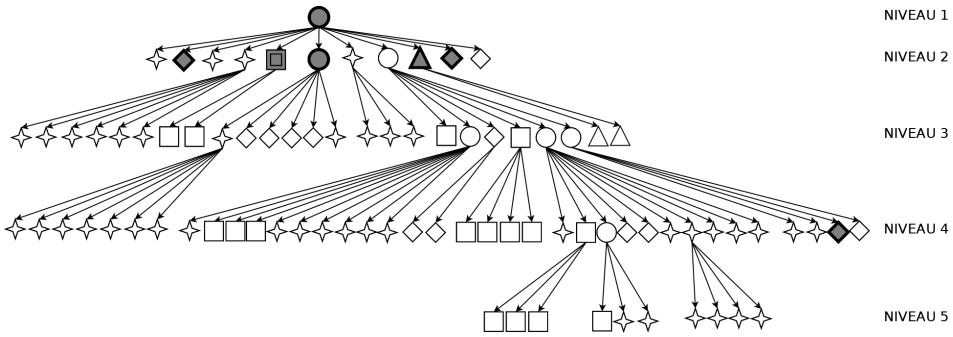

FIGURE 4.17 – Instrumentation des équipements énergivores (a_{07})

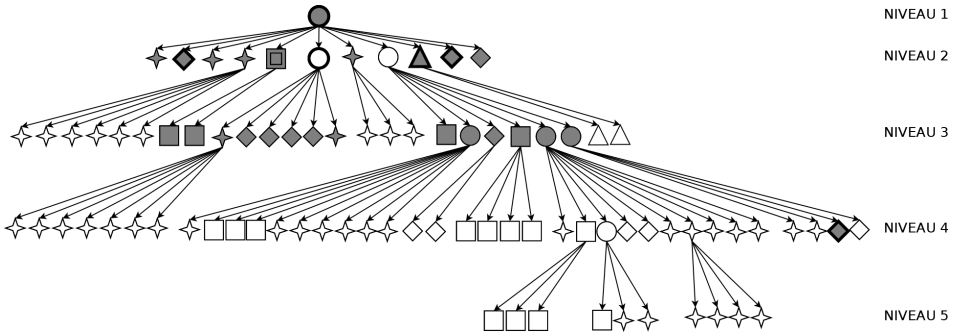

FIGURE 4.18 – Instrumentation intermédiaire entre le niveau 2 et le niveau 3 (a_{08})

Cette action est considérée par le décideur qui veut lever des ambiguïtés, les nœuds MIX, sur les consommations des équipements au niveau 2 en s'intéressant aux équipements correspondant du niveau 3.

Cette instrumentation consiste en un déploiement de points de mesures de façon à pouvoir discriminer les mesures réalisées en fonction d'un secteur d'activité donné (voir figure 4.18), en s'arrêtant au niveau 3.

En pratique : chaque nœud hors catégorie MIX au niveau 2 est instrumenté et les nœuds fils d'un nœud MIX du niveau 2 sont instrumentés. Sauf dans le cas d'une génératrice (située au niveau 2 du réseau) pour laquelle il est souhaité de mieux connaitre son comportement.

Ainsi, dans ce problème de décision, $A = \{a_{01},\ a_{02},\ a_{03},\ a_{04},\ a_{05},\ a_{06},\ a_{07},\ a_{08}\}$.

Les critères considérés dans ce problème d'instrumentation :

Compatibilité avec l'organisation par secteurs d'activité de l'entreprise (g_1) : Ce critère permet l'évaluation d'une action en fonction de la capacité à fournir directement une information aux responsables des secteurs d'activité sur les consommations électriques.

Ce critère est défini sur une échelle de $\alpha_1 = 0$ à $\beta_1 = 10$. Afin de construire cette échelle, le décideur doit vérifier que les valeurs associées à ce critère augmentent progressivement en fonction de sa satisfaction. Plus une valeur est élevée, plus l'instrumentation

est proche de l'organisation managériale de l'entreprise.

Il s'agit d'un critère de type *Gain* puisque le décideur est plus satisfait lorsque l'action permet de décomposer l'information sur les consommations électriques en de l'information élémentaire au plus proche de l'organisation managériale de l'entreprise.

Distance totale entre les points de mesure (g_2) : Ce critère permet l'évaluation d'une action en fonction d'une contrainte technique. Il s'agit de la longueur de câblage nécessaire pour relier les différents points de mesure associés à une action d'instrumentation.

Ce critère est défini de $\alpha_2 = 0\ m$ à $\beta_2 = 200\ m$. La raison est que tous les 100 m un répétiteur doit être installé sur le câblage. De plus la perturbation de l'activité de l'entreprise augmente avec l'augmentation du périmètre physique et matérielle d'une action. Le décideur veut au maximum un seul répétiteur à installer durant le câblage des compteurs et donc la limite supérieure pour ce critère est 200 m.

Il s'agit d'un critère de type *Coût* puisque le décideur est plus satisfait lorsque les équipements à outiller de compteurs sont au plus proches les uns des autres, matériellement parlant.

Pérennité de l'instrumentation (g_3) : Ce critère permet l'évaluation d'une action en fonction de la durée estimée de la présence de l'équipement matériel concerné par l'action. Une machine peut être remplacée ou déplacée ce qui est un inconvénient selon le décideur car il faudrait reconfigurer le câblage après une telle modification.

Ce critère est défini de $\alpha_3 = 0\ mois$ à $\beta_3 = 24\ mois$. 0 *mois* signifie que l'équipement va bouger « aujourd'hui » tandis que 24 *mois* signifie qu'il n'est pas prévu de bouger l'équipement avant 24 mois. Il s'agit de la limite supérieure de ce critère car les plans d'action sont rarement définis au delà d'un horizon de deux ans.

Il s'agit d'un critère de type *Gain* puisque le décideur est plus satisfait lorsque les équipements outillés sont les plus pérennes au sein de l'entreprise.

Gain (potentiel) pour le système de management de l'énergie (g_4) : Ce critère permet l'évaluation d'une action en fonction de l'estimation sur le gain d'information apporté par l'action pour la construction du système de management de l'énergie pour aVP. Les données concernant ce critère sont incertaines parce que l'évaluation des gains en information futurs est une tâche couteuse et difficile. Ainsi, ce critère est abordé qualitativement.

Ce critère est défini sur une échelle linguistique, raisonnable, constituée de 3 termes : *faible, moyen, fort*. Pour la simplicité, dans ce cas d'étude, ces valeurs linguistiques sont transformées en valeurs numériques : *1, 2, 3* respectivement avec $\alpha_4 = 1$ à $\beta_4 = 3$.

Il s'agit d'un critère de type *Gain*.

Coût total (g_5) : Ce critère permet l'évaluation d'une action selon le coût total de l'action (achat, installation et mise en service des compteurs).

Ce critère est défini à l'aide d'une valeur forfaitaire de 700 € par point de mesure. α_5 et β_5 sont directement calculés en fonction des actions de A. Ici $\alpha_5 = g_5(a_{01}) = 0$ € et $\beta_5 = g_5(a_{02}) = 50000$ €.

Il s'agit d'un critère de type *Coût*.

Maintenant que les actions et les critères du problème de décision ont été définis, il est possible de déterminer les valeurs $g_i(a)$, $\forall a \in A$, $\forall i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$.

Pour le critère g_1 : l'équipe a évalué la discrimination, par secteur d'activité, possible de l'information apportée par une action. Cette évaluation se traduit par le score $g_1(a)$.

Pour le critère g_2 : l'équipe a estimé sur plans et par expertise la distance de câblage nécessaire selon l'action considérée. Cette distance estimée constitue $g_2(a)$.

Pour le critère g_3 : l'équipe dispose des plans d'action prévus dans les prochains mois pour le matériel de l'entreprise. A partir de ces plans d'action, les équipements à la fois concernés par une action d'instrumentation et un déménagement ou un remplacement dans les prochains mois sont identifiés. La durée de l'équipement de l'ensemble concerné par une action dont la pérennité est la plus faible constitue $g_3(a)$.

Pour le critère g_4 : l'équipe a évalué un compromis entre la qualité (au sens de l'utilité pour contrôler la performance) et la quantité d'information à exploiter en fonction de l'action d'instrumentation concernée pour juger l'apport de l'action, en termes d'information, à la réalisation du système de management de l'énergie. Ce jugement se traduit par la valeur numérique $g_4(a)$.

Pour le critère g_5 : l'équipe a compté le nombre de compteurs à installer selon une action. Il suffit ensuite de multiplier ce nombre par la valeur forfaitaire d'un compteur à installer pour calculer $g_5(a)$.

L'équipe est consciente de l'imprécision qui peut affecter certaines de ces valeurs. Les résultats obtenus seront discutés dans la suite de ce chapitre.

4.4.4 Construction du modèle

Grâce aux éléments déterminés dans la partie 4.4.3, la matrice de décision du problème d'instrumentation du Poste P est définie (voir tableau 4.3).

Actions	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
a_{01}	0	0	24	1	0
a_{02}	10	200	6	2	47600
a_{03}	7	10	20	2	7700
a_{04}	9	120	12	3	16100
a_{05}	8	80	6	3	19600
a_{06}	6	5	20	2	4200
a_{07}	7	100	20	2	4200
a_{08}	8	160	12	3	16800

Tableau 4.3 – La matrice de décision concernant le problème d'instrumentation du Poste P

Pour pouvoir utiliser la méthode ACUTA, il reste encore à

- restituer les préférences du décideur, sous forme d'une relation d'ordre sur les actions de A ;
- définir le nombre de segments des fonctions d'utilité élémentaire correspondant à chaque critère ;
- définir la valeur ε qu'utilise ACUTA telle que $\forall (a_x,\ a_y) \in A^2,\ a_x \succ a_y \Leftrightarrow U(a_x) \geq U(a_y) + \varepsilon$.

En se fondant sur son expertise, son jugement et les pieuvre électriques correspondant à chaque action (figures 4.10, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 et 4.18), le décideur exprime ses préférences telles que

$$a_{06} \succ a_{05} \succ a_{04} \succ a_{03} \succ a_{01} \succ a_{02}.$$

En prenant en compte à la fois le peu de données disponibles (chaque segment par fonction d'utilité ajoute une variable au problème) et la « rigidité » d'un modèle qui serait fondé sur des fonctions linéaires simples, l'équipe a choisi des fonctions d'utilité élémentaire en 2 morceaux pour tous les critères. Ainsi chaque fonction d'utilité élémentaire du modèle de préférence est caractérisée par 3 points : $(\alpha_i, u_i(\alpha_i))$; $(\gamma_i, u_i(\gamma_i))$; $(\beta_i, u_i(\beta_i))$, avec $\gamma_i = \dfrac{\alpha_i + \beta_i}{2}$.

Enfin, ε est conservé à sa valeur par défaut sur la plateforme Diviz, c'est à dire $\varepsilon = 0,01$.

Le modèle de préférence du décideur pour ce problème est transcrit dans le tableau 4.4 (les variables du problème sont indiquées en rouge) et illustré par la figure 4.19.

g_i	α_i	$u_i(g_i(\alpha_i))$	γ_i	$u_i(g_i(\gamma_i))$	β_i	$u_i(g_i(\beta_i))$
g_1	0	0	5	0,10	10	0,13
g_2	0	0,24	100	0,13	200	0
g_3	0	0	12	0,03	24	0,08
g_4	1	0	2	0,10	3	0,32
g_5	0	0,23	25000	0,07	50000	0

Tableau 4.4 – Le modèle de préférence calculé par ACUTA à partir de la plateforme Diviz

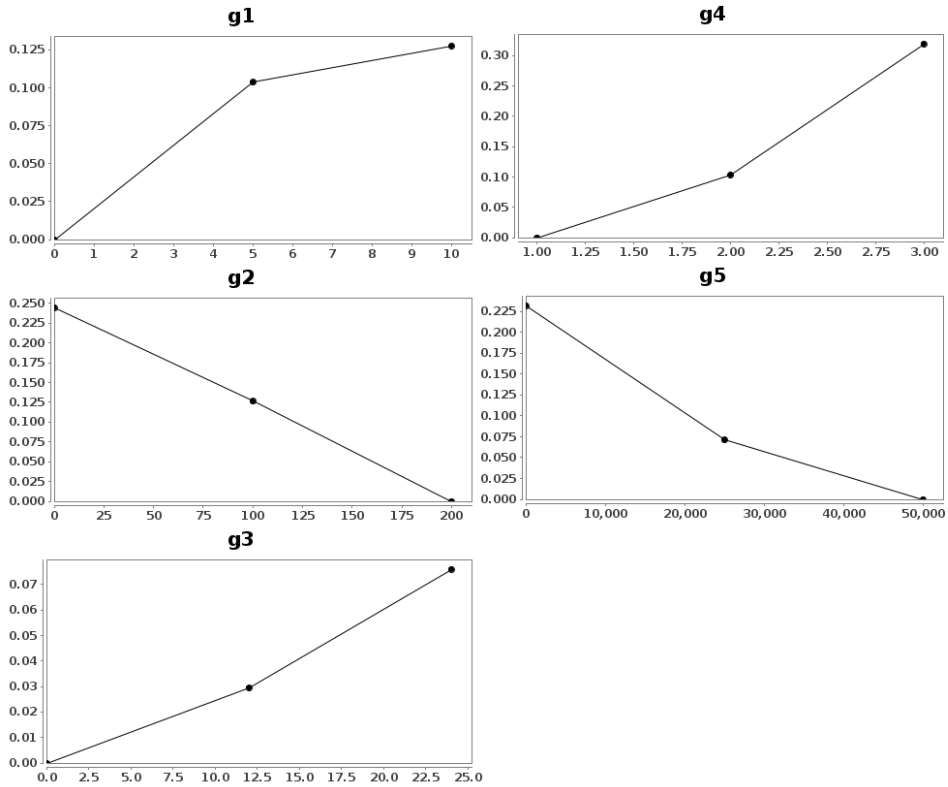

FIGURE 4.19 – Le modèle de préférence calculé par ACUTA à partir de la plateforme Diviz

4.4.5 Utiliser le modèle pour informer et remettre en question

Avant de discuter l'information fournie par le modèle de préférence, il faut d'abord vérifier que le modèle est bien *compatible* avec les préférences du décideur. Pour ce faire, il faut vérifier que la relation d'ordre proposée par le décideur est conservée par le modèle de préférence.

Dans ce cas d'étude, le modèle est compatible puisque (voir tableau 4.5) :

$$U(a_{06}) > U(a_{05}) > U(a_{04}) > U(a_{03}) > U(a_{08}) > U(a_{07}) > U(a_{01}) > U(a_{02})$$

.

Actions	Utilité Globale	Rang
a_{06}	0.72	1
a_{05}	0.71	2
a_{04}	0.70	3
a_{03}	0.69	4
a_{08}	0.64	5
a_{07}	0.61	6
a_{01}	0.55	7
a_{02}	0.25	8

Tableau 4.5 – Les utilités globales et le *ranking* des actions considérées

Il a été souligné dans la partie 4.4.3 que ce modèle de préférence est réalisé malgré l'imprécision des données disponibles. Néanmoins, sa production permet de remettre en question l'« intuition » de l'équipe chargée de réaliser un système de management de l'énergie.

D'après ce modèle de préférence (voir tableau 4.4 ou figure 4.19) :

- le critère *Gain (potentiel) pour le système de management de l'énergie* (g_4) est *a priori* prépondérant, ce qui est cohérent avec le but de l'instrumentation mise en place chez aVP ;

- les critères *Distance totale entre les points de mesure* (g_2) et *Coût total* (g_5) sont *a priori* importants, ce qui est cohérent avec les contraintes majeures d'un plan d'action en entreprise ;

- le critère *Compatibilité avec l'organisation par secteurs d'activité de l'entreprise* (g_1) est *a priori* assez faible, ce qui est surprenant étant donné le besoin de réaliser la pieuvre électrique, dans le but d'identifier les secteurs d'activité de l'entreprise dans le réseau du Poste P ;

- le critère *Pérennité de l'instrumentation* (g_3) est *a priori* sans importance, ce qui soulève la question de sa pertinence.

D'après les utilités globales U calculées pour chaque action à partir de ce modèle de préférence (voir tableau 4.4 illustré par la figure 4.20) :

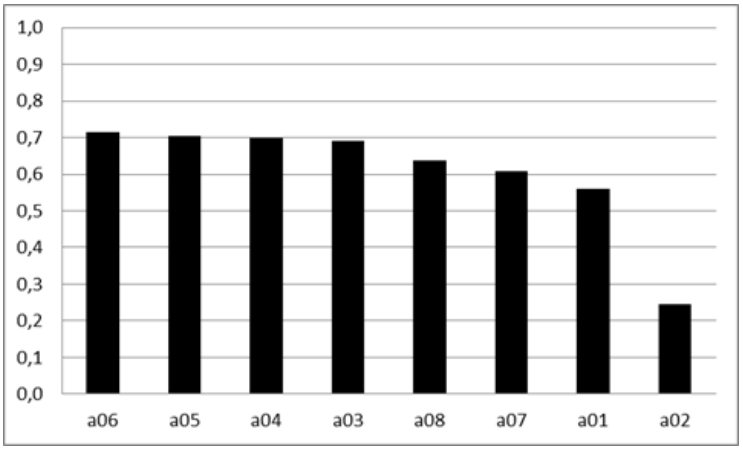

FIGURE 4.20 – Les utilités globales des actions

- les actions *Instrumentation spécifique* (a_{06}), *Instrumentation concentrée sur l'activité de production* (a_{05}), *Instrumentation par secteur d'activité* (a_{04}) et *Instrumentation du Niveau 1* (a_{03}) ont *a priori* des différences d'utilité très faibles (0.024 entre $U(a_{06})$ et $U(a_{03})$ sur un domaine d'utilité allant de 0 à 1), ce qui n'est pas évident d'après la lecture de la matrice de décision (voir tableau 4.3) ;

- le gain d'utilité entre l'action *Instrumentation initiale* (a_{01}), c'est-à-dire *Ne rien faire*, et l'action de premier rang a_{06} est *a priori* significatif (0.155 entre $U(a_{06})$ et $U(a_{01})$ sur un domaine d'utilité allant de 0 à 1), ce qui est cohérent avec la charge relativement faible (financière, technique et en gestion des données) de l'action a_{06} ;

- l'action *Instrumentation exhaustive* (a_{02}) est *a priori* une perte pour l'entreprise par rapport à l'existant (a_{01}), ce qui est cohérent avec la philosophie de l'équipe (« Ne pas mesurer pour le plaisir de mesurer ») et la charge (financière, technique et en gestion des données) trop importante que représente cette action.

D'après les utilités élémentaires u_i calculées pour chaque action et chaque critère à partir de ce modèle de préférences (voir figure 4.21) :

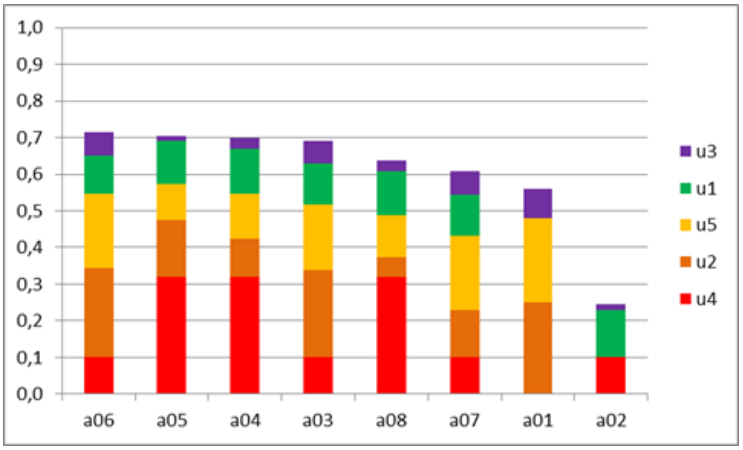

FIGURE 4.21 – Illustration des utilités élémentaires pour chaque action

- l'action préférée par le décideur a_{06} est *a priori* relativement équilibrée par rapport à l'ensemble des critères, ce qui est cohérent pour un premier cycle ;

- les actions a_{05} et a_{04} sont *a priori* plus orientées sur le gain pour le système de management que a_{06}, ce qui est cohérent avec l'idée derrière ces actions et leur caractère systémique par rapport à l'action de premier rang, mais sont moins soucieuses des contraintes majeures.

- l'action *a priori* de dernier rang a_{02} ne tient pas compte des contraintes majeures pour une entreprise, ce qui est cohérent avec les conclusions précédentes sur cette action.

4.4.6 Utilisation du modèle pour le problème de décision sur le Poste H5

Le modèle de préférence construit sur le problème d'instrumentation du poste P, appris durant le cycle 1, est redéployé pour le cycle 2 : l'instrumentation du deuxième poste le plus consommateur en électricité, le poste H5.

Le réseau du poste H5 est illustré par une pieuvre électrique (voir figure 4.22), en raison de l'utilité de ce type de document défini pendant le cycle 1.

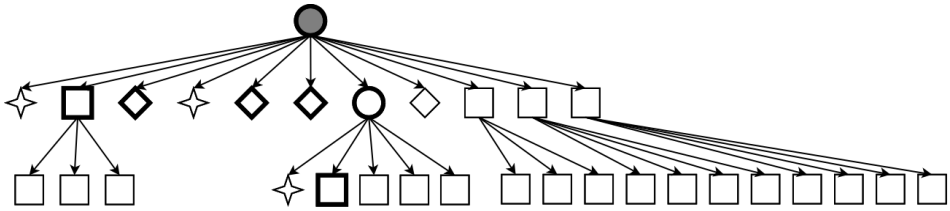

FIGURE 4.22 – La pieuvre électrique du poste H5

Puisque l'idée est d'appliquer pendant le cycle 2 le modèle de préférence appris pendant le cycle 1, il faut définir un nouvel ensemble A d'actions qui concernent le choix des équipements, dépendants du Poste H5, sur lesquels installer des compteurs. Puis il faut renseigner les valeurs correspondant à l'évaluation de ces actions selon les critères établis durant le cycle 1.

Pour des raisons pratiques, notamment pour pouvoir plus facilement critiquer le modèle qui doit encore évoluer, les actions considérées sont analogues à celles du cycle 1 :

- *Instrumentation initiale* (b_{01})
- *Instrumentation exhaustive* (b_{02})
- *Instrumentation du Niveau 1* (b_{03})
- *Instrumentation par secteur d'activité* (b_{04})
- *Instrumentation concentrée sur l'activité de production* (b_{05})
- *Instrumentation spécifique* (b_{06})

La matrice de décision pour le problème, de cycle 2, d'instrumentation du poste H5 est représentée dans le tableau 4.6 :

Actions	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
b_{01}	0	0	24	1	0
b_{02}	10	200	0	2	17500
b_{03}	7	80	0	2	7700
b_{04}	9	200	0	3	10500
b_{05}	8	200	0	3	15400
b_{06}	6	120	24	3	2800

Tableau 4.6 – La matrice de décision concernant le problème d'instrumentation du Poste H5

Ensuite on applique le modèle de préférence (voir tableau 4.4) pour calculer les utilités globales afin d'établir une relation d'ordre de la préférence entre ces actions. Le résultat est présenté dans le tableau 4.7.

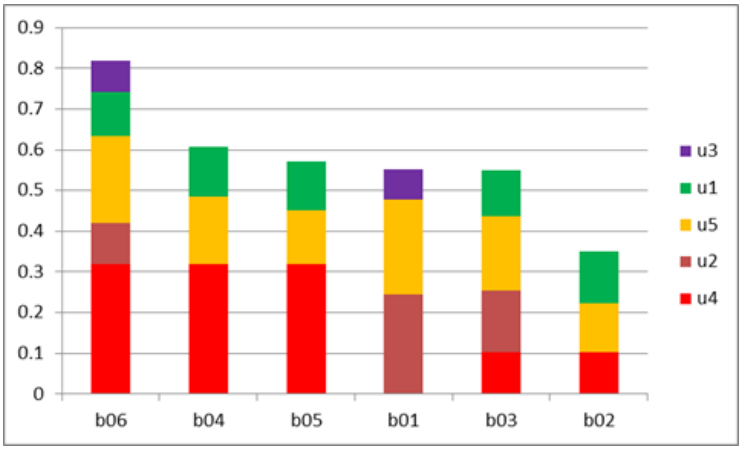

FIGURE 4.23 – Illustration des utilités élémentaires pour chaque action

Actions	Utilité Globale	Rang
b_{06}	0,82	1
b_{04}	0,61	2
b_{05}	0,57	3
b_{01}	0,55	4
b_{03}	0,55	5
b_{02}	0,35	6

Tableau 4.7 – Les utilités globales et le *ranking* des actions considérées

A partir de ce résultat, il est possible de discuter le modèle appris durant le cycle 1.

L'ordre de référence proposé par le décideur durant le cycle 1, certes sur des actions différentes mais fondées sur les mêmes idées et principes, n'est pas respecté. Cependant le *ranking* reste cohérent avec le choix du décideur concernant le déploiement de l'action qu'il a définie (b_{06}).

La limite supérieure β_2 pour les valeurs du critère g_2, définie durant le cycle 1, ne convient pas pour la description des actions considérées pour le problème d'instrumentation du Poste H5. En effet, si b_{02}, b_{04}, ou b_{05} devait être mise en œuvre, il faudrait plus que 200m de câblage. Ce critère porte sur une dimension « tangible » et qui dépend fortement du contexte, ici l'architecture du réseau électrique physique et des équipements (nombre et emplacements) qui dépendent du poste électrique concerné.

Il est regrettable que le critère g_3 (qui a très peu d'importance par rapport aux autres critères selon ce modèle) ne discrimine pas suffisamment une action qui propose l'installation de compteurs sur un très grand nombre d'équipements voués à être déplacés par rapport à une installation plus pérenne (voir figure 4.23).

Ainsi, le modèle de décision issu du cycle d'instrumentation du Poste P, déployé le

cycle suivant sur le Poste H5 montre qu'il a du sens selon les préférences du décideur, mais il a certainement besoin d'être amélioré pour être suffisamment mature.

4.5 Compléments d'information du modèle

4.5.1 Prise en compte de l'imprécision

Il s'agit de traiter le problème de l'imprécision des données utilisées dans la matrice de décision. Le critère affecté par de l'imprécision pour cette mise en pratique est le critère g_5 : *Coût total*. Le modèle de préférence « précis » ayant été établi, nous reprenons la méthodologie développée en 3.2 à partir l'étape *Appliquer le modèle de préférence initial aux données imprécises* :

La matrice de décision « imprécise » du problème est présentée dans le tableau avec une imprécision Δ de 10%. Ainsi $\forall a \in A,\ g_5(a)^- = g_5(a)(1-\Delta),\ g_5(a)^+ = g_5(a)(1+\Delta)$.

Actions	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
a_{01}^-	0	0	24	1	0
a_{01}^+	0	0	24	1	0
a_{02}^-	10	200	6	2	42840
a_{02}^+	10	200	6	2	47600
a_{03}^-	7	10	20	2	6930
a_{03}^+	7	10	20	2	8470
a_{04}^-	9	120	12	3	14490
a_{04}^+	9	120	12	3	17710
a_{05}^-	8	80	6	3	17640
a_{05}^+	8	80	6	3	21560
a_{06}^-	6	5	20	2	3780
a_{06}^+	6	5	20	2	4620
a_{07}^-	7	100	20	3	3780
a_{07}^+	7	100	20	3	4620
a_{08}^-	8	160	12	1	15120
a_{08}^+	8	160	12	1	18480

Tableau 4.8 – La matrice de décision « imprécise », de 10% sur g_5 concernant le problème d'instrumentation du Poste P

Lorsqu'une valeur est $g_i(a)^+$ dépasse la limite β_i, nous plafonnons $g_i(a)^+$ à β_i.

Analyser la concordance entre rangs d'actions précises et imprécises :

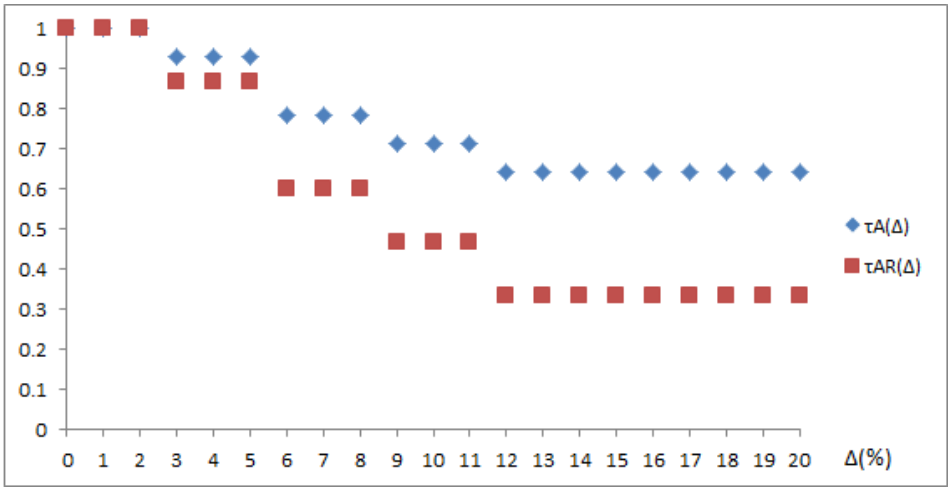

FIGURE 4.24 – Indice de Kendall τ en fonction de l'imprécision Δ et pertes de la robustesse de relations de préférence 2 à 2

Pour rappel, dans ce cas d'étude, la relation d'ordre complet établie sur A dans le cas précis est telle que

$$a_{06} \succ a_{05} \succ a_{04} \succ a_{03} \succ a_{01} \succ a_{02}.$$

Ainsi, il y a 15 relations de préférence 2 à 2 à vérifier.

Pour que la robustesse de la relation d'ordre soir garantie malgré l'imprécision des données associées au critère g_5, il faut pouvoir vérifier que les relations de préférence 2 à 2 sont *Strong*, c'est-à-dire vérifier que

$$\begin{array}{l}
a_{06}^- \succ a_{05}^+ \,;\, a_{06}^- \succ a_{04}^+ \,;\, a_{06}^- \succ a_{03}^+ \,;\, a_{06}^- \succ a_{08}^+ \,;\, a_{06}^- \succ a_{07}^+ \,;\, a_{06}^- \succ a_{01}^+ \,;\, a_{06}^- \succ a_{02}^+ \,; \\
a_{05}^- \succ a_{04}^+ \,;\, a_{05}^- \succ a_{03}^+ \,;\, a_{05}^- \succ a_{08}^+ \,;\, a_{05}^- \succ a_{07}^+ \,;\, a_{05}^- \succ a_{01}^+ \,;\, a_{05}^- \succ a_{02}^+ \,; \\
a_{04}^- \succ a_{03}^+ \,;\, a_{04}^- \succ a_{08}^+ \,;\, a_{04}^- \succ a_{07}^+ \,;\, a_{04}^- \succ a_{01}^+ \,;\, a_{04}^- \succ a_{02}^+ \,; \\
a_{03}^- \succ a_{08}^+ \,;\, a_{03}^- \succ a_{07}^+ \,;\, a_{03}^- \succ a_{01}^+ \,;\, a_{03}^- \succ a_{02}^+ \,; \\
a_{08}^- \succ a_{07}^+ \,;\, a_{08}^- \succ a_{01}^+ \,;\, a_{08}^- \succ a_{02}^+ \,; \\
a_{07}^- \succ a_{01}^+ \,;\, a_{07}^- \succ a_{02}^+ \,; \\
a_{01}^- \succ a_{02}^+
\end{array}$$

Nous avons calculé la valeur de l'indice de Kendall $\tau = \dfrac{N_c - N_d}{N}$ en augmentant la variable Δ avec un pas de 1%. La figure 4.24 présente le graphique obtenu pour $0\% \leq \Delta \leq 20\%$. Une imprécision de l'ordre de 3%, *a priori* faible et suffisante pour que les données disponibles soient concernées, remettrait en question une préférence de a_{05} sur a_{04}. En l'état (premier cycle), ce n'est guère inquiétant.

A 5% d'imprécision, la préférence de l'action a_{04} est remise en question jusqu'à sa préférence sur a_{01} *Ne rien faire*. En termes pratique, ceci est un résultat relativement incohérent par rapport à ce que la réflexion concluerait.

Calculer un seuil pour l'imprécision :

Concerné d'avantage par la légitimité de l'action de premier rang a_{06}, le décideur souhaite connaitre la valeur de seuil à l'imprécision qui garantisse la robustesse de a_{06} préférée à toutes les autres actions.

Le calcul de min $\Delta(a_{06}, a)_{lim}$, $\forall a \in A$ produit la valeur $\Delta = 5.65\%$.

Si l'imprécision des données associées à g_5 est environ inférieure ou égale 5% alors la préférence de a_{06} sur toutes les autres actions de A est robuste malgré l'imprécision. Cet ordre de grandeur d'imprécision est raisonnable et ce résultat rassure sur la décision prise.

Ainsi, le bilan sur la robustesse associée à l'imprécision des données pour le critère de coût est qu'il reste à faire progresser ce modèle durant les cycles suivants mais que la démarche déjà mise en œuvre est globalement cohérente par rapport aux informations disponibles et les critiques concevables à leur sujet.

4.5.2 Prise en compte de la faisabilité

Il s'agit de mettre en pratique notre proposition sur la faisabilité d'une action afin d'apporter un complément d'information à l'utilité d'une action.

Concrètement, pour calculer les fonctions de faisabilité élémentaires, le processus de décision est repris au niveau de la *Construction du modèle* (voir 4.4.4).

La matrice de décision (voir tableau 4.3) est globalement conservée. Même s'il est difficile de se figurer une action virtuellement « la meilleure » et une action virtuellement « la pire » au sens de la faisabilité.

Pour pouvoir utiliser la méthode ACUTA, cette fois-ci pour calculer un modèle de préférence construit sur la faisabilité et non l'utilité d'une action, il reste encore à

- restituer les préférence du décideur, sous forme d'une relation d'ordre sur les actions de A, cette fois-ci en rapport avec la faisabilité de passer d'une action à une autre ;
- définir le nombre de segments des fonctions de faisabilité élémentaire correspondant à chaque critère ;
- définir la valeur ε qu'utilise ACUTA telle que $\forall (a_x,\ a_y) \in A^2,\ a_x \rhd a_y \Leftrightarrow F(a_x) \geq F(a_y) + \varepsilon$.

En se fondant sur son expertise, son jugement et les pieuvre électriques correspondant à chaque action (figures 4.10, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 et 4.16), le décideur exprime ses préférences de faisabilité telles que

$$a_{01} \rhd a_{06} \rhd a_{03} \rhd a_{05} \rhd a_{04} \rhd a_{02}.$$

L'équipe a choisi des fonctions d'utilité élémentaire en 2 morceaux pour tous les critères. Ainsi chaque fonction d'utilité élémentaire du modèle de préférence est caractérisée

par 3 points : $(\alpha_i, f_i(\alpha_i))$; $(\gamma_i, f_i(\gamma_i))$; $(\beta_i, f_i(\beta_i))$, avec $\gamma_i = \dfrac{\alpha_i + \beta_i}{2}$.

Enfin, ε est conservé à sa valeur par défaut sur la plateforme Diviz, c'est à dire $\varepsilon = 0,01$.

Le modèle de préférence du décideur pour ce problème, cette fois-ci dans la perspective de la faisabilité, est transcrit dans le tableau 4.9 (les variables du problème sont indiquées en rouge) et illustré par la figure 4.25.

g_i	α_i	$f_i(g_i(\alpha_i))$	γ_i	$f_i(g_i(\gamma_i))$	β_i	$f_i(g_i(\beta_i))$
g_1	0	0.69	5	0.61	10	0
g_2	0	0	100	0.05	200	0.07
g_3	0	0.08	12	0.05	24	0
g_4	1	0.11	2	0.03	3	0
g_5	0	0	25000	0.03	50000	0.05

Tableau 4.9 – Le modèle de préférence calculé par ACUTA à partir de la plateforme Diviz

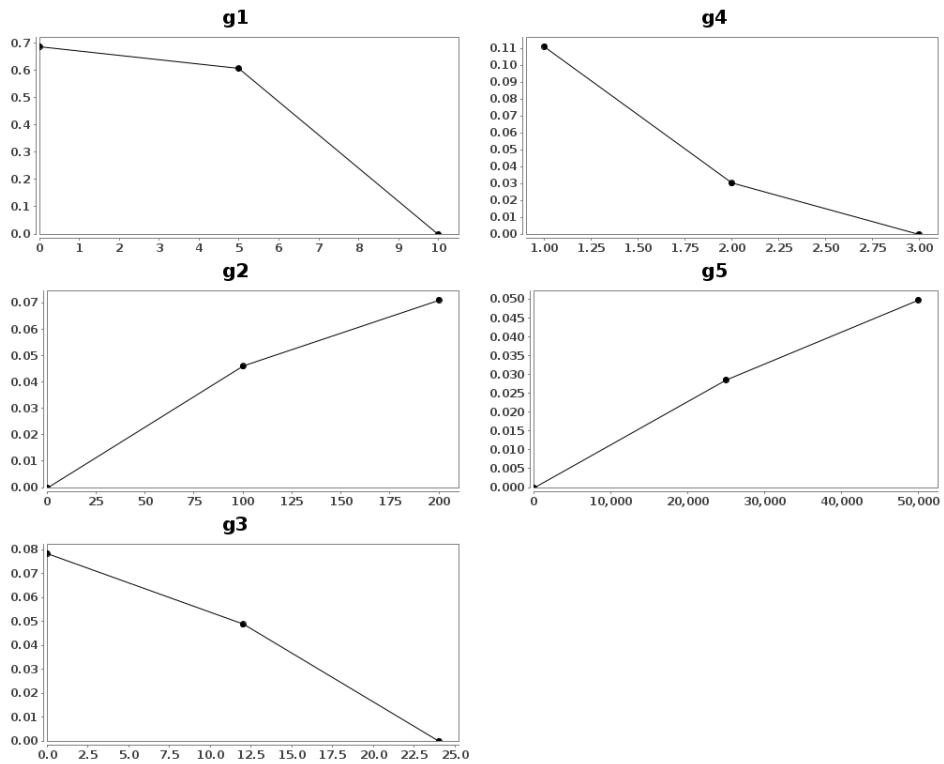

FIGURE 4.25 – Le modèle de faisabilité calculé par ACUTA à partir de la plateforme Diviz

Avant de discuter l'information fournie par le modèle de faisabilité, il faut d'abord vé-

rifier que le modèle est bien *compatible* avec les préférences de faisabilité du décideur. Pour ce faire, il faut vérifier que la relation d'ordre proposée par le décideur est conservée par le modèle de faisabilité. De plus, n'ayant pas défini d'actions symbolisant virtuellement le meilleur et le pire des cas en ce qui concerne la faisabilité, il faut aussi vérifier que a_{01} (au premier rang des préférences du décideur sur la faisabilité) et a_{02} (au dernier rang des préférences du décideur sur la faisabilité) aient des valeurs de faisabilité globale respectivement proches de 1 et de 0.

Dans ce cas d'étude, le modèle est compatible puisque (voir tableau 4.10) :

$$F(a_{01}) > F(a_{06}) > F(a_{07})F(a_{03}) > F(a_{08}) > F(a_{05}) > F(a_{04}) > F(a_{02}).$$

De plus $F(a_{01}) = 0.80$ (meilleure faisabilité) et $F(a_{02}) = 0.21$ (pire faisabilité) sont suffisamment proches respectivement de 1 et 0.

Actions	Faisabilité Globale	« Rang »
a_{01}	0.80	1
a_{06}	0.54	2
a_{07}	0.46	3
a_{03}	0.42	4
a_{08}	0.37	5
a_{05}	0.37	6
a_{04}	0.24	7
a_{02}	0.21	8

Tableau 4.10 – Les faisabilités globales et le *ranking* des actions considérées

Il reste à appliquer l'idée proposée dans le chapitre 3, à savoir exploiter l'information sur la faisabilité.

Exploitation :

Connaissance de $(U(a), F(a))$ (voir figure 4.26) :

Dans ce cas d'étude, l'action a_{06} est à la fois l'action de meilleur rang au sens de l'utilité et l'action de second rang au sens de la faisabilité. L'action a_{01} est l'action de meilleur rang au sens de la faisabilité mais l'action de pénultième rang au sens de l'utilité et, correspondant à l'existant, est jugée en l'état insatisfaisante pour la réalisation d'un système de management de l'énergie.

En outre, en considérant la faible différence d'utilité entre les actions a_{06}, a_{05}, a_{04} et a_{03}, dans le cas de figure où la robustesse de leur rang respectifs serait remise en question (pour des raisons d'imprécision ou autres), l'action a_{06} présente une bien meilleure faisabilité que les trois autres.

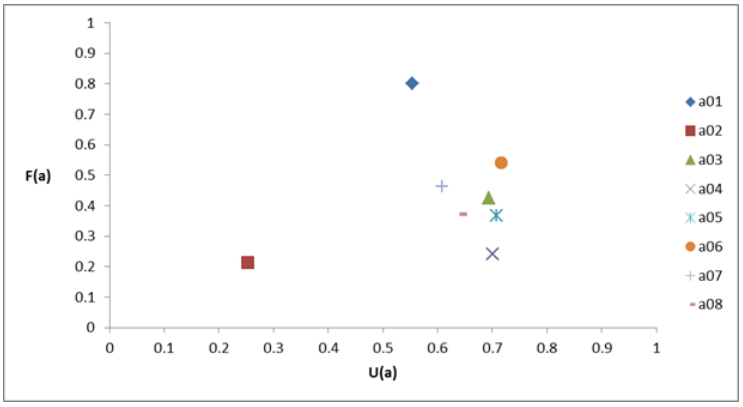

FIGURE 4.26 – Utilité et Faisabilité de chaque action de A

La prise en compte de la faisabilité appuie le choix du décideur à mettre en œuvre l'action a_{06}.

Amélioration de l'utilité globale sachant une faisabilité donnée ;
Amélioration de la faisabilité globale sachant une utilité donnée ;
Recherche d'un compromis entre utilité et faisabilité :
Ces trois exploitations présentées dans la partie 3.3.3 n'ont pas été réalisées car le décideur ne souhaite pas aller plus loin sur l'exploitation de la faisabilité.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé l'application de nos propositions sur un cas d'étude concret de décision stratégique en entreprise industrielle.

Le travail préliminaire à l'application de nos propositions occupe une partie importante des travaux relatés dans ce cas d'étude. En effet, notre choix d'une approche constructive pour l'aide à la décision est fondé en ce qui concerne la satisfaction du décideur sur l'aide à la décision. Cependant, pour parvenir à construire le problème de décision, il a fallu prendre le problème « à la racine » du raisonnement. Ce travail, a mis en lumière l'importance capitale de la préparation en amont du processus d'aide à la décision : la visualisation de l'intérêt des données en temps réel pour piloter la performance énergétique a influencé l'équipe sur le besoin d'instrumentation en temps réel et donc les préférences du décideur apportées au processus MCDA en soit.

De plus, nos propositions émises dans le chapitre 3, ont pour but d'être assez généralistes vis-à-vis d'un problème de décision, tandis que la pratique doit tenir compte de spécificités qui vont au-delà des phases du processus MCDA, et ne sont pas forcément évidentes : *Identifier le problème de décision* n'est pas, selon notre expérience, la première phase du travail de l'analyste et du décideur pour aboutir à un modèle puis un plan d'actions. Il faut d'abord reconnaître le besoin d'avoir à décider, ce que nous avons accompli grâce à un travail documentaire/réglementaire, un état des lieux orienté par la documentation et une mise en lumière concrète des gains.

De plus, au delà de la construction d'un modèle, cette démarche nous a conduit à créer un document (la *pieuvre électrique*) afin d'aider le décideur à comparer les actions entre-elles (et pouvoir exprimer ses préférences). Ce document s'est construit au fur et à mesure que le problème de décision se dessinait par l'interaction dans l'équipe, et, au delà du problème d'instrumentation en soit est utile au dialogue entre différentes parties prenantes à l'activité de l'entreprise. Cela soulève l'importance (*a minima*) du dialogue entre le décideur et l'analyste durant le processus d'aide à la décision.

Conclusion

L'aide à la décision pour les entreprises industrielles inscrites dans une démarche de développement durable que nous proposons s'adresse au décideur humain. Ce contexte est très complexe à appréhender et le meilleur « outil » pour y parvenir reste son expertise. Notre but était de définir une approche afin de supporter le décideur humain dont la responsabilité est engagée devant les besoins de son entreprise et les enjeux du DD.

Pour comprendre le contexte, nous avons adopté le point de vue de l'amélioration de la performance industrielle qui est aujourd'hui, selon nous, synonyme de DD. La clé des démarches d'amélioration industrielles (représentées à travers le cycle PDCA) est le traitement de l'information afin de piloter les actions d'amélioration. Ce traitement est assuré par un décideur humain qui est confronté à de l'information de plus en plus complexe et se retrouve en difficulté.

Les approches MCDA ont pour but d'aider le décideur humain à adopter une démarche rigoureuse dans le traitement d'une information complexe. Parmi les différentes méthodes MCDA, certaines répondent mieux aux principes et difficultés du DD et de l'entreprise. La méthode ACUTA est celle que nous avons choisi pour aider le décideur.

Nous proposons d'apporter au décideur qui pilote ses actions d'amélioration à travers des cycles PDCA une aide par un processus MCDA dans une vision constructive de l'aide à la décision.

Pour traiter des données imprécises dans le problème de décision, nous avons développé une méthodologie fondée sur ACUTA pour relier une quantification de l'imprécision avec la robustesse du résultat et fournir cette information au décideur.

Pour considérer l'aspect pratique d'une action à mettre en œuvre, nous avons développé la notion de faisabilité (pratique) d'une action comme information complémentaire à l'information d'utilité (stratégique) d'une action.

Enfin, nous présentons l'application de cette proposition sur le problème de choix des équipements à instrumenter dans le cadre d'un système de management de l'énergie selon les principes de l'ISO 50001 pour l'entreprise aVP. Cette application a produit de l'information utile au décideur pour choisir une instrumentation et conforter son choix, à travers l'identification des critères du problème, leur importance relative pour le décideur, l'impact de l'imprécision sur un des critères et le compromis entre utilité et faisabilité. Le processus d'instrumentation du site d'aVP étant pas à pas, ces résultats sont réutilisables pour la suite de leur démarche.

Les contributions apportées par ce travail de thèse ouvrent différentes perspectives.

L'approche qui consiste à enrichir le cycle PDCA avec un processus MCDA fondé sur ACUTA, et son application concrète sur le terrain industriel de aVP, est intéressante dans l'idée d'établir un standard générique pour aider les décideurs industriels à proposer des actions d'amélioration de la performance dans un DD. Il s'agirait de formaliser, pour une démarche d'amélioration industrielle, le déploiement d'une méthode MCDA dans les plani-

fications et standards de l'entreprise. Une difficulté majeure pour un standard générique est l'importance des contextes spécifiques de l'entreprise concernée, de l'environnement (au sens large) de l'entreprise, de la problématique industrielle et du couple décideur/analyste qui influent fortement sur la construction d'une prise de décision.

La méthodologie développée pour intégrer la prise en compte de l'imprécision sur la robustesse de relations de préférence est fondée sur des hypothèses simplificatrices, notamment :

- un seul critère est affecté par l'imprécision ;
- le modèle est appris sans tenir compte de l'imprécision.

Pour se rapprocher d'une prise en compte de l'imprécision plus satisfaisante, il faudrait pouvoir traiter la relation entre la robustesse de relations de préférences et l'imprécision sur plusieurs critères à la fois. Pour apprendre le modèle tout en tenant compte de l'imprécision, dans l'esprit de notre contribution où il n'existe pas de référent historique, il faudrait résoudre des problèmes non linéaires sur lesquelles nous avons moins d'expertise.

La faisabilité que nous définissons ici, est encore au stade de développement et son positionnement (en terme d'information de décision) par rapport à l'utilité sont à élaborer.

Annexe A

Article	Méthode	Pb de décision	Pb Industriel
[Bititci 2001]	AHP	Ranking	Prod./ Perf.
[Korpela 2001b]	AHP	Designing	SC
[Pavić 1991]	PROMETHEE	Ranking	SC
[Al-Harbi 2001]	AHP	Ranking	Qual.
[Kim 1997]	TOPSIS	Designing	Perf.
[Kengpol 2001]	AHP	Designing	Amélio.
[Rabelo 2007]	AHP	Ranking	SC
[Wang 2004]	AHP	Ranking	SC
[Scott 2014]	AHP	Optimizing	SC
[Liu 2005]	AHP	Ranking	SC
[Korpela 1999]	AHP	Optimizing	SC
[Lolli 2014]	AHP	Sorting	Inv.
[Dey 1999]	AHP	Optimizing	Amélio.
[Al Khalil 2002]	AHP	Ranking	Amélio./ Perf.
[Mahdi 2005]	AHP	Ranking	Amélio./ Perf.
[Alidi 1996]	AHP	Ranking	Perf.
[Gürbüz 2012]	AHP / MACBETH	Ranking	SC
[Lauras 2010]	MACBETH	Sorting	Perf.
[Khalili 2013]	ELECTRE	Ranking	Envir.
[Chareonsuk 1997]	PROMETHEE	Ranking	Amélio.
[Yang 2011]	Rough Set	Descripting	Perf./ Envir.
[Wang 2012]	AHP	Choosing	SC
[Kinra 2008]	AHP	Ranking	SC/ Envir.
[Korpela 2001a]	AHP	Ranking	SC
[Darmawan 2014]	AHP	Descripting	SC/ Envir.
[Govindan 2014]	AHP	Ranking	SC/ Envir.
[Amid 2011]	AHP	Optimizing	SC
[Korpela 2002]	AHP	Optimizing	Prod./ SC
[Mafakheri 2011]	AHP	Ranking	SC
[Yan 2008]	AHP	Sorting	SC
[Sarkis 2012]	AHP	Ranking	Envir.

Tableau 11 – Etat de l'art-partie 1

Article	Méthode	Pb de décision	Pb Industriel
[Wu 2006]	AHP	Choosing	SC
[Alvarez-Rodríguez 2014]	AHP	Ranking	Qual.
[Naesens 2009]	AHP	Ranking	SC
[Borchardt 2011]	AHP	Designing	Envir.
[Jakhar 2015]	AHP	Optimizing	SC/ Perf.
[Jia 2014]	AHP	Descripting	Envir./ Prod./ Amélio.
[Liu 2013]	AHP	Descripting	Perf.
[Zeng 2007]	AHP	Descripting	Perf.
[Bertolini 2006]	AHP	Ranking	Perf./ Qual.
[Khazaeni 2012]	AHP	Ranking	Perf.
[Liu 2011]	ELECTRE	Ranking	SC
[Sevkli 2007]	AHP	Choosing	SC
[Chan 2008]	AHP	Choosing	SC
[Zeydan 2009]	TOPSIS	Descripting	Perf.
[Eraslan 2007]	AHP	Descritping	Perf.
[Yakovleva 2012]	AHP	Descripting	Perf./ SC
[Yurdakul* 2005]	AHP	Descripting	Perf.
[Varajão 2013]	AHP	Choosing	Amélio.
[Cabral 2012]	AHP	Choosing	Amélio./ Envir.
[Ramesh 2012]	AHP	Choosing	Amélio./ Perf.
[Huang* 2005]	Rough Set	Sorting	Amélio.
[Singh 2006]	AHP	Choosing	Amélio.

Tableau 12 – Etat de l'art-partie 2

Annexe B

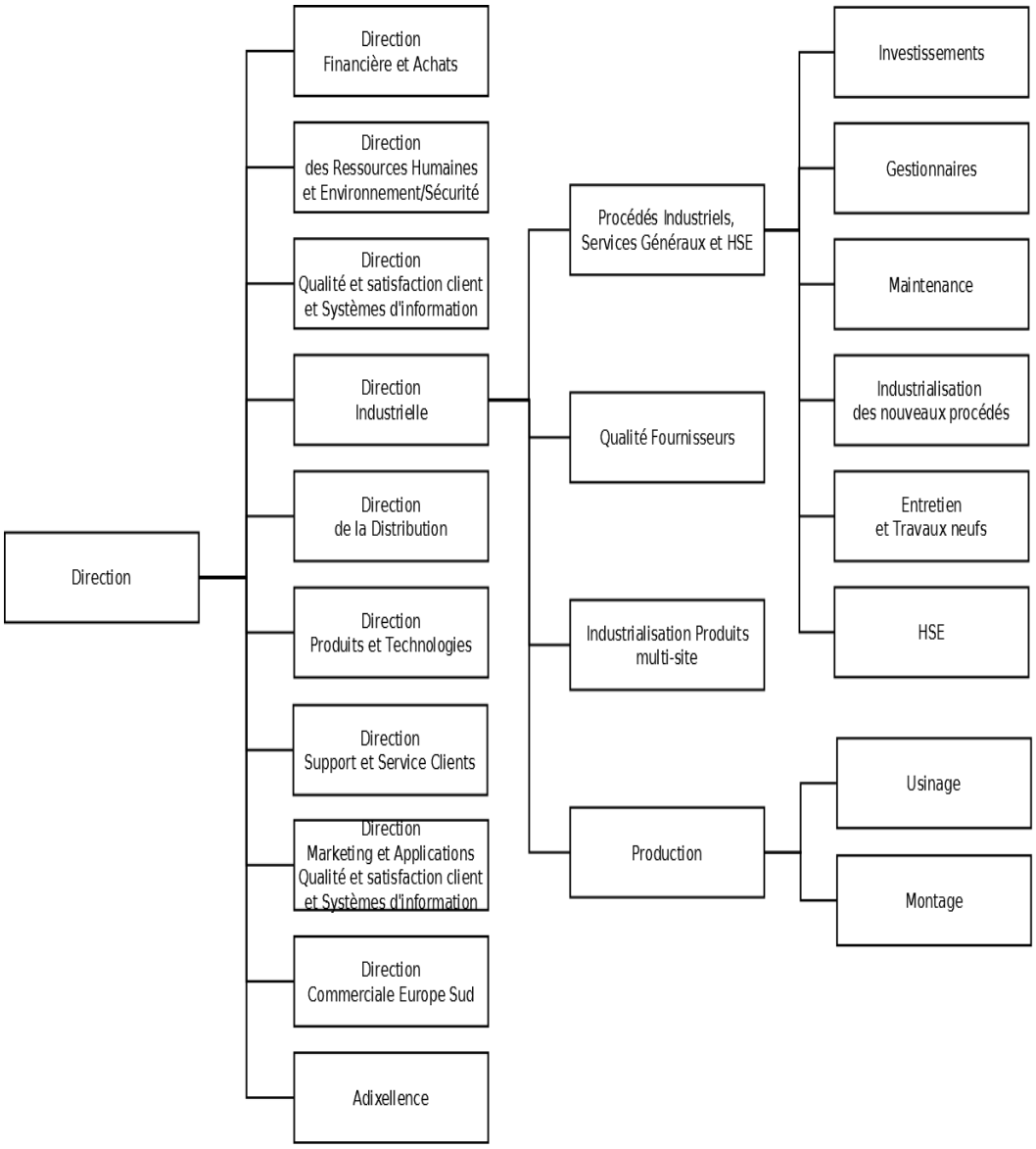

FIGURE 27 – Organigramme de aVP (déployé à partir de la Direction Industrielle)

Annexe C

A partir des informations dont elle dispose, aVP peut établir un profil de sa consommation électrique générale. En effet l'archivage des données est tel que les informations sur la consommation électrique sont horodatées, ce qui autorise une plus grande liberté de traitement de ces données qu'un simple archivage chronologique.

Par exemple, à l'aide de ces données il est possible de procéder à une analyse des consommations et puissances électriques selon différents points de vue temporels (heure par heure, jour par jour, tous les lundis, les mois d'hiver, etc.). Ceci permet d'établir différents profils selon les informations cherchées par l'entreprise. Un exemple de profil de consommation électrique réalisé par nos soins sur les données des années 2013 et 2014 est présenté en figure 28.

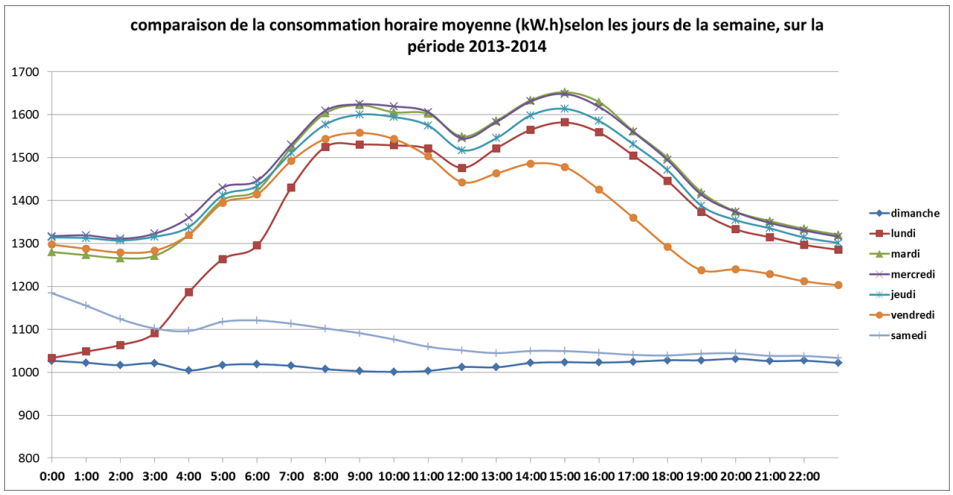

FIGURE 28 – Profil de la consommation électrique Générale de aVP selon les heures et les jours de la semaine.

A la lecture de ce profil, l'activité de l'entreprise transparait, comme par exemple :

- la reprise de l'activité le lundi matin, le *pic* d'activité hebdomadaire des mardi, mercredi et jeudi, la baisse de l'activité du vendredi après-midi jusqu'au samedi matin et le *fonctionnement de fond* du WE.
- les pics d'activité du matin (entre 8h et 10h) et de l'après-midi (entre 14h et 16h) et le creux de la pause midi sont cohérents avec le planning des heures de travail.

Cette information a porté l'attention sur la question de la planification, la programmation et du déroulement des mises en veille des équipements pour le WE en raison de l'asymétrie entre le comportement de la consommation énergétique du dimanche au lundi (*a priori* plus efficace) par rapport au comportement du vendredi au samedi.

Le graphique en figure 28 est construit à partir des mêmes archives de données que celles utilisées pour construire le graphique en figure 4.7. L'information qui en est extraite est plus facilement accessible. Les pics de consommation et les variations journalières sont cohérents avec l'activité d'une entreprise humaine, ce qui ne « saute pas aux yeux » avec un graphique classique.

Annexe D

Le suivi de la consommation électrique de la machine à laver est illustré par les figures 29 (état des lieux) et 30 (données traitées par nos soins).

Le passage du graphique 29 au graphique 30 a été réalisé comme suit :

- agrégation des consommations toutes les 10 minutes en les sommant par tranche horaire correspondante (par exemple, toutes les consommations enregistrées entre 2 :00 :00 et 2 :59 :59 ont été sommées pour produire la consommation sur la tranche horaire « 2 :00 ») ; l'idée est de ne pas s'encombrer avec plus d'information que nécessaire ;
- discrimination des consommations en fonction du jour pour distinguer : les consommations durant les jours de fermeture, les jours de WE et les jours ouvrés ; l'idée est de pouvoir identifier aisément les WE et les jours de fermeture (où la machine n'est pas censée fonctionner) ;
- discrimination des consommations en journée ouvrée en fonction de la tranche horaire : horaires de chauffe de la machine, horaires de travail des utilisateurs et horaires en dehors de la journée de travail ; l'idée est de pouvoir identifier les consommations en fonction de l'activité durant la journée ;
- agrégation des consommations horaires par jour ; l'idée est de visualiser la variation de la consommation de la machine sur une période suffisamment longue pour se figurer l'impact d'un dysfonctionnement éventuel.

A la lecture de ce suivi détaillé de la consommation de la machine transparait :

- des périodes de consommation anormales certains WE alors que la machine n'est pas utilisée,
- des périodes de consommation anormales certains soirs alors que la machine n'est pas utilisée,
- une surconsommation importante durant ces périodes de consommations anormales en comparaison avec les jours/semaines où il n'y a pas d'anomalie.

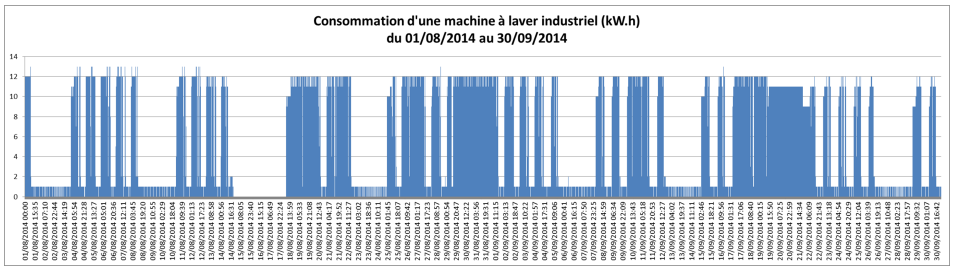

FIGURE 29 – Graphique directement extrait des données disponibles

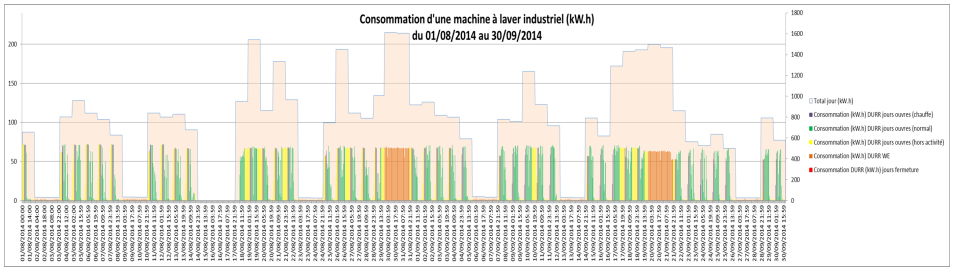

FIGURE 30 – Graphique réalisé après un traitement des données disponibles

Ce suivi a permis d'alerter immédiatement le responsable sur un dysfonctionnement notable vraisemblablement imputable à la mise en veille/arrêt de la machine. Pour appréhender l'ampleur et l'importance du dysfonctionnement les données collectées puis traitées sur la consommation électrique ont permis de le quantifier après identification visuelle de semaine « bonnes » et « mauvaise » en fonction du respect du planning de l'activité concernant cette machine à laver industrielle (voir figure 31).

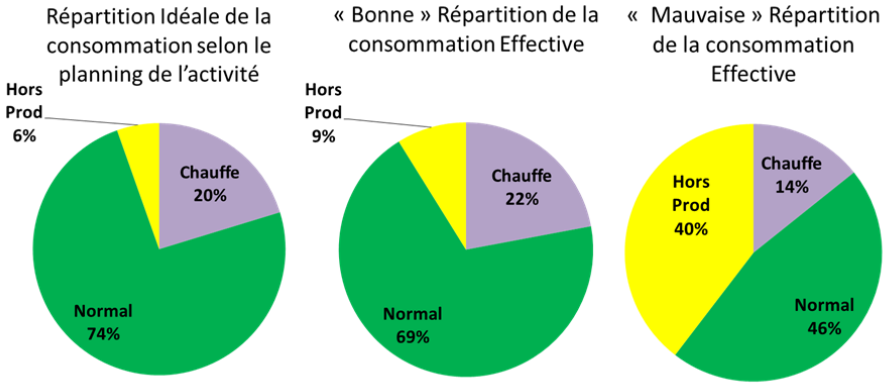

FIGURE 31 – Comparaison de la répartition de la consommation électrique entre l'idéal et la pratique

La consommation horaire de la machine durant les dysfonctionnements étant significativement plus élevée (de 60 à 70 kW.h par heure) que durant les phases d'activité normales (environ 50 kW.h pat heure) où le personnel utilise la machine, le contrôle du respect des consignes de mise en veille étant positif et l'expertise technologique concernant la machine venant à l'appui, les signes pointent vers un problème de la programmation de l'automate de mise en veille.

Le coût de ces dysfonctionnements est tel que sur une journée, un dysfonctionnement durant la nuit coute environ 50 € et un dysfonctionnement durant le WE coute environ 300 € sur la durée du WE. Ainsi, en raison du surcout économique et environnemental (gaspillage à réduire) un technicien de la société qui a vendu cette machine à laver à aVP a été contacté pour corriger la programmation de l'automate de mise en veille.

Ce graphique a permis de détecter des anomalies et des gisements d'économie réelle (c'est-à-dire qui ne dégrade en rien l'activité ou le confort au travail) et d'enclencher un plan d'action pour corriger ces anomalies.

Publications associées à la thèse

Conférences internationales associées aux travaux de thèse

[Rizzon 2016] Rizzon B., Clivillé V., Galichet S., *Aide à la décision multicritère dans un système de management de l'énergie*, Actes des 83èmes journées de l'Euro Working Group MCDA - 83èmes journées de l'Euro Working Group MCDA, Barcelona, Espagne, mars 2016.

[Rizzon 2015b] Rizzon B., Clivillé V., Galichet S., Ochalek P., Ratajczak E., *Decision Problem of Instrumentation in a Company involved in ISO 50001*, Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM 2015), Seville, Spain, October 2015, pp. 409–416.

[Clivillé 2015b] Clivillé V., Greco S., Corrente S., Rizzon B., *Feasible Optimization*, 27th European Conference on Operational Research (EURO 2015), Glasgow, Royaume Uni, Juillet 2015.

[Clivillé 2015a] Clivillé V., Greco S., Corrente S., Rizzon B., *Feasible Optimization*, 81èmes journées de l'Euro Working Group MCDA, Annecy le Vieux, France, Mars 2015.

[Rizzon 2014b] Rizzon B., Clivillé V., Galichet S., *Robustness Threshold Methodology for Multicriteria based Ranking using Imprecise Data*, IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (MCDM - SSCI 2014), Orlando, Floride, USA, Décembre 2014.

[Rizzon 2014a] Rizzon B., Clivillé V., Galichet S., *Aide à la décision robuste dans une démarche de développement durable*, Actes des 79èmes journées de l'Euro Working Group MCDA - 79èmes journées de l'Euro Working Group MCDA, Athènes, Grèce, Avril 2014.

[Rizzon 2013b] Rizzon B., Clivillé V., Galichet S., *Aide à la décision pour les entreprises industrielles inscrites dans une démarche de développement durable*, Résumés/Abstracts – 78èmes journées de l'Euro Working Group MCDA, Catane, Italie, Octobre 2013.

Conférences nationales et journées groupes de recherche

[Rizzon 2015a] Rizzon B., *Aide à la décision pour les entreprises industrielles inscrites dans une démarche de développement durable*, 21eme journées STP du GDR-MACS, Nantes, France, Novembre 2015.

[Rizzon 2013a] Rizzon B., Clivillé V., Galichet S, *Aide à la décision pour les entreprises industrielles inscrites dans une démarche de développement durable*, 18eme journées STP du GDR-MACS, St-Etienne, France, Octobre 2013.

[Rizzon 2013c] Rizzon B., Clivillé V., Galichet S., *Besoins pour l'aide à la décision pour les entreprises inscrites dans des démarches de développement durable*, Actes du 14ième congrès annuel de la Société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF 2013), Troyes, France, Février 2013.

Bibliographie

[AFITEP 1998] Livres AFITEP. *Management de projet : principes et pratique*. AFNOR Gestion, vol. 2, 1998. (Cité à la page 9.)

[Aguilar-Saven 2004] Ruth Sara Aguilar-Saven. *Business process modelling : Review and framework*. International Journal of production economics, vol. 90, no. 2, pages 129–149, 2004. (Cité à la page 23.)

[Al-Harbi 2001] Kamal M Al-Subhi Al-Harbi. *Application of the AHP in project management*. International journal of project management, vol. 19, no. 1, pages 19–27, 2001. (Cité à la page 147.)

[Al Khalil 2002] Mohammed I Al Khalil. *Selecting the appropriate project delivery method using AHP*. International journal of project management, vol. 20, no. 6, pages 469–474, 2002. (Cité à la page 147.)

[Alidi 1996] Abdulaziz S Alidi. *Use of the analytic hierarchy process to measure the initial viability of industrial projects*. International Journal of Project Management, vol. 14, no. 4, pages 205–208, 1996. (Cité à la page 147.)

[Alvarez-Rodríguez 2014] Jose María Alvarez-Rodríguez, José Emilio Labra-Gayo and Patricia Ordoñez de Pablos. *New trends on e-Procurement applying semantic technologies : Current status and future challenges*. Computers in Industry, vol. 65, no. 5, pages 800–820, 2014. (Cité à la page 148.)

[Amid 2011] A Amid, SH Ghodsypour and Ch O'Brien. *A weighted max–min model for fuzzy multi-objective supplier selection in a supply chain*. International Journal of Production Economics, vol. 131, no. 1, pages 139–145, 2011. (Cité à la page 147.)

[Angilella 2012] Silvia Angilella, Salvatore Corrente and Salvatore Greco. *SMAA-Choquet : Stochastic multicriteria acceptability analysis for the Choquet integral*. In Advances in Computational Intelligence, pages 248–257. Springer, 2012. (Cité aux pages 54 and 63.)

[Anthony 1965] R. N. Anthony. *Planning and control systems : a framework for analysis*. 1965. (Cité à la page 21.)

[API] *APICS Supply Chain Council advances supply chains through research, benchmarking, and publications.* http://www.apics.org/sites/apics-supply-chain-council/research-and-publications/research-and-publications. Accessed : 2015-10. (Cité à la page 10.)

[Askham 2012] C. Askham, A. L. Gade and O. J. Hanssen. *Combining REACH, environmental and economic performance indicators for strategic sustainable product development*. Journal of Cleaner Production, 2012. (Cité à la page 12.)

[Azapagic 2000] A. Azapagic and S. Perdan. *Indicators of sustainable development for industry : a general framework*. Process Safety and Environmental Protection, vol. 78, no. 4, pages 243–261, 2000. (Cité aux pages 13 and 14.)

[Bana E Costa 1997] C. A. Bana E Costa and J-C. Vansnick. *Applications of the MACBETH approach in the framework of an additive aggregation model*. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, vol. 6, no. 2, pages 107–114, 1997. (Cité à la page 51.)

[Bana E Costa 2005] Carlos A Bana E Costa, Jean-Marie De Corte, Jean-Claude Vansnick*et al.* On the mathematical foundation of macbeth. Springer, 2005. (Cité à la page 51.)

[Baumgartner 2010] R. J. Baumgartner and D. Ebner. *Corporate sustainability strategies : Sustainability profiles and maturity levels*. Sustainable Development, vol. 18, no. 2, pages 76–89, 2010. (Cité à la page 13.)

[Bell 1988] David E Bell, Howard Raiffa and Amos Tversky. Decision making : Descriptive, normative, and prescriptive interactions. Cambridge University Press, 1988. (Cité à la page 39.)

[Belton 2002] Valerie Belton and Theodor Stewart. Multiple criteria decision analysis : an integrated approach. Springer Science & Business Media, 2002. (Cité aux pages 41, 60 and 69.)

[Berliner 1988] Callie Berliner and James A Brimson. Cost management for today's advanced manufacturing : The cam-i conceptual design. Harvard Business School Press, 1988. (Cité aux pages 9 and 23.)

[Berrah 1997] L.A. Berrah. *Une Approche d'Evaluation de la Performance Industrielle : Modèle d'Indicateur et Techniques Floues pour un Pilotage Réactif*. PhD thesis, 1997. (Cité aux pages 11, 21 and 24.)

[Berrah 2001] Lamia Berrah, Vincent Clivillé, Mounira Harzallah, Alain Haurat and François Vernadat. Petra : un guide méthodologique pour une démarche de réorganisation industriellle. LLP, 2001. (Cité aux pages 8 and 11.)

[Bertolini 2006] M Bertolini, M Braglia and G Carmignani. *Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract*. International Journal of Project Management, vol. 24, no. 5, pages 422–430, 2006. (Cité à la page 148.)

[Bititci 1995] U. S. Bititci. *Modelling of performance measurement systems in manufacturing enterprises*. International Journal of Production Economics, vol. 42, no. 2, pages 137–147, 1995. (Cité à la page 11.)

[Bititci 2001] Umit S Bititci, P Suwignjo and AS Carrie. *Strategy management through quantitative modelling of performance measurement systems*. International Journal of production economics, vol. 69, no. 1, pages 15–22, 2001. (Cité à la page 147.)

[Bitton 1990] Maurice Bitton. *ECOGRAI : Méthode de conception et d'implantation de systèmes de mesure de performances pour organisations industrielles*. PhD thesis, Bordeaux 1, 1990. (Cité aux pages 11, 21 and 25.)

[Bond 1999] TC Bond. *The role of performance measurement in continuous improvement*. International Journal of Operations & Production Management, vol. 19, no. 12, pages 1318–1334, 1999. (Cité à la page 11.)

[Boons 2013] F. Boons, C. Montalvo, J. Quist and M. Wagner. *Sustainable innovation, business models and economic performance : an overview*. Journal of Cleaner Production, vol. 45, no. 0, pages 1 – 8, 2013. (Cité à la page 31.)

[Borchardt 2011] Miriam Borchardt, Marcos H Wendt, Giancarlo M Pereira and Miguel A Sellitto. *Redesign of a component based on ecodesign practices : environmental impact and cost reduction achievements*. Journal of Cleaner Production, vol. 19, no. 1, pages 49–57, 2011. (Cité à la page 148.)

[Bouchery 2012] Yann Bouchery, Asma Ghaffari, Zied Jemai and Yves Dallery. *Including sustainability criteria into inventory models*. European Journal of Operational Research, vol. 222, no. 2, pages 229–240, 2012. (Cité à la page 57.)

[Boucly 1988] Francis Boucly. Maintenance : les coûts de la non-efficacité des équipements. Association française de normalisation, 1988. (Cité à la page 9.)

[Bouquin 2014] H.. Bouquin and C. Kuszla. *Le contrôle de gestion*. PUF, page 598, 2014. (Cité à la page 21.)

[Bous 2010] G. Bous, P. Fortemps, F. Glineur and M. Pirlot. *ACUTA : A novel method for eliciting additive value functions on the basis of holistic preference statements*. European Journal of Operational Research, vol. 206, no. 2, pages 435–444, 2010. (Cité aux pages 62, 63 and 83.)

[Bouyssou 2000] Denis Bouyssou, Thierry Marchant, Marc Pirlot, Patrice Perny, Alexis Tsoukias and Philippe Vincke. *Evaluation and decision models : a critical perspective. International Series in Operations Research & Management Science*, 2000. (Cité à la page 39.)

[Brans 2005] Jean-Pierre Brans and Bertrand Mareschal. *PROMETHEE methods*. In Multiple criteria decision analysis : state of the art surveys, pages 163–186. Springer, 2005. (Cité à la page 49.)

[Brilius 2010] P. Brilius. *Dynamic model of dependancies between economic crisis and corporate social responsibility contribution to sustainable development*. Economics and Management, no. 15, pages 422–429, 2010. (Cité à la page 13.)

[Brimson 1994] James A Brimson and John Antos. Activity-based management : for service industries, government entities, and nonprofit organizations. Wiley, 1994. (Cité à la page 10.)

[Cabral 2012] Izunildo Cabral, Antonio Grilo and Virgílio Cruz-Machado. *A decision-making model for lean, agile, resilient and green supply chain management*. International Journal of Production Research, vol. 50, no. 17, pages 4830–4845, 2012. (Cité à la page 148.)

[Cezar Lucato 2014] Wagner Cezar Lucato, Felipe Araujo Calarge, Mauro Loureiro Junior and Robisom Damasceno Calado. *Performance evaluation of lean manufacturing implementation in Brazil*. International Journal of Productivity and Performance Management, vol. 63, no. 5, pages 529–549, 2014. (Cité à la page 27.)

[Chan 2008] Felix TS Chan, N Kumar, MK Tiwari, HCW Lau and KL Choy. *Global supplier selection : a fuzzy-AHP approach*. International Journal of Production Research, vol. 46, no. 14, pages 3825–3857, 2008. (Cité à la page 148.)

[Chandler 1977] Alfred D Chandler. *The Visible Hand : The Managerial Revolution in American BusinessHarvard Univ*. Press, Cambridge, MA, 1977. (Cité aux pages 8 and 24.)

[Chareonsuk 1997] Chaichan Chareonsuk, Nagen Nagarur and Mario T Tabucanon. *A multicriteria approach to the selection of preventive maintenance intervals*. International Journal of Production Economics, vol. 49, no. 1, pages 55–64, 1997. (Cité à la page 147.)

[Cliville 2004] V. Cliville. *Approche systémique et méthode multicritère pour la définition d 'un système d 'indicateurs de performance*. PhD thesis, Université de Savoie, 2004. (Cité à la page 29.)

[Clivillé 2007] V. Clivillé, L. Berrah and G. Mauris. *Quantitative expression and aggregation of performance measurements based on the MACBETH multi-criteria method*. International Journal of Production economics, vol. 105, no. 1, pages 171–189, 2007. (Cité aux pages 25 and 54.)

[Clivillé 2015a] Vincent Clivillé, Salvatore Greco, Corrente Salvatore and Bastien Rizzon. *Feasible Optimization*. In 81èmes journées de l'Euro Working Group MCDA, Annecy le Vieux, France, Mars, 2015. (Cité à la page 88.)

[Clivillé 2015b] Vincent Clivillé, Salvatore Greco, Corrente Salvatore and Bastien Rizzon. *Feasible Optimization*. In 27th European Conference on Operational Research (EURO 2015), Glasgow, Royaume Uni, Juillet, 2015. (Cité à la page 88.)

[Cook 2001] W. D. Cook and M. Hababou. *Sales performance measurement in bank branches*. Omega, vol. 29, no. 4, pages 299–307, 2001. (Cité à la page 25.)

[COP] *Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015. Part one : Proceedings.* `http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10.pdf`. Accessed : 2016-02. (Cité à la page 13.)

[Corrente 2012] S. Corrente, S. Greco and R. Slowinski. *Robust Ordinal Regression in case of Imprecise Evaluations*. arXiv preprint arXiv :1206.6317, 2012. (Cité à la page 82.)

[Corrente 2013] Salvatore Corrente, Salvatore Greco, Milosz Kadzinski and Roman Slowinski. *Robust ordinal regression in preference learning and ranking*. Machine Learning, vol. 93, pages 381–422, 2013. (Cité à la page 80.)

[Cross 1988] Kelvin F Cross and Richard L Lynch. *The "SMART" way to define and sustain success*. National Productivity Review, vol. 8, no. 1, pages 23–33, 1988. (Cité à la page 9.)

[Darmawan 2014] Muhammad Arif Darmawan, Muhammad Panji Islam Fajar Putra, Bangkit Wigunaet *al. Value chain analysis for green productivity improvement in the natural rubber supply chain : a case study*. Journal of Cleaner Production, vol. 85, pages 201–211, 2014. (Cité à la page 147.)

[Daub 2005] C-H. Daub and R Ergenzinger. *Enabling sustainable management through a new multi-disciplinary concept of customer satisfaction*. European Journal of Marketing, vol. 39, no. 9/10, pages 998–1012, 2005. (Cité à la page 17.)

[Delafollie 1991] Gérard Delafollie. Analyse de la valeur. Hachette, 1991. (Cité à la page 9.)

[Deming 1982] William Edwards Deming. Quality, productivity, and competitive position. Massachusetts Institute of Technology Center for Advanced En, 1982. (Cité à la page 9.)

[Denoeux 2009] T. Denoeux. *Extending stochastic ordering to belief functions on the real line*. Information Sciences, vol. 179, pages 1362–1376, 2009. (Cité à la page 79.)

[Dey 1999] Prasanta Kumar Dey. *Process re-engineering for effective implementation of projects*. International Journal of Project Management, vol. 17, no. 3, pages 147–159, 1999. (Cité à la page 147.)

[Dias 2003] Luis C Dias and Alexis Tsoukiàs. *On the constructive and other approaches in decision aiding*. In Proceedings of the 57th meeting of the EURO MCDA working group. to appear, 2003. (Cité aux pages 39 and 40.)

[Div] *Diviz-Decision Deck*. `http://www.decision-deck.org/diviz/`. Accessed : 2015-03. (Cité aux pages 49, 63, 75 and 76.)

[Dombrowski 2014] U Dombrowski and T Mielke. *Lean Leadership–15 Rules for a Sustainable Lean Implementation*. Procedia CIRP, vol. 17, pages 565–570, 2014. (Cité à la page 11.)

[Doumpos 2014] Michael Doumpos and Constantin Zopounidis. *The Robustness Concern in Preference Disaggregation Approaches for Decision Aiding : An Overview*. In

Optimization in Science and Engineering, pages 157–177. Springer, 2014. (Cité à la page 58.)

[Ebner 2006] D. Ebner and R.J. Baumgartner. *The relationship between Sustainable Development and Corporate Social Responsibility*. Corporate Responsibility Research Conference, 4th-5th September, Dublin, 2006. (Cité aux pages 13, 15 and 16.)

[Eden 2004] Colin Eden. *Analyzing cognitive maps to help structure issues or problems*. European Journal of Operational Research, vol. 159, no. 3, pages 673–686, 2004. (Cité à la page 20.)

[El-Kafafi 2008] S. El-Kafafi. *Building a Sustainable Mindset*. Environmental Management, Sustainable Development and Human Health, page 207, 2008. (Cité à la page 31.)

[Engel 2005] Ellen Engel. *Discussion of does the market value financial expertise on audit committees of boards of directors ?* Journal of Accounting Research, pages 195–204, 2005. (Cité aux pages 21 and 22.)

[Eom 2006] S. Eom and E. Kim. *A survey of decision support system applications (1995–2001)*. Journal of the Operational Research Society, vol. 57, no. 11, pages 1264–1278, 2006. (Cité à la page 34.)

[Eraslan 2007] E Eraslan and M Kurt. *Fuzzy multi-criteria analysis approach for the evaluation and classification of cognitive performance factors in flexible manufacturing systems*. International journal of production research, vol. 45, no. 5, pages 1101–1118, 2007. (Cité à la page 148.)

[Evans 2012] James Evans and William Lindsay. Managing for quality and performance excellence. Cengage Learning, 2012. (Cité à la page 10.)

[Figueira 2005a] José Figueira, Salvatore Greco and Matthias Ehrgott. Multiple criteria decision analysis : state of the art surveys. Springer, 2005. (Cité à la page 34.)

[Figueira 2005b] José Figueira, Vincent Mousseau and Bernard Roy. *ELECTRE methods*. In Multiple criteria decision analysis : State of the art surveys, pages 133–153. Springer, 2005. (Cité à la page 48.)

[Figueira 2009] J. R. Figueira, S. Greco and R. Słowiński. *Building a set of additive value functions representing a reference preorder and intensities of preference : GRIP method*. European Journal of Operational Research, vol. 195, no. 2, pages 460–486, 2009. (Cité à la page 64.)

[Forrester 1994] Jay W Forrester. *System dynamics, systems thinking, and soft OR*. System Dynamics Review, vol. 10, no. 2-3, pages 245–256, 1994. (Cité à la page 20.)

[Fortuin 1988] L. Fortuin. *Performance indicators — why, where and how ?* European Journal of Operational Research, vol. 34, no. 1, pages 1–9, 1988. (Cité à la page 9.)

[Franks 2014] Daniel M Franks, Rachel Davis, Anthony J Bebbington, Saleem H Ali, Deanna Kemp and Martin Scurrah. *Conflict translates environmental and social risk into business costs*. Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 111, no. 21, pages 7576–7581, 2014. (Cité à la page 11.)

[Freeman 1984] R.E. Freeman*et al.* Strategic management : A stakeholder approach, volume 1. Pitman Boston, 1984. (Cité à la page 12.)

[Gasparatos 2009] A. Gasparatos, M. El-Haram and M. Horner. *The argument against a reductionist approach for measuring sustainable development performance and the need for methodological pluralism*. Accounting Forum, vol. 33, no. 3, pages 45 – 256, 2009. (Cité à la page 31.)

[Gervais 2009] Michel Gervais. *Contrôle de gestion*. 2009. (Cité à la page 24.)

[Ghalayini 1997] Alaa M Ghalayini, James S Noble and Thomas J Crowe. *An integrated dynamic performance measurement system for improving manufacturing competitiveness*. International Journal of production economics, vol. 48, no. 3, pages 207–225, 1997. (Cité à la page 11.)

[Giard 2003] V. Giard. *Gestion de la production et des flux*. 2003. (Cité à la page 25.)

[Gilbreth 1921] Frank Bunker Gilbreth and Lillian Moller Gilbreth. *An Indictment of Stop-Watch Time Study*. Bulletin of the Taylor Society, vol. 6, page 102, 1921. (Cité à la page 8.)

[Globerson 1985] Shlomo Globerson. *Issues in developing a performance criteria system for an organization*. International Journal of production research, vol. 23, no. 4, pages 639–646, 1985. (Cité à la page 9.)

[Goldratt 1986] Eliyahu M Goldratt, Jeff Cox, Eliyahu M Goldratt and Eliyahu M Goldratt. Le but : l'excellence en production. Association française de normalisation, 1986. (Cité à la page 9.)

[Goosen 2012] M.F.A. Goosen. *Environmental management and sustainable development*. Procedia Engineering, vol. 33, no. 0, pages 6 – 13, 2012. (Cité à la page 31.)

[Govindan 2014] Kannan Govindan, Mathiyazhagan Kaliyan, Devika Kannan and AN Haq. *Barriers analysis for green supply chain management implementation in Indian industries using analytic hierarchy process*. International Journal of Production Economics, vol. 147, pages 555–568, 2014. (Cité à la page 147.)

[Govindan 2016] Kannan Govindan and Martin Brandt Jepsen. *ELECTRE : A comprehensive literature review on methodologies and applications*. European Journal of Operational Research, vol. 250, no. 1, pages 1–29, 2016. (Cité à la page 48.)

[Grabisch 1996] Michel Grabisch. *The application of fuzzy integrals in multicriteria decision making*. European journal of operational research, vol. 89, no. 3, pages 445–456, 1996. (Cité à la page 63.)

[Greco 2001] Salvatore Greco, Benedetto Matarazzo and Roman Slowinski. *Rough sets theory for multicriteria decision analysis*. European journal of operational research, vol. 129, no. 1, pages 1–47, 2001. (Cité à la page 53.)

[Greco 2008] S. Greco, V. Mousseau and R. Słowiński. *Ordinal regression revisited : Multiple criteria ranking using a set of additive value functions*. European Journal of Operational Research, vol. 191, no. 2, pages 416–436, 2008. (Cité à la page 63.)

[Greco 2010a] S. Greco, V. Mousseau and R. Słowiński. *Multiple criteria sorting with a set of additive value functions*. European Journal of Operational Research, vol. 207, no. 3, pages 1455–1470, 2010. (Cité à la page 80.)

[Greco 2010b] S. Greco, R. Słowiński, J. R. Figueira and V. Mousseau. *Robust ordinal regression*. In Trends in multiple criteria decision analysis, pages 241–283. Springer, 2010. (Cité aux pages 34 and 80.)

[Greif 1998] M. Greif. L'usine s'affiche. éditions d'Organisation, 1998. (Cité à la page 10.)

[GRI a] *G3.1 Economic Indicator Protocol Set*. https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/G3.1-Guidelines-Incl-Technical-Protocol.pdf. Accessed : 2013-05. (Cité à la page 29.)

[GRI b] *G3.1 Environment Indicator Protocol Set*. https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/G3.1-Guidelines-Incl-Technical-Protocol.pdf. Accessed : 2013-05. (Cité à la page 29.)

[GRI c] *G3.1 Human Rights Indicator Protocol Set*. https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/G3.1-Guidelines-Incl-Technical-Protocol.pdf. Accessed : 2013-05. (Cité à la page 29.)

[GRI d] *G3.1 Labor Indicator Protocol Set*. https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/G3.1-Guidelines-Incl-Technical-Protocol.pdf. Accessed : 2013-05. (Cité à la page 29.)

[GRI e] *G3.1 Product Responsibility Indicator Protocol Set*. https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/G3.1-Guidelines-Incl-Technical-Protocol.pdf. Accessed : 2013-05. (Cité aux pages 29 and 30.)

[GRI f] *G3.1 Reporting Guidelines*. https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/G3.1-Sustainability-Reporting-Guidelines.pdf. Accessed : 2013-05. (Cité à la page 16.)

[GRI g] *G3.1 Society Indicator Protocol Set*. https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/G3.1-Guidelines-Incl-Technical-Protocol.pdf. Accessed : 2013-05. (Cité aux pages 29 and 30.)

[GRI h] *G3.1 Sustainability Reporting Guidelines incl. Technical Protocol.* https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/G3.1-Guidelines-Incl-Technical-Protocol.pdf. Accessed : 2013-05. (Cité à la page 29.)

[GRI i] *GRI G4 GUIDELINES PART 2 IMPLEMENTATION MANUAL.* https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/GRIG4-Part2-Implementation-Manual.pdf. Accessed : 2015-10. (Cité à la page 12.)

[Guitouni 1998] A. Guitouni and J.M. Martel. *Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method*. European Journal of Operational Research, vol. 109, no. 2, pages 501–521, 1998. (Cité à la page 34.)

[Gürbüz 2012] Tuncay Gürbüz, S Emre Alptekin and Gülfem Işıklar Alptekin. *A hybrid MCDM methodology for ERP selection problem with interacting criteria*. Decision Support Systems, vol. 54, no. 1, pages 206–214, 2012. (Cité à la page 147.)

[Hadley 1966] George Hadley and Thomson M Whitin. *Étude et pratique des modèles de stocks*. 1966. (Cité à la page 8.)

[Hammer 1993] Michael Hammer, James Champy and Michel Le Séac'h. Le reengineering : réinventer l'entreprise pour une amélioration spectaculaire de ses performances. Dunod, 1993. (Cité aux pages 10 and 26.)

[Hanssen 1999] O.J. Hanssen. *Sustainable product systems—experiences based on case projects in sustainable product development*. Journal of Cleaner Production, vol. 7, no. 1, pages 27–41, 1999. (Cité à la page 15.)

[Harmon 2015] Paul Harmon. *The scope and evolution of business process management*. In Handbook on Business Process Management 1, pages 37–80. Springer, 2015. (Cité à la page 25.)

[Holweg 2014] Matthias Holweg and Petri Helo. *Defining value chain architectures : Linking strategic value creation to operational supply chain design*. International Journal of Production Economics, vol. 147, pages 230–238, 2014. (Cité à la page 27.)

[Howarth 2006] M. Howarth G. Hadfield. *A sustainable product design model*. Materials and Design, 2006. (Cité à la page 16.)

[Huang* 2005] C-C Huang* and S-H Liu. *A novel approach to lean control for Taiwan-funded enterprises in mainland China*. International Journal of Production Research, vol. 43, no. 12, pages 2553–2575, 2005. (Cité à la page 148.)

[Imai 1986] Masaaki Imai. Kaizen, volume 201. Random House Business Division New York, 1986. (Cité à la page 10.)

[ISO a] *ISO 14000*. http://www.iso.org/iso/fr/home/standards/management-standards/iso14000.htm. Accessed : 2013-05. (Cité à la page 11.)

[ISO b] *ISO 26000*. http://www.iso.org/iso/fr/home/standards/iso26000.htm. Accessed : 2013-05. (Cité aux pages 11, 12, 15 and 16.)

[ISO c] Qualité et systèmes de management iso 9000. éditions AFNOR. (Cité aux pages 10 and 25.)

[ISO d] *Systemes de management de l'energie ; Exigences et recommandations de mise en oeuvre*. https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:50001:ed-1:v1:fr. Accessed : 2015-09. (Cité aux pages 11, 109, 111 and 113.)

[Jacquet-Lagreze 1982] E Jacquet-Lagreze and J. Siskos. *Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method*. European journal of operational research, vol. 10, no. 2, pages 151–164, 1982. (Cité à la page 51.)

[Jacquet-Lagreze 2001] E Jacquet-Lagreze and J. Siskos. *Preference disaggregation : 20 years of experience*. European Journal of Operational Research, vol. 130, no. 2, pages 233–245, 2001. (Cité à la page 58.)

[Jakhar 2015] Suresh Kumar Jakhar. *Performance evaluation and a flow allocation decision model for a sustainable supply chain of an apparel industry*. Journal of Cleaner Production, vol. 87, pages 391–413, 2015. (Cité à la page 148.)

[Jelali 2006] Mohieddine Jelali. *An overview of control performance assessment technology and industrial applications*. Control Engineering Practice, vol. 14, no. 5, pages 441 – 466, 2006. Intelligent Control Systems and Signal Processing {ICONS} 2003 {IFAC} International Conference on Intelligent Control Systems and Signal Processing. (Cité à la page 21.)

[Jia 2014] Li Jia, Yimin Zhang, Liu Tao, Huang Jing and Shengxu Bao. *A methodology for assessing cleaner production in the vanadium extraction industry*. Journal of Cleaner Production, vol. 84, pages 598–605, 2014. (Cité à la page 148.)

[Johnson 1975] H Thomas Johnson. *Management accounting in an early integrated industrial : EI duPont de Nemours Powder Company, 1903-1912*. Business History Review, vol. 49, no. 02, pages 184–204, 1975. (Cité à la page 24.)

[Kadziński 2012] M. Kadziński, S. Greco and R. Słowiński. *Selection of a representative value function in robust multiple criteria ranking and choice*. European Journal of Operational Research, vol. 217, no. 3, pages 541–553, 2012. (Cité à la page 62.)

[Kadziński 2015] Miłosz Kadziński, Roman Słowiński and Salvatore Greco. *Multiple criteria ranking and choice with all compatible minimal cover sets of decision rules*. Knowledge-Based Systems, vol. 89, pages 569–583, 2015. (Cité à la page 53.)

[Kaplan 1992] R. Kaplan and D. P. Norton. *The Balanced Scorecard : Measures that drives performance*. Harvard Business Review, 1992. (Cité aux pages 11 and 28.)

[Kassicieh 1998] Suleiman K Kassicieh and Steven A Yourstone. *Training, performance evaluation, rewards, and TQM implementation success*. Journal of Quality Management, vol. 3, no. 1, pages 25–38, 1998. (Cité à la page 11.)

[Keeney 1976] R. L. Keeney and H. Raiffa. *Decisions with multiple objectives. 1976*. John Wiley&Sons, New York, 1976. (Cité aux pages 34, 38, 49 and 50.)

[Kengpol 2001] Athakorn Kengpol and Christopher O'Brien. *The development of a decision support tool for the selection of advanced technology to achieve rapid product development*. International Journal of Production Economics, vol. 69, no. 2, pages 177–191, 2001. (Cité à la page 147.)

[Khalili 2013] Nasrin R Khalili and Susanna Duecker. *Application of multi-criteria decision analysis in design of sustainable environmental management system framework*. Journal of Cleaner Production, vol. 47, pages 188–198, 2013. (Cité à la page 147.)

[Khazaeni 2012] Garshasb Khazaeni, Mostafa Khanzadi and Abas Afshar. *Fuzzy adaptive decision making model for selection balanced risk allocation*. International Journal of Project Management, vol. 30, no. 4, pages 511–522, 2012. (Cité à la page 148.)

[Kim 1997] Gyutai Kim, Chan S Park and K Paul Yoon. *Identifying investment opportunities for advanced manufacturing systems with comparative-integrated performance measurement*. International Journal of Production Economics, vol. 50, no. 1, pages 23–33, 1997. (Cité à la page 147.)

[Kinra 2008] Aseem Kinra and Herbert Kotzab. *A macro-institutional perspective on supply chain environmental complexity*. International Journal of Production Economics, vol. 115, no. 2, pages 283–295, 2008. (Cité à la page 147.)

[Korpela 1999] Jukka Korpela and Antti Lehmusvaara. *A customer oriented approach to warehouse network evaluation and design*. International Journal of Production Economics, vol. 59, no. 1, pages 135–146, 1999. (Cité à la page 147.)

[Korpela 2001a] Jukka Korpela, Antti Lehmusvaara and Markku Tuominen. *An analytic approach to supply chain development*. International Journal of Production Economics, vol. 71, no. 1, pages 145–155, 2001. (Cité à la page 147.)

[Korpela 2001b] Jukka Korpela, Antti Lehmusvaara and Markku Tuominen. *Customer service based design of the supply chain*. International Journal of Production Economics, vol. 69, no. 2, pages 193–204, 2001. (Cité à la page 147.)

[Korpela 2002] Jukka Korpela, Kalevi Kyläheiko, Antti Lehmusvaara and Markku Tuominen. *An analytic approach to production capacity allocation and supply chain design*. International Journal of Production Economics, vol. 78, no. 2, pages 187–195, 2002. (Cité à la page 147.)

[Krantz 1971] D. H. Krantz, R D. Luce, P. Suppes and A. Tversky. Foundations of measurement : Vol. 1 : Additive and polynomial representations. Academic Press New York, 1971. (Cité à la page 48.)

[Lauras 2010] Matthieu Lauras, Guillaume Marques and Didier Gourc. *Towards a multi-dimensional project performance measurement system*. Decision Support Systems, vol. 48, no. 2, pages 342–353, 2010. (Cité à la page 147.)

[Le Moigne 1990] Jean-Louis Le Moigne. *La modélisation des systèmes complexes*. Paris : Bordas, Dunot, 1990, vol. 1, 1990. (Cité à la page 8.)

[Lee 1993] Hau L Lee and Corey Billington. *Material management in decentralized supply chains*. Operations research, vol. 41, no. 5, pages 835–847, 1993. (Cité à la page 9.)

[Liu 2005] Fuh-Hwa Franklin Liu and Hui Lin Hai. *The voting analytic hierarchy process method for selecting supplier*. International Journal of Production Economics, vol. 97, no. 3, pages 308–317, 2005. (Cité à la page 147.)

[Liu 2011] Peide Liu and Xin Zhang. *Research on the supplier selection of a supply chain based on entropy weight and improved ELECTRE-III method*. International Journal of Production Research, vol. 49, no. 3, pages 637–646, 2011. (Cité à la page 148.)

[Liu 2013] Jialin Liu, Quanxi Li and Yuhan Wang. *Risk analysis in ultra deep scientific drilling project—A fuzzy synthetic evaluation approach*. International Journal of Project Management, vol. 31, no. 3, pages 449–458, 2013. (Cité à la page 148.)

[Lolli 2014] F Lolli, Alessio Ishizaka and R Gamberini. *New AHP-based approaches for multi-criteria inventory classification*. International Journal of Production Economics, vol. 156, pages 62–74, 2014. (Cité à la page 147.)

[Lorino 1991] P. Lorino. Le contrôle de gestion stratégique : la gestion par les activités, volume 1. Dunod, 1991. (Cité à la page 21.)

[Lorino 1996] P. Lorino. Méthodes et pratiques de la performance : le guide du pilotage. Les Éditions d'Organisation, 1996. (Cité aux pages 11 and 28.)

[Mafakheri 2011] Fereshteh Mafakheri, Michele Breton and Ahmed Ghoniem. *Supplier selection-order allocation : a two-stage multiple criteria dynamic programming approach*. International Journal of Production Economics, vol. 132, no. 1, pages 52–57, 2011. (Cité à la page 147.)

[Mahdi 2005] Ibrahim M Mahdi and Khaled Alreshaid. *Decision support system for selecting the proper project delivery method using analytical hierarchy process (AHP)*. International Journal of Project Management, vol. 23, no. 7, pages 564–572, 2005. (Cité à la page 147.)

[Maruta 2012] Rikio Maruta. *Maximizing knowledge work productivity : a time constrained and activity visualized PDCA cycle*. Knowledge and process Management, vol. 19, no. 4, pages 203–214, 2012. (Cité à la page 11.)

[Mélèse 1991] Jacques Mélèse. L'analyse modulaire des systèmes (ams). Les éditions d'organisation, 1991. (Cité à la page 21.)

[Melnyk 2004] Steven A Melnyk, Douglas M Stewart and Morgan Swink. *Metrics and performance measurement in operations management : dealing with the metrics maze*. Journal of Operations Management, vol. 22, no. 3, pages 209–218, 2004. (Cité à la page 25.)

[Montes 2014] Ignacio Montes, Enrique Miranda and Susana Montes. *Stochastic dominance with imprecise information*. Computational Statistics and Data Analysis, vol. 71, pages 868–886, 2014. (Cité à la page 79.)

[Morin 1977] Edgar Morin. *La méthode, Tome 1 : la nature de la nature*. Seuil, Paris, vol. 377, 1977. (Cité à la page 8.)

[Munda 1993] Giuseppe Munda. *Multiple-criteria decision aid : Some epistemological considerations*. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, vol. 2, no. 1, pages 41–55, 1993. (Cité à la page 40.)

[Naesens 2009] Kobe Naesens, Ludo Gelders and Liliane Pintelon. *A swift response framework for measuring the strategic fit for a horizontal collaborative initiative*. International Journal of Production Economics, vol. 121, no. 2, pages 550–561, 2009. (Cité à la page 148.)

[Neely 1995] Andy Neely, Mike Gregory and Ken Platts. *Performance measurement system design : a literature review and research agenda*. International journal of operations & production management, vol. 15, no. 4, pages 80–116, 1995. (Cité à la page 11.)

[Neely 2005] Andy Neely, Mike Gregory and Ken Platts. *Performance measurement system design : a literature review and research agenda*. International journal of operations & production management, vol. 25, no. 12, pages 1228–1263, 2005. (Cité à la page 11.)

[OCD] http://www.oecd.org/fr/sites/strategiedelocdepourlinnovation/definirlinnovation.htm. Accessed : 2015-10. (Cité à la page 11.)

[Omer 2007] A. M. Omer. *Energy, water and sustainable development*. Focus on Sustainable Development Research Advances, Larson, BA.(Eds.). NOVA Science Publishers, Inc., New York, USA, pages 189–205, 2007. (Cité à la page 31.)

[on Environment 1987] [WCED] World Commission on Environment and Development. *Our common future*, 1987. (Cité à la page 13.)

[Ōno 1988] Taiichi Ōno. Toyota production system : beyond large-scale production. Productivity press, 1988. (Cité à la page 10.)

[Ozturk 2011] M. Ozturk, M. Pirlot and A. Tsoukias. *Representing preferences using intervals*. Artificial Intelligence, vol. 175, pages 1194–1222, 2011. (Cité à la page 80.)

[Pavić 1991] Ivan Pavić and Zoran Babić. *The use of the PROMETHEE method in the location choice of a production system*. International journal of production Economics, vol. 23, no. 1, pages 165–174, 1991. (Cité à la page 147.)

[Pawlak 1982] Zdzisław Pawlak. *Rough sets*. International Journal of Computer & Information Sciences, vol. 11, no. 5, pages 341–356, 1982. (Cité à la page 52.)

[Porter 1982] Michael E Porter, Philippe de Lavergne and Georges Sudrie. Choix stratégiques et concurrence : techniques d'analyse des secteurs et de la concurrence dans l'industrie. Economica Paris, 1982. (Cité à la page 9.)

[Pouget 1998] M. Pouget. *Taylor et le Taylorisme, Que sais-je ?* PUF, 1998. (Cité à la page 8.)

[Ptak 2011] Carol Ptak and Chad Smith. Orlicky's material requirements planning 3/e. McGraw Hill Professional, 2011. (Cité à la page 23.)

[Pujo 2002] P Pujo and JP Kieffer. *Concepts fondamentaux du pilotage des systèmes de production*. Fondements du pilotage des systèmes de production, sous la direction de P. Pujo et JP Kieffer, Hermès Science Publications, Paris, 2002. (Cité à la page 21.)

[Rabelo 2007] Luis Rabelo, Hamidreza Eskandari, Tarek Shaalan and Magdy Helal. *Value chain analysis using hybrid simulation and AHP*. International Journal of Production Economics, vol. 105, no. 2, pages 536–547, 2007. (Cité à la page 147.)

[Ramakrishnan 2014] Sivakumar Ramakrishnan and Arivoli Vijayan. *A study on development of cognitive support features in recent ontology visualization tools*. Artificial Intelligence Review, vol. 41, no. 4, pages 595–623, 2014. (Cité à la page 29.)

[Ramesh 2012] Varun Ramesh and Rambabu Kodali. *A decision framework for maximising lean manufacturing performance*. International Journal of Production Research, vol. 50, no. 8, pages 2234–2251, 2012. (Cité à la page 148.)

[Reix 2002] R Reix. *Systèmes d'information et performance de l'entreprise étendue*. F. Rowe (éd.), Faire de la recherche en systèmes d'information. Paris, France : Vuibert, 2002. (Cité à la page 23.)

[Rizzon 2013a] Bastien Rizzon, Vincent Clivillé and Sylvie Galichet. *Aide à la décision pour les entreprises industrielles inscrites dans une démarche de développement durable*. In 18eme journées STP du GDR-MACS, St-Etienne, France, Octobre, 2013. (Cité à la page 7.)

[Rizzon 2013b] Bastien Rizzon, Vincent Clivillé and Sylvie Galichet. *Aide à la décision pour les entreprises industrielles inscrites dans une démarche de développement durable*. In Résumés/Abstracts – 78èmes journées de l'Euro Working Group MCDA, Catane, Italie, Octobre, 2013. (Cité à la page 7.)

[Rizzon 2013c] Bastien Rizzon, Vincent Clivillé and Sylvie Galichet. *Besoins pour l'aide à la décision pour les entreprises inscrites dans des démarches de développement durable*. In Actes du 14ième congrès annuel de la Société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF 2013), Troyes, France, Février, 2013. (Cité à la page 7.)

[Rizzon 2014a] Bastien Rizzon, Vincent Clivillé and Sylvie Galichet. *Aide à la décision robuste dans une démarche de développement durable*. In Actes des 79èmes journées de l'Euro Working Group MCDA - 79èmes journées de l'Euro Working Group MCDA, Athènes, Grèce, Avril, 2014. (Cité à la page 79.)

[Rizzon 2014b] Bastien Rizzon, Vincent Clivillé and Sylvie Galichet. *Robustness Threshold Methodology for Multicriteria based Ranking using Imprecise Data*. In IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (MCDM - SSCI 2014), Orlando, Floride, USA, Décembre, 2014. (Cité à la page 79.)

[Rizzon 2015a] Bastien Rizzon. *Aide à la décision pour les entreprises industrielles inscrites dans une démarche de développement durable*. In 21eme journées STP du GDR-MACS, Nantes, France, Novembre, 2015. (Cité à la page 103.)

[Rizzon 2015b] Bastien Rizzon, Vincent Clivillé, Sylvie Galichet, Pascal Ochalek and Elodie Ratajczak. *Decision Problem of Instrumentation in a Company involved in ISO 50001*. In IESM International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, Seville, Spain, October, pages 409–416, 2015. (Cité à la page 103.)

[Rizzon 2016] Bastien Rizzon, Vincent Clivillé and Sylvie Galichet. *Aide à la décision multicritère dans un système de management de l'énergie*. In Actes des 83èmes journées de l'Euro Working Group MCDA - 83èmes journées de l'Euro Working Group MCDA, Barcelona, Espagne, mars, 2016. (Cité à la page 103.)

[Roy 1991] B. Roy. *The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods*. Theory and decision, vol. 31, no. 1, pages 49–73, 1991. (Cité aux pages 47 and 48.)

[Roy 1996] B. Roy. Multicriteria methodology for decision aiding, volume 12. Springer, 1996. (Cité à la page 34.)

[Roy 2005] B. Roy. *Paradigms and challenges*. In Multiple criteria decision analysis : State of the art surveys, pages 3–24. Springer, 2005. (Cité aux pages 12, 34, 37, 38, 42, 72 and 89.)

[Roy 2010] B. Roy. *Robustness in operational research and decision aiding : A multi-faceted issue*. European Journal of Operational Research, vol. 200, no. 3, pages 629–638, 2010. (Cité à la page 80.)

[Saaty 1977] T. L. Saaty. *A scaling method for priorities in hierarchical structures*. Journal of mathematical psychology, vol. 15, no. 3, pages 234–281, 1977. (Cité à la page 34.)

[Saaty 2005] Thomas L Saaty. *The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making*. In Multiple criteria decision analysis : state of the art surveys, pages 345–405. Springer, 2005. (Cité aux pages 12, 39 and 50.)

[Saghafian 2005] Soroush Saghafian and S Reza Hejazi. *Multi-criteria group decision making using a modified fuzzy TOPSIS procedure*. In Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, 2005 and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, International Conference on, volume 2, pages 215–221. IEEE, 2005. (Cité à la page 52.)

[Sarkis 2012] Joseph Sarkis, Laura M Meade and Adrien R Presley. *Incorporating sustainability into contractor evaluation and team formation in the built environment*. Journal of Cleaner Production, vol. 31, pages 40–53, 2012. (Cité à la page 147.)

[Sauter 2014] Vicki L Sauter. Decision support systems for business intelligence. John Wiley & Sons, 2014. (Cité à la page 25.)

[Savall 1992] Henri Savall and Véronique Zardet. *Le nouveau contrôle de gestion. Méthode des coûts-performances cachés*. 1992. (Cité à la page 10.)

[Schenkerman 1994] Stan Schenkerman. *Avoiding rank reversal in AHP decision-support models*. European Journal of Operational Research, vol. 74, no. 3, pages 407–419, 1994. (Cité à la page 50.)

[Schneiderman 1988] Arthur M Schneiderman. *Setting quality goals*. Quality Progress, vol. 21, no. 4, pages 51–57, 1988. (Cité à la page 9.)

[Scott 2014] James Scott, William Ho, Prasanta K Dey and Srinivas Talluri. *A decision support system for supplier selection and order allocation in stochastic, multi-stakeholder and multi-criteria environments*. International Journal of Production Economics, 2014. (Cité à la page 147.)

[Sevkli 2007] Mehmet Sevkli, SC Lenny Koh, Selim Zaim, Mehmet Demirbag and Ekrem Tatoglu. *An application of data envelopment analytic hierarchy process for supplier selection : a case study of BEKO in Turkey*. International Journal of Production Research, vol. 45, no. 9, pages 1973–2003, 2007. (Cité à la page 148.)

[Singh 2006] RK Singh, S Kumar, AK Choudhury and MK Tiwari. *Lean tool selection in a die casting unit : a fuzzy-based decision support heuristic*. International Journal of Production Research, vol. 44, no. 7, pages 1399–1429, 2006. (Cité à la page 148.)

[Siskos 2005] Yannis Siskos, Evangelos Grigoroudis and Nikolaos F Matsatsinis. *UTA methods*. In Multiple criteria decision analysis : State of the art surveys, pages 297–334. Springer, 2005. (Cité aux pages 59 and 60.)

[Słowiński 2000] Roman Słowiński, Jerzy Stefanowski, Salvatore Greco and Benedetto Matarazzo. *Rough set based processing of inconsistent information in decision analysis*. Control and Cybernetics, vol. 29, no. 1, pages 379–404, 2000. (Cité à la page 53.)

[Spangenberg 2002] J. H. Spangenberg, S. Pfahl and K. Deller. *Towards indicators for institutional sustainability : lessons from an analysis of Agenda 21*. Ecological indicators, vol. 2, no. 1, pages 61–77, 2002. (Cité à la page 13.)

[Spearman 1990] Mark L Spearman, David L Woodruff and Wallace J Hopp. *CONWIP : a pull alternative to kanban*. The International Journal of Production Research, vol. 28, no. 5, pages 879–894, 1990. (Cité à la page 23.)

[Stark 2011] John Stark. Product lifecycle management. Springer, 2011. (Cité à la page 10.)

[Steurer 2005] Reinhard Steurer, Markus E Langer, Astrid Konrad and Andre Martinuzzi. *Corporations, stakeholders and sustainable development I : A theoretical exploration of business–society relations*. Journal of Business Ethics, vol. 61, no. 3, pages 263–281, 2005. (Cité à la page 11.)

[Sullivan 1986] Edward Sullivan. *Optim-linking cost, time, and quality*. Quality Progress, vol. 19, no. 4, pages 52–55, 1986. (Cité à la page 9.)

[Taylor 1911] F.W. Taylor. *Principles of scientific management*. 1911. (Cité à la page 8.)

[Tennant 2003] Charles Tennant and Paul Roberts. *The creation and application of a self-assessment process for new product introduction*. International journal of project management, vol. 21, no. 2, pages 77–87, 2003. (Cité à la page 11.)

[Troffaes 2007] M.C.M. Troffaes. *Decision making under uncertainty using imprecise probabilities*. International Journal of Approximate Reasoning, vol. 45, pages 17–29, 2007. (Cité à la page 79.)

[Tseng 2009] M.L. Tseng, L. Divinagracia and R. Divinagracia. *Evaluating firm's sustainable production indicators in uncertainty*. Computers & Industrial Engineering, vol. 57, no. 4, pages 1393–1403, 2009. (Cité à la page 16.)

[Tsoukias 2005] A Tsoukias, M Ozturk and P Vincke. *Preference modelling*. Multiple Criteria Decision Analysis : State of the Art Surveys, International Series in Operatios Research and Management Science, vol. 78, pages 27–71, 2005. (Cité aux pages 34 and 36.)

[Van Laarhoven 1983] PJM Van Laarhoven and Witold Pedrycz. *A fuzzy extension of Saaty's priority theory*. Fuzzy sets and Systems, vol. 11, no. 1, pages 199–227, 1983. (Cité à la page 50.)

[Varajão 2013] João Varajão and Maria Manuela Cruz-Cunha. *Using AHP and the IPMA Competence Baseline in the project managers selection process*. International Journal of Production Research, vol. 51, no. 11, pages 3342–3354, 2013. (Cité à la page 148.)

[Vikhorev 2013] Konstantin Vikhorev, Richard Greenough and Neil Brown. *An advanced energy management framework to promote energy awareness*. Journal of Cleaner Production, vol. 43, no. 0, pages 103 – 112, 2013. (Cité à la page 115.)

[Vincke 1999] P. Vincke. *Robust Solutions and Methods in Decision-Aid*. Journal of multicriteria decision analysis, vol. 8, pages 181–187, 1999. (Cité à la page 79.)

[Wang 2004] Ge Wang, Samuel H Huang and John P Dismukes. *Product-driven supply chain selection using integrated multi-criteria decision-making methodology*. International journal of production economics, vol. 91, no. 1, pages 1–15, 2004. (Cité à la page 147.)

[Wang 2012] Xiaojun Wang, Hing Kai Chan, Rachel WY Yee and Ivan Diaz-Rainey. *A two-stage fuzzy-AHP model for risk assessment of implementing green initiatives in the fashion supply chain*. International Journal of Production Economics, vol. 135, no. 2, pages 595–606, 2012. (Cité à la page 147.)

[Womack 1990] James P Womack, Daniel T Jones and Daniel Roos. Machine that changed the world. Simon and Schuster, 1990. (Cité à la page 10.)

[Wu 2006] Teresa Wu, Jennifer Blackhurst and Vellayappan Chidambaram. *A model for inbound supply risk analysis*. Computers in industry, vol. 57, no. 4, pages 350–365, 2006. (Cité à la page 148.)

[Yakovleva 2012] Natalia Yakovleva, Joseph Sarkis and Thomas Sloan. *Sustainable benchmarking of supply chains : the case of the food industry*. International Journal of Production Research, vol. 50, no. 5, pages 1297–1317, 2012. (Cité à la page 148.)

[Yan 2008] Wei Yan, Chun-Hsien Chen, Youfang Huang and Weijian Mi. *An integration of bidding-oriented product conceptualization and supply chain formation*. Computers in Industry, vol. 59, no. 2, pages 128–144, 2008. (Cité à la page 147.)

[Yang 2011] Ming Yang, Faisal I Khan, Rehan Sadiq and Paul Amyotte. *A rough set-based quality function deployment (QFD) approach for environmental performance evaluation : a case of offshore oil and gas operations*. Journal of Cleaner Production, vol. 19, no. 13, pages 1513–1526, 2011. (Cité à la page 147.)

[Yoon 1995] K Paul Yoon and Ching-Lai Hwang. Multiple attribute decision making : an introduction, volume 104. Sage publications, 1995. (Cité à la page 52.)

[Yurdakul* 2005] Mustafa Yurdakul* and YT Ic. *Development of a performance measurement model for manufacturing companies using the AHP and TOPSIS approaches*. International Journal of Production Research, vol. 43, no. 21, pages 4609–4641, 2005. (Cité à la page 148.)

[Zeng 2007] Jiahao Zeng, Min An and Nigel John Smith. *Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment*. International journal of project management, vol. 25, no. 6, pages 589–600, 2007. (Cité à la page 148.)

[Zeydan 2009] Mithat Zeydan and Cüneyt Çolpan. *A new decision support system for performance measurement using combined fuzzy TOPSIS/DEA approach*. International Journal of Production Research, vol. 47, no. 15, pages 4327–4349, 2009. (Cité à la page 148.)

[Zwetsloot 2003] G. I. J. M. Zwetsloot. *From Management Systems to Corporate Social Responsibility*. Journal of Business Ethics, 2003. (Cité à la page 16.)

Résumé

Le Développement Durable (DD) est « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. » Ses trois piliers fondateurs sont l'Economie, l'Environnement et la Société qu'il faut appréhender conjointement. Nous prenons le point de vue de la performance industrielle pour caractériser les besoins de l'entreprise dans une démarche DD. La performance industrielle, à travers son histoire, doit prendre en compte de plus en plus de critères jusqu'aux actuels piliers du DD. Nous proposons de voir le DD comme la démarche d'amélioration mise en place par l'entreprise. Dans ce sens nous proposons une aide au décideur humain qui permet de répondre aux exigences du DD, en particulier sa nature holistique et cyclique et aussi la prise en compte de l'imprécision des données et de la mise en œuvre d'une action.

Les entreprises déploient des approches d'amélioration continue à l'aide de standards et de méthodes comme le cycle PDCA. L'idée est alors d'enrichir cette pratique par un processus MCDA en aidant le décideur à formuler ses préférences de façon holistique et leur appliquer un traitement d'information adapté afin de fournir une aide à la décision qui serve la démarche d'amélioration. Pour intégrer l'imprécision dans la décision à prendre, nous proposons une méthodologie qui permet de caractériser la robustesse du résultat d'une méthode MCDA en fonction de l'imprécision des valeurs d'un critère. Pour prendre en compte l'aspect « réalisation opérationnelle » d'une action, en plus de son intérêt pour la performance de l'entreprise, nous avons développé un modèle de « faisabilité » associé aux actions en nous fondant sur la méthode ACUTA. L'idée est de proposer au décideur une information complémentaire à l'information d'utilité afin d'offrir une perspective autorisant un compromis Utilité/Faisabilité sur la décision à prendre. Nous déclinons notre proposition sur un cas pratique industriel mené dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise adixen Vacuum Products (aVP) d'Annecy. Ce partenariat a permis le déploiement de notre proposition pour un problème de décision portant sur les besoins d'instrumentation pour construire un système de management de l'énergie, conformément à la norme ISO 50001.

Mots clés : Aide à la décision multicritère ; Démarche d'amélioration continue ; Développement Durable.

Abstract

Sustainable Development (SD) is "development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs." Its three founding pillars are Economy, Environment and Society which are to be handled together. We take the perspective of industrial performance in order to characterize the needs of a company involved in SD. Industrial performance, throughout its history, has to consider more and more numerous criteria up to the present SD pillars. Nous proposons de voir le DD comme la démarche d'amélioration mise en place par l'entreprise. We propose to look on SD as the improvement approach established by the company. According to this, we propose an aid for the human decision maker in order to fulfill the requirements of SD, notably its holistic and cyclic nature and also the inclusion of data imprecision and the implementation of an action.

Companies develop continuous approaches to improvement based on standards and methods like the PDCA cycle. Thus, the idea is to enrich this practice with a MCDA process for aiding the decision maker to establish his/her preference in a holistic way and to apply a suitable information processing to it that benefits the improvement approach. In order to integrate imprecision in the decision to be taken, we propose a methodology for characterizing the robustness of the product of a MCDA method in relation to the imprecision of a criterion value. In order to consider the aspect "operational implemantation" of an action, besides its benefit for the performance of the company, we developped a "Feasability" model related to the actions based on the ACUTA method. The idea is to offer the decision maker information complementary with utility information in order to permit a compromise Utility/Feasibility concerning the decision to be taken. Our proposition is applied to an industrial real case conducted in the framework of a partnership with the company adixen Vacuum Products (aVP) in Annecy. This partnership has led to the deployment of our proposition for a decision problem concerning the need in instrumentation required for the building of an energy management system, according to the ISO 50001 standard.

Keywords : Multicriteria Decision Aiding ; Continuous improvment approach ; Sustainable Development.