

THÈSE

présentée par

Laetitia AVRILLON

pour obtenir le diplôme de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE SAVOIE
(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

Spécialité : GÉNIE INDUSTRIEL

***Démarche de résolution de problèmes qualité dans le cadre
de produits nouveaux de haute technologie***

Soutenue publiquement le 17 octobre 2005 devant le jury composé de :

Abdessamad KOBİ	Président du jury Rapporteur	Professeur à l'Université d'Angers
Olivier SENECHAL	Rapporteur	Professeur à l'Université de Valenciennes
Jean-François AUBRY	Examineur	Professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine
Bruno COMMERE	Examineur	Responsable Technique Projet – Société TRIXELL
Maurice PILLET	Directeur de thèse	Professeur à l'Université de Savoie

Préparée au sein du LISTIC
Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance

En convention CIFRE avec la société TRIXELL

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais adresser mes premiers remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur Maurice PILLET, Professeur à l'Université de Savoie, pour son encadrement exemplaire, pour la confiance qu'il m'a toujours accordée, pour ces brillantes idées et pour son étonnante disponibilité malgré son emploi du temps plus que chargé ! Je souhaite à tous les futurs doctorants d'avoir un encadrant de cette envergure ! Ces quelques lignes sont peu de choses par rapport à tout ce qu'il m'a apporté.

Merci aussi à mon encadrant industriel, Monsieur Bruno COMMERE, Responsable Technique Projet au sein de la société TRIXELL, pour ses grandes qualités d'écoute et tous les conseils qu'il m'a apportés, notamment lors de mes premiers pas dans le monde industriel.

Merci aux personnes qui m'ont fait l'honneur de participer à mon jury, Messieurs Olivier SENECHAL, Professeur à l'Université de Valenciennes, et Abdessamad KOBI, Professeur à l'Université d'Angers, comme rapporteurs et Monsieur Jean-François AUBRY, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, comme examinateur.

Merci à Monsieur François LOUVET, Professeur à l'Université d'Orléans, pour sa relecture détaillée du chapitre IV de ce manuscrit et les corrections proposées.

Merci à Monsieur Bernard DEPRAZ, Consultant en méthodes de résolution de problèmes, pour tous les enseignements et les longues discussions relatifs à ce sujet.

Merci à toutes les personnes de TRIXELL qui m'ont aidée et m'ont fait progresser dans mon travail de recherche et industriel. Je ne peux pas toutes les citer mais je pense qu'elles se reconnaîtront à travers ces quelques lignes.

Merci à Selma, Karim, Fred, Lionel, Jérôme, Yoann, Anne-Sophie et Valérie pour leur compagnie très agréable au sein du laboratoire LISTIC. Un remerciement tout particulier à Sorana pour tout le temps qu'elle m'a consacré pour les répétitions de pré-soutenance, soutenance et présentation de congrès.

Et enfin des millions de mercis à mes proches, ma famille et mon compagnon Jérôme, pour tous leurs encouragements et leur soutien sans faille tout au long de ces années. Parce qu'il n'y a pas que les produits de haute technologie qui peuvent avoir des problèmes ...

Cette thèse fut également l'occasion pour mon directeur Maurice PILLET de débiter dans l'encadrement de doctorantE (avec toutes les complexités qu'engendrent le « E » ...) et pour mon compagnon Jérôme de développer ses compétences en tâches ménagères (impressionnants progrès sauf en repassage) ...

RESUME

Les produits industriels développés actuellement sont de plus en plus complexes et mettent en œuvre simultanément plusieurs technologies. De plus, les temps de développements étant de plus en plus réduits, cela conduit à de nouvelles contraintes dans les phases de pré-industrialisation. Il faut être capable de résoudre rapidement de nombreux problèmes en faisant collaborer des experts ayant chacun une connaissance du produit ciblé sur leur domaine de spécialité. Ces nouvelles contraintes sont peu prises en compte dans les méthodes traditionnelles de résolution de problème.

Les travaux de recherche développés dans cette thèse ont pour objet l'aide méthodologique à la résolution de problèmes qualité concernant les produits nouveaux de haute technologie. Par « problème qualité », nous entendons tout problème technique à cause spéciale concernant le produit ou le procédé.

L'objectif de l'étude est donc de proposer une structure d'accompagnement adaptée pour ce contexte. D'un point de vue organisationnel, elle doit permettre de résoudre rapidement les problèmes avec un nombre de ressources très limité. D'un point de vue socioculturel, elle doit s'appuyer sur la culture technique et la nature créative des personnes pour le fond de la démarche et la forme de son déploiement. D'un point de vue technique, la structure d'accompagnement doit proposer une priorisation dans le traitement des problèmes, guider l'utilisateur dans la recherche de causes et lui permettre d'identifier l'information pertinente parmi les sources multiples d'informations dès les premières occurrences du problème. La structure doit pousser la recherche et la collecte d'informations en amont de l'expérimentation, l'idéal à viser étant le « zéro essai ». Enfin, la structure proposée doit être adaptable à la future évolution de ce type d'entreprise : cohabitation de produits tendant à se stabiliser et de produits nouvellement développés.

L'objectif n'est pas de proposer une n^{ième} méthode de résolution de problèmes mais plutôt une structure modelable selon les configurations rencontrées. Le principe proposé est fondé sur une structure de base (phases et outils) modifiée par deux évaluations : l'évaluation du profil du problème et l'évaluation de son état méthodologique.

Le profil du problème peut être défini comme l'ensemble des caractéristiques techniques du produit, physiques et humaines du problème ; l'objectif de cette évaluation est de proposer une instrumentation adéquate pour le résoudre. L'état méthodologique peut être défini comme le niveau de l'avancée de la résolution du problème ; l'objectif de cette évaluation est d'identifier les phases qui ont déjà été réalisées et celles sur lesquelles il faut travailler.

Le croisement de ces deux évaluations permet d'établir une démarche de résolution de problème contextualisée constituée des phases qu'il reste à réaliser et pour chacune d'une instrumentation associée. Pour élaborer cette instrumentation, nous avons travaillé sur trois axes. Le premier axe s'appuie sur les méthodes et outils existants (Six Sigma, Shainin, Kepner Tregoe, 8D ...) : sélection des méthodes et outils les plus adaptés à notre contexte, enrichissement de ces entités, recherche de potentielles interactions positives entre elles. Le deuxième axe a pour objectif de compléter le panel d'outils disponibles en développement de nouveaux outils. Le troisième axe repose sur l'analyse des méthodologies d'autres domaines (criminologie et accidentologie) ayant des contraintes similaires au contexte étudié et leur adaptation à l'industrie.

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une convention CIFRE avec la société TRIXELL (Isère), joint-venture de Philips Medical Systems, Siemens Medical Solutions et Thales Electron Devices, concevant et fabriquant des détecteurs pour l'imagerie médicale.

Mots-clés : Méthodes de résolution de problèmes, Produits nouveaux de haute technologie, Outils qualité

ABSTRACT

Industrial products currently developed are more and more complex and make use of several technologies at the same time. Moreover, design times are increasingly reduced, bringing new constraints during pre-industrialization phases. Companies have to rapidly solve many problems by involving experts who have a partial knowledge of the product limited to their field of specialty. These new constraints are rarely taken into account in traditional problem solving methods.

The purpose of the research work developed in this PhD thesis is quality problem solving methodology for new high technology products. By "quality problem", we mean any technical problem due to a special cause concerning the product or the process.

The aim of the study is thus to propose a methodological structure adapted to this context. From an organizational point of view, problems have to be solved quickly with a very limited number of resources. From a sociocultural point of view, the structure has to be based on the people's technical culture and their creative nature for the content of the method and for the form of its deployment. From a technical point of view, the structure has to give priority to handling the problems, to guiding the user in the root causes analysis and to allowing him to identify relevant information among the many sources of information from the very first occurrences of the problem. The structure must drive the investigation and the information gathering prior to the experimentation, the ideal situation being to target "zero test". Lastly, the structure must be adaptable to the future evolution of this type of company: cohabitation of stabilized products and newly developed products.

The objective is not to propose yet another problem solving method but rather a tunable structure in accordance with each configuration. The suggested principle is founded on a basic structure (phases and tools) modified by two assessments: the assessment of the problem profile and the assessment of its methodological state.

The problem profile can be defined as all the technical, physical and human features of the problem; the objective of this evaluation is to propose an adequate instrumentation to solve it. The methodological state can be defined as the progress level of the problem solving; the objective of this evaluation is to identify the phases which have already been carried out and those on which it is necessary to work.

The crossing of these two evaluations allows us to build a contextualized problem solving method with the phases that remain to be created and dedicated instrumentation for each phase. We worked on three main axes to develop this instrumentation. The first one is based on the existing methods and tools (Six Sigma, Shainin, Kepner Tregoe, 8D...): selection of the methods and tools that are the most adapted to our context, improvement of these entities, analysis of the potential positive interactions between them. The aim of the second main line is to supplement the available set of tools by developing new tools. The third one concerns the analysis of methodologies for other fields (criminology and accidentology) which have similar constraints to the studied context and their adaptation to industry.

This PhD has been carried out in the frame of a "CIFRE convention" with TRIXELL (Isère), a joint-venture company formed by Philips Medical Systems, Siemens Medical Solutions and Thales Electron Devices committed to the development and production of a complete family of X-ray flat panel digital detectors for the entire radiological imaging industry.

Key-words : New high technology products, Quality Problems Solving, Quality Tools

A ma famille

TABLE DES MATIERES

Introduction	1
--------------------	---

Chapitre I : Un nouvel enjeu : maîtriser la qualité des produits nouveaux de haute technologie	3
--	---

1. INTRODUCTION	3
2. LE DEVELOPPEMENT D'ENTREPRISES DE HAUTE TECHNOLOGIE	5
2.1. <i>Pourquoi ce développement ?</i>	5
2.1.1. Mondialisation et globalisation de la concurrence.....	5
2.1.2. Accélération des changements	5
2.1.3. Nécessité d'innover.....	6
2.2. <i>Caractéristiques des entreprises de haute technologie</i>	7
2.2.1. A la croisée de trois familles d'entreprises	7
2.2.2. Caractéristiques économiques.....	7
2.2.3. Le management dans l'incertitude	8
2.3. <i>Caractéristiques des produits nouveaux de haute technologie</i>	8
2.3.1. Des produits nouveaux.....	8
2.3.2. Spécificités	9
3. LA MAITRISE DE LA QUALITE	10
3.1. <i>Définitions</i>	10
3.2. <i>Maîtrise des processus</i>	11
3.2.1. Processus de production et processus de conception	11
3.2.2. Plus que des aspects techniques	11
3.3. <i>La résolution des problèmes qualité</i>	12
3.3.1. Définition de problèmes.....	12
3.3.2. Définitions de problèmes qualité	13
3.3.3. Résoudre un problème qualité.....	14
4. LA RESOLUTION DES PROBLEMES QUALITE DANS LE CAS DES PRODUITS NOUVEAUX DE HAUTE TECHNOLOGIE.....	16
4.1. <i>Des structures d'accompagnement</i>	16
4.2. <i>Contraintes pour la résolution des problèmes qualité</i>	17
4.2.1. Contraintes liées aux spécificités de l'entreprise	17
4.2.2. Contraintes liées aux spécificités des produits.....	17
5. CONCLUSION	19

Chapitre II : Vers une structuration de l'aide méthodologique pour la résolution des problèmes qualité	21
--	----

1. INTRODUCTION	21
2. DEMULTIPLICATION DES OUTILS.....	23
2.1. <i>Introduction</i>	23
2.2. <i>Outils de base de la qualité et leurs dérivés</i>	23
2.2.1. Neuf des sept outils de base de la qualité.....	23
2.2.2. Dérivés des sept outils de base de la qualité	25
2.2.3. Sept nouveaux outils qualité	27
2.3. <i>Et les outils statistiques</i>	28

2.3.1.	Les outils de statistiques classiques	29
2.3.2.	Les outils de Maîtrise Statistique des Procédés	29
2.3.3.	Les plans d'expériences	30
2.4.	<i>Conclusion</i>	31
3.	VERS UNE ORGANISATION DES OUTILS	32
3.1.	<i>Introduction</i>	32
3.2.	<i>Classifications rencontrées dans la littérature</i>	32
3.2.1.	Les classifications de phases.....	32
3.2.2.	Les classifications de complexité.....	32
3.2.3.	Les classifications de forme.....	33
3.2.4.	Synthèse des classifications de la littérature	33
3.3.	<i>Notre proposition de typologie</i>	34
3.3.1.	Nouveaux critères de classification.....	34
3.3.2.	Adéquation des outils à notre problématique.....	36
3.4.	<i>Conclusion</i>	37
4.	VERS LE DEVELOPPEMENT DE METHODES	38
4.1.	<i>Introduction</i>	38
4.2.	<i>Illustration de cette évolution</i>	38
4.2.1.	Quatre méthodes de résolution de problèmes	38
4.2.2.	Le DMAIC de Six Sigma.....	39
4.2.3.	Le Système de Shainin.....	42
4.2.4.	La méthode Global 8D.....	43
4.2.5.	Le PSDM de Kepner Tregoe.....	45
4.3.	<i>Point de vue des principes</i>	47
4.4.	<i>Point de vue structurel</i>	48
4.4.1.	Niveau macroscopique.....	48
4.4.2.	Niveau cheminement dans la phase	51
4.5.	<i>Point de vue organisationnel</i>	53
4.5.1.	Le modèle utilisé.....	53
4.5.2.	Des rôles définis.....	54
4.6.	<i>Point de vue socioculturel</i>	54
4.7.	<i>Conclusion</i>	56
5.	ADEQUATION A NOTRE PROBLEMATIQUE	57
5.1.	<i>Point de vue des principes</i>	57
5.2.	<i>Point de vue structurel</i>	58
5.3.	<i>Point de vue organisationnel</i>	59
5.4.	<i>Point de vue socioculturel</i>	59
6.	CONCLUSION.....	61

Chapitre III : Construction d'une démarche de résolution de problèmes qualité adaptée et adaptable

1.	INTRODUCTION	63
2.	DEMARCHE DE RECHERCHE	65
2.1.	<i>Introduction</i>	65
2.2.	<i>Postulats</i>	65
2.3.	<i>Axes de recherche</i>	67
2.4.	<i>Conclusion</i>	68
3.	PROPOSITION D'UNE STRUCTURE.....	69
3.1.	<i>Introduction</i>	69
3.2.	<i>Bases conceptuelles</i>	69

3.2.1.	Profil et état méthodologique du problème.....	69
3.2.2.	Principe méthodologique	70
3.3.	<i>Etablissement du profil du probleme</i>	71
3.3.1.	Définition des critères et des niveaux	71
3.3.2.	Caractérisation du profil d'un problème	72
3.4.	<i>Génération de l'instrumentation de substitution</i>	73
3.4.1.	Choix de la structure de base	73
3.4.2.	Lien entre le profil du problème et l'instrumentation.....	73
3.4.3.	Formulation des concepts à développer.....	73
3.5.	<i>Etablissement de l'état méthodologique du problème</i>	75
3.5.1.	Définition des phases	75
3.5.2.	Caractérisation de l'état méthodologique du problème	76
3.6.	<i>Construction de la démarche contextualisée</i>	76
3.6.1.	Schéma proposé	76
3.6.2.	Dynamique du schéma.....	76
3.7.	<i>Conclusion</i>	77
4.	INSTRUMENTATION DE SUBSTITUTION POUR LA PHASE RECONNAITRE	78
4.1.	<i>Introduction</i>	78
4.2.	<i>Besoin d'intégrer la notion de probabilité de résolution</i>	79
4.2.1.	Analyse de la littérature	79
4.2.2.	Proposition d'instrumentation.....	79
4.3.	<i>Besoin de travailler par niveau de résolution</i>	80
4.3.1.	Analyse de la littérature	80
4.3.2.	Proposition d'instrumentation.....	81
4.4.	<i>Conclusion</i>	81
5.	INSTRUMENTATION DE SUBSTITUTION POUR LES PHASES DEFINIR ET MESURER.....	82
5.1.	<i>Introduction</i>	82
5.2.	<i>Besoin d'adapter la répartition des rôles</i>	83
5.2.1.	Analyse de la littérature	83
5.2.2.	Proposition d'organisation	83
5.3.	<i>Besoin de travailler la mesure</i>	85
5.3.1.	Introduction.....	85
5.3.2.	Besoin de faire parler les produits qui n'ont pas le défaut.....	85
5.3.3.	Besoin de faire parler les autres mesures	86
5.4.	<i>Conclusion</i>	86
6.	INSTRUMENTATION DE SUBSTITUTION POUR LA PHASE DECRIRE.....	87
6.1.	<i>Introduction</i>	87
6.2.	<i>Besoin d'approfondir le relevé d'information</i>	88
6.2.1.	Analyse de la littérature	88
6.2.2.	Outil de retranscription	89
6.3.	<i>Besoin d'approfondir la description</i>	91
6.3.1.	Analyse de la littérature	91
6.3.2.	Est N'est pas enrichi	92
6.3.3.	Sélection des outils dans le Est N'est pas enrichi	93
6.4.	<i>Conclusion</i>	94
7.	INSTRUMENTATION DE SUBSTITUTION POUR LA PHASE ANALYSER	95
7.1.	<i>Introduction</i>	95
7.2.	<i>Liste des causes</i>	95
7.2.1.	Introduction.....	95
7.2.2.	Faire parler la physique.....	96
7.2.3.	Faire parler les produits avec et sans défaut	97

7.2.4.	Faire parler les lieux et périodes avec et sans défaut	97
7.3.	<i>Test des causes</i>	98
7.3.1.	Introduction	98
7.3.2.	Test « sur papier »	99
7.3.3.	Test en réel	100
7.4.	<i>Conclusion</i>	100
8.	CONCLUSION	101

Chapitre IV : Le problème particulier de l'expérimentation dans la phase Analyser 103

1.	INTRODUCTION	103
2.	STRATEGIES POUR REDUIRE L'EXPERIMENTATION	105
2.1.	<i>Introduction</i>	105
2.2.	<i>Des expérimentations mieux ciblées</i>	105
2.2.1.	Introduction	105
2.2.2.	Choix des facteurs par génération d'indices	106
2.2.3.	Validation des facteurs par la description	107
2.3.	<i>Des expérimentations mieux agencées</i>	107
2.3.1.	Introduction	107
2.3.2.	Prise en compte de la connaissance	108
2.3.3.	Arrangement gigogne	108
2.3.4.	Arrangement mathématique	109
2.4.	<i>Des expérimentations moins coûteuses</i>	109
2.4.1.	Introduction	109
2.4.2.	Simulation	109
2.4.3.	Utilisation de support factice	109
2.4.4.	Combinaison de plusieurs essais sur un même produit	110
2.5.	<i>Positionnement de ces expérimentations</i>	110
2.6.	<i>Conclusion</i>	111
3.	PLANS D'EXPERIENCE DE CRIBLAGE	113
3.1.	<i>Introduction</i>	113
3.2.	<i>Rappel des notions élémentaires</i>	114
3.3.	<i>Plans « un facteur a la fois »</i>	115
3.3.1.	Description	115
3.3.2.	Discussion	115
3.4.	<i>Plans fractionnaires orthogonaux</i>	116
3.4.1.	Description	116
3.4.2.	Discussion	116
3.5.	<i>Plans sursaturés</i>	117
3.5.1.	Description	117
3.5.2.	Discussion	117
3.6.	<i>Plans par groupe de facteurs</i>	117
3.6.1.	Description	117
3.6.2.	Discussion	118
3.7.	<i>Bifurcation séquentielle</i>	118
3.7.1.	Description	118
3.7.2.	Discussion	118
3.8.	<i>Conclusion</i>	119
4.	LES PLANS DICHOTOMIQUES	120
4.1.	<i>Introduction</i>	120

4.2.	<i>Principes et hypothèses</i>	120
4.2.1.	Principes et propriétés.....	120
4.2.2.	Hypothèses.....	122
4.3.	<i>Déroulement</i>	122
4.3.1.	Déroulement de base.....	122
4.3.2.	Généralisation.....	123
4.4.	<i>Analyse pour dissocier les effets significatifs</i>	124
4.4.1.	Approche par le test z.....	124
4.4.2.	Approche par un test de valeurs aberrantes.....	124
4.4.3.	Approche par le test t.....	125
4.5.	<i>Exemple</i>	126
4.5.1.	Introduction.....	126
4.5.2.	Transposition dans la table L16 de Taguchi.....	126
4.5.3.	Déroulement des essais selon un plan dichotomique.....	127
4.5.4.	Conclusion des essais réalisés.....	130
4.6.	<i>Discussion sur les limites de l'approche proposée</i>	131
4.7.	<i>Conclusion</i>	131
5.	CONCLUSION.....	133

Chapitre V : Application industrielle 135

1.	INTRODUCTION.....	135
2.	L'ENTREPRISE TRIXELL ET SES PRODUITS.....	137
2.1.	<i>Introduction</i>	137
2.2.	<i>Présentation des produits de la société Trixell</i>	137
2.2.1.	Principe de fonctionnement.....	137
2.2.2.	Le PIXIUM 4600 : La référence technologique dans l'imagerie numérique.....	138
2.2.3.	Le PIXIUM 4800 : Détecteur numérique pour radiologie dynamique.....	139
2.2.4.	Le PIXIUM 4700 : Détecteur numérique dédié à la radiologie temps réel.....	139
2.3.	<i>Des produits nouveaux et de haute technologie</i>	140
2.3.1.	Des produits innovants.....	140
2.3.2.	Des technologies complexes.....	140
2.4.	<i>Conclusion</i>	141
3.	VERS LA MAITRISE DE LA QUALITE EN PRODUCTION DES PRODUITS.....	142
3.1.	<i>Introduction</i>	142
3.2.	<i>Une organisation cohérente</i>	142
3.3.	<i>Partie formalisation</i>	143
3.4.	<i>Partie progrès</i>	146
3.5.	<i>Partie anti-recul</i>	147
3.6.	<i>Conclusion</i>	147
4.	CAS D'APPLICATION DE LA DEMARCHE DE RESOLUTION DE PROBLEME CONTEXTUALISEE.....	148
4.1.	<i>Introduction</i>	148
4.2.	<i>Construction de la démarche à suivre</i>	149
4.2.1.	Etablissement de l'état méthodologique.....	149
4.2.2.	Reconnaître.....	150
4.2.3.	Etablissement du profil du problème.....	151
4.2.4.	Construction de la structure de résolution de problème.....	152
4.3.	<i>Définir et décrire</i>	153
4.3.1.	Définition des rôles.....	153
4.3.2.	Décrire.....	153
4.4.	<i>Analyser</i>	156

4.4.1.	Lister	156
4.4.2.	Tester.....	157
4.5.	<i>Conclusion</i>	158
5.	CAS D'APPLICATION INDUSTRIELLE DES PLANS DICHOTOMIQUES	159
5.1.	<i>Introduction</i>	159
5.2.	<i>Traitement du cas</i>	160
5.2.1.	Essais réalisés.....	160
5.2.2.	Analyse	160
5.3.	<i>Conclusion</i>	163
6.	CONCLUSION.....	164
Conclusion générale et perspectives de recherche.....		165
Références bibliographiques.....		169
ANNEXE I : Les outils de résolution de problèmes.....		179
ANNEXE II : Check-lists associées à chaque phase et étape.....		187
ANNEXE III : Présentation de la société TRIXELL.....		189
ANNEXE IV : Document de Gestion de Résolution de Problèmes		193
ANNEXE V : Grille EMSE pour la résolution de problèmes à TRIXELL		199

TABLE DES ILLUSTRATIONS

CHAPITRE I

Figure I- 1 : Représentation des entreprises de haute technologie.....	7
Figure I- 2 : Représentation de ISO 9000 version 2000	11
Figure I- 3 : La résolution des problèmes suit le cercle PDCA de Deming.....	15
Tableau I- 1 : Types de problèmes.....	13
Tableau I- 2 : Récapitulatif des types de problèmes selon les auteurs.....	14
Tableau I- 3 : Déclinaison de spécificités des produits novateurs en contraintes pour la résolution de problèmes.....	17

CHAPITRE II

Figure II- 1 : Exemple de diagramme causes-effet.....	24
Figure II- 2 : Exemple de diagramme ACE	26
Figure II- 3 : Diagramme de décision PDPC	28
Figure II- 4 : Boîte à moustaches	29
Figure II- 5 : Exemple de carte de contrôle	30
Figure II- 6 : Objectif Six Sigma	40
Figure II- 7 : Schéma du DMAIC de Six Sigma.....	41
Figure II- 8 : Schéma du système Shainin [Shainin 1993a].....	43
Figure II- 9 : Schéma de la méthode 8D	44
Figure II- 10 : Schéma des méthodes du PSDM de Kepner Tregoe.....	45
Figure II- 11 : Schéma de l'articulation des outils de l'entonnoir à X de Shainin.....	52
Figure II- 12 : Articulation autour du Est N'est pas selon Kepner Tregoe	53
Tableau II- 1 : Exemples d'outils dérivés des outils de base de la qualité	25
Tableau II- 2 : Exemple de tableau « Est, n'est pas »	27
Tableau II- 3 : Exemple de table de Taguchi : L ₄	31
Tableau II- 4 : Classification de Chauvel.....	33
Tableau II- 5 : Croisement des principales catégories des outils dans la littérature	34
Tableau II- 6 : Classement des outils selon les deux critères retenus.....	35
Tableau II- 7 : Déclinaison de spécificités des produits novateurs en contraintes pour la résolution de problèmes	36
Tableau II- 8 : Outils et contraintes de notre contexte.....	36
Tableau II- 9 : Intégration de Six Sigma à tous les niveaux de l'entreprise [Harry <i>et al.</i> 2000].....	48
Tableau II- 10 : Analyse structurelle macroscopique des méthodes de résolution de problèmes	49
Tableau II- 11 : Différences culturelles France / Etats-Unis pour l'utilisation de la méthode Six Sigma	55
Tableau II- 12 : Adéquation structurelle des méthodes au contexte des produits innovants.....	58

CHAPITRE III

Figure III- 1 : Déroulement méthodologique.....	70
Figure III- 2 : Schéma de la démarche de résolution de problèmes.....	77
Figure III- 3 : Etapes, critères et concepts pour la phase Reconnaître.....	78
Figure III- 4 : Etapes, critères et concepts pour la phase Définir.....	82
Figure III- 5 : Etapes, critères et concepts pour la phase Mesurer.....	82
Figure III- 6 : Proposition de rôles dans une démarche de résolution de problèmes.....	84
Figure III- 7 : Etapes, critères et concepts pour la phase Décrire.....	87
Figure III- 8 : Exploitation des sources d'informations par les méthodes classiques.....	89
Figure III- 9 : Outil de retranscription.....	90
Figure III- 10 : Critères et concepts pour l'étape Lister les causes.....	96
Figure III- 11 : Vision "Boîte noire" et vision séquentielle.....	97
Figure III- 12 : Critères et concepts pour l'étape Tester les causes.....	98
Tableau III- 1 : Les phases critiques.....	65
Tableau III- 2 : Rapprochement des trois méthodologies.....	67
Tableau III- 3 : Critères pour évaluer le profil du problème.....	72
Tableau III- 4 : Impact des critères sur les phases.....	74
Tableau III- 5 : Formulaire de filtrage des problèmes.....	80
Tableau III- 6 : Exploitation des sources d'informations par les outils classiques.....	89
Tableau III- 7 : Structure d'origine du "Est, N'est pas".....	91
Tableau III- 8 : Structure enrichie du "Est, N'est pas".....	92
Tableau III- 9 : Typologie de manifestation du défaut de l'ADAQ [Bernard <i>et al.</i> 2001].....	94

CHAPITE IV

Figure IV- 1 : Contraintes pour l'expérimentation.....	104
Figure IV- 2 : Entonnoir à X de Shainin.....	106
Figure IV- 3 : Association des stratégies pour une réduction optimale de l'expérimentation.....	111
Figure IV- 4 : Plans de criblage en fonction du nombre de facteurs.....	113
Figure IV- 5 : Procédure de définition des essais à réaliser.....	124
Figure IV- 6 : Test t pour le découpage A1 / B1 (essai 4).....	128
Figure IV- 7 : Test t pour le découpage A2 / B2 (essais 5 et 6).....	128
Figure IV- 8 : Test t pour le découpage C2' / D2' (essais 7 et 8).....	129
Figure IV- 9 : Graphique des effets et des interactions de l'exemple [Pyzdek 2001].....	130
Tableau IV- 1 : Stratégies pour réduire l'expérimentation.....	110
Tableau IV- 2 : Comparaison des plans de criblage.....	119
Tableau IV- 3 : Table L16.....	121
Tableau IV- 4 : Les quatre premiers essais du plan dichotomique pour huit facteurs.....	121
Tableau IV- 5 : Récapitulatif des essais réalisés pour huit facteurs.....	123
Tableau IV- 6 : Extrait de la table de Dixon pour n=3.....	125
Tableau IV- 7 : Plan fractionnaire issu de l'exemple [Pyzdek 2001].....	126
Tableau IV- 8 : Table L16 correspondant à l'exemple [Pyzdek 2001].....	127
Tableau IV- 9 : Plan dichotomique correspondant à l'exemple [Pyzdek 2001].....	127
Tableau IV- 10 : Analyse des facteurs influents par plan complet de l'exemple [Pyzdek 2001].....	129

CHAPITRE V

Figure V- 1 : Transformation des rayons X en signal électrique	138
Figure V- 2 : Le PIXIUM 4600	138
Figure V- 3 : Le PIXIUM 4800	139
Figure V- 4 : Le PIXIUM 4700	139
Figure V- 5 : Démarche de mise en oeuvre de l'automatisation	143
Figure V- 6 : Indicateur d'appropriation de la démarche de résolution de problèmes à TRIXELL	146
Figure V- 7 : Démarche à suivre pour résoudre le problème ESD <i>B</i>	153
Figure V- 8 : Diagramme de processus pour le problème ESD <i>B</i>	155
Figure V- 9 : Graphique de concentration du sous-ensemble pour le problème ESD <i>B</i>	156
Figure V- 10 : Test t pour le découpage A1 / B1 (essai 4)	161
Figure V- 11 : Test t pour le découpage C2 / D2 (essais 5 et 6).....	161
Figure V- 12 : Graphique des effets et des interactions du cas d'application industrielle	162
Tableau V- 1 : Spécificités des produits nouveaux de haute technologie.....	141
Tableau V- 2 : Décomposition des processus de production et de mesure en 5M	144
Tableau V- 3 : Actions de maîtrise du processus de Mesure	144
Tableau V- 4 : Actions de maîtrise du processus de Production	145
Tableau V- 5 : Indicateurs de performance.....	147
Tableau V- 6 : Formulaire de filtrage pour les ESD <i>B</i> et ESD <i>C</i>	150
Tableau V- 7 : Evaluation du profil du problème ESD <i>B</i>	152
Tableau V- 8 : Est N'est pas du problème des ESD <i>B</i>	154
Tableau V- 9 : Test des causes potentielles pour le cas des ESD <i>B</i>	157
Tableau V- 10 : Facteurs retenus pour l'étude de la température interne du détecteur.....	159
Tableau V- 11 : Essais réalisés pour étudier l'influence des huit facteurs sur la température interne du détecteur	160

Résoudre des problèmes a toujours été le lot de tous, que ce soit dans la vie personnelle ou dans la vie professionnelle. Déjà dans l'Antiquité, Archimède résolvait des problèmes techniques !

« Un beau jour, le roi de Syracuse Hiéron II commanda une couronne en or pour l'offrir aux Dieux, il donna à l'orfèvre la masse d'or nécessaire à la fabrication. La couronne réalisée était superbe, elle fut pesée, sa masse était identique à celle de l'or donné. Pourtant le roi avait un doute : la couronne ne semblait pas faite d'or pur, il demanda à son ami Archimède de s'en assurer mais sans détruire l'ouvrage. La légende veut qu'Archimède prit un bain pour réfléchir, et qu'il remarqua que la baignoire débordait quand il y entrait. Il comprit alors que l'immersion d'un corps déplace une quantité d'eau équivalente à son volume. Autrement dit, que deux matériaux différents, tels l'or et l'argent, pris en volumes égaux, ne devaient pas avoir le même poids apparent une fois immergés. Il immergea alors un lingot d'or de même masse que la couronne dans un récipient plein d'eau à ras bord et mesura la quantité d'eau qui débordait. Il réitéra l'expérience avec un lingot d'argent de même masse, puis avec la couronne. Il constata alors que la quantité d'eau déplacée par la couronne se situait entre les deux autres. Cela lui permit de prouver la supercherie de l'orfèvre qui avait mêlé de l'argent à l'or de la couronne.

La légende raconte aussi que lorsque les troupes du consul romain Marcellus (homme politique et général romain) envahirent Syracuse, Archimède était occupé à résoudre un problème de géométrie. Un soldat romain entra dans sa maison, lui demandant de le suivre; mais Archimède lui ordonna d'attendre qu'il eût fini de résoudre son problème. Le soldat le transperça alors d'un coup de glaive et le tua. »

Depuis, les objets et les connaissances ont évolué mais la problématique reste toujours la recherche de la stratégie la plus efficace pour résoudre un problème. La deuxième partie de l'histoire illustre bien les contraintes contemporaines : les problèmes doivent être résolus certes avec efficacité mais aussi dans un temps imparti très court !

Pourquoi une thèse sur la démarche de résolution de problèmes qualité dans le cas de produits nouveaux de haute technologie ? A l'heure où Six Sigma a le vent en poupe dans le milieu industriel (et de l'édition !) et où avoir le dernier produit « high tech » est le comble du bonheur, on pourrait penser dans un premier temps que c'est une question de mode ...

Mais très vite on se rend compte que la démultiplication croissante des produits nouveaux de haute technologie est une véritable réalité dans tous les domaines. Et elle permet de belles avancées pour l'Homme comme par exemple le développement de diagnostic pointu dans le domaine médical.

La mise sur le marché de ce type de produits est un véritable défi pour les entreprises qui les développent et les fabriquent. Dans un monde où tout s'accélère et tout se complexifie, elles doivent répondre à des besoins qui seront peut être différents dans six mois. Les démarches de résolution de problèmes traditionnelles comme Six Sigma ne sont alors plus adaptées. Il faut résoudre les problèmes avant que les besoins ne changent et que les concurrents n'aient mis leurs produits sur le marché !

Il est donc important de définir et de comprendre les particularités de ce nouveau type de contexte industriel afin que les entreprises puissent adapter leur démarches de résolution de problèmes. Ce travail d'adaptation est l'objet de cette thèse.

Ce mémoire restitue le travail réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE entre la société TRIXELL et le laboratoire LISTIC (Université de Savoie). Il est composé de cinq chapitres.

Dans le chapitre I, nous présenterons les caractéristiques du contexte socioéconomique actuel expliquant le développement de ces produits de haute technologie. Nous présenterons aussi les spécificités de ce type de produits et d'entreprises afin de cerner les contraintes à prendre en compte pour la proposition d'une démarche de résolution de problèmes adaptée.

Dans le chapitre II, nous étudierons l'évolution méthodologique qui s'est opérée en matière de résolution de problèmes depuis l'avènement des cercles qualité. Nous analyserons l'adéquation de ces outils et méthodes aux contraintes de notre contexte.

Dans le chapitre III, nous proposerons une démarche de résolution de problèmes adaptée et adaptable aux produits nouveaux de haute technologie. Cette démarche sera modulable selon les typologies de problèmes rencontrés.

Dans le chapitre IV, nous étudierons le problème particulier de l'expérimentation dans ce type de contexte. Nous verrons les différentes techniques existantes pour réduire le nombre d'essais à réaliser et nous proposerons une autre technique complémentaire : les plans dichotomiques.

Dans le chapitre V, nous exposerons l'application industrielle de la démarche proposée dans l'entreprise TRIXELL qui conçoit et fabrique des détecteurs de rayons X pour l'imagerie médicale.

Chapitre I

Un nouvel enjeu : maîtriser la qualité des produits nouveaux de haute technologie

Ce chapitre a pour objectif de montrer en quoi la maîtrise de la qualité des produits nouveaux de haute technologie est une problématique et en quoi elle est une problématique d'actualité.

Nous tenterons de répondre aux questions suivantes : Pourquoi un développement si spectaculaire des entreprises de haute technologie ? Quelles sont les caractéristiques d'une telle entité et de ses produits ? En quoi consiste la maîtrise de la qualité des produits en général ? Pourquoi la maîtrise de la qualité des produits nouveaux de haute technologie et plus précisément la résolution des problèmes qualité sont-elles particulières ?

1. INTRODUCTION

Pour évoluer dans le contexte actuel, les nouvelles entreprises ont pour défi de concevoir, développer, produire et fidéliser leurs clients dans un environnement de plus en plus compétitif, sujet à des changements imprévisibles, et dont la clientèle est de plus en plus exigeante. Dans ce cadre, les entreprises de haute technologie se développent de plus en plus et doivent résoudre leurs problèmes en conception comme en production avant les autres pour la réussite de la mise sur le marché de leurs produits.

Dans la première partie de ce chapitre, nous verrons quelles sont plus exactement les particularités du contexte actuel expliquant le développement de nouvelles entreprises de haute technologie. Puis,

nous détaillerons les caractéristiques de ce type d'entreprise ainsi que celles de leurs produits afin de mieux cerner le cadre de cette étude.

Dans la deuxième partie, nous rappellerons en quoi consiste la maîtrise de la qualité en général et la résolution de problèmes plus particulièrement. Nous préciserons le type de problèmes qui sera traité dans ce travail.

La troisième partie est le croisement des deux premières. Nous verrons en quoi la résolution des problèmes qualité est une problématique dans le cadre des produits nouveaux de haute technologie, c'est-à-dire quelles sont les contraintes particulières qu'il faut prendre en compte.

2. LE DEVELOPPEMENT D'ENTREPRISES DE HAUTE TECHNOLOGIE

2.1. POURQUOI CE DEVELOPPEMENT ?

2.1.1. Mondialisation et globalisation de la concurrence

Le contexte industriel actuel est avant tout marqué par la mondialisation et la globalisation de la concurrence. Pour survivre, les entreprises doivent donc trouver la taille critique de leur activité. Et cette taille n'a pas de limite supérieure, son plafond s'élève avec le développement de la mondialisation [Villemus 2001]. La volonté est de grandir en se recentrant sur les activités à forte rentabilité pour accroître la productivité, les synergies et les compétences et de se différencier en développant des produits toujours plus innovants. On voit ainsi se multiplier les méga-fusions, les corporate-ventures et autres joint-ventures entre les grands groupes industriels pour développer des start-up des haute technologie. Ces différentes pratiques correspondent à une redéfinition stratégique permettant l'accès à de nouveaux segments technologiques. Dans un contexte où les innovations jouent un rôle majeur dans la compétitivité des firmes, les actifs concernés par de tels arrangements organisationnels sont de plus en plus spécifiques [Montchaud 2003]. Cette multiplication et mondialisation des interactions complexifient l'environnement économique des entreprises.

On retrouve cette complexité en interne, de part l'association de cultures différentes et les contraintes externes de plus en plus fortes. Les efforts des organisations et des dirigeants doivent se porter sur le développement de nouvelles structures, de nouveaux outils (techniques et méthodologiques) et de nouvelles compétences pour apprivoiser cette complexité. Aucune organisation un tant soit peu sophistiquée et qui veut survivre ou se développer ne peut le faire sans systèmes d'information performants. Le recours croissant à l'informatique et aux nouvelles technologies de l'information en est la preuve.

Mais, paradoxalement, le recours à ces nouvelles technologies crée lui-même une complexité supplémentaire en termes de croissance de l'information disponible et de sources nombreuses et diverses. L'information est immédiate et instantanée, sans qu'on ait eu le temps de la vérifier, de la contrôler ou même de la filtrer. La gestion des flux d'informations, le filtrage des informations pertinentes, leur traitement et leur compréhension sont ainsi des grands défis qui se posent à toutes les entreprises et à tous les managers. La maîtrise de l'information est une des données clés du futur.

2.1.2. Accélération des changements

Il y a aujourd'hui de plus en plus d'évènements qui interagissent sur et dans l'entreprise. Elle est soumise à des contraintes externes et internes qui se croisent et qui lui échappent. Les changements sont moins explicables. Il est de plus en plus difficile pour une entreprise d'expliquer la réussite ou l'échec d'un produit. Les besoins des individus se diversifient, les motivations des individus se combinent de manière de plus en plus complexe, en interaction avec l'environnement, les habitudes évoluent très vite. C'est la génération et la société de « zapping ». La consommation de vins de table chute, mais les dégustations épisodiques de grands crus se développent, en même temps que la consommation de Coca-Cola ! Pour suivre cette évolution, le raccourcissement des délais entre les innovations, des délais de production et des horizons de planification devient un impératif. L'accélération des changements est une constante de la vie des entreprises [Villemus 2001].

L'accent est donc mis sur l'accroissement de la « productivité intellectuelle » pour une efficacité plus grande des réalisations de projets, des résolutions de problèmes et des prises de décisions. Les entreprises ont donc besoin d'aide méthodologique pour explorer plusieurs domaines, envisager

plusieurs pistes, traiter des montagnes d'informations dans le but de définir leur stratégie future, de développer de nouveaux produits et de les industrialiser rapidement. Il n'est donc pas étonnant de voir exploser dans le monde industriel l'utilisation de méthodes de prises de décision, de résolution de problèmes et de conduite de projet. Les fonctions de support tendent alors à se développer, à prendre une importance particulière et doivent développer une réelle productivité.

Sinon, comment s'y retrouver et faire la part de ce qui est attendu dans une industrie où la performance des microprocesseurs double tous les dix huit mois, celle des fibres optiques tous les douze mois et celle des disques tous les neuf mois ? Comment prendre des décisions qui ne risqueront pas d'être remises en cause dans le mois qui suit ?

2.1.3. Nécessité d'innover

Les efforts de productivité ont longtemps porté sur l'outil de production : comment produire plus, plus vite, moins cher, en moins de temps ? Mais aujourd'hui, cela ne suffit plus. Se distinguer, innover, sortir de la moyenne, sont devenus les clés de la réussite dans l'économie contemporaine, en particulier quand une guerre des prix n'est pas soutenable.

L'innovation se porte sur des produits plus intelligents, plus nomades, plus autonomes et plus compatibles pour suivre la naissance des nouveaux besoins, la complexité et l'évolution grandissante des besoins actuels. La sophistication des produits devient ainsi de plus en plus avancée en terme de nombre de composants ou de métiers qui interviennent dans leur conception et leur fabrication. Par exemple, l'automobile compte aujourd'hui jusqu'à quatre-vingt sous-systèmes ou modules électroniques qui interagissent par l'intermédiaire de différents réseaux de communication. Le niveau de complexité est comparable à celui de l'aéronautique ou du spatial [Kunh 2004].

Nouvelles technologies, nouveaux besoins : qui est l'œuf ? qui est la poule ?

Il ne fait aucun doute que le besoin (la demande) est l'un des moteurs principaux de l'innovation et, par ce biais, du développement des nouvelles technologies, que ce soit dans le domaine de l'information ou dans toute autre activité (production, services). Par exemple, la messagerie électronique est née du besoin d'échanger de l'information de manière plus rapide et plus simple. Mais les nouvelles technologies peuvent engendrer à leur tour de nouveaux usages. Pour illustration, le développement de la technologie numérique a ainsi créé un besoin dans le domaine du médical en matière de radiologie : comme les appareils photographiques argentiques ont été remplacés par des appareils numériques, les grands groupes de l'électronique (General Electric, Siemens, Philips, Thales) ont proposé des systèmes numériques pour remplacer les cassettes de films traditionnels de radiologie. Les hôpitaux et cliniques ont vite été conquis par cette nouvelle technologie facilitant le diagnostic par les différents traitements d'images possibles (zoom, jeu des contrastes ...). Un nouveau besoin a été créé : pouvoir traiter numériquement les images radiologiques et s'est généralisé dans les autres domaines de diagnostic médical.

En fait, à travers ces exemples, nous voyons que nouvelles technologies et nouveaux besoins s'auto-alimentent. Les nouveaux modes de vie actuels et les nouveaux moyens technologiques accélèrent cette dynamique. En conséquence, les entreprises concernées par ce type de produits sont stratégiques pour l'emploi de demain et pour la sauvegarde de la compétitivité des pays les plus développés.

2.2. CARACTERISTIQUES DES ENTREPRISES DE HAUTE TECHNOLOGIE

2.2.1. A la croisée de trois familles d'entreprises

Etudions quelles sont les caractéristiques de ces entreprises nouvelles de haute technologie.

Les entreprises de technologie avancée ou entreprises « high tech » se trouvent à l'intersection de trois familles d'entreprises comme l'indique la Figure I- 1 [Bernasconi et al 2000] :

- Elles appartiennent à la famille des entreprises technologiques. Les technologies en jeu peuvent être plus ou moins innovantes et la taille de ces entreprises plus ou moins grande. La partie nous concernant est la phase de jeunesse des entreprises technologiques.
- Elles font également partie des entreprises innovantes. L'innovation n'est pas l'apanage de la technologie, bien évidemment. L'innovation est très présente dans les services. Nous sommes ici concernés par les entreprises qui innove dans la technologie.
- Elles ont les caractéristiques des petites entreprises industrielles. La particularité de la petite taille est ici pertinente, notamment dans le mode de management et l'accès aux ressources. Mais pour le jeune entreprise de haute technologie, plutôt orientée vers la croissance, il ne devrait s'agir que d'une phase transitoire.

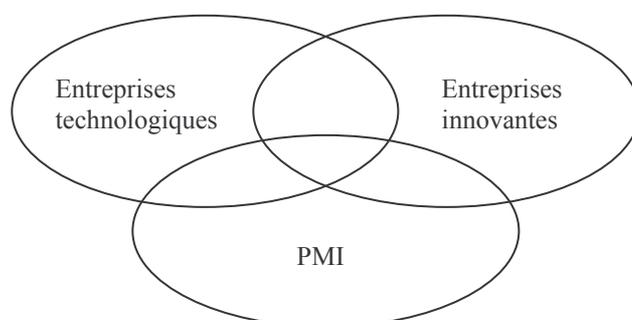


Figure I- 1 : Représentation des entreprises de haute technologie

2.2.2. Caractéristiques économiques

Leurs caractéristiques économiques ont été décrites par différents auteurs [Cooper 1986] [Cooper *et al.* 1997] [Albert *et al.* 1998].

Elles appartiennent à des secteurs d'activité très instables, notamment en raison de la rapidité et de l'ampleur des évolutions technologiques. Les technologies telles que l'électronique, l'informatique, les télécommunications, l'énergie, les matériaux, les sciences du vivant ont donné naissance, souvent en s'associant, à des secteurs d'activité en très forte croissance dans les pays les plus développés. La convergence et l'intégration de ces technologies, c'est-à-dire leur application concomitante dans un même produit aux fonctionnalités multiples, est une cause du foisonnement de ces technologies.

Elles ont des dépenses de Recherche et Développement nettement plus importantes que la moyenne nationale. Elles vivent, en général, en relation étroite avec les milieux scientifiques, et disposent d'une proportion élevée de personnel hautement qualifié. Leurs produits ou services sont à forte valeur ajoutée et souvent de durée de vie courte ou assez courte.

En apportant des innovations sur le marché, elles bousculent l'équilibre précédent, contribuant à modifier la demande et, souvent, créant un nouveau marché. Un système de co-apprentissage fluide doit donc s'installer dans les relations clients-fournisseurs. S'adressant souvent à un nombre limité

de clients, elles vont devoir conquérir un marché international, voire mondial, ce qui nécessite, en général, des investissements en marketing et distribution élevés.

Elles demandent des investissements élevés qui sont fonction de trois facteurs : le coût de mise en œuvre des savoirs-faire utilisés (Recherche et Développement, production, marketing-vente), le temps d'immobilisation de ces ressources pour créer une activité économique rentable et les aléas.

2.2.3. Le management dans l'incertitude

Les particularités des jeunes entreprises de haute technologie tiennent à l'incertitude dans laquelle elles se développent : le manque de ressources et la prise de risque.

Dans ces situations, les modèles adaptés sont plutôt des modèles d'apprentissage et de découverte. Le développement suit une croissance forte et les modes d'organisation sont constamment en évolution. La vie organisationnelle au sein de ce type d'entreprises est d'ailleurs souvent dépeinte comme une réalité désordonnée, complexe et polymorphe : les attributions individuelles n'y sont pas clairement définies et se modifient en permanence afin de suivre le plus étroitement possible la dynamique collective du processus créatif. Cette situation est difficile à vivre par les hommes de l'entreprise, créant des malentendus, voire des conflits.

Le management est, dès lors, une pratique en mouvement. Il est ici moins un mode de contrôle qu'un processus de création de sens par l'action. Il n'est alors pas représenté par une personne, ni par une structure, mais par l'action elle-même et par le processus d'initiation et de maintien de liens entre les acteurs [Bernasconi *et al.* 2000].

2.3. CARACTERISTIQUES DES PRODUITS NOUVEAUX DE HAUTE TECHNOLOGIE

2.3.1. Des produits nouveaux

Analysons maintenant les caractéristiques de ces produits.

Choffray et Dorey [Choffray *et al.* 1983] distinguent trois types de produits nouveaux :

- Les produits repositionnés : par d'éventuelles légères modifications de l'aspect extérieur, le domaine d'application de ces produits est élargi et est perçu alors, par les utilisateurs potentiels, comme nouveau.
- Les produits reformulés : ils ont des caractéristiques physiques nouvelles que le consommateur ne perçoit pas mais qui permettent à l'entreprise d'en élargir le champ d'application, ou d'en baisser le coût de production, d'en augmenter la fiabilité.
- Les produits originaux : ils ont des caractéristiques techniques et esthétiques qui font que leur nouveauté est perçue par les consommateurs, mais également par l'entreprise qui met en œuvre son savoir faire.

D'autres classifications précisent cette différenciation entre ce qui est perçu par le consommateur et l'entreprise : les produits nouveaux issus d'opération « marketing » (extension de gamme, de secteur géographique, imitation de produit concurrent ...) et les produits mettant en œuvre des technologies et/ou des concepts marquant une rupture par rapport à l'existant, une mutation industrielle [Gautier 1995].

Dans notre cas d'étude, le terme « produits nouveaux de haute technologie » est à rapprocher de la dernière définition. En effet, nous traitons des **produits innovants ou novateurs**, inédits pour le marché dont la conception et la fabrication nécessitent elles-même le développement de nouvelles briques technologiques et de nouveaux procédés.

2.3.2. Spécificités

Quelles sont les particularités de ces produits nouveaux de haute technologie ?

☞ *Briques technologiques et procédés associés nouveaux*

Quand le produit est réellement nouveau et de haute technicité, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de produit strictement équivalent même au niveau mondial, il est difficile de réutiliser des briques technologiques existantes, des procédés de fabrication standardisés, des composants déjà commercialisés. L'entreprise doit développer des briques technologiques et des procédés de fabrication dont elle est seule, ou presque, à avoir l'utilité.

☞ *Briques technologiques et procédés associés évolutifs*

Ces produits étant souvent liés à un nouveau besoin dérivé d'une technologie nouvelle comme nous l'avons vu précédemment, leur configuration, leurs fonctions détaillées et leurs spécifications ne peuvent pas être figées définitivement dès la conception, elles évoluent forcément en fonction de l'utilisation des premiers prototypes de part l'interaction « nouvelles technologies et nouveaux besoins ». L'évolution constante des produits notamment au cours de la phase d'industrialisation est donc une contrainte forte à prendre en compte. Par exemple, dans le cas des systèmes numériques pour l'imagerie médicale, les essais par les radiologues sur les premiers prototypes livrés aux hôpitaux et aux cliniques ont permis de développer de nouvelles pratiques de diagnostic qui ont engendré de nouveaux besoins nécessitant le développement de nouvelles fonctions du produit. Les briques technologiques et les procédés de fabrication spécifiquement développés pour et par l'entreprise doivent donc pouvoir être en plus évolutifs.

☞ *Forte valeurs des produits*

La haute technicité et la singularité de ces produits engendrent des coûts élevés de développement, de prototypage et de fabrication pour les produits finis comme pour les sous-ensembles achetés (exemple : dalle de photodiodes pour l'électronique).

☞ *Interaction de plusieurs métiers*

Ces produits novateurs comprenant souvent l'intégration de plusieurs technologies, l'élaboration des briques et procédés associés recouvre plusieurs métiers différents : mécanique, électronique, chimie, traitement du signal, informatique ... Cette interaction de métiers différents et de technologies nouvelles accroît encore la complexité de conception et de fabrication et amène aussi de la complexité au niveau du fonctionnement du produit.

3. LA MAITRISE DE LA QUALITE

3.1. DEFINITIONS

Rappelons dans cette partie en quoi consiste la maîtrise de la qualité en général et plus particulièrement la résolution de problèmes qualité. Commençons par quelques définitions.

☞ *Qualité*

Selon la norme ISO9000 [ISO 9000 : 2000], la qualité est définie comme « l'ensemble des caractéristiques d'une entité (activité, processus, organisme ...) qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites ».

☞ *Maîtrise de la qualité*

La maîtrise de la qualité est un élément clé dans la course à la réussite et à la compétitivité des entreprises. Elle peut être définie comme regroupant l'ensemble des techniques et activités à caractère opérationnel utilisées pour satisfaire aux exigences des clients. Les exigences des clients étant évolutives, elles induisent donc un besoin d'amélioration continue de la qualité. Cette amélioration se situe à tous les niveaux : au niveau de la qualité technique, au niveau de la qualité en conception, au niveau de l'organisation [Cherfi 2002].

Pour organiser et outiller cette démarche d'amélioration continue, on dispose d'outils, de techniques et de méthodes qualité basés sur des concepts qualité. Nous retiendrons les définitions de Béchard et Raïche [Béchard *et al.* 2001] [Raïche *et al.* 2000] pour ces termes.

☞ *Outil qualité*

L'outil qualité proprement dit est un moyen ou un instrument conçu pour réaliser de façon efficace une tâche précise, selon un mode opératoire bien défini. Relativement autonome, il permet de cibler et d'appuyer les activités d'amélioration et de changement. Exemple : cartes de contrôle, diagramme de Pareto.

☞ *Technique qualité*

La technique qualité est un ensemble de procédés ordonnés de façon systématique et utilisé dans un contexte précis pour atteindre un objectif bien déterminé. D'une portée plus large que le simple outil qualité, elle est souvent constituée de plusieurs petits outils ordonnés et structurés selon un ensemble de règles opératoires. Exemple : QFD (Quality Function Deployment), MSP (Maîtrise Statistique des Procédés).

☞ *Méthode qualité*

La méthode qualité, parfois appelée approche, est un ensemble de démarches raisonnées, de règles et de principes permettant d'arriver à un résultat dans un contexte précis. Contrairement à la technique, elle ne requiert pas nécessairement un algorithme rigoureux de mise en œuvre. Toutefois, elle peut regrouper et structurer de façon logique un ensemble d'outils et de techniques. Exemple : Six Sigma, TRIZ (méthode de résolution de problèmes en conception).

☞ *Concept qualité*

Le concept qualité est une abstraction, une représentation théorique et générale. De nature fondamentale, il se matérialise dans et par les méthodes, techniques et outils qu'il oriente selon les grands principes qualité sur lesquels il s'appuie. Exemple : La maîtrise de la variabilité, « Faire parler les produits ».

3.2. MAITRISE DES PROCESSUS

3.2.1. Processus de production et processus de conception

En dehors des définitions normatives, il est évident que la qualité comporte plusieurs aspects : qualité du produit, qualité des processus ... Sachant que l'obtention de la qualité du produit n'est possible que si l'on maîtrise les différents processus qui participent de près ou de loin à la réalisation de celui-ci, il est important d'avoir une démarche structurée et cohérente pour maîtriser cette qualité.

Le processus de production est de loin celui pour lequel le plus d'outils, de techniques, de méthodes et de concepts ont été développés. On peut par exemple citer les cartes de contrôle pour les outils, la MSP pour les techniques, le Six Sigma pour les méthodes et la Maîtrise de la variabilité pour les concepts. Le risque pour les entreprises est de se sentir perdue devant cette prolifération de techniques qualité et de mettre en place ces outils sans une démarche structurée. Il nous paraît important en effet que chacune d'entre elles puisse sélectionner les outils et méthodes les plus appropriés à son contexte et qu'elle puisse les déployer selon une démarche structurée qui les rendront pertinents et efficaces.

Au fil du temps, la nécessité de maîtriser la qualité a remonté les étapes correspondant au cycle de vie du produit, elle est devenue un objectif important de la phase de conception. On a donc aussi vu se développer des moyens pour la maîtriser. On peut par exemple citer l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité) pour les outils, le QFD pour les techniques, TRIZ pour les méthodes et l'Ingénierie Robuste pour les concepts. Mais là encore c'est plus la volonté d'atteindre un objectif et l'utilisation d'une démarche intelligente pour l'atteindre qui seront importantes.

3.2.2. Plus que des aspects techniques

En fait, pour réussir cette maîtrise de la qualité, il est nécessaire de prendre aussi en considération les aspects organisationnels et managériaux, en plus des aspects techniques. Les travaux de Deming [Deming 1982], en particulier, montrent bien la nécessité d'associer les démarches statistiques aux méthodes de management. Chacun des quatorze points de sa méthode est basé sur ces aspects : la responsabilisation de tous, l'implication de tous, le besoin de formation, la connaissance des outils statistiques ... La structure de la nouvelle version des normes ISO 9000 version 2000 [ISO 9000 : 2000] illustre parfaitement cette association (voir Figure I- 2). [Cherfi 2002]

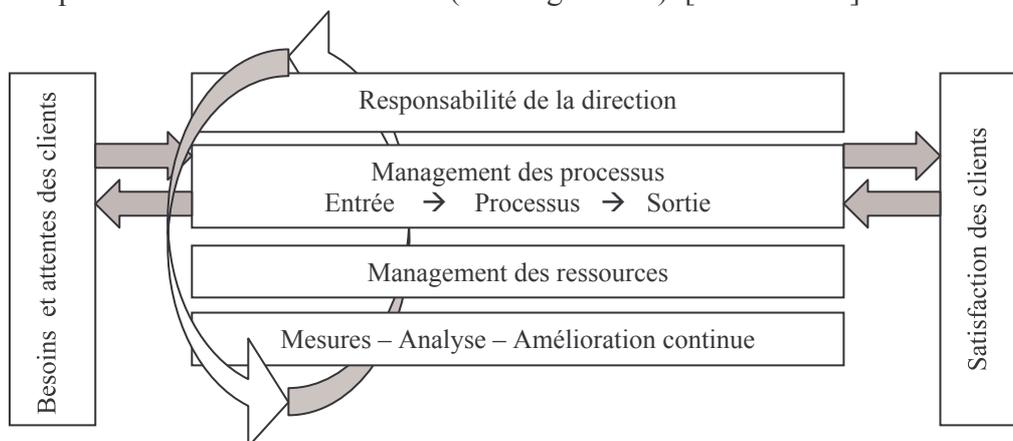


Figure I- 2 : Représentation de ISO 9000 version 2000

Nous aimerions mettre aussi l'accent sur un aspect trop souvent occulté pour la réussite de la mise en place d'une démarche qualité quelle qu'elle soit : le contexte socioculturel.

Sans vouloir nous immiscer dans un domaine qui n'est pas le notre, nous souhaitons simplement mentionner l'importance de la prise en compte de la dimension humaine dès que l'on parle de management de la qualité. On pourrait faire le parallèle, certes un peu brutal mais très parlant, avec le déploiement d'une politique dans un pays pour lequel on prend systématiquement en compte l'aspect socioculturel : on n'imagine pas faire un « copier-coller » de la même politique en Europe et en Afrique !!

Comme le précise Nouiga [Nouiga 2003], la résistance au changement est un risque associé au contexte socioculturel, il faut manager ce risque par la connaissance de la culture et par la prise en compte de la culture : ses leviers et ses résistances. Quels sont les risques de la non prise en compte du contexte culturel dans le processus de mise en oeuvre d'une démarche qualité ? Les risques sont liés d'une part à la mise en oeuvre des processus de changement lui-même, et d'autre part à la conception de ces processus de changement. La démarche qualité qui est un système de management ne peut donc ignorer la diversité des cultures. Il n'y a pas une seule bonne méthode d'application d'une méthode qualité. Celle-ci doit être adaptée à la culture et à l'histoire de chaque entreprise. De nombreux auteurs [Kourilskybelliard 1995] [D'Iribarne 1998] imputent la réussite ou l'échec de la démarche qualité et des cercles de qualité à l'adaptation ou non au contexte socioculturel.

3.3. LA RESOLUTION DES PROBLEMES QUALITE

3.3.1. Définition de problèmes

Avant de définir ce qu'est la résolution d'un problème qualité, étudions le terme « problème » dans son acception courante (dictionnaire). Il comprend trois définitions :

1. Question à résoudre qui prête à discussion, dans une science. Exemple : problèmes philosophiques.
2. Question à résoudre, portant soit sur un résultat inconnu à trouver à partir de certaines données, soit sur la détermination de la méthode à suivre pour obtenir un résultat supposé connu. Exemple : problèmes de géométrie.
3. Difficulté qu'il faut résoudre pour obtenir un certain résultat; situation instable ou dangereuse exigeant une décision. Exemple : problèmes techniques.

La différence entre la dernière définition et les deux autres tient surtout de la connaissance ou non du résultat à atteindre. Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous nous intéressons aux problèmes techniques, c'est-à-dire aux problèmes que l'on peut rencontrer sur les produits ou sur les procédés, souvent appelés « problèmes qualité ». Le résultat à atteindre dans un problème technique étant généralement connu, nous retiendrons donc la dernière définition « difficulté qu'il faut résoudre pour obtenir un certain résultat ».

Ce résultat peut avoir déjà été atteint dans le passé ou non. Cette distinction est évoquée par plusieurs auteurs que nous présenterons dans la partie suivante.

Dans la classification des problèmes selon Hosotani [Hosotani 1997], on retrouve aussi cette différence induite par le critère « solution connue/inconnue » avec en plus le critère « cause connue/inconnue ». Le Tableau I- 1 présente cette classification :

- Les problème simples (type C) : les causes sont simples et les solutions à apporter apparaissent immédiatement.
- Les problèmes nécessitant une technologie de haut niveau (type B) : les causes ont été identifiées mais on ignore comment résoudre le problème.
- Les problèmes qui constituent un défi (type A) : particulièrement difficiles, ni leurs causes, ni leurs solutions sont connues.
- Les problèmes pour lesquels on connaît la solution mais qui exigent une grande attention (type D) : on sait ce qu'il convient de faire mais on ne comprend pas pourquoi !! C'est le cas de la recette de cuisine. Le danger de cette situation est de se retrouver forcément à un moment ou à un autre devant l'impossibilité de reproduire avec exactitude le processus à réaliser et de ne pas savoir les conséquences de cette situation. En fait, nous pensons que cette situation revient à un problème de type A car la solution n'est pas vraiment connue : elle est « noyée » dans un enchaînement d'actions.

Solution	Inconnue	B Problèmes nécessitant de hauts moyens technologiques	A Problèmes méritant d'être résolus
	Connue	C Problèmes simples	D Problèmes exigeant une vigilance particulière
		Connue	Inconnue
		Cause	

Tableau I- 1 : Types de problèmes

3.3.2. Définitions de problèmes qualité

Comme nous l'avons mentionné, dans le cadre de nos travaux de recherche, nous nous intéressons aux problèmes techniques, c'est-à-dire aux problèmes que l'on peut rencontrer sur les produits ou sur le procédé, souvent appelés « problèmes qualité ». Dans la littérature, on distingue plusieurs types de problèmes qualité [Shewhart 1931] [Deming 1982] [Juran *et al.* 1980] [Kepner *et al.* 1981] [Nickols 1996] [Palady *et al.* 2002] [Smith 2000].

Shewhart [Shewhart 1931] et Deming [Deming 1982] ont montré que les problèmes qualité pouvaient être séparés en deux groupes, chacun nécessitant une approche différente de résolution de problèmes :

- **Les problèmes de cause spéciale** (ou assignable) : une instabilité soudaine et imprévisible a provoqué une baisse du niveau de performance et empêche le retour à ce niveau.
- **Les problèmes de causes communes** : c'est le niveau de performance stable qui est le problème, le niveau escompté de performance est plus élevé.

Juran [Juran *et al.* 1980] et Kepner Tregoe [Kepner *et al.* 1981] ont aussi confirmé cette distinction des problèmes qualité en opposant respectivement les « problèmes sporadiques » des « problèmes chroniques » et les « écarts dus à un changement » des « écarts de premiers jours ».

Nickols [Nickols 1996] définit trois types de problèmes ou tâches :

- **Réparation** : pour rétablir à son niveau de performance prévu un système dysfonctionnant.
- **Amélioration** : pour revoir un système qui n'atteint pas les objectifs de performance escomptés.
- **Ingénierie** : pour concevoir un nouveau système ou une nouvelle solution qui satisfera des objectifs pertinents.

La catégorisation de Nickols inclut une catégorie hybride (amélioration), reflétant le fait que l'amélioration de la performance est souvent atteinte par la reconception d'un système existant.

Selon Smith [Smith 2000], il y a deux types de base de problèmes qualité :

- **Les problèmes de performance** regroupant les problèmes de conformité, de performance non structurée (absence de formalisation) et de rendement.
- **Les problèmes de conception** regroupant les problèmes de conception de produit ou de processus.

Cette catégorie peut porter à confusion car un problème de rendement peut être dû à un problème de conception (non robuste par exemple).

Le Tableau I- 2 récapitule la distinction des problèmes selon les auteurs cités précédemment.

	Nickols	Smith	Shewhart Deming	Juran	Kepner-Tregoe
Groupe 1	Réparation Amélioration	Problème de performance	Problème de cause spéciale	Sporadique	Ecart du à un changement
Groupe 2	Amélioration Ingénierie	Problème de conception	Problème de causes communes	Chronique	Ecart de premiers jours

Tableau I- 2 : Récapitulatif des types de problèmes selon les auteurs

Cette classification est primordiale car les méthodes utilisées pour résoudre ces deux types de problèmes ne sont pas les mêmes. Dans notre cas d'étude, nous nous focalisons essentiellement sur les problèmes de type Groupe 1, c'est-à-dire des problèmes de causes spéciales (pour reprendre le terme le plus courant). Par la suite, nous entendrons donc par « problème qualité » un problème technique de cause spéciale sur le produit ou sur le procédé.

3.3.3. Résoudre un problème qualité

Dans le cas d'un problème de type C (problème simples) selon la classification de Hosotani [Hosotani 1997], on peut le résoudre par un raisonnement logique, fondé sur les connaissances, l'expérience et les compétences sans faire appel forcément à une démarche de résolution de problèmes.

Dans les autres cas, une démarche de résolution de problèmes est souvent utile. Il existe deux grandes démarches de résolution de problèmes [Hosotani 1997] :

- La démarche théorique. Egalement appelée méthode déductive, cette démarche est utilisée pour résoudre des problèmes en appliquant des principes physiques, chimiques, économiques ou scientifiques, ou encore par analogie avec des cas antérieurs similaires. Cette démarche est particulièrement utilisée pour les problèmes de type B (cause connue et solution inconnue). Elle est plus efficace lorsqu'il s'agit de conduire une recherche fondamentale en laboratoire.
- La résolution de problème par la qualité. Si la première démarche est déductive, celle-ci pourrait être qualifiée d'inductive. Les causes des problèmes sont identifiées par une série de questions, permettant de remonter jusqu'à la source en partant des faits. Cette démarche est plutôt utilisée dans les problèmes de type A et D (problèmes dont la cause est inconnue). Elle donne les meilleurs résultats dans l'unité de travail.

Nous retiendrons donc cette dernière démarche. Elle est souvent instrumentée par un certain nombre d'outils, qui varient selon la méthode retenue, dans le but de collecter des données et des connaissances, de les rassembler, de les comparer, de les analyser et de prendre une décision sur la base de cette analyse. Quelque soit la méthode retenue, on retrouve le cercle PDCA de Deming comme indiqué dans la Figure I- 3.

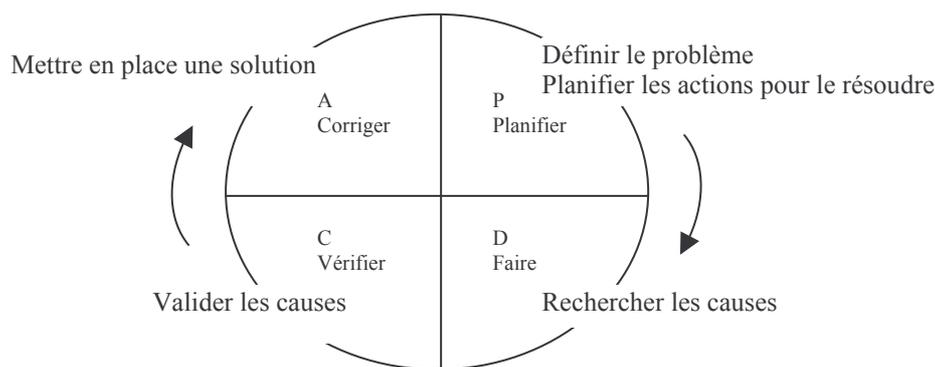


Figure I- 3 : La résolution des problèmes suit le cercle PDCA de Deming

4. LA RESOLUTION DES PROBLEMES QUALITE DANS LE CAS DES PRODUITS NOUVEAUX DE HAUTE TECHNOLOGIE

Dans les parties précédentes, nous avons présenté le développement et les caractéristiques des produits nouveaux de haute technologie. Puis, nous avons rappelé en quoi consistait la maîtrise de la qualité des produits en général et plus particulièrement la résolution des problèmes qualité. Croisons maintenant les deux parties pour identifier les spécificités que les entreprises de haute technologie doivent prendre en compte pour maîtriser la qualité de leurs produits, pour résoudre leurs problèmes qualité.

4.1. DES STRUCTURES D'ACCOMPAGNEMENT

La démarche qualité à mettre en place dans le cas des produits nouveaux de haute technologie s'apparente plutôt à une démarche d'accompagnement qu'à une structure de pilotage. En effet, dans un système fortement porteur d'innovation et en constante évolution, il est quasi-impossible de pouvoir réaliser des modèles d'une complexité adéquate à celle du système modélisé pour proposer ensuite des boucles de rétroaction. On a donc toujours un écart plus ou moins important entre la relative simplicité du ou des modèles et la relative complexité du système. Le comportement du système et son évolution dynamique présentent une part d'imprévisibilité qu'il faut admettre en « accompagnant » au mieux les évolutions imprévues par des conduites opportunistes [Kieffer 2005].

Ces structures d'accompagnement, par le biais d'observations et d'analyses outillées, doivent permettre d'apprendre sur les processus et sur les produits pour réduire les causes communes et pour éradiquer les causes spéciales. Ces apprentissages pourront ensuite être intégrés dans les standards de conception et de production de l'entreprise.

Les démarches et outils méthodologiques à développer seront donc orientés vers la recherche et la collecte de données (appelée cueillette de données) utilisant plusieurs sources d'information. Il existe plusieurs méthodes de cueillette de données [Dionne 1998] :

- Méthode historique : enquête dans le temps, reconstitution du passé
- Entrevue : questionnaires, grille d'entrevue, enregistrement
- Analyse de données chiffrées (statistiques)
- Observation d'un groupe ou d'un phénomène : grille d'observation, vidéo, photographies, journal de bord, carnet de terrain, instruments de mesure ou d'analyse scientifiques, logiciels, bases de données
- Expérimentations scientifiques

Notre cadre de recherche se focalisant sur les problèmes de cause spéciale, il nous faut proposer une structure d'accompagnement utilisant ce type d'outils permettant de trouver l'origine de chaque problème et de le corriger. Etudions dans la partie suivante quelles sont les contraintes à prendre en compte.

4.2. CONTRAINTES POUR LA RESOLUTION DES PROBLEMES QUALITE

4.2.1. Contraintes liées aux spécificités de l'entreprise

Nous avons vu que les particularités des jeunes entreprises de haute technologie tiennent à l'incertitude dans laquelle elles se développent : le manque de ressources et la prise de risque.

La structure d'accompagnement à proposer pour résoudre les problèmes doit donc prendre en compte encore plus que pour les entreprises traditionnelles les contraintes de temps et de ressources disponibles.

La prise de risque est importante, les problèmes doivent être résolus très rapidement afin que les produits puissent être disponibles et fiables à temps sur le marché. Or, les ressources sont limitées. Il est donc nécessaire que la structure d'accompagnement permettent d'associer ces deux contraintes antagonistes.

Quant à l'aspect socioculturel, le personnel de ce type d'entreprises est généralement d'une culture technique et d'une nature créative. Pour proposer une structure d'accompagnement, nous devons donc prendre en compte cet aspect, voire nous appuyer dessus, pour le fond de la démarche et la forme de son déploiement.

4.2.2. Contraintes liées aux spécificités des produits

Les spécificités des produits nouveaux de haute technologie ont été présentés précédemment. Le Tableau I- 3 présente la déclinaison de ces spécificités en contraintes pour la résolution des problèmes qualité.

Spécificités	Contraintes
Briques technologiques et procédés associés nouveaux et évolutifs	Nombre important de problèmes à traiter Difficulté d'établir une liste exhaustive de causes possibles Difficulté d'accéder à l'information pertinente
Interaction de plusieurs métiers	Morcellement de l'information Pas de vision globale
Forte valeur des produits	Peu d'occurrences pour l'analyse Partie amont à l'expérimentation majeure Expérimentation limitée

Tableau I- 3 : Déclinaison de spécificités des produits novateurs en contraintes pour la résolution de problèmes

☞ *Nombre important de problèmes à traiter*

La jeunesse des briques technologiques utilisées pour la conception des produits et des procédés de fabrication et leur constante évolution engendrent inévitablement un nombre important de problèmes à traiter. Or, nous avons vu que le temps et les ressources alloués pour les résoudre étaient limités. La structure d'accompagnement devra donc proposer une priorisation dans le traitement des ces problèmes.

☞ *Difficulté d'établir une liste exhaustive de causes possibles*

La singularité et la haute technicité des briques technologiques et des procédés associés rendent difficile la recherche des causes possibles pour un problème donné, par manque de connaissances et d'expériences. La structure devra donc guider l'utilisateur dans la recherche des causes potentielles.

☞ *Difficulté d'accéder à l'information pertinente*

Les mêmes raisons font qu'il est difficile de déterminer quelle est l'information pertinente à relever. Une énorme quantité d'informations concernant le produit et le procédé de fabrication est donc enregistrée et l'information pertinente peut être ou non parmi ce relevé. L'information disponible est donc paradoxalement en quantité importante et incomplète. La structure devra donc permettre de rechercher l'information pertinente, soit dans les données existantes, soit en organisant une collecte de données.

☞ *Morcellement de l'information – Pas de vision globale*

La participation de plusieurs métiers de haute technicité dans le développement du produit et des procédés de fabrication amène un morcellement de la connaissance et des données. Peu de personnes ont une vision globale et complète du produit, du procédé de fabrication et de l'application. La difficulté de recherche de causes ne s'en trouve qu'accrue. La structure devra être compatible avec ces sources multiples et morcelées d'informations.

☞ *Peu d'occurrences pour l'analyse*

La forte valeur des produits ne permet pas d'attendre une statistique suffisante pour démarrer un processus de résolution de problème. La structure devra donc permettre de déterminer les causes et de proposer des solutions dès les premières occurrences du problème.

☞ *Partie amont à l'expérimentation majeure - Expérimentation limitée*

Le coût élevé des produits rend majeure la partie amont à l'expérimentation dans le processus de résolution, le nombre d'essais possibles est limité. La structure devra pousser la recherche et la collecte d'informations en amont, l'idéal à viser étant le « zéro essai ».

5. CONCLUSION

L'objectif de notre travail est de proposer une structure d'accompagnement pour la résolution des problèmes qualité dans le cas des produits nouveaux de haute technologie. Par « problème qualité », nous entendons tout problème technique à cause spéciale concernant le produit ou le procédé.

Cette structure devra prendre en compte les contraintes imposées par les spécificités de ce contexte.

- D'un point de vue organisationnel, elle devra permettre de résoudre rapidement les problèmes avec un nombre de ressources très limité.
- D'un point de vue socioculturel, elle devra s'appuyer sur la culture technique et la nature créative des personnes pour le fond de la démarche et la forme de son déploiement.
- D'un point de vue technique, la structure d'accompagnement devra tout d'abord proposer une priorisation dans le traitement des problèmes. Ensuite, pour la recherche des causes, elle devra guider l'utilisateur et lui permettre d'identifier l'information pertinente parmi les sources multiples d'informations (immédiatement disponibles ou non) dès les premières occurrences du problème. La structure devra pousser la recherche et la collecte d'informations en amont de l'expérimentation, l'idéal à viser étant le « zéro essai ».

Enfin, il faudra prévoir que la structure proposée puisse être adaptable à la future évolution de ce type d'entreprise : cohabitation de produits tendant à se stabiliser et de produits nouvellement développés. Elle devra donc proposer une démarche de résolution de problèmes adaptée à tous les produits fabriqués, qu'ils soient en phase de production « de croisière » ou en phase de préindustrialisation.

Chapitre II

Vers une structuration de l'aide méthodologique pour la résolution des problèmes qualité

Ce chapitre a pour objectif de présenter l'évolution de l'aide méthodologique, de comparer les diverses approches proposées pour résoudre un problème et d'étudier leur adéquation avec notre problématique.

Nous tenterons de répondre aux questions suivantes : Comment s'est opérée l'évolution des outils de résolution de problèmes ? Comment est-on passé de la boîte à outils à la méthode ? Quelles sont les principales méthodes actuelles ? Quels apports peuvent-elles apporter à notre problématique ? Quelles sont leurs faiblesses au regard de notre contexte ?

1. INTRODUCTION

Les premières évolutions en matière d'aide méthodologique pour la qualité ont d'abord porté sur le développement d'outils permettant d'extraire de l'information (données ou opinions des personnes), de l'agréger, de l'analyser puis de prendre une décision et de la mettre en œuvre. Ainsi, on a vu se développer les sept outils de la qualité aussi appelés outils de base, dont le célèbre diagramme d'Ishikawa, rapidement renforcés par de multiples autres outils (sept nouveaux outils, outils statistiques ...).

La démultiplication foisonnante de ces outils a vite donné une impression de « grande boîte à outils sans casier » : on disposait de nombreux éléments méthodologiques mais il manquait leur ordre d'utilisation, leur logique d'enchaînement ... Par la suite, la réflexion s'est donc plus portée sur la conception de guide d'utilisation de ces outils, la création de méthodes, basées sur des principes, visant à organiser les outils pour une utilisation harmonieuse. On a ainsi vu fleurir une pléthore de méthodes dont l'emblématique méthode Six Sigma.

Dans une première partie, nous montrerons l'évolution des outils, comment ils se sont peu à peu complexifiés et diversifiés, à travers des exemples d'illustration.

Dans une deuxième partie, nous verrons le besoin d'organisation de ces outils et les premières catégorisations proposées. Nous discuterons l'adéquation des outils à notre contexte.

Dans une troisième partie, nous verrons comment la boîte à outils est devenue méthode et nous présenterons quatre illustrations de méthodes : Six Sigma, Shainin, Kepner Tregoe et G8D. Ces méthodes seront analysées selon différents points de vue : principes, structurel, organisationnel et socioculturel.

Dans une dernière partie, nous reprendrons ces mêmes points de vue pour étudier l'adéquation de ces méthodes à notre problématique et identifier les points d'amélioration à développer pour notre proposition.

2. DEMULTIPLICATION DES OUTILS

2.1. INTRODUCTION

Dans un premier temps, le besoin d'aide méthodologique s'est fait ressentir avec l'arrivée des cercles de qualité. Les personnes de différents services devaient apprendre à travailler ensemble pour résoudre les problèmes qualité. Elles avaient donc besoin d'avoir une vision claire, visuelle et partagée des problèmes pour mieux les comprendre et les appréhender. Les premiers outils vulgarisés, les sept outils de base (« 7 QC tools »), ont donc été associés dans cette optique par la JUSE (Japanese Union of Scientists and Engineers) en 1972.

Ces outils ont permis d'un point de vue plus macroscopique pour l'entreprise :

- de systématiser, de rationaliser et d'harmoniser les façons de faire,
- de responsabiliser et rassurer les personnes dans leur traitement des problèmes,
- d'encourager le travail en équipe,
- de déployer un langage commun,
- de favoriser la communication,
- d'augmenter l'efficacité et l'efficience de la résolution des problèmes.

Très vite, le besoin d'autres outils s'est fait ressentir pour traiter des problèmes plus complexes demandant des collectes d'informations et des analyses plus fines, d'appréhender le problème dans son ensemble, d'organiser les différentes actions à mener et cela avec une efficacité toujours plus grande. Les outils se sont peu à peu multipliés : les outils de base ont été dérivés et complexifiés, de nouveaux outils ont vu le jour comme les « sept nouveaux outils de la qualité » (« 7 new QC tools »). La partie 2.2 présente cette évolution des outils qualité.

Les statistiques ont permis d'apporter des compléments à ces premiers outils et ont fourni un énorme réservoir d'autres outils, évoqués dans la partie 2.3, tels que les cartes de contrôle, les plans d'expériences, les techniques d'analyses descriptives ou inférentielles.

L'objectif de cette partie n'est donc pas d'exposer dans le détail tous les outils existants mais plutôt de présenter comment s'est opérée leur évolution. Un exemple d'outil illustre chaque partie. Les outils cités sont brièvement présentés en annexe I.

Avant de commencer cette partie, rappelons la définition d'un outil qualité proposée par Béchard [Béchard *et al.* 2001] : ***L'outil qualité proprement dit est un moyen ou un instrument conçu pour réaliser de façon efficace une tâche précise, selon un mode opératoire bien défini. Relativement autonome, il permet de cibler et d'appuyer les activités d'amélioration et de changement.***

2.2. OUTILS DE BASE DE LA QUALITE ET LEURS DERIVES

2.2.1. Neuf des sept outils de base de la qualité

Les outils se sont tellement multipliés et diversifiés qu'il est même aujourd'hui difficile de donner une liste reconnue par tous des sept outils de base de la qualité !! Il existe, en effet, plusieurs variantes selon les auteurs et les sources d'informations (revues, ouvrages, internet ...) [Hosotani 1982] [Hosotani 1997] [Duret *et al.* 2001] [Chauvel 2000] [Le Coz 2001a] [Site MQQ].

Sont généralement cités comme faisant partie des sept outils de la qualité :

- Diagramme causes-effet ou Diagramme d'Ishikawa
- Carte de contrôle
- Diagramme de Pareto
- Graphiques
- Fiche de relevé de données
- Histogramme
- Diagramme de corrélation
- Diagramme de concentration de défauts
- Diagramme de cheminement

Nous avons vu précédemment que ces outils ont été développés dans l'objectif de donner une vision claire et partagée du problème en répondant aux compléments circonstanciels suivants :

- L'objet : quels sont les différents problèmes présents ? Quel est le problème principal ? Outils : Diagramme de Pareto, Graphiques.
- Le lieu : où se situe le problème géographiquement et sur le produit ? Outils : Diagramme de cheminement, Diagramme de concentration de défauts.
- Le temps : quand est apparu le problème ? Outil : Cartes de contrôle, Graphiques.
- La manière : comment se manifeste le problème ? Outil : Histogramme.
- La cause : pourquoi est apparu le problème ? Quelles sont les causes ? Outils : Diagramme causes-effet, Cartes de contrôle, Fiche de relevé de données, Diagramme de corrélation.

Ces outils présentent l'intérêt d'être simples et très visuels. Ils ont la caractéristique d'être plutôt orientés traitement des données et donnent une image assez statique du problème : une sorte de photo du présent. Ils servent surtout à définir le problème après la collecte de données numériques.

📁 **Illustration : Diagramme causes-effet ou Diagramme d'Ishikawa**

Le diagramme causes-effet [Chauvel 2000] permet de visualiser de façon simple l'ensemble des causes potentielles concernant le constat d'un effet quel qu'il soit. Il se présente sous la forme d'arêtes de poisson dont la tête encadre l'effet dont on veut connaître les causes. La Figure II- 1 montre ce diagramme.

Après avoir identifié le problème en terme d'effet, on liste les causes potentielles par famille. Ces familles correspondent souvent aux 5M (Main d'œuvre, Matériel, Matière, Méthode, Milieu) mais ceux-ci peuvent être aussi être remplacés par d'autres classifications propres à l'entreprise (par type de métiers par exemple).

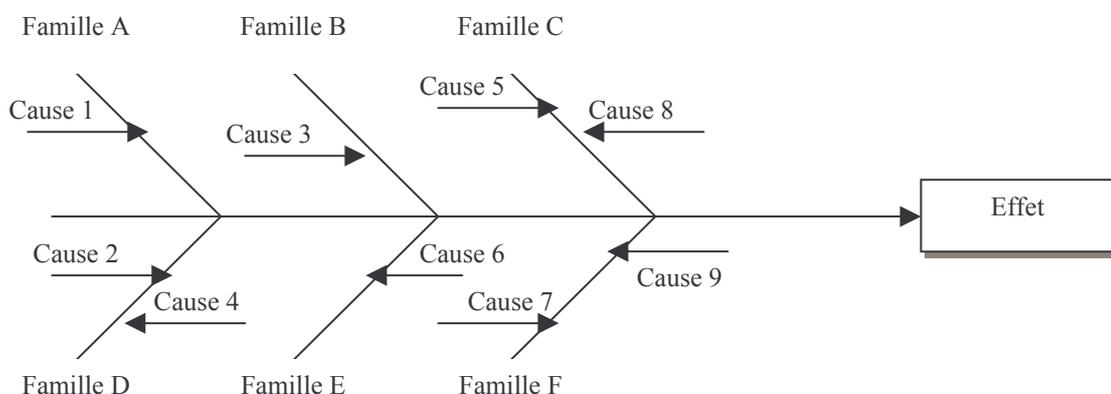


Figure II- 1 : Exemple de diagramme causes-effet

Cet outil nous donne une vision globale et actuelle de toutes les causes potentielles pouvant expliquer le problème caractérisé par l'effet énoncé. En revanche, il ne permet ni de visualiser une

séquentialité ou une hiérarchisation de ces causes, ni de planifier les actions à mener pour valider ou invalider ces causes.

Pour compléter ce premier set d'outils, d'autres outils de base sont donc souvent ajoutés :

- Le Brainstorming et le Vote pondéré pour traiter les données verbales et outiller les différents points de vue.
- Le Diagramme des 5 pourquoi pour remonter aux sources du problème et comprendre l'enchaînement des causes.
- Le QQQQCP pour organiser les actions futures.

2.2.2. Dérivés des sept outils de base de la qualité

Pour traiter les problèmes complexes et palier aux manquants des outils de base, de multiples outils dérivés de ceux-ci ont aussi été développés et se sont peu à peu complexifiés. Souvent cette complexification s'opère par la combinaison, l'association de plusieurs outils de base.

Chauvel détaille un bon nombre de ces outils dans [Chauvel 2000]. Il est aujourd'hui impossible de donner une liste exhaustive des outils qualité dérivés existants aujourd'hui. Il en existe plus d'une centaine.

Le Tableau II- 1 ci-dessous présente des exemples de création d'outils dérivés des outils de base.

Outils de base	Outils dérivés
Diagramme d'Ishikawa	Diagramme CEDAC
Diagramme d'Ishikawa Diagramme de cheminement	Diagramme causes effet méthode des processus
Diagramme d'Ishikawa Diagramme de cheminement Diagramme de Pareto Graphique	Diagramme ACE
QQQQCP	« Est / n'est pas »

Tableau II- 1 : Exemples d'outils dérivés des outils de base de la qualité

Pour illustrer ce phénomène, nous allons présenter deux outils dérivés : le Diagramme ACE et le Est N'est pas. Commençons par le Diagramme ACE qui est dérivé du Diagramme d'Ishikawa et qui associe en plus d'autres outils de base.

Illustration : Diagramme ACE

Le Diagramme d'Ishikawa a d'abord connu une première mutation : le Diagramme causes-effet par la méthode des processus. Cette évolution provient de l'ajout d'un Diagramme de cheminement qui permet ainsi de visualiser l'ensemble des causes potentielles concernant l'effet constaté aux différentes étapes de réalisation d'un processus, et non plus en les regroupant par famille. Il permet de positionner les causes possibles de façon séquentielle et donc d'avancer dans la méthode d'investigation en désignant les lieux où se feront les observations. Le diagramme se présente sous la forme d'un cheminement aboutissant à l'effet avec des flèches (causes) reliées aux diverses étapes du processus.

Le diagramme ACE (Action sur les Causes d'Erreurs) [Chauvel 2000] est une variante du diagramme causes-effet méthode des processus. Il permet de traiter un problème au niveau d'un processus en utilisant le diagramme causes-effet comme support du suivi du plan d'action.

Par rapport au diagramme causes-effet méthode des processus, à chaque étape du processus est associé un Diagramme de Pareto des non-conformités mis à jour périodiquement. De plus, est associé à l'effet un Graphique temporel représentant le pourcentage d'unités non conformes observé durant la dernière période de temps. La Figure II- 2 montre ce type de diagramme.

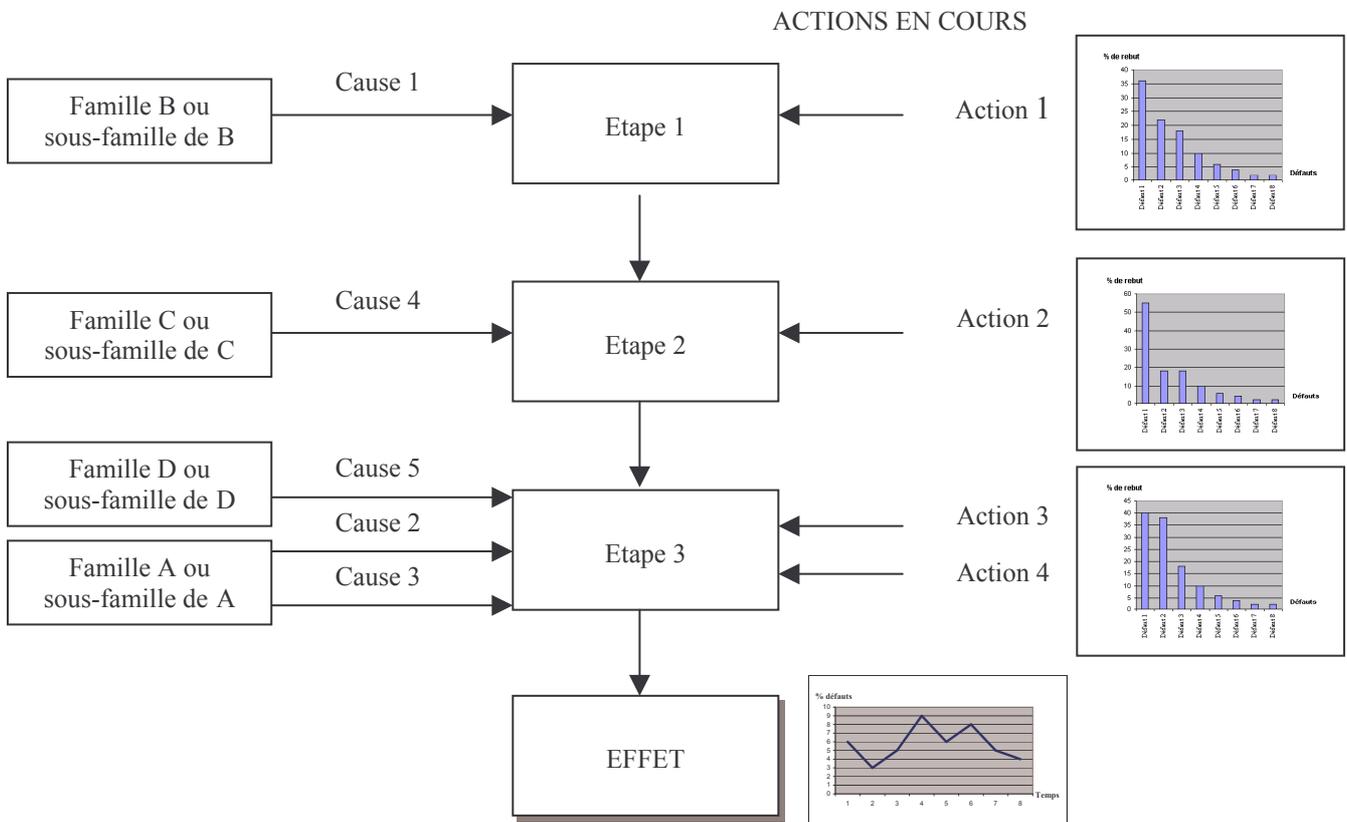


Figure II- 2 : Exemple de diagramme ACE

On voit que ce diagramme est le résultat d'une combinaison de quatre outils de base : Diagramme d'Ishikawa, Diagramme de cheminement, Diagramme de Pareto et un Graphique. Il permet ainsi de visualiser en même temps le processus, les causes potentielles et la répartition des défauts à chaque étape. Il donne donc une image plus dynamique du problème.

Présentons un autre cas d'illustration : Le « Est / n'est pas » dérivé du QOOQCP.

📁 **Illustration : « Est, n'est pas »**

Le « Est, n'est pas » [Kepner *et al.* 1980] est une variante du QOOQCP. Cet outil est purement analytique et permet de décrire le problème uniquement par des faits, en éliminant les on-dit, les opinions.

Il se présente sous la forme d'un tableau, comme montré dans le Tableau II- 2, dont :

- Les lignes représentent les dimensions du problème : Quoi, Où, Quand et Combien,
- Les colonnes caractérisent le « est » et le « n'est pas » du problème.

Enoncé du problème : Défaut X sur objet YZ		
	EST	N'EST PAS
QUOI ?	Objet Y de type Z Défaut X	Objet Y de type W Défaut K
OU ?	Machine A	Machine B
QUAND ?	Depuis le xx/xx/xx	Avant le xx/xx/xx
COMBIEN ?	Tendance croissante	Tendance stable

Tableau II- 2 : Exemple de tableau « Est, n'est pas »

On peut noter que cette variante du QOOQCP présente un intérêt majeur par rapport à l'outil original : l'adjonction de la colonne « N'est pas » permet de cerner complètement le problème en terme de description et de définir ainsi le périmètre. Cette complexification de l'outil original permet ici d'orienter la recherche de causes en identifiant des particularités entre le « est » et le « n'est pas » d'une même ligne.

2.2.3. Sept nouveaux outils qualité

Puis sont apparus les « sept nouveaux outils de la qualité » aussi dénommés « les sept outils de management » ou « outils de deuxième génération » ... [Nayatani 1984] [Hosotani 1997] [Le Coz 2001b] [Site MQQ] : Diagramme des affinités ou KJ (Kawahito Jiro), Diagramme relationnel, Diagramme en arbre, Diagramme en flèche ou diagramme sagittal, Diagramme matriciel, Diagramme de décision ou graphes de processus décisionnel (PDPC), Analyse factorielle de données. Ces nouveaux outils, plus conceptuels, répondaient à plusieurs besoins :

- Appréhender les problèmes avec un degré d'abstraction supérieur : Ex : Diagramme des affinités, Diagramme relationnel, Diagramme en arbre, Diagramme matriciel et Diagramme de décision.
- Traiter les données verbales plutôt que chiffrées. Ex : Diagramme des affinités, Diagramme matriciel et Diagramme de décision.
- Prise en compte de l'aspect multidimensionnel. Ex : Diagramme matriciel et Analyse factorielle.
- Remonter aux sources des problèmes : Ex : Diagramme des affinités, Diagramme relationnel, Diagramme en arbre, Diagramme de corrélation et Analyse factorielle.
- Identifier les moyens à mettre en oeuvre : Ex : Diagramme matriciel et Diagramme de décision.
- Planifier les futures actions : Ex : Diagramme en flèche, Diagramme de décision.

📁 **Illustration : Diagramme de décision ou graphe de processus décisionnel ou PDPC**

Le Diagramme de décisions ou PDPC (« Process Decision Progress Chart ») [Site MQQ] est un outil qui permet de prévoir les problèmes potentiels et de planifier des actions en tenant compte de ceux-ci. Il permet d'évaluer la faisabilité des étapes de mise en oeuvre. C'est un plan de contingence.

Le PDPC est d'abord constitué d'un Diagramme en arbre représentant les activités à planifier pour atteindre un objectif fixé, en gris sur la Figure II- 3. Ensuite, pour chaque étape critique, les questions suivantes sont posées :

- Quels problèmes risquent de se présenter à cette étape ?
- Quels résultats non souhaités peut-on obtenir à cette étape ?
- Que peut-on faire pour les éviter ou y faire face ?

Le diagramme est alors complété en intégrant les problèmes potentiels, les mesures correctives et préventives associées, en blanc sur la Figure II- 3.

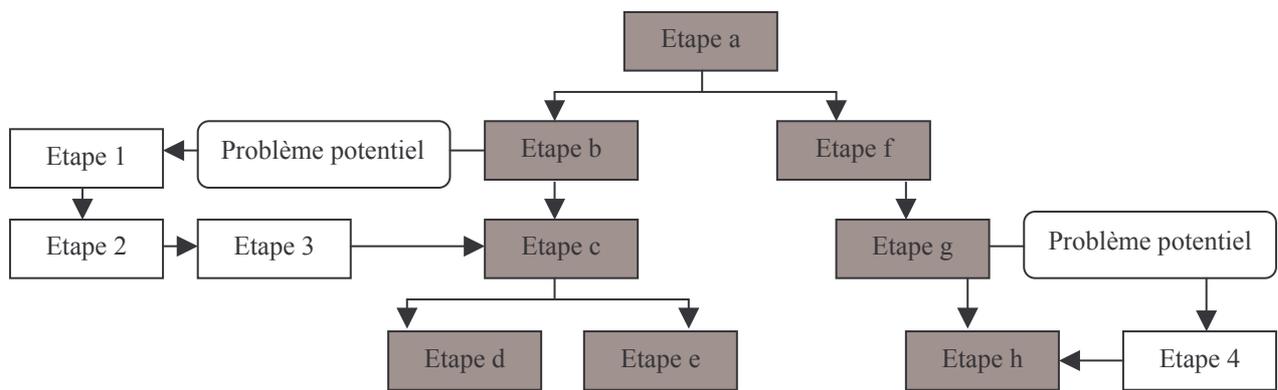


Figure II- 3 : Diagramme de décision PDPC

Ce diagramme apporte une aide méthodologique dans la planification d'un cheminement d'étapes d'un processus et la prise en compte des aléas. Cette illustration nous montre que ces outils sont plutôt des outils de management.

D'autres nouveaux outils du même type ont aussi été développés :

- Outils de planification. Exemple : GANTT
- Outils de prévention. Exemple : AMDEC
- Outils de créativité. Exemple : Les Six Chapeaux.

Ces outils permettent de définir le problème et les actions à mener avant la collecte de données numériques, contrairement aux outils de base.

2.3. ET LES OUTILS STATISTIQUES ...

L'augmentation du volume de données disponibles et la démocratisation des outils informatiques dans les entreprises ont permis de déployer dans le monde industriel les outils statistiques. A la panoplie déjà très fournie citée précédemment, s'ajoutent donc tous les outils basés sur des statistiques : outils de statistiques classiques, outils de MSP (Maîtrise Statistique des Procédés) et plans d'expériences. L'utilisation de ce type d'outils a aussi permis de répondre au besoin de la prise en compte de l'inférence multi-dimensionnelle et de mettre en lumière l'importance des données empiriques.

2.3.1. Les outils de statistiques classiques

Les outils classiques de statistique sont un puit formidable d'outils très nombreux et très élaborés pour lever toute subjectivité dans l'appréhension et la résolution de problèmes. On peut citer [Le Coz 2001a] :

- Les outils de statistique descriptive pour représenter objectivement les données. Exemple : Boîte à moustaches.
- Les outils de statistique d'analyse des données monovariées. Exemple : Test t de Student pour la comparaison de deux moyennes.
- Les outils de statistiques d'analyse des données multivariées. Exemple : Analyse en composantes principales (ACP).

Illustration : Boîte à moustaches

La boîte à moustaches est couramment utilisée en statistiques pour représenter les distributions de population. Dans cette représentation, on distingue la boîte et les « moustaches ». La largeur de la boîte correspond à 50% de la population (écart entre premier et troisième quartile). Les lignes qui s'étendent de part et d'autre de la boîte représentent l'étendue des données s'il n'y a pas de valeur aberrante. Les points à l'extérieur symbolisent les valeurs aberrantes.

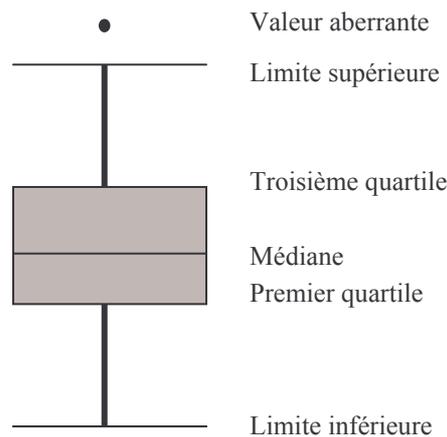


Figure II- 4 : Boîte à moustaches

Ce type d'outil permet de représenter de manière objective et normée une série de données et de comparer ainsi avec rigueur plusieurs séries entre elles.

2.3.2. Les outils de Maîtrise Statistique des Procédés

La Maîtrise Statistique des Procédés (MSP) regroupe des outils spécifiques à cette technique et certains des outils cités précédemment, notamment les outils qualité de base et les outils statistiques. On peut les regrouper en trois catégories :

- Les outils de description du procédé. Exemple : Capabilité, outil spécifique à la MSP.
- Les outils de recherche des causes de la variabilité du procédé. Exemple : Diagramme d'Ishikawa, un des sept outils de base.
- Les outils de mise sous contrôle statistique du procédé. Exemple : Carte de contrôle, outil spécifique à la MSP.

Ces outils se déclinent sous de très nombreuses variantes plus ou moins complexes pour s'adapter à chaque cas particulier. Il existe par exemple une multitude de cartes de contrôle : pour les petites séries, pour les dérives lentes, pour les empreintes multiples ...

📁 **Illustration : Carte de contrôle**

La carte de contrôle [NF X 06-031] assure un suivi du procédé en établissant les limites naturelles de celui-ci. Elle permet de distinguer les variations aléatoires des variations spécifiques et donc de diagnostiquer et de corriger les situations anormales en cours de fabrication.. Les cartes de contrôle peuvent s'appliquer à :

- Des grandeurs mesurables. Exemple : Carte aux moyennes et aux étendues.
- Des grandeurs non mesurables. Exemple : Carte aux attributs.

La Figure II- 5 montre un exemple de carte de contrôle.

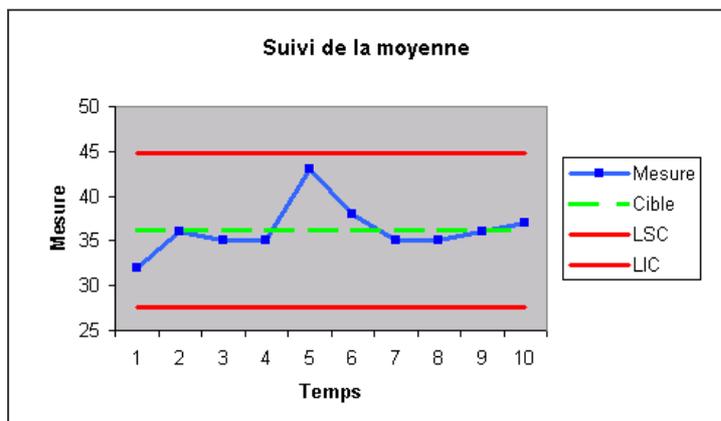


Figure II- 5 : Exemple de carte de contrôle

2.3.3. Les plans d'expériences

Les outils de la technique des plans d'expériences permettent de planifier des essais selon une stratégie qui permet d'obtenir des conclusions solides et adéquates quant à la connaissance des facteurs influents de manière efficace et économique.

Il existe deux types de plans d'expériences méthodologiquement indépendants en terme d'outils mais présentant des similitudes en terme de démarche :

- Les plans pour la recherche de facteurs influents (qui correspondent aux causes réelles dans le cas de la résolution d'un problème).
- Les plans de modélisation pour optimiser une ou plusieurs réponses qui caractérisent un processus ou un produit.

Les deux types de plans d'expériences comprennent aussi un très grand nombre de déclinaisons adaptées à différents contextes : domaine de variables très grand, réponse non continue ...

📁 **Illustration : Tables de Taguchi**

Genichi Taguchi [Taguchi 1987] a mis au point une méthode originale permettant, à partir de tables standards et de graphes associés, de déterminer les facteurs influents d'un système pour l'optimisation de produits et de procédés.

Les tables et les graphes associés permettent à l'expérimentateur de très vite cibler les essais qu'il aura à réaliser en fonction du nombre de facteurs à étudier et de leur degré de difficulté à être modifiés. Les tables se présentent sous la forme de matrices portant en ligne le nombre d'expériences à effectuer et en colonne les facteurs et leurs interactions. Ces tables sont notées par exemple $L_4 (2^3)$: 4 expériences, 2 modalités et 3 colonnes. Le Tableau II- 3 présente cette table.

	Col 1	Col 2	Co 1 3
Lig 1	1	1	1
Lig 2	1	2	2
Lig 3	2	1	2
Lig 4	2	2	1

Tableau II- 3 : Exemple de table de Taguchi : L_4

2.4. CONCLUSION

Nous avons vu qu'il existe une grande quantité et une grande diversité d'outils pouvant être utilisés pour la résolution des problèmes qualité : les outils qualité de base et leurs dérivés, les nouveaux outils de la qualité, les outils de statistiques classiques, les outils de MSP, les outils des plans d'expériences ...

Devant cette montagne d'outils, le besoin de structuration s'est vite fait ressentir afin de pouvoir faire un choix du ou des outils à utiliser. La partie suivante montre les premières organisations des outils.

3. VERS UNE ORGANISATION DES OUTILS

3.1. INTRODUCTION

Pour organiser cette grande boîte à outils, des « casiers » ont été formés, c'est-à-dire des regroupement d'outils en classes, plus facilement maniables.

Plusieurs classifications ont alors été élaborées avec des critères portant sur le fond et la forme. Dans la partie 3.2 nous proposons de diviser les classifications rencontrées le plus fréquemment dans la littérature en trois catégories : classifications de phases, de nécessité et de forme.

Dans la partie 3.3, nous proposerons une classification adaptée à notre besoin, c'est-à-dire pouvoir mesurer l'adaptation des outils existants à notre contexte et nous concluons sur cette adaptation.

3.2. CLASSIFICATIONS RENCONTREES DANS LA LITTERATURE

Après étude des classifications rencontrées dans la littérature, nous proposons de former les trois grandes classes suivantes :

- Les classifications de phases [Le Coz 2001a] [Hosotani 1997] [Ministère ETL 2001] qui classent les outils selon leur occasion d'utilisation.
- Les classifications de complexité [Chauvel 2000] [Hosotani 1997] qui ordonnent les outils selon leur complexité.
- Les classifications de forme [Jayram *et al.* 1997] qui regroupent les outils selon leur nature.

3.2.1. Les classifications de phases

Généralement, la panoplie de ces outils est souvent classée en fonction de leur ordre d'utilisation dans une démarche classique de résolution de problème [Le Coz 2001a] [Hosotani 1997] [Ministère ETL 2001], c'est-à-dire s'ils interviennent plutôt pour :

- Le problème (choix, définition). Exemple : Diagramme de Pareto.
- Les causes (analyse). Exemple : Diagramme d'Ishikawa.
- Les solutions (analyse). Exemple : Vote pondéré.
- Les actions (vérification, mise en place). Exemple : Diagramme de décisions PDPC.

Le principal avantage de cette classification est sa logique : elle est calée sur le déroulement du processus de résolution de problèmes. Le principal inconvénient est son manque de discrimination, par exemple de nombreux outils peuvent être utilisés pour analyser des causes et cette classification ne propose pas de différenciation entre eux.

3.2.2. Les classifications de complexité

La deuxième classification est basée sur la complexité :

- Soit comme vu précédemment : outils de base, outils dérivés des outils de base et nouveaux outils.
- Soit en niveaux de nécessité [Chauvel 2000]. Le Tableau II- 4 présente les caractéristiques de ces niveaux et donne des exemples d'outils pour illustration.

Catégorie	Caractéristique	Exemples
Première nécessité	Outils simples pour aborder des problèmes simples : facile à définir et à décrire, forte présomption sur les causes, solution facile à mettre en œuvre.	Brainstorming Fiche de relevé de données Diagramme d'Ishikawa
Deuxième nécessité	Outils plus élaborés pour aborder des problèmes plus difficiles : besoin de mieux cerner le problème, plan d'actions à préparer.	Diagramme de cheminement Est, n'est pas Diagramme causes-effet méthode des processus.
Troisième nécessité	Outils spécialisés, à utiliser en renfort des outils des deux premières catégories lorsque ceux-ci ne permettent pas d'obtenir l'information ou le résultat attendu pour avancer vers la solution définitive.	Diagramme fléché Diagramme CEDAC Diagramme ACE

Tableau II- 4 : Classification de Chauvel

Le principal avantage de cette classification est que l'on peut cibler très vite les outils à utiliser pour des problèmes simples. En revanche, on peut se demander si la complexité de l'outil à utiliser est forcément corrélée à celle du problème. Doit-on utiliser obligatoirement des outils très élaborés pour résoudre des problèmes complexes ? La question reste ouverte ...

Le principal inconvénient est aussi un manque de discrimination pour faire un choix : chaque niveau de nécessité regroupe une liste d'une dizaine d'outils.

3.2.3. Les classifications de forme

Jayram [Jayram *et al.* 1997] propose une troisième classification plutôt basée sur la nature et le principe de l'outil :

- La première catégorie regroupe les outils qui se basent sur l'exploitation de données. Exemple : les outils statistiques type Test t de Student pour comparer des moyennes.
- La seconde catégorie utilise des outils graphiques à base de diagrammes. Exemple : Diagramme de concentration des défauts.
- La troisième catégorie regroupe ceux qui font intervenir le jugement des personnes. Exemple : les outils intuitifs type Brainstorming.

Cette classification est d'un premier abord simple et discriminante pour un outil : on pourrait penser en effet qu'il est très aisé de déterminer la nature d'un outil. Cependant, si on s'efforce de faire ce travail tel que nous le verrons dans la partie suivante, nous nous rendons compte qu'un même outil peut figurer dans deux catégories. Par exemple, le diagramme d'Ishikawa est à la fois un outil graphique et un outil qui fait intervenir le jugement des personnes. De plus, on peut se demander si le choix d'un outil doit être guidé par sa nature. Par exemple, choisit-on un diagramme d'Ishikawa parce qu'il est graphique ? Nous pensons que cette classification doit être couplée au moins à une des deux précédentes pour fournir un guide efficace.

3.2.4. Synthèse des classifications de la littérature

Le Tableau II- 5 présente le croisement des trois classifications. Les lignes reprennent la classification de phases, les colonnes la classification de forme et les formats de police de caractères la classification de complexité :

- En gras : **outils de base**
- En italique : *outils dérivés et nouveaux outils*
- Souligné : outils statistiques

Seuls les outils cités précédemment figurent dans ce tableau pour éviter trop de lourdeur, l'exhaustivité des outils n'étant de toute façon pas réalisable comme nous l'avons vu précédemment.

		Nature et principe de l'outil		
		Exploitation de données	Graphique	Jugement de personnes
Occasions d'utilisation	Problème	<u>Outils de stat. descriptive</u> <u>Capabilités</u>	Diagramme de Pareto Graphiques Histogramme <u>Outils de stat. descriptive</u>	Brainstorming Vote pondéré QOOQCP
	Causes	Fiche de relevé de données Diagramme de dispersion <i>Analyse factorielle</i> <u>Outils de stat. inférentielle</u> <u>Plans d'expériences</u> <i>Est, n'est pas</i>	Graphiques Diagramme de Pareto Diagramme d'Ishikawa Diagramme de cheminement Diagramme de concentration Diagramme de corrélation <i>Diagramme relationnel</i> <i>Diagramme en arbre</i> <i>Diagramme CEDAC</i> <i>Diagramme ACE</i> <i>Diagramme causes-effet</i> <i>méthode des processus</i>	Brainstorming Vote pondéré Diagramme d'Ishikawa Diagramme des 5 pourquoi <i>Diagramme des affinités</i> <i>Diagramme CEDAC</i> <i>Diagramme ACE</i> <i>Diagramme causes-effet</i> <i>méthode des processus</i>
	Solutions	<u>Plans d'expériences</u>	<i>Diagramme de décisions</i> <i>Diagramme matriciel</i> <u>Carte de contrôle</u>	Brainstorming Vote pondéré
	Actions		<i>Diagramme CEDAC</i> <i>Diagramme ACE</i> <i>Diagramme en flèche</i>	QOOQCP

Tableau II- 5 : Croisement des principales catégories des outils dans la littérature

L'analyse de ce tableau nous montre deux désagréments majeurs dus aux critères de classement : la redondance et le manque de discrimination.

La difficulté de classement d'un outil entraîne une importante redondance : on retrouve les mêmes outils à différents endroits, soit parce qu'ils peuvent être utilisés à différentes étapes du processus de résolution de problème, soit parce qu'ils combinent graphique et exploitation de donnée ou graphiques et jugement de personne. Par exemple, le Vote pondéré peut être utilisé pour analyser des causes et pour analyser des solutions, et le Diagramme de corrélation est à la fois un outil d'exploitation de données et un outil graphique.

De plus, le croisement de ces trois classifications ne permet toujours pas de régler le problème de manque de discrimination : pour une ligne, une colonne et un format donnés, il y a encore une liste plus ou moins longue d'outils potentiellement utilisables.

Cette classification n'apporte pas réellement une aide efficace dans le choix des outils à utiliser.

3.3. NOTRE PROPOSITION DE TYPOLOGIE

3.3.1. Nouveaux critères de classification

Le principe sous jacent de la première classification, classification de phases, est intéressant car il part du but de l'outil, ce qui est fondamental pour la proposition d'un guide. Cependant, plutôt que de segmenter les buts des outils selon les phases de résolution (problème, causes, solutions,

actions), nous proposons de découper les buts selon la nature de l'action : recueillir, choisir, planifier, valider, suivre.

L'idée de base de la troisième classification est de catégoriser les outils selon leur nature. Cependant deux types de natures sont en fait mélangés et rendent ainsi le classement difficile : la nature des données d'entrées (données factuelles ou jugement des personnes) et la nature de la forme de l'outil (texte ou graphique). Nous ne pensons pas que la forme de l'outil soit un bon critère de choix. En revanche, la classification en fonction de la nature des données d'entrée nous paraît être un excellent moyen de discrimination.

Nous proposons donc un croisement de ces deux critères :

- La nature dominante des « données d'entrée » de l'outil : faits, opinions. Les opinions sont souvent basés sur des faits, nous choisirons donc la dominante de la nature des données d'entrée utilisées pour l'outil en question.
- La nature de l'action dont il sert d'accompagnement.

Le Tableau II- 6 présente cette nouvelle classification. Par comparaison au Tableau II- 5, on peut noter la non redondance et une discrimination meilleure : pour une ligne, une colonne et un format donnés, la liste des outils potentiellement utilisables est plus courte.

Nous pensons que celle-ci est plus adaptée pour aider l'utilisateur à choisir son outil et pour étudier l'adéquation d'un outil à un contexte. Cependant, il faut garder en mémoire que dans ces tableaux ne figurent que les outils cités précédemment ... Autrement dit, la liste des outils potentiels est en fait bien plus longue. Ceci relativise le rôle de cette nouvelle classification en tant que guide.

		Nature principale des données d'entrée	
		Faits	Opinions
Nature de l'action	Recueillir l'information, lister	Fiche de relevés de données Graphiques Diagramme de concentration <i>Est, n'est pas</i> <u>Plans d'expériences</u>	Brainstorming QOOQCP Diagramme d'Ishikawa Diagramme des 5 pourquoi <i>Diagramme relationnel</i> <i>Diagramme en arbre</i> <i>Diagramme causes-effet méthode des processus</i> <i>Diagramme CEDAC</i> <i>Diagramme ACE</i>
	Trier, prioriser, choisir	Diagramme de Pareto Diagramme de corrélation <i>Analyse factorielle</i> <u>Outils de stat. inférentielle</u> <u>Outils de stat. descriptive</u>	Vote pondéré <i>Diagramme des affinités</i> <i>Diagramme matriciel</i>
	Planifier	<i>Diagramme en flèche</i> <i>Diagramme de décisions</i>	
	Valider	<u>Outils de stat. inférentielle</u>	
	Suivre, observer, surveiller	Graphique Diagramme de cheminement Histogramme <i>Diagramme CEDAC</i> <i>Diagramme ACE</i> <u>Outils de stat. descriptive</u> <u>Outils de MSP</u>	

Tableau II- 6 : Classement des outils selon les deux critères retenus

3.3.2. Adéquation des outils à notre problématique

Le Tableau II- 7 ci-dessous rappelle les contraintes de notre contexte pour la résolution de problèmes, exposées au chapitre I.

Spécificités	Contraintes
Briques technologiques et procédés associés nouveaux et évolutifs	Nombre important de problèmes à traiter Difficulté d'établir une liste exhaustive de causes possibles Difficulté d'accéder à l'information pertinente
Interaction de plusieurs métiers	Morcellement de l'information Pas de vision globale
Forte valeur des produits	Peu d'occurrences pour l'analyse Partie amont à l'expérimentation majeure Expérimentation limitée

Tableau II- 7 : Déclinaison de spécificités des produits novateurs en contraintes pour la résolution de problèmes

En reportant ces contraintes dans notre tableau de classification, nous pouvons étudier l'adéquation des outils à notre contexte (Tableau II- 8). La notation utilisée est la suivante : (-) correspond à des contraintes qui limitent l'utilisation des outils cités précédemment, (+) correspond à des contraintes qui encouragent l'utilisation de ces outils.

		Nature principale des données d'entrée	
		Faits	Opinions
Nature de l'action	Recueillir l'information, lister	(-) Morcellement de l'information (-) Peu d'occurrences pour l'analyse (-) Expérimentation limitée (-) Difficulté d'accéder à l'information pertinente	(-) Difficulté d'établir une liste exhaustive de causes possibles (-) Pas de vision globale
	Trier, prioriser, choisir	(-) Nombre important de problèmes à traiter (-) Peu d'occurrences pour l'analyse (-) Difficulté d'accéder à l'information pertinente	
	Planifier		
	Valider	(-) Peu d'occurrences pour l'analyse	
	Suivre, observer, surveiller	(+) Partie amont à l'expérimentation majeure	

Tableau II- 8 : Outils et contraintes de notre contexte

L'analyse de ce tableau nous permet d'établir les conclusions suivantes :

- La plus grande des difficultés se situe dans le recueil d'informations, que ce soit de données (faits) ou d'opinions. C'est en effet à cette étape où nous avons le plus grand nombre de contraintes. Si nous étudions les outils proposés correspondants, la plupart ne sont pas en adéquation avec nos contraintes :
 - Plans d'expériences \diamond Expérimentation limitée
 - Diagramme de concentration, Graphiques \diamond Peu d'occurrences pour l'analyse
 - Brainstorming, Diagramme d'Ishikawa et ses dérivés \diamond Difficulté d'établir une liste exhaustive de causes possibles, pas de vision globale.

- L'analyse et la validation des causes sont aussi une problématique majeure : les outils proposés sont essentiellement des outils statistiques. Or notre faible occurrence de défauts et notre faible nombre de produits fabriqués nous réduit ce champ d'utilisation possible.
- Le choix de problème à traiter est aussi une complication. Le nombre de problèmes étant important et chacun comportant peu d'occurrences, il est difficile d'établir des priorités selon les critères classiques tel que le pourcentage de rebuts, lequel est principalement utilisé pour le Pareto.
- La nature de l'action à privilégier sera celle qui correspond à la dernière ligne du tableau, c'est-à-dire l'observation. C'est la seule ligne pour laquelle nos contraintes encouragent l'utilisation des outils.

3.4. CONCLUSION

Nous avons vu différentes classifications de la littérature qui allaient dans le sens d'une organisation des outils : classification de phases, de complexité, de forme. Nous avons remarqué que ces classifications seules et leur croisement étaient insuffisants pour permettre un guide de choix de l'outil à utiliser.

La classification que nous proposons selon deux critères, nature de l'action et nature des données d'entrée, nous a permis d'étudier l'adéquation des outils existants à notre contexte et quel était le type d'action à privilégier. Cependant, cette organisation n'apporte toujours pas de réponse efficace au choix des outils à utiliser à cause d'un manque de discrimination et d'une absence totale de liens logiques entre les outils.

4. VERS LE DEVELOPPEMENT DE METHODES

4.1. INTRODUCTION

Après ce début de structuration, le besoin de cohérence s'est vite fait ressentir afin de pouvoir disposer d'une architecture méthodologique proposant un enchaînement cohérent de ces outils selon des principes définis. De multiples méthodes ont alors vu le jour. Chaque méthode reprend un certain nombre d'outils présentés dans la partie précédente et les associe aux phases dont elle est composée. Aujourd'hui, on compte presque autant de méthodes que d'entreprises ou de consultants ! Chacune s'est façonnée un nom accrocheur et des particularités tant sur le découpage des phases que sur les outils utilisés.

Comment est-on passé des outils à la création d'une méthode à proprement parler ? Nous proposons de distinguer quatre types d'évolution :

- Le centrage autour d'un outil et la construction de logique autour de cet outil. Exemple : La méthode d'Analyse de Problème de Kepner Tregoe avec l'outil « Est, n'est pas ».
- La focalisation sur un type d'outils. Exemple : Le DMAIC (Define Measure Analyse Improve Control) de Six Sigma avec les outils statistiques.
- La mise en relief d'étapes clefs. Exemple : Le DMAIC de Six Sigma ou le Global-8D de Ford.
- L'articulation logique d'une série d'outils. Ex : Le Système de Shainin.

Ces quatre types d'évolution différents ont cependant un point en commun : l'évolution s'est faite en se focalisant sur un ou plusieurs principes propres à chaque méthode.

Pour illustrer cette évolution, nous présenterons tout d'abord brièvement en partie 4.2 les méthodes citées ci-dessus.

Nous pourrions alors dans un deuxième temps les analyser de points de vue différents :

- En partie 4.3 : Point de vue des principes
- En partie 4.4 : Point de vue structurel
- En partie 4.5 : Point de vue organisationnel
- En partie 4.6 : Point de vue socioculturel

Rappelons la définition d'une méthode qualité que nous avons retenue [Bécharde *et al.* 2001] :

La méthode qualité, parfois appelée approche, est un ensemble de démarches raisonnées, de règles et de principes permettant d'arriver à un résultat dans un contexte précis. Contrairement à la technique, elle ne requiert pas nécessairement un algorithme rigoureux de mise en œuvre. Toutefois, elle peut regrouper et structurer de façon logique un ensemble d'outils et de techniques.

4.2. ILLUSTRATION DE CETTE EVOLUTION

4.2.1. Quatre méthodes de résolution de problèmes

Pour illustrer nos propos, nous allons présenter les quatre méthodes évoquées précédemment :

- le DMAIC de Six Sigma, créé par Motorola, l'approche la plus statistique des quatre méthodes étudiées. Elle est centrée sur la mesure et comprend une panoplie entière de tests statistiques, de plans d'expériences, de cartes de contrôle [Pyzdek 2001].
- le Système de Shainin dont le découpage n'est pas très différent du DMAIC. L'originalité de cette méthode réside plutôt dans l'articulation logique d'outils simples et

conviviaux développés ou repris par Dorian Shainin pour « faire parler les produits », générer des indices [Shainin 1993a].

- la méthode Global 8D de Ford, également très répandue. Elle est séquencée en neuf phases, aussi surprenant que cela puisse paraître... La liste des outils à utiliser est assez hétérogène et volontairement non définie comme exhaustive : d'autres outils peuvent être ajoutés au besoin. [Ford 1999]
- le PSDM de Kepner-Tregoe. Contrairement aux approches précédentes, elle est constituée de quatre méthodes distinctes : l'Évaluation de Situation, l'Analyse de Problème, l'Analyse de Décision et l'Analyse des Problèmes Potentiels et des Opportunités. Cette approche est la moins statistique, l'Analyse de Problème illustre parfaitement le centrage autour d'un outil méthodologique. [Kepner *et al.* 1980]

Nous avons choisi de présenter ces méthodes-ci pour les raisons suivantes :

- Elles sont représentatives des quatre types d'évolution.
- Elles sont bien adaptées à la résolution de problèmes techniques.
- Elles font partie des méthodes les plus répandues dans l'industrie.

4.2.2. Le DMAIC de Six Sigma

Six Sigma développée dans les années 1980 chez Motorola est une approche par processus fondée sur le fait que les clients évoluent à travers l'entreprise via une série de processus, et non en suivant ses fonctions ou services [Eckes 2001]. Tout processus doit donc mesurer son efficacité et son efficience.

Six Sigma est souvent utilisée pour concilier plusieurs objectifs : doter l'organisation d'actions mesurables et efficaces, réduire les pertes et coûts de la qualité, améliorer l'image de marque du groupe. Elle s'applique théoriquement à tout type d'entreprise quelles que soient sa taille et son activité et s'utilise pour tous les processus de l'entreprise : processus de fabrication, processus de conception, processus commercial ... [Harry *et al.* 2000].

Plus qu'une simple méthode, elle regroupe [Pillet 2004] :

- Une philosophie de la qualité centrée sur la mesure, la réduction de la variabilité pour atteindre l'objectif « Six Sigma » (Figure II- 6)
- Un indicateur de performance permettant de savoir où se situe l'entreprise en matière de qualité
- Une méthode de résolution de problèmes : DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) utilisant des outils très statistiques
- Une méthode de conception : DFSS (Design For Six Sigma) fondée sur une approche DMADV (Define, Measure, Analyze, Design, Verify).
- Un mode de management qui repose sur une organisation très encadrée dédiée à la conduite de projet avec de rôles parfaitement définis tels que le Champion ou le Master Black Belt.

Dans le cadre de notre problématique, nous nous focaliserons sur la partie méthode de résolution de problème, c'est-à-dire le DMAIC.

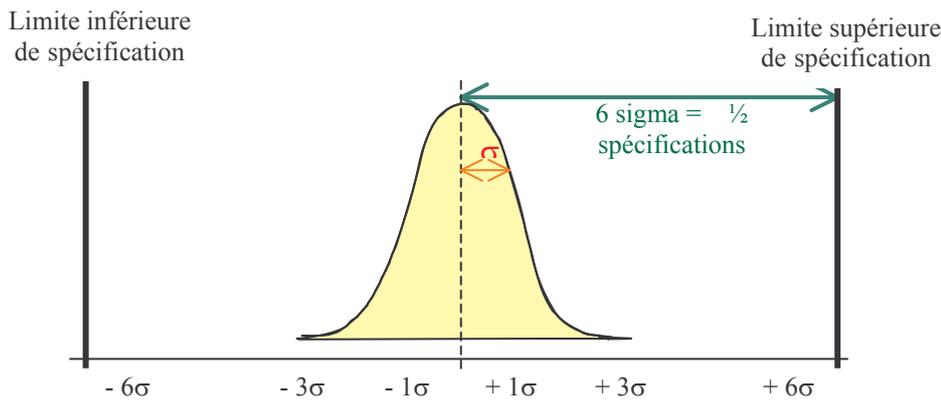


Figure II- 6 : Objectif Six Sigma

Les principes fondamentaux de Six Sigma sont :

- **Une approche par processus tournée vers le client** [Eckes 2001]. Les clients évoluent à travers l'entreprise via une série de processus. Ils faut identifier ces processus et travailler à partir de cette base et non des fonctions.
- **L'amélioration par percée** [Lucas 2002] [Pillet 2004] [Harry *et al.* 2000]. Les processus et les produits sont remis à plats pour procéder à une remise en cause fondamentale. Le but doit être ambitieux : on n'entreprend pas une démarche Six Sigma pour gagner quelques euros !!
- **Une approche descendante** [Hahn *et al.* 2000] [Harry *et al.* 2000]. Des « Champions » sont choisis parmi les hauts responsables hiérarchiques. Ils sont responsables de la réussite de l'implémentation de Six Sigma dans leurs propres zones d'influence. Ce sont eux qui déclinent les états à améliorer du niveau business, au niveau opérationnel puis au niveau procédé. Cette approche garantit une future répercussion notable des résolutions des problèmes traités niveau procédé.
- **Une approche centrée sur la mesure** [Harry *et al.* 2000] [Pillet 2004]. S'il ne fallait retenir qu'un mot de Six Sigma ce serait la mesure ! Sans mesure de ses processus, l'entreprise ne peut se situer ni dans le présent ni dans le futur. Ainsi l'implémentation de cette méthode se fait par des outils statistiques.
- **La réduction de la variabilité** [Pillet 2004]. La variabilité est l'ennemi de la qualité. Six Sigma s'attaque aux trois sources de variabilité : une conception pas assez robuste, des matières premières instables et une capabilité des procédés insuffisante.
- **Une approche très disciplinée** [Harry *et al.* 2000] [Hahn *et al.* 2000]. Six Sigma doit être compris et intégré à tous les niveaux : business, opérationnel et procédés selon huit étapes parfaitement définies et immuables : identifier, définir, mesurer, analyser, améliorer, contrôler, standardiser et intégrer.
- **Une organisation dédiée** [Hahn *et al.* 2000] [Pillet 2004]. Pour mettre en oeuvre cette approche, les compétences et responsabilités de chacun sont parfaitement cadrés. Des rôles particuliers sont établis : Champions, Master Black Belts, Black Belts et Green Belts. Ils couvrent les quatre niveaux de pilotage : stratégique, tactique, opérationnel et suivi.

La méthode de résolution de problèmes proposée par Six Sigma se découpe originellement en cinq étapes (DMAIC en anglais) [Hahn *et al.* 2000] : **D**éfinir, **M**esurer, **A**nalysier, **A**méliorer (**I**mprove en anglais) et **C**ontrôler.

Cependant, des auteurs adjoignent désormais trois étapes supplémentaires [Pillet 2004] [Harry *et al.* 2000] pour obtenir le RDMAICSI (Figure II- 7):

- **Reconnaître** : avant Définir
- **Standardiser** : après Contrôler
- **Intégrer** : après Standardiser

Chaque étape est clôturée et figée par une revue. Les outils proposés par Six Sigma ne sont pas nouveaux : ils font partie de la « boîte à outils » décrites précédemment, les outils statistiques étant fortement privilégiés. Le plus de cette méthode en terme d’outillage est d’avoir « fait des casiers » dans cette boîte à outils : à chaque étape du DMAIC correspond une liste d’outils utilisables mais aucun n’est prescrit particulièrement, il faut choisir ceux qui sont les plus appropriés au problème en question [Sanders *et al.* 2000]



Figure II- 7 : Schéma du DMAIC de Six Sigma

Le point fort de Six Sigma est d’offrir une approche globale de la qualité comprenant des principes fondamentaux, une organisation, des méthodes et des outils autour d’une même logique centrée sur la mesure. En effet, elle ne se limite pas à énoncer une nième méthode de résolution de problèmes, elle va plus loin en proposant une véritable philosophie axée sur la mesure et toute une organisation pour un déploiement solide de la méthode et pour une déclinaison des objectifs stratégiques en objectifs opérationnels. On comprend ainsi son succès international !

4.2.3. Le Système de Shainin

Dorian Shainin (1914-2000) est le créateur des techniques d'ingénierie statistique qui forment la base de la stratégie Shainin. Il a reconnu très tôt dans sa carrière la valeur des données empiriques dans la résolution de problèmes. Tous les outils qu'il propose sont donc basés sur des faits, il rejette complètement tous les outils centrés sur le jugement des personnes type Brainstorming ou Digramme d'Ishikawa. Ces techniques, bien que peu médiatisées, sont répandues surtout aux Etats-Unis depuis le début des années 80s où elles ont notamment été déployées chez ... Motorola ! La descendance de Dorian Shainin, en particulier ses fils Peter et Richard, continue à faire évoluer le système Shainin.

Dans la philosophie Shainin, l'amélioration continue est une fausse idée. L'amélioration réelle évolue par palier, projet par projet [Shainin 1995]. Partant de cette proposition, la stratégie Shainin propose donc pour améliorer efficacement la compétitivité des entreprises de choisir judicieusement les projets sur lesquels travailler et d'utiliser un système de résolution de problèmes basé sur l'ingénierie statistique. L'ingénierie statistique utilise des données empiriques de la production actuelle ou des prototypes pour déceler les caractéristiques critiques de la conception du produit ou du procédé de fabrication qui affectent la satisfaction du client. Les stratégies et techniques de l'ingénierie statistique peuvent être appliquées à la conception, à l'amélioration et à la maîtrise de la qualité [Shainin 1995].

Cinq principes composent l'ingénierie statistique [Shainin 1995] [Shainin 1993a]:

- **La qualité est l'enthousiasme du client.** La satisfaction du client est le niveau minimum à atteindre pour être compétitif. Pour être « classe mondiale », il faut viser l'enthousiasme du client. Le principe est de se focaliser sur les caractéristiques qui ont un impact sur la satisfaction du client et de réduire leur variation à un niveau qui n'est plus important pour le client. [Shainin *et al.* 1997]
- **Il n'y a pas de variation aléatoire.** Pour toute sortie Y d'un système, il y a un nombre de facteurs d'entrée X qui causent la variation. Avec des ressources suffisantes, le temps inclus, on pourrait trouver tous ces X. Mais rechercher tous ces paramètres serait du gaspillage car selon le principe de Pareto la découverte de toute la myriade de petites causes et le contrôle de celles-ci nous coûteraient plus qu'ils nous rapporteraient.
- **Le principe de Pareto.** Quel que soit le problème, il y a toujours un petit nombre de causes responsables en très grande partie du problème et une myriade d'autres qui ont un effet mineur. La cause majeure de variation (paramètre ou interaction) est appelée « Red X », la seconde « Pink X », la troisième « Pale Pink X »... La façon la plus efficace de réduire la variation est de trouver et de contrôler le Red X.
- **Le principe de combinaison des causes indépendantes.** Lorsque des causes indépendantes sont combinées, la variance de la distribution résultante est la somme des variances des causes indépendantes (principe d'additivité des variances). Ainsi, la seule façon d'obtenir une amélioration majeure dans la réduction de variation du procédé est de trouver le Red X et de le contrôler.
- **Il faut faire « parler les produits ».** La démarche de résolution de problèmes s'apparente à celle d'un détective : il faut générer des indices en faisant parler les produits, c'est-à-dire en observant la variation du procédé, pour se baser sur des faits.

Le but de cette stratégie est de trouver les causes racines aussi vite et efficacement que possible en utilisant un enchaînement d'outils servant « d'entonnoir à X ». La plupart des outils proposés ont été développés ou adaptés par Dorian Shainin. Ils présentent l'avantage d'être basés sur des statistiques tout en masquant celle-ci par des codes couleurs, des comptages ... L'utilisateur utilise des statistiques sans même le savoir ! Le système Shainin [Shainin 1993a] est présenté dans la Figure II- 8.

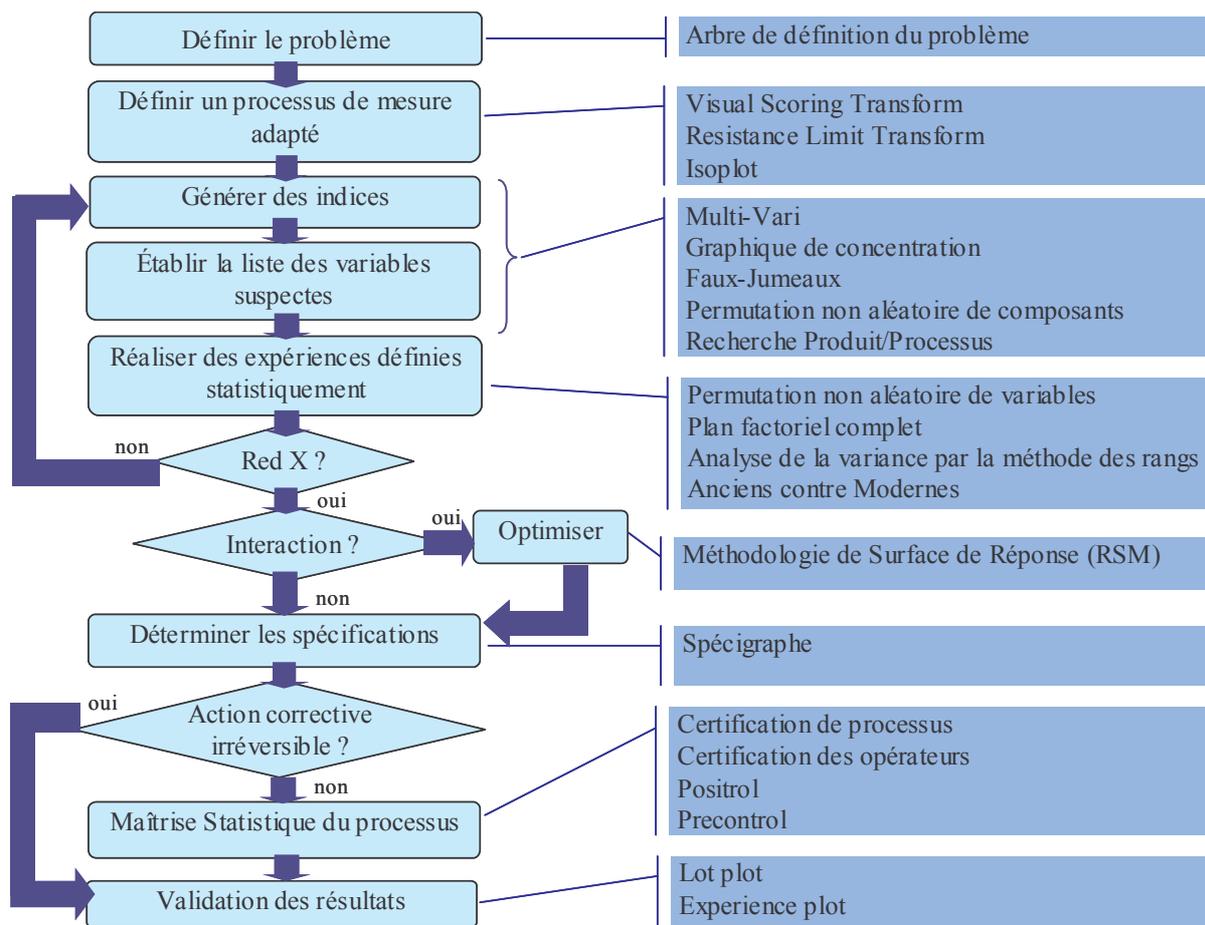


Figure II- 8 : Schéma du système Shainin [Shainin 1993a]

Pour qu'une stratégie soit efficace, l'expérimentation, bien que nécessaire, doit rester une petite partie de la résolution de problèmes [Shainin 1993b]. Il faut avant tout chercher des indices en observant les variations du procédé, en faisant parler les produits afin de s'assurer d'avoir cibler les variables réellement influentes. C'est ce dernier principe qui fait toute la force de l'approche Shainin. Les autres points forts de cette méthode concernent les outils : ils sont conviviaux et leur enchaînement est parfaitement établi (ce n'est pas une boîte à outils).

4.2.4. La méthode Global 8D

Développée à l'origine par Ford Motor Company, 8D (pour huit Disciplines) a été introduite dans la fin des années 80s dans un manuel intitulée "Team Oriented Problem Solving" (TOPS) [Ford 1989]. Cette méthode a été développée à la demande d'un des managers de Ford qui voyait les mêmes problèmes récurrents revenir d'une année à l'autre. Dans l'utilisation de cette méthode, les équipes doivent être multidisciplinaires et inclure aussi bien des personnes de la production que des personnes de la conception.

Les principes de la méthode sont les suivants [Site QOL] :

- L'utilisation d'une méthode simple et efficace
- L'adoption d'une démarche d'analyse systématique relative à l'importance du problème
- Le travail en équipe pluridisciplinaire
- L'amélioration continue

Comme l'indique la Figure II- 9, elle est structurée en neuf phases [Ford 1999]. Il n'y a volontairement pas de liste d'outils imposés pour chaque phase, des outils peuvent être ajoutés au besoin.

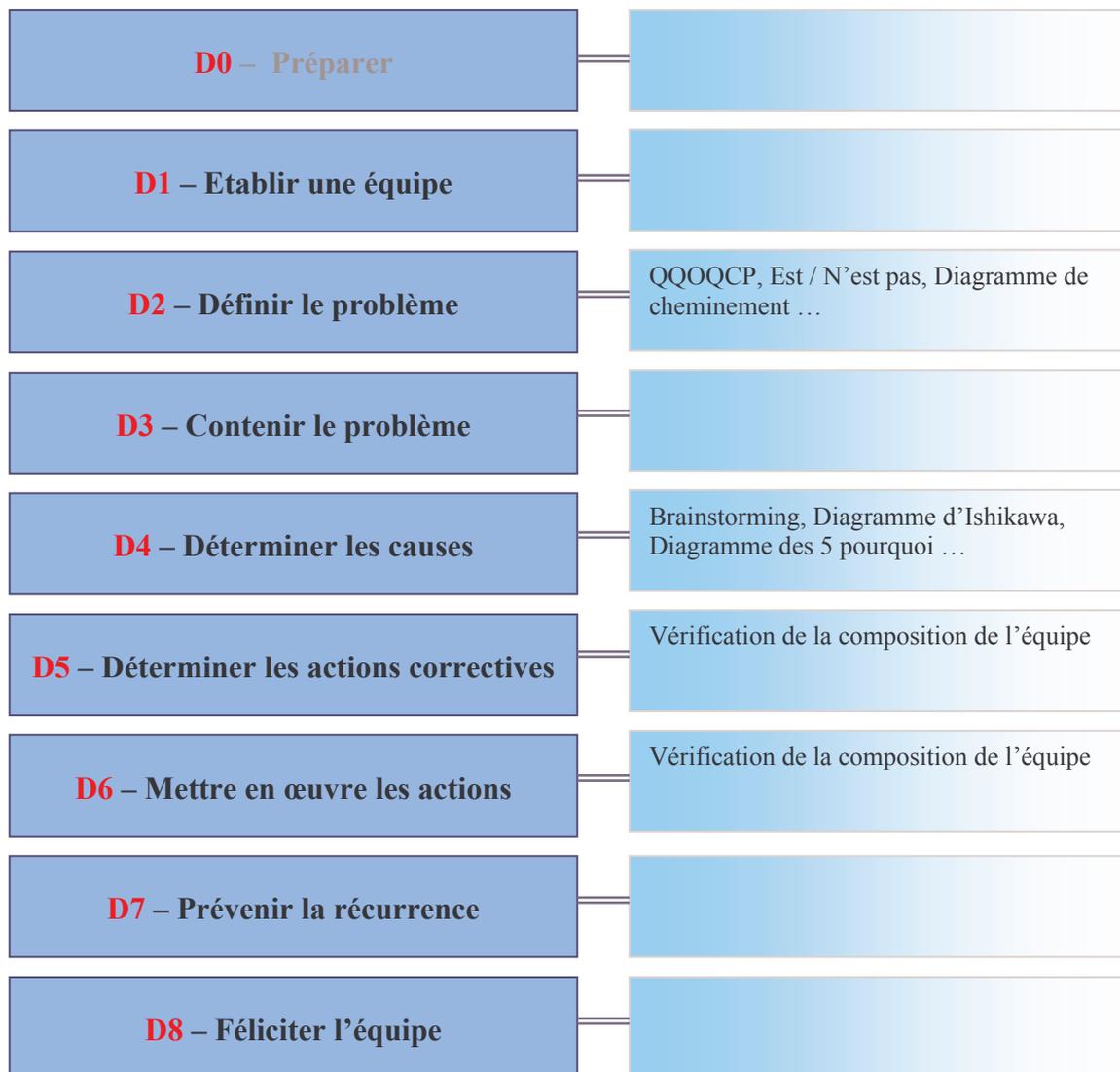


Figure II- 9 : Schéma de la méthode 8D

L'originalité et les points forts de la méthode ne se situent donc pas dans les outils mais plutôt dans les deux points suivants :

- L'importance accordée à l'équipe. Deux phases sur huit lui sont consacrées et la composition de l'équipe est revue aux étapes D5 et D6 [Chaudhry 1999]. Cette révision se révèle souvent nécessaire dans toute résolution de problème car souvent ce ne sont pas les mêmes personnes qui recherchent les causes, qui choisissent la solution et qui la mettent en place.
- La mise en place d'actions palliatives temporaires pour contenir les effets du problème. Elle permet d'isoler le problème du client jusqu'à ce qu'une action corrective permanente puisse être proposée. Elle permet aussi à l'équipe de résoudre plus sereinement le problème en faisant « baisser la pression ».

4.2.5. Le PSDM de Kepner Tregoe

Kepner Tregoe a été fondée en 1958 par les Docteurs Benjamin Tregoe et Charles Kepner. En tant que chercheurs dans les sciences sociales, ils ont tenté de comprendre quelles étaient les différences qui séparaient les managers efficaces de ceux qui l'étaient moins. Leurs travaux de recherche auprès des différentes organisations leur ont permis de déceler et de rendre évident les processus logiques sous-jacents à l'analyse et au traitement des préoccupations de tout manager. Plusieurs méthodes et outils ont donc été développés pour la résolution de problèmes, la prise de décisions stratégiques ou opérationnelles, la conduite de projets, le management ... [Site KT]

Pour résoudre les problèmes, Kepner Tregoe propose le PSDM (Problem Solving and Decision Making) composé de quatre méthodes distinctes [Site KT]:

- **L'Evaluation de Situation (ES)** est utilisée pour séparer, clarifier et donner des priorités aux préoccupations. Selon le type de préoccupations, on utilisera l'une des trois méthodes ci-dessous.
- **L'Analyse de Problème (AP)** est utilisée pour trouver la cause d'une déviation positive ou négative. Elle permet de pointer l'information pertinente et de guider vers la cause racine. Elle est centralisée autour de l'outil « Est N'est pas ».
- **L'Analyse de Décision (AD)** est utilisée pour faire un choix entre plusieurs solutions. Elle permet de clarifier l'objectif à viser, d'évaluer les risques et les bénéfices pour faire un choix solide et cautionné.
- **L'Analyse des Problèmes Potentiels et des Opportunités (APPO)** est utilisée pour consolider les actions menées ou planifiées. L'analyse des problèmes potentiels par rapport à une action planifiée permet de mettre en place des mesures préventives pour diminuer leur probabilité d'apparition et correctives pour diminuer leur effet. L'analyse des opportunités permet d'étudier les autres bénéfices que peut apporter une action mise en place comme la standardisation aux autres systèmes similaires.

La Figure II- 10 [Site KT] [Kepner *et al.* 1981] présente ces quatre méthodes. Elles sont toutes basées sur la même logique : « faits, hypothèses, confrontation, action ».

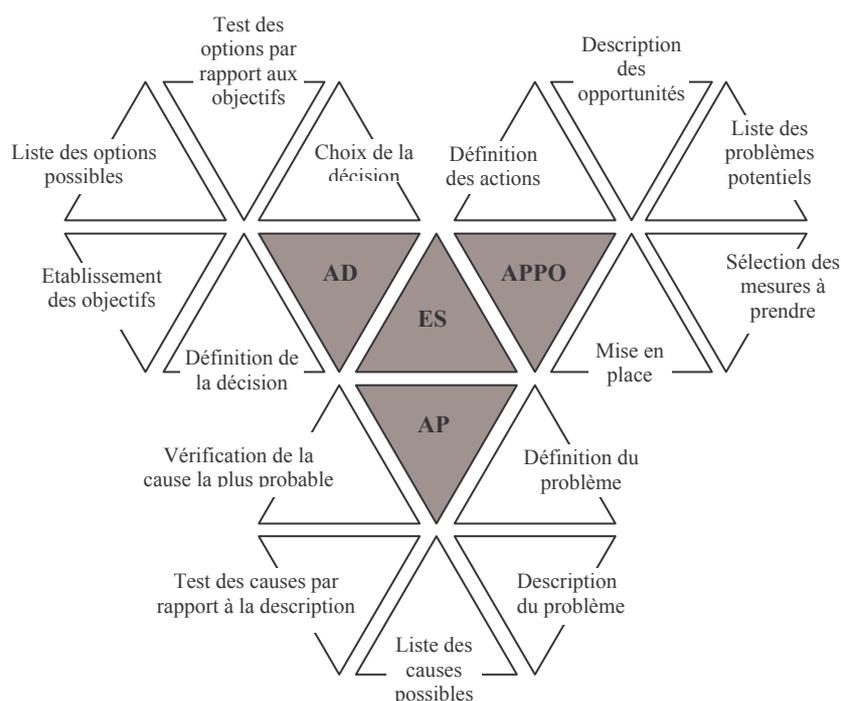


Figure II- 10 : Schéma des méthodes du PSDM de Kepner Tregoe

Les principes retraçant les étapes de l'Analyse de Problème sont [Kepner *et al.* 1980] :

- Celui qui analyse un problème dispose d'un résultat type, d'un « devrait être » comparé avec la situation actuelle.
- Un problème est constitué par une divergence par rapport à ce schéma de résultat idéal.
- La divergence par rapport à la norme doit être identifiée avec précision, localisée et décrite.
- Il existe toujours une particularité qui différencie ce qui a été affecté par la cause d'un problème, de ce qui ne l'a pas été (contraste frappant).
- La cause d'un problème consiste toujours en un changement qui s'est produit dans un trait, mécanisme, ou condition caractéristique, et qui a engendré un nouvel effet non désiré.
- On déduit les causes possibles de la divergence à partir des changements adéquats trouvés dans l'analyse du problème.
- La cause la plus probable d'une divergence est celle qui rend compte exactement de tous les éléments de l'énoncé du problème.

Quant à l'Analyse de décision, les principes sont les suivants [Kepner *et al.* 1980] :

- Il faut d'abord fixer les objectifs de la décision.
- On classe les objectifs selon leur importance.
- Il faut faire la liste des diverses options possibles.
- On confronte les options avec les objectifs fixés.
- Le choix de l'option qui a les meilleures chances d'atteindre les objectifs constitue la décision provisoire.
- On examine la décision provisoire pour en déceler les conséquences néfastes éventuelles.
- Il faut contrôler les effets de la décision finale en adoptant d'autres mesures pour empêcher les conséquences néfastes de devenir des problèmes réels, et il faut s'assurer que les actions décidées ont été réellement menées à bien.

Le grand point fort de ces méthodes PSDM est qu'elles mettent bien en avant le processus logique de pensée à suivre et remettent les outils à leur place, c'est-à-dire l'instrumentation de cette structure mentale. Le fait de séparer le processus de résolution de problèmes en plusieurs méthodes est discutable. On perd un peu la vision linéaire que suit généralement la résolution d'un problème. Cependant, cette structure permet de cibler très rapidement la phase à travailler grâce à la méthode d'Évaluation de Situation.

4.3. POINT DE VUE DES PRINCIPES

Nous venons de voir quatre exemples de méthodes de résolution de problèmes. Etudions maintenant en quoi elles diffèrent et en quoi elles se ressemblent de différents points de vue. Commençons par l'analyse de ces méthodes selon le point de vue des principes.

☞ *Des approches descendantes*

Toutes les méthodes proposées sont des approches descendantes. La direction doit être moteur et impliquée dans le déploiement de la méthode. De plus, elle doit sélectionner les problèmes les plus importants et assigner à chacun d'eux des ressources humaines (groupe de travail) et des ressources matérielles. Pour les méthodes Six Sigma et Shainin [Shainin *et al.* 1997], ces rôles dans la direction sont très explicitement définis et cadrés : Shainin parle de « Sponsor », Six Sigma de « Champion ».

☞ *Des rôles macroscopiques définis*

Ce principe est surtout présent dans les méthodes Shainin et Six Sigma. Comme nous venons de la voir, Sponsor et Champion appartenant à la direction ont pour rôle le choix des projets et l'affectation des ressources. Un deuxième type de rôles est aussi défini selon l'expertise acquise de la méthode et l'envergure des projets à piloter : Journeyman et Master pour Shainin [Shainin *et al.* 1997], Master Black Belts, Black Belts et Green Belts pour Six Sigma.

☞ *Une culture partagée*

Les bases de chaque méthode doivent être intégrées dans la culture de l'entreprise. Par exemple, pour la méthode Six Sigma, la vérification systématique de la mesure doit être un réflexe acquis par tous, du directeur général à l'opérateur. D'ailleurs, dans le déploiement de cette méthode, tous les salariés de l'entreprise sans exception ont généralement suivi au moins une session de formation ou de sensibilisation. Shainin souligne aussi le fait que les principes de base de l'ingénierie statistique, comme le « Red X » ou « faire parler les produits » doivent être connus de tous, y compris de la direction. Quant à la logique « faits, hypothèses, confrontation, action » de Kepner Tregoe, tous l'utilisent : que ce soit la direction pour la prise de décisions ou les unités de production pour la résolution des problèmes.

☞ *Des approches disciplinées*

Un autre principe commun de toutes ces méthodes est la discipline de leur approche qui comprend une séquence de phases parfaitement déterminée à respecter et pour chacune des outils à utiliser. Cette discipline est d'ailleurs mise en relief par l'utilisation systématique d'acronymes reprenant les phases : le DMAIC de Six Sigma, le G8D de Ford.

La plus marquée est certainement l'approche Six Sigma : chaque phase est clôturée officiellement et figée par une revue. On a interdiction de passer à la phase suivante avant d'avoir clôturé dans les règles la précédente. De plus, Six Sigma doit être compris et intégré à tous les niveaux : business, opérationnel et process selon huit étapes parfaitement définies et immuables : identifier, définir, mesurer, analyser, améliorer, contrôler, standardiser et intégrer (voir Tableau II- 9).

☞ *Des approches statistiques*

La plupart de ces approches sont très orientées statistiques, à l'exception faite de Kepner Tregoe. Les outils préconisés sont souvent des tests d'hypothèses statistiques, des analyses de régression, des plans d'expériences, des cartes de contrôle ... Encore une fois, c'est la méthode Six Sigma qui est la plus poussée dans cette approche : les sessions de formation comprennent une très large part aux outils statistiques. L'approche Shainin rejoint ce principe mais présente un avantage majeur : elle propose ses propres outils (ou assimilés comme tels !) dont la statistique est présente mais masquée pour l'utilisateur [Shainin 1993a].

☞ *Des sources d'informations caractéristiques*

Les sources d'informations exploitées sont très différentes et caractéristiques de chaque méthode. Par exemple, pour Shainin, la source d'information la plus utilisée est le produit pour générer des indices. La méthode Six Sigma est quant à elle très orientée sur l'analyse des bases de données, de part les outils qu'elles préconisent. L'AP de Kepner Tregoe est basée essentiellement sur la connaissance des personnes, comprenant les faits dont ils ont eu connaissance et les hypothèses qu'ils peuvent émettre quant à leur expertise.

	Pour le niveau business	Pour le niveau opérationnel	Pour le niveau procédé
Reconnaître	Identifier les véritables états du niveau business.	Identifier les problèmes opérationnels en lien avec les systèmes business clés.	Identifier les problèmes fonctionnels en lien avec les problèmes opérationnels.
Définir	Définir quels plans doivent être mis en place pour améliorer chaque état.	Définir les projets Six Sigma pour résoudre ces problèmes opérationnels.	Définir les procédés en lien avec les problèmes fonctionnels.
Mesurer	Mesurer les systèmes business supports des plans d'amélioration.	Mesurer la performance des projets Six Sigma.	Mesurer la capacité de chaque procédé.
Analyser	Analyser les lacunes par benchmarking.	Analyser la performance des projets par rapport aux objectifs opérationnels.	Analyser les données pour évaluer les configurations et les tendances courantes.
Améliorer	Améliorer les éléments du système pour atteindre les objectifs de performance.	Améliorer le système de management des projets Six Sigma	Améliorer les caractéristiques clés du produit ou service liées aux variables clés du procédé.
Contrôler	Contrôler les caractéristiques qui sont critiques à évaluer.	Contrôler les entrées du système de management des projets.	Contrôler les variables clés du procédé qui créent la variation indésirable.
Standardiser	Standardiser les systèmes qui s'avèrent être les meilleurs.	Standardiser les meilleures pratiques du système de management.	Standardiser les méthodes et procédés qui produisent les meilleures performances.
Intégrer	Intégrer les meilleurs systèmes dans le cadre d'une planification stratégique.	Intégrer les pratiques standardisées dans les politiques et les procédures.	Intégrer les méthodes et procédés standardisés dans le cycle de conception.

Tableau II- 9 : Intégration de Six Sigma à tous les niveaux de l'entreprise [Harry *et al.* 2000]

4.4. POINT DE VUE STRUCTUREL

4.4.1. Niveau macroscopique

Etudions maintenant les méthodes d'un point de vue structurel. On peut dissocier deux niveaux de structuration : macroscopique et cheminement dans la phase.

Nous proposons dans le Tableau II- 10 [Avrillon *et al.* 2005a] une analyse structurelle des méthodes de résolution de problèmes [Avrillon *et al.* 2002a] [Avrillon *et al.* 2002b] [Bauer-Kurz 2000] [De Mast 2003] [Harry *et al.* 2000] [Kepner *et al.* 1980] [Pillet 2004] [Pyzdek 2001] [Shainin 1993a] [Shainin 1993b]. La première colonne reprend les différentes phases, toutes méthodes confondues.

Phases	Six Sigma	Shainin	G8D	Kepner Tregoe
Choisir	Reconnaître Identifier les problèmes liés aux systèmes clés de l'entreprise.	Top 5 Sélection des problèmes les plus importants pour chaque unité.		Evaluation de situation Prioriser les problèmes à traiter et mettre des actions en face de chacun.
Définir	Définir Définir le problème à résoudre, préciser l'impact sur le client et les bénéfices potentiels. Identifier les CTQ (Critical To Quality). <u>Outil</u> : Diagramme des CTQ	Définir le problème Définir le problème en terme de caractéristique spécifique importante pour le client, relier le problème à une caractéristique spécifique mesurable. <u>Outil</u> : Arbre de définition du problème	Préparer le process G8D Définir le problème et ses conséquences pour les clients <u>Outil</u> : QQQQCP Etablir une équipe Définir les rôles de chacun Décrire le problème Décrire le problème dans toutes ses dimensions <u>Outil</u> : Est / N'est pas.	Analyse de Problème Définir le problème « objet + défaut », identifier la divergence de la situation actuelle et la situation souhaitée Décrire le problème dans toutes ses dimensions <u>Outil</u> : Est / N'est pas
Contenir			Développer une action temporaire pour contenir le problème	
Mesurer	Mesurer Vérifier le processus de mesure. Recueil de données du processus <u>Outils</u> : Gage R&R , fiche de relevé de données	Etablir un système de mesure adapté Vérifier le processus de mesure. <u>Outils</u> : Visual Scoring Transform, Resistance Limit Transform, Isoplot		
Analyser	Analyser Comprendre les causes premières de l'apparition du défaut, identifier les variables clés du process qui causent le défaut. <u>Outils</u> : Diagramme d'Ishikawa, Tests statistiques, Plans d'expériences (screening).	Générer des indices Faire parler les produits par collecte de données bien planifiée. <u>Outils</u> : Multi-vari, Diagramme de concentration, Faux-Jumeaux, Permutation non aléatoire de composants ... Isoler le Red X <u>Outils</u> : Permutation non aléatoire de variables, Plan complet, Anciens contre Modernes	Définir et vérifier les causes racines Tester chaque cause possible par rapport à la description du problème et aux données. <u>Outils</u> : Diagramme d'Ishikawa, Est / N'est pas. Ajout d'autres outils possibles.	Analyse de Problème Lister les particularités et les changements. pour rechercher les causes possibles. Tester chaque cause possible par rapport à la description du problème. <u>Outil</u> : Est / N'est pas
Améliorer	Améliorer Quantifier l'influence des variables clés du process sur les CTQ, identifier la cible et les spécifications pour ces variables, modifier le process en conséquence. <u>Outils</u> : Plans d'expériences (surface de réponse)	Etablir une cible et des tolérances Fixer une cible et des tolérances avec preuve statistique pour tous les X rouges. <u>Outils</u> : Spécigraphe, outils de méthodologie de surface de réponse	Choisir et vérifier les actions correctives Générer les solutions possibles et choisir la meilleure. Implémenter et valider les actions correctives Implémenter la solution retenue, stopper l'action temporaire pour contenir le problème.	Analyse de Décision Analyse des problèmes potentiels Fixer les objectifs. Lister les options possibles. Confronter les options avec les objectifs fixés. Choisir l'option la meilleure. Etudier ses problèmes potentiels et adopter des mesures en conséquence.
Contrôler	Contrôler Assurer que les variables clés du process restent sous contrôle pour maintenir les gains sur le long terme. <u>Outils</u> : Cartes MSP	Implémenter la maîtrise statistique des procédés Veiller au maintien du Red X sur sa cible. <u>Outils</u> : Certification de Process, Certification des opérateurs, Positrol, Precontrol.	Implémenter et valider les actions correctives Surveiller les résultats sur le long terme.	
Standardiser	Standardiser Standardiser les bonnes pratiques (méthodes et processus). Intégrer Intégrer ces méthodes et processus dans le cycle de conception.		Prévenir la récurrence Modifier les politiques, pratiques et procédures concernées. Faire des recommandations d'amélioration systématique pour les cas de problèmes similaires.	Analyse des opportunités Etudier les opportunités potentielles de la solution retenue et les mettre en pratique.
Clôturer		Clôturer le projet Récapituler la logique utilisée pour résoudre le problème. <u>Outils</u> : Arbre de la solution	Remercier l'équipe Reconnaître les contributions individuelles et collectives.	

Tableau II- 10 : Analyse structurelle macroscopique des méthodes de résolution de problèmes

L'analyse de ce tableau nous montre que chacune des méthodes présente des phases supplémentaires par rapport aux autres et peuvent proposer des outils différents pour une même phase. Le choix d'utilisation d'une méthode va donc dépendre du type de problème ou du type du contexte du problème à résoudre. Détaillons chacune des phases.

☞ **Reconnaître**

La phase Reconnaître consiste à choisir le ou les problèmes prioritaires à traiter. Elle permet de s'assurer que les sujets sur lesquels travaillent les personnes sont bien liés à des objectifs clé pour l'entreprise. Cette phase a été très longtemps oubliée, les versions initiales de Six Sigma commençaient directement par la phase « Définir » par exemple. Seule l'approche de Kepner Tregoe lui consacre depuis toujours l'importance qu'elle mérite : une méthode à part entière, l'Evaluation de Situation.

☞ **Définir**

Toutes les méthodes sont unanimes sur les caractères de cette phase : elle doit être obligatoire et la définition du problème doit être unanime et validée. Kepner Tregoe impose que la définition du problème ait la forme « objet + défaut » pour garantir l'unicité du problème et de sa définition. Six Sigma et Shainin s'accordent sur le fait que la définition du problème doit aboutir à une caractéristique spécifique mesurable sur le produit ou sur le procédé. Une charte de l'équipe doit être établie. Six Sigma va plus loin en s'appuyant sur une approche processus pour définir le projet : une cartographie du processus est à établir ainsi que la liste des acteurs, des clients du processus, leurs besoins, leurs exigences.

Concernant la définition des rôles au sein du groupe de travail, seule la méthode G8D le préconise. Pourtant, dans la pratique, cette définition s'avère essentielle pour la bonne articulation des actions. Kepner Tregoe et G8D ajoutent à cette phase une étape de description du problème en utilisant l'outil Est / N'est pas pour le décrire dans toutes ses dimensions.

☞ **Contenir**

Cette phase consiste à proposer et à mettre en place des actions temporaires pour contenir le problème, c'est-à-dire isoler ses effets. Seule la méthode G8D préconise ce type d'actions. Cette phase permet de maîtriser les effets du problèmes et de résoudre ainsi plus sereinement le problème pour l'éliminer définitivement.

☞ **Mesurer**

Cette phase ne regroupe pas exactement les mêmes étapes selon les méthodes et est même absente pour la moitié des méthodes de la littérature (notamment Kepner Tregoe et G8D).

Pour Shainin, elle se limite à la validation du processus de mesure. Cette validation est essentielle car l'analyse va se baser sur toutes les mesures observées et observables. Pour Six Sigma, elle comprend en plus le relevé des données qui serviront à l'analyse. En revanche, il n'y a pas d'outil préconisé pour orienter ce relevé : le recueil des informations doit se focaliser au mieux sur les données les plus pertinentes afin d'identifier les variables qui participent au processus et d'en comprendre le fonctionnement.

☞ **Analyser**

L'objet de cette phase est de lister les causes potentielles puis d'identifier les causes réelles du problème avec preuves.

Pour lister les causes potentielles, les méthodes les plus riches sont Shainin et Kepner Tregoe. Shainin, de part son étape de génération d'indices, propose une succession d'outils permettant de faire parler les produits et d'orienter la liste des causes potentielles vers la cause réelle : le Red X. Kepner Tregoe propose d'étudier les contrastes frappants de la description via l'outil « Est N'est pas » (par exemple le problème n'apparaît sur qu'une seule des deux lignes de fabrication). Ces deux méthodes sont basées sur le même principe pour lister les causes potentielles : la recherche de

manifestations non aléatoires. Les autres méthodes utilisent plus au moins des outils tels que le diagramme d'Ishikawa avec lequel on peut passer à côté de la cause réelle.

Pour analyser et trier ces causes potentielles, Six Sigma s'appuie sur des outils d'analyse du processus, d'analyses statistiques de données et d'expérimentation tels que les plans d'expériences. Le grand point fort de Six Sigma est la puissance et la richesse des outils proposés. Quant à Kepner Tregoe et G8D, ils proposent de confronter les causes potentielles à la description du défaut « Est N'est pas » pour filtrer les hypothèses qui sont en contradiction avec les faits.

☞ *Améliorer*

Cette phase consiste à déterminer l'action corrective la plus adaptée et à la mettre en place.

La méthode Shainin est assez limitée pour cette phase. Elle permet simplement de déterminer les spécifications et la cible à donner au Red X. Les autres méthodes proposent en plus des outils de choix de solutions dans le cas où la suppression du problème ne se résume pas au réglage d'une ou de plusieurs caractéristiques du procédé. Kepner Tregoe propose même une méthode à part entière pour choisir la solution la plus appropriée : l'Analyse de Décision.

☞ *Contrôler*

L'objectif de cette phase est de maintenir l'amélioration sur le long terme. Kepner Tregoe est la seule des méthodes à ne pas préconiser ce type d'actions. Toutes les autres méthodes proposent des outils type cartes de contrôle ou des certifications ou des audits. La méthode présentant le plus d'outils afin de s'adapter au mieux aux différents cas de figure est Six Sigma. Shainin propose un seul type de carte, simple mais qui doit être utilisé avec précaution : le Precontrol.

☞ *Standardiser*

Cette phase est peu répandue et peu appliquée en entreprise par manque de temps. C'est une grave erreur !! La systématisation de l'amélioration apportée aux autres systèmes similaires (présents ou futurs) permet de prévenir l'apparition de futurs problèmes potentiels. Seule la méthode Shainin n'en parle pas.

☞ *Clôturer*

Cette phase, comme la précédente, fait partie des oubliées des méthodes et de leur application ... N'ayant pas de valeur ajoutée visible concrètement et immédiate, on passe plutôt au problème suivant ... Or elle présente trois objectifs non négligeables : la validation du raisonnement suivi, la reconnaissance du travail accompli et la synthèse du travail réalisé.

4.4.2. Niveau cheminement dans la phase

Nous venons de voir la structure macroscopique des méthodes. L'analyse peut aussi être menée à un niveau inférieur : l'analyse structurée dans la phase. Prenons la phase Analyser pour illustration car elle est celle qui contient le plus d'outils dans la théorie et qui est la plus difficile à réaliser dans la pratique.

Très vite on s'aperçoit que l'aspect structuré est beaucoup moins présent à ce niveau. Prenons la méthode Six Sigma. Pour la phase Analyser, elle présente une pléthore d'outils, tous très puissants statistiquement ou méthodologiquement. Mais, devant cette panoplie d'outils dont certains sont de plus très complexes, les utilisateurs risquent d'être vite perdus, de ne pas savoir lequel choisir. Il n'y a pas de guide pour le choix et l'articulation des outils.

Shainin, en revanche, guide l'utilisateur à travers des outils simples dans son « entonnoir à X » comme indiqué dans la Figure II- 11. Il le conduit dans sa démarche de recherche de causes et l'oriente vers tel ou tel outil en fonction de ses résultats. L'utilisateur sait exactement quel outil utiliser à quel moment. C'est la grande force de la méthodologie Shainin.

Le seul bémol que nous pourrions apporter à ce système est qu'il sous-entend que tous les problèmes peuvent se résoudre avec un seul et même enchaînement d'outils, ce qui n'est pas vérifié en réalité. Par exemple, si après l'utilisation de l'outil Multi-Vari, la variation la plus importante est « inter-unités », l'outil suivant à utiliser est la Permutation non aléatoire de composants. Or, si le produit concerné par le problème n'est pas démontable, cet outil n'est pas applicable. L'utilisateur est « bloqué ».

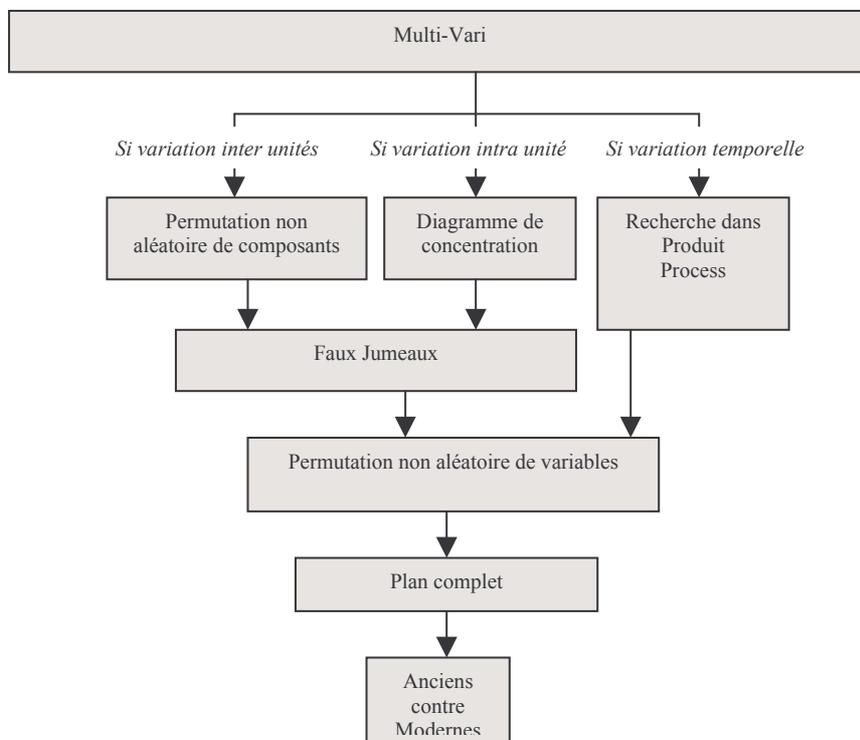


Figure II- 11 : Schéma de l'articulation des outils de l'entonnoir à X de Shainin

Une autre solution adoptée par Kepner Tregoe dans sa méthode Analyse de Problème est de construire une phase autour d'un seul outil « universel » (c'est-à-dire applicable pour tous les types de problèmes) et de bâtir une procédure autour de celui-ci. Ainsi la description du problème est établie via un « Est N'est pas ». Cet outil permet d'identifier des lignes de contrastes frappants. L'analyse des particularités et des changements liés à ces contrastes frappants permet de lister des causes potentielles. La confrontation de ces causes potentielles à l'ensemble de la description permet de filtrer les causes les plus probables. La Figure II- 12 présente ce propos.

L'utilisateur est parfaitement guidé mais cette structuration comporte un risque important. Si la description du problème n'est pas correcte alors toute la démarche est faussée. Or, il n'y a aucun « verrouillage » qui garantit cette description.

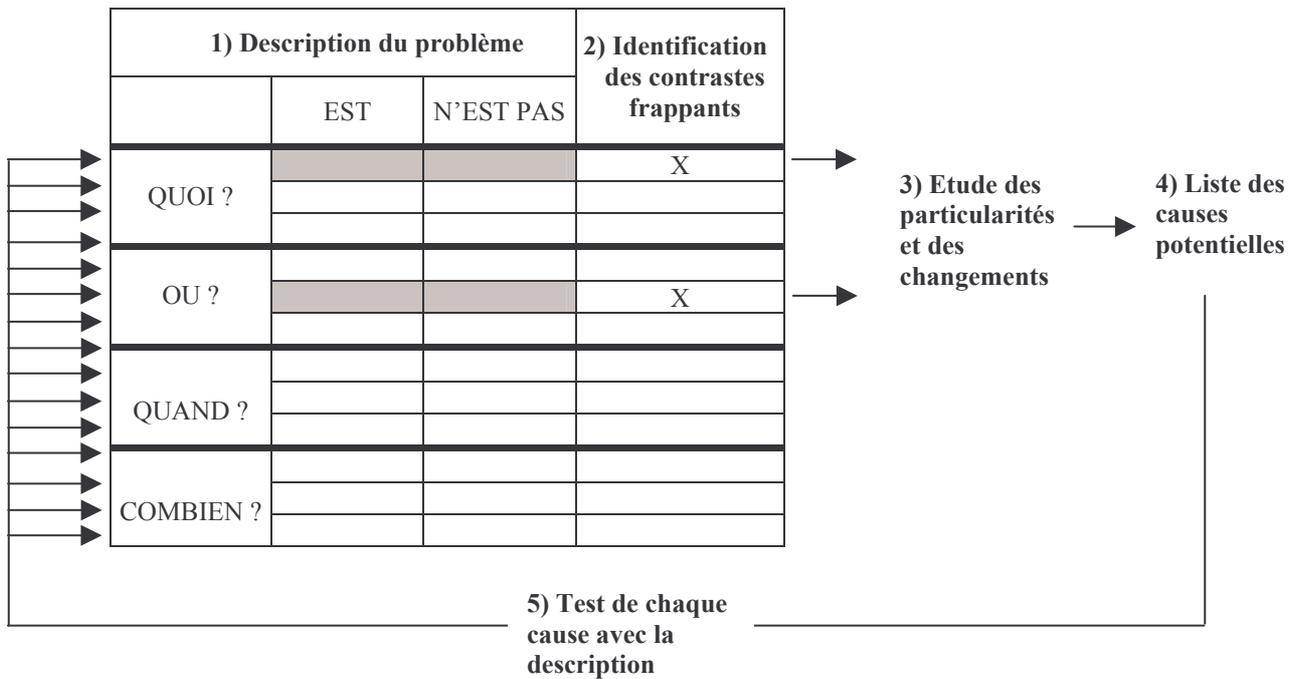


Figure II- 12 : Articulation autour du Est N'est pas selon Kepner Tregoe

4.5. POINT DE VUE ORGANISATIONNEL

4.5.1. Le modèle utilisé

Etudions les méthodes d'un point de vue organisationnel : comment l'entreprise doit être structurée pour manager ses démarches de résolution de problèmes ?

Le modèle ou la stratégie utilisée pour déployer une méthode de résolution de problèmes peut varier d'une organisation à une autre. Sanders [Sanders *et al.* 2000], dans le cas de Six Sigma, regroupe ces modèles en trois catégories générales de stratégies de déploiement :

- L'organisation Six Sigma
- L'organisation Six Sigma de l'ingénierie
- La sélection stratégique des projets et des individus

Dans le premier modèle, toute l'entreprise est formée à la philosophie, à la méthode et aux outils. Six Sigma sert autant de dispositif de motivation que de métrique.

Au lieu de s'attacher à motiver toute l'entreprise, l'attention peut aussi se porter sur le développement d'un corps de compétences dans les départements d'ingénierie. Ainsi, les objectifs des projets sont pour la plupart basés sur des nouveaux produits, des changements sur les produits ou des résolutions de problèmes en production.

Certaines entreprises choisissent aussi de déployer le Six Sigma à travers une minutieuse sélection d'individus et de projets s'appuyant sur la stratégie organisationnelle de l'entreprise. Ce modèle de stratégie permet une grande flexibilité des formations qui peuvent être ainsi adaptées à chaque projet, à chaque individu.

4.5.2. Des rôles définis

Seules les méthodes Six Sigma et Shainin définissent des rôles dans le déploiement des démarches. Six Sigma propose une organisation dédiée, pilier de cette méthode, qui s'articule suivant des rôles parfaitement définis [Harry *et al.* 2000] :

- Les Champions mènent l'initialisation, le déploiement et l'implémentation de la méthode à travers des organisations. Ce sont ceux qui choisissent les projets spécifiques à réaliser. Les théories, principes et pratiques de Six Sigma leur sont familiers. Les Champions sont choisis parmi les dirigeants exécutifs.
- Les Masters Black Belts (MBB) sont les « experts maison » de la méthode. Ils consacrent 100% de leur temps à la démarche. Les MBB sont choisis par les Champions avec lesquels ils travaillent pour coordonner la sélection des projets et la formation.
- Les Black Belts (BB) pilotent des projets spécifiques. Comme les MBB, ils ont donc de solides connaissances en techniques statistiques comme en management et travaillent à 100% de leur temps sur ces projets. Chaque BB travaille sous la responsabilité d'un MBB.
- Les Green Belts (GB) pilotent des projets de plus petite envergure qui ont trait à leur travail quotidien ou jouent un rôle de support pour un projet d'un BB. Ils aident aussi au déploiement des techniques Six Sigma. Ils consacrent une partie de leur temps à ces projets.

Shainin définit aussi des rôles similaires [Shainin *et al.* 1997] :

- Le Sponsor est une personne élevée hiérarchiquement dont le rôle est de fournir à l'équipe les ressources nécessaires et de la soutenir.
- Le Journeyman est un ingénieur qui a développé l'ingénierie statistique comme corps de compétences. Sa formation inclut une formation théorique et des résolutions de problèmes réels à l'aide de coaching par un Master.
- Le Master est un Journeyman dont le corps de compétences s'est transformé en profession et qui a développé une habilité à coacher. Le coaching par le Master est primordial pour maintenir la culture.

Dans tous les cas, il est donc important d'avoir des « experts maison » de la méthode déployée pour qu'ils puissent accompagner les pilotes dans la résolution de leurs problèmes. Leur rôle est aussi de favoriser la présentation de « success stories » [Harry *et al.* 2000] pour diffuser les améliorations obtenues sur un processus particulier : toute l'entreprise bénéficie ainsi du travail réalisé par l'équipe de projet.

4.6. POINT DE VUE SOCIOCULTUREL

S'il est une leçon que les entreprises ayant fait l'expérience des cercles de qualité ont apprises, c'est que, telles qu'elles, les méthodes d'une culture (japonaise dans ce cas) ne fonctionnent pas dans une autre culture (américaine par exemple). Pour que le concept puisse être appliqué efficacement une adaptation est nécessaire. Crocker, Charney et Sik Leung Chiu présentent par exemple dans [Crocker *et al.* 1991] les différences et les similitudes entre les Etats-Unis et le Japon en terme de valeurs et relations humaines, de structures organisationnelles, de pratiques de management et de prise de décision pour l'adaptation des cercles de qualité.

Le point de vue socioculturel est trop rarement abordé dans la littérature comme dans la pratique industrielle. Il est cependant primordial de prendre en compte cet aspect pour que l'entreprise s'approprie la méthode. Le déploiement actuel de la méthode Six Sigma dans les autres pays est un parfait exemple d'illustration : on ne déploie pas une méthode de la même façon aux Etats-Unis qu'en France. Richer et Caporali [Richer *et al.* 2005] présentent dans un article récent les

différences culturelles entre les deux pays à prendre en compte pour l'utilisation de cette méthode. Le Tableau II- 11 présente un résumé de ces points. Les symboles utilisés sont les suivants : (=) pour les similitudes culturelles, (≠) pour les particularités de la France par rapport aux Etats-Unis.

Points	Caractéristiques socioculturelles de la France par rapport aux Etats-Unis
Les objectifs du Six Sigma	(=) Objectifs globalement identiques : réduction des coûts, des rebuts, des déchets, des délais, des erreurs ... (≠) Certains projets lancés uniquement pour une meilleure connaissance du processus, voire même pour transmettre un savoir. (≠) Plans de déploiement à plus court terme et moins détaillés
Le rôle des acteurs du Six Sigma	(≠) Importance donnée à l'équipe projet plus forte (≠) Taille de l'équipe projet plus grande : facilite l'appropriation mais induit un problème de disponibilité des participants (≠) Moins d'importance au mode de relation entre le chef du projet et le champion (≠) Plus d'importance accordée aux relations entre les membres (=) Rôle et implication des champions globalement identiques (≠) Black Belt avant tout méthodologues, aident à améliorer le processus en intégrant fortement les aspects humains, non perçus comme des « coupeurs de tête » (≠) Black Belt occupent cette fonction à mi-temps dans 50% des entreprises (≠) Green Belt ont plus d'autonomie, se font aider seulement si analyse statistique complexe.
Le déploiement d'une démarche Six Sigma	(=) Utilisation de logiciels statistiques spécialisés (≠) Six Sigma moins considéré comme une culture d'entreprise, d'autres méthodologies d'amélioration sont utilisées en parallèle
La formation	(≠) Sous-estimation de l'importance d'être formé dans sa langue maternelle, avantage pourtant indiscutable (≠) Importance plus grande d'expliquer la théorie, besoin de bien comprendre d'où viennent les formules (≠) Ne se contente pas d'une liste d'outils dans laquelle piocher, importance particulière à l'enchaînement des outils (≠) Formation des champions moins poussée : une journée généralement alors que les champions américains sont souvent Black Belt, parfois Green Belt. (≠) Formation des Yellow Belt (membres d'équipe projet) moins développée en terme de durée et de nombre de participants
La communication	(≠) Plus grande difficulté pour obtenir l'affichage de l'avancement des projets, soit par souhait de l'entreprise de ne pas communiquer sur ses gains, soit par peur du chef de projet d'être critiqué en cas de retard. (≠) Recours plus intense au coaching par habitude de remonter aux théories et par volonté de s'adapter aux différences culturelles. (≠) Réseau d'échange entre tous les Black Belt et les Green Belt d'une entreprise demande à être plus fortement poussé
La conclusion des projets	(≠) Projets trop souvent prolongé par manque de focalisation, dû parfois à la direction, cette dispersion augmente la durée et démotive les équipes. (≠) Plus grande difficulté à intégrer l'action des chefs de projets et des membres d'équipe dans leur évaluation annuelle (≠) Moyens de reconnaissance : un « pot » ou un repas. Moyens américains tels que les tee-shirts personnalisés généralement mal acceptés. (=) Article dans le journal interne et félicitations solennelles par la direction ont montré leur efficacité. (≠) Plus de freins psychologiques de la part des chefs de projets pour restituer leurs projets dans l'intranet de l'entreprise.

Tableau II- 11 : Différences culturelles France / Etats-Unis pour l'utilisation de la méthode Six Sigma

L'analyse de ce tableau nous montre que les adaptations doivent concerner tous les aspects du déploiement : les rôles des acteurs, la formation, la communication, la conduite de la démarche ... Il y a donc un travail colossal d'adaptation à mener en amont avant de déployer une méthode de résolution de problèmes ou toute autre méthode qualité en entreprise.

4.7. CONCLUSION

Les méthodes de résolution de problèmes ont permis d'apporter un réel guide dans l'utilisation des outils. Un autre aspect important qu'elles ont développé est l'établissement d'un processus logique et systématique de résolution des problèmes : définition, recherche de causes, recherche de solutions, mise en place d'actions. Elles obligent à suivre un cheminement préétabli, à se poser les bonnes questions et à s'astreindre à des validations.

La plupart des méthodes de résolution de problèmes sont basées sur les mêmes principes : ce sont des approches descendantes, disciplinées et majoritairement orientées statistiques. Pour leur déploiement, la culture doit être partagée et les rôles des acteurs définis.

D'un point de vue structurel, ces méthodes ont un découpage en phases plutôt similaire à quelques variantes près. En revanche, chacune d'entre elles apporte un éclairage plus important à certaines phases. Par exemple, Six Sigma développe particulièrement la phase Mesurer alors que Shainin se focalise plutôt sur la phase de recherche de causes (par la génération d'indices). Serait-il donc possible de créer une méthode idéale, universelle en prenant les points forts de chacune ? Cette proposition engendrerait assurément une méthode très lourde et très complexe et apporterait encore plus de confusion pour l'utilisateur dans le choix des outils à utiliser.

D'un point de vue organisationnel, une méthode de résolution de problèmes peut être déployée à des niveaux différents : de toute l'entreprise à quelques personnes ciblées. Dans tous les cas, il est important d'avoir des « experts maison » pour maintenir et diffuser la culture.

D'un point de vue socioculturel, il est important que les modes de déploiement et d'utilisation de toute méthode de résolution de problèmes soient adaptés en fonction des contextes. Les cultures entre pays et entre entreprises étant différentes, il est nécessaire de réfléchir en amont à l'adaptation de la méthode pour la réussite de son intégration.

5. ADEQUATION A NOTRE PROBLEMATIQUE

Nous venons d'étudier les méthodes de la littérature sous différents points de vue : des principes, structurel, organisationnel et socioculturel. Reprenons ces mêmes points de vue pour étudier leur adéquation à notre problématique. Cette analyse nous permettra d'identifier les bases à conserver et les développements à réaliser pour l'élaboration d'une démarche adaptée à la résolution des problèmes qualité des produits innovants. Commençons par le point de vue des principes.

5.1. POINT DE VUE DES PRINCIPES

Les principes des méthodes de la littérature cités précédemment sont :

- Des approches disciplinées
- Une culture partagée
- Des approches descendantes
- Des rôles macroscopiques bien définis
- Des approches statistiques
- Des sources d'informations pour l'analyse différentes

Nous ne reviendrons pas sur les deux premiers principes qui constituent un tronc commun pour le déploiement de toute méthode qualité (que ce soit pour la résolution de problèmes ou autres). Il est évident que pour réussir une intégration de la méthode dans toute l'entreprise, celle-ci doit être connue de tous et comporter des étapes parfaitement définies. Les personnes ont ainsi un langage et une démarche commune pour avancer ensemble.

Dans notre contexte où le nombre de problèmes à résoudre est grand et le temps de résolution petit, il est d'autant plus important d'avoir des approches descendantes. Le choix des sujets et l'affectation des ressources humaines et matérielles doivent être judicieusement ciblés pour une efficacité maximale. Quant à la définition des rôles macroscopiques au sein de ce type d'entreprise, elle n'est pas aisée à mettre en place, l'entreprise étant en mutation organisationnelle pour évoluer d'une entité de développement vers une entité industrielle. Il est cependant nécessaire d'avoir des « experts maison » de la méthode comme nous l'avons vu précédemment pour inculquer et maintenir la culture.

L'approche à retenir pour la résolution des problèmes des produits innovants ne pourra pas être uniquement une approche statistique basée sur un type de source d'informations principal pour deux raisons.

Premièrement, nous avons vu que l'information pertinente est difficilement accessible et morcelée. Il faut développer des techniques permettant de rechercher cette information parmi toutes les sources possibles et de mettre en cohérence les informations de ces différentes sources.

Deuxièmement, le faible nombre d'occurrences du problème et de produits fabriqués limitent l'utilisation d'outils statistiques.

L'approche à développer s'apparentera donc plus à celle d'un détective qu'à celle d'un statisticien !

5.2. POINT DE VUE STRUCTUREL

Le Tableau II- 12 présente notre analyse de l'adéquation des méthodes à notre contexte d'un point de vue structurel. Les parties grisées correspondent aux caractéristiques des méthodes ne répondant pas aux contraintes, les parties en blanc aux réponses satisfaisantes.

Contraintes	Six Sigma	Shainin	G8D	Kepner Tregoe
Nombre important de problèmes à traiter dans un temps très court	Si problèmes de même enjeux, pas de critères de choix	Si problèmes de même enjeux, pas de critères de choix	Si problèmes de même enjeux, pas de critères de choix	Si problèmes de même enjeux, pas de critères de choix
	Absence de phase Contenir	Absence de phase Contenir	Phase Contenir	Détermination d'actions pour chaque problème : analyse ou action palliative
	Formalisation demandée conséquente pour chaque phase	Déroulement imposé de chaque phase	Outils à utiliser et formalisation libres de chaque phase	Quatre méthodes différentes à dérouler pour résoudre le problème
	Un groupe de travail monopolisé tout au long de la résolution	Un groupe de travail monopolisé tout au long de la résolution	Un groupe de travail monopolisé tout au long de la résolution	Constitution du groupe peut être revue à chaque changement de méthode
Difficulté de lister les causes potentielles	Débuté par un Ishikawa	Entonnoir à X	Aide à la définition du « périmètre critique »	Aide à la définition du « périmètre critique »
Information morcelée Difficulté d'accéder à l'information pertinente	Sources d'information limitées aux bases de données et au processus de fabrication	Sources d'information limitées aux produits et au processus de fabrication	Difficulté pour remplir le QQQQCP et l'outil « Est / n'est pas »	Difficulté pour remplir l'outil « Est / n'est pas »
Peu d'occurrences pour l'analyse	Nombreuses utilisations d'outils statistiques	Outils applicables avec peu d'occurrences	Prend en compte les objets n'ayant pas de défaut pour l'analyse	Prend en compte les objets n'ayant pas de défaut pour l'analyse
	Importance donnée à la mesure continue	Importance donnée à la mesure continue	Phase « Mesurer » absente	Phase « Mesurer » absente
Partie amont à l'expérimentation majeure – Expérimentation limitée	Utilisation rapide des plans d'expériences	Principe même de la méthode !	Analyse précise des données du problème avant toute expérimentation	En principe, essai seulement pour valider la cause

Tableau II- 12 : Adéquation structurelle des méthodes au contexte des produits innovants

Pour la phase Reconnaître, si les problèmes ont des enjeux similaires, il n'y a pas de critères de sélection permettant de choisir lequel traiter en premier. Pour chaque problème, il faut dérouler toutes les phases dans l'ordre et selon un formalisme imposé et il faut monopoliser un groupe entier de personnes. Ceci peut être très lourd lorsqu'il y a de nombreux problèmes à traiter. De plus, la mise en place d'actions palliatives est nécessaire pour contenir les effets du problème prioritaire mais aussi pour contenir les effets des autres problèmes qui seront traités plus tard.

Pour la phase Analyser, aucune des méthodes ne répond bien à la difficulté d'accéder à l'information pertinente et à son morcellement.

Les phases impactées par ces contraintes concernent essentiellement le choix du problème (phase Reconnaître) jusqu'à la validation de la cause réelle (phase Analyser). Notre travail et nos propositions se focaliseront donc sur phases.

5.3. POINT DE VUE ORGANISATIONNEL

Nous avons vu qu'il existait trois types de modèles de déploiement :

- L'organisation Six Sigma
- L'organisation Six Sigma de l'ingénierie
- La sélection stratégique des projets et des individus

Etant donné que ce type d'entreprise est en mutation organisationnelle pour évoluer d'une entité de développement vers une entité industrielle, le modèle à déployer le plus adapté serait le troisième : la sélection stratégique des projets et des individus. Il permet une grande flexibilité des formations qui peuvent être ainsi adaptées à chaque projet ou à chaque individu, ce qui est important dans le cadre d'une proposition ad hoc de méthode. Plus tard, l'entreprise pourra évoluer vers un des deux autres modèles.

Quant aux rôles à définir, nous avons vu qu'il était nécessaire d'avoir des « experts maison » de la méthode pour inculquer et maintenir la culture. La direction a aussi un rôle très important à jouer, même dans ce modèle de déploiement. Elle doit mener l'initialisation et le déploiement de la méthode à travers les organisations. Elle doit aussi déterminer les problèmes prioritaires sur lesquels travailler.

5.4. POINT DE VUE SOCIOCULTUREL

Il est aussi important d'adapter la forme que le fond des modes de déploiement d'une méthode de résolution de problèmes selon la culture de l'entreprise.

Sur la forme, on peut citer par exemple l'intitulé de la méthode, l'intitulé des rôles des personnes et les moyens de reconnaissance.

Pour que les personnes s'approprient la méthode, la première mesure simple est de choisir un intitulé interne à la méthode, en rapport avec l'histoire de l'entreprise par exemple. L'intitulé doit donner envie d'utiliser la méthode !

Concernant les intitulés des rôles et les moyens de reconnaissance, ils doivent aussi être adaptés. Etre le Master Black Belt ou le Champion de l'entreprise, comme recevoir une casquette à l'effigie de la société, ne fait pas partie de la culture française et peut même être perçu comme ridicule voire décrédibiliser la méthode. Pour la définition des rôles, par exemple, les Champions peuvent être appelés les « conducteurs de la méthode » et les Masters Black Belts les « experts maison de la méthode ». Quant aux marques de reconnaissance, comme l'indique le Tableau II- 11 : Différences culturelles France / Etats-Unis pour l'utilisation de la méthode Six Sigma, un « pot » ou un repas est beaucoup plus dans la culture française !

Sur le fond, les méthodes de résolution de problèmes sont rarement considérées comme une culture d'entreprise en France, d'autres méthodologies d'amélioration sont utilisées en parallèle (la Maîtrise Statistique des Procédés par exemple). Il est donc nécessaire d'expliquer et de montrer le lien entre les différentes méthodes. Même si au départ, le changement est issu d'une vision macroscopique d'un état souhaité pour l'entreprise dont la cohérence est évidente au niveau de la direction générale, on peut se poser la question de ce qu'il reste de cette cohérence au niveau du poste de travail par exemple. Le risque est important que la mise en place simultanée de plusieurs démarches produise une vision extrêmement fractionnée pour le technicien de production et l'opérateur. Ils voient arriver une succession de démarches, de méthodes, d'outils sans toujours en percevoir la complémentarité et les articulations.

Quant à la communication sur l'avancement ou la réussite des cas, elle n'est pas non plus naturelle à notre culture. L'affichage de l'avancement des projets ou l'édition sous l'intranet de l'entreprise des cas de réussite connaissent plus de freins psychologiques. Les « conducteurs » et les « experts maison » doivent donc identifier les raisons de ces freins et mettre en place des actions pour les supprimer.

6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons vu l'évolution des outils utilisés pour résoudre les problèmes qualité en termes de diversification, de complexification et d'organisation. Ces outils ont ensuite été intégrés dans des méthodes afin de proposer un guide de leur utilisation et un processus logique de raisonnement.

Les méthodes les plus répandues dans la littérature et dans l'industrie sont le DMAIC de Six Sigma, le Système de Shainin, la méthode G8D de Ford et le PSDM de Kepner Tregoe. Ces méthodes comprennent chacune une part d'originalité dans le découpage des phases ou dans le choix des outils préconisés. Nous avons vu qu'il n'était pas concevable de créer une « superméthode » englobant toutes les méthodes et tous les outils existants dans l'espoir d'être le plus exhaustif et le plus complet possible. Il faut donc sélectionner les méthodes ou parties de méthodes les plus adaptées au cas étudié. Enfin, le déploiement de la méthode retenue demande un travail important en amont d'adaptation aux valeurs et aux habitudes socioculturelles du contexte dans laquelle elle sera implémentée. Ce travail est impératif pour la réussite du déploiement de la méthode et son intégration dans la culture de l'entreprise.

L'adéquation de ces méthodes au cas des produits nouveaux de haute technologie a été analysée selon différents points de vue : principes, structurel, organisationnel et socioculturel.

D'un point de vue des principes, nous avons vu que la démarche de résolution de problèmes dans le cas de produits innovants s'apparentait plus à celle d'un détective qu'à celle d'un statisticien afin d'explorer toutes les sources d'informations disponibles. Cependant, elle doit conserver une structure disciplinée par phases et systématique.

D'un point de vue structurel, cette analyse montre que notre travail devra essentiellement se focaliser sur les phases Reconnaître, Définir, Contenir, Mesurer et Analyser car ce sont les impactées par les contraintes du contexte.

D'un point de vue organisationnel, le déploiement doit dans un premier temps se focaliser sur certains projets et certaines personnes. Il est cependant important d'avoir des conducteurs de la méthode, membres de la direction moteurs dans le déploiement, et des experts maison pour accompagner les pilotes dans la résolution des problèmes.

D'un point de vue socioculturel, il faut adapter le fond et la forme à la culture de l'entreprise et du pays. Dans le cas d'entreprise française, il faut notamment adapter les intitulés des rôles et les marques de reconnaissances et encourager la communication relatives aux cas traités. Le lien et l'articulation avec les autres démarches déployées doit être mis en lumière. Dans le cas particulier des entreprises de haute technologie, il faut aussi prendre en compte la culture technique et la nature créative des personnes.

Chapitre III

Construction d'une démarche de résolution de problèmes qualité adaptée et adaptable

Ce chapitre a pour objectif de proposer une structure de démarche de résolution des problèmes qualité pour les entreprises de haute technologie. Après avoir identifié les points faibles des démarches existantes au regard du contexte étudié, nous tenterons de répondre aux questions suivantes : que peuvent nous apporter les méthodologies d'autres domaines ? Doit-on recréer une autre méthode ? Peut-on proposer une méthode unique pour tous les cas ? Quelle structure globale peut être proposée ? Quelles sont les phases et étapes clés à suivre ? Quels sont les outils à utiliser pour chacune de ces étapes ?

1. INTRODUCTION

Resituons tout d'abord le cadre notre étude. Notre problématique tourne autour de la maîtrise de la qualité des produits nouveaux de haute technologie et plus particulièrement des démarches de résolution de problèmes. Les particularités de ces produits ont été étudiées au chapitre I.

L'analyse des méthodes et outils existants, développée en chapitre II, nous conduit premièrement à ne pas trouver de méthode prédéfinie idéale. De plus, nous avons vu qu'il n'était pas concevable de créer une méthode générique idéale en prenant toutes les forces des méthodes et outils disponibles.

Il faut prendre en compte le problème de l'adaptation au contexte que nous traiterons au cours de ce chapitre.

La première partie de ce chapitre présente notre démarche de recherche. Nous verrons comment l'étude bibliographique menée au chapitre II et sa confrontation aux contraintes de notre contexte a mis en lumière les points sur lesquels nous devons nous focaliser et a pu préciser ainsi notre problématique. Nous verrons aussi comment les méthodologies d'autres domaines peuvent nous apporter des réponses à notre question principale.

La deuxième partie représente le cœur de ce chapitre : la proposition d'une structure de résolution de problèmes. Bien que reposant sur une structure de base, nous verrons comment celle-ci peut évoluer via plusieurs étapes : définition du profil du problème, définition de l'état méthodologique du problème, formulation de concepts à développer, génération de l'instrumentation de substitution.

Les parties suivantes sont consacrées à l'instrumentation de substitution pour les phases Reconnaître, Définir, Mesurer, Décrire et Analyser. Nous aborderons successivement les problématiques de choix du problème et de détermination du niveau de résolution, de répartition des rôles et de mesure du problème, puis la description du problème, la liste des causes potentielles et le test de celles-ci.

2. DEMARCHE DE RECHERCHE

2.1. INTRODUCTION

Cette recherche tente de répondre à un besoin d'amélioration présent dans de nombreuses entreprises : l'adaptation des démarches de résolution de problèmes à leur contexte pour améliorer l'efficacité des méthodes.

L'exploration des méthodes et outils existants [Shainin 1993a] [Shainin 1993b] [Kepner *et al.* 1980] [Hanh *et al.* 2000] [Goh 2001] confrontée aux contraintes de notre contexte de recherche a mis en relief les phases de résolution de problèmes les plus critiques sur lesquelles nous devons nous concentrer : du choix du problème (phase Reconnaître) jusqu'à la validation de la cause réelle (phase Analyser). Notre travail et nos propositions se focalisent donc essentiellement sur ces phases, l'étude des phases suivantes (phases Améliorer, Contrôler, Standardiser, Clôturer) pourront faire l'objet de perspectives de recherche. Le Tableau III- 1 présente cette mise en relief.

	Reconnaître	Définir	Contenir	Mesurer	Analyser	Améliorer	Contrôler	Standardiser	Clôturer
Nombre de problèmes à traiter	X	X	X						
Difficulté d'établir une liste exhaustive de causes possibles				X	X				
Difficulté d'accéder à l'information pertinente	X			X	X				
Morcellement de l'information disponible				X	X				
Pas de vision globale					X				
Peu d'occurrences pour l'analyse				X	X				
Partie amont à l'expérimentation majeure					X				
Expérimentation limitée					X				

Tableau III- 1 : Les phases critiques

La question principale de ce travail de recherche peut donc s'énoncer comme suit :

Comment une entreprise de haute technologie peut-elle sélectionner judicieusement les problèmes qualité à traiter et en identifier les causes réelles en minimisant les essais et ce, dès les premières occurrences ?

2.2. POSTULATS

Pour répondre à cette question centrale, nous proposons de baser notre travail sur les quatre postulats suivants.

Postulat 1 :

Une méthode de résolution de problème n'est ni bonne ni mauvaise dans l'absolu, elle doit être évaluée dans un contexte pour lequel on pourra conclure qu'elle est adaptée ou non.

Notre premier postulat concerne l'évaluation des méthodes de résolution de problèmes. L'efficacité ou l'efficience des méthodes ne peut être mesurée intrinsèquement; suivant le contexte de l'entreprise et du problème en particulier, tel outil ou telle méthode pourra être adapté ou non. Par exemple, dans une entreprise où les personnes n'ont pas été formées aux techniques statistiques, les outils proposés par Six Sigma seront moins appropriés que ceux de la méthode Shainin. En revanche, dans une entreprise travaillant en grande série et dont le niveau de formation moyen des personnes en statistiques est élevé, l'utilisation de la méthode Six Sigma sera pertinente. L'idée est donc de pouvoir caractériser ce contexte pour proposer une démarche adaptée à ces caractéristiques précises.

Postulat 2 :

Dans une démarche de résolution de problème, la disponibilité de l'information pertinente conditionne les chances de résolution.

Une nouvelle notion à prendre en compte est introduite par notre deuxième postulat : la disponibilité de l'information pertinente. Cette notion n'est pas développée dans les méthodes classiques de résolution de problèmes. Or, pour nous, elle est fondamentale. En effet, si l'information pertinente n'est pas disponible ou au moins potentiellement disponible, le problème ne peut être résolu que par un hasard miraculeux. S'astreindre à évaluer l'information disponible des différents problèmes à traiter permet d'augmenter la probabilité de résolution des problèmes choisis et de mieux affecter les ressources.

Postulat 3 :

Le développement de la description du problème est le moyen le plus efficace pour réduire le nombre d'essais dans la recherche et la validation des causes.

Notre troisième postulat concerne la réduction de l'expérimentation. Nous partons du principe que pour diminuer au maximum l'expérimentation, il faut en amont la cibler le plus précisément possible. Si la description du problème dans toutes ses dimensions est étoffée finement alors elle pourra agir comme un premier filtre efficace des causes potentielles en éliminant les causes en contradiction avec un ou plusieurs faits. Ensuite, il est possible de travailler sur une organisation judicieuse des essais restant à réaliser mais le facteur de gain sera moindre.

Postulat 4 :

Pour résoudre un problème, les occurrences sans défaut sont aussi riches d'informations que les occurrences avec défaut.

La partie amont à l'expérimentation fait justement l'objet de notre dernier postulat. Trop souvent une focalisation s'opère autour des occurrences ayant le défaut : ces unités sont analysées, décortiquées et examinées sous tous les angles. Or la focalisation devrait se faire à la frontière de l'espace multidimensionnel des occurrences avec défaut et de celui des occurrences sans défaut : plus cette zone est rétrécie, plus les causes potentielles sont cernées. Ce postulat est d'autant plus intéressant dans notre problématique que le nombre d'occurrences avec défaut pour l'analyse est faible.

2.3. AXES DE RECHERCHE

Le croisement de nos postulats et de l'étude bibliographique du chapitre II a permis de mettre en valeur d'une part des points de méthodes bien adaptés à notre situation et d'autre part des points ayant un éclairage insuffisant, particulièrement en ce qui concerne l'extraction et l'évaluation de l'information pertinente. La sélection, la combinaison, l'enrichissement et le développement de ces méthodes et outils initiaux sont donc nécessaires pour construire une démarche de résolution de problèmes adaptée mais non suffisants.

Nous avons donc eu pour idée d'élargir notre champ de recherche aux méthodes et outils d'autres domaines (non industriels) ayant des contraintes similaires aux nôtres dans l'objectif de pouvoir adapter leurs principes, méthodes et outils pour notre démarche.

En poussant à l'extrême ces contraintes, il faut trouver des contextes pour lesquels :

- Il y a un nombre de problèmes important.
- Chaque problème est apparu une seule fois.
- Toutes les données pertinentes ne sont pas forcément enregistrées.
- La recherche de causes n'autorise aucun essai.
- Personne n'a une connaissance complète de l'objet ayant le défaut.

Au moins deux domaines répondent à ces critères : l'analyse des accidents et la criminologie (considérée comme la «science des causes du crime»). Les méthodologies utilisées pour ces domaines sont décrites notamment dans [Chartrand 2004] [Greenberg 1973] [Prévoist 1988] [Livingston *et al.* 2001]. Le Tableau III- 2 présente le rapprochement de ces deux méthodologies avec la démarche de résolution de problèmes industrielle. La découpe des phases entre les trois méthodologies est assez similaire, certains outils utilisés sont même communs entre les méthodes. Il paraît donc plutôt pertinent de les utiliser pour compléter la résolution de problèmes classique.

Méthode de résolution de problème industrielle	Processus d'investigation des accidents	Enquête criminelle
Reconnaître		Questionnement de filtrage des enquêtes
	Investigation sur site	Descente sur les lieux
Définir		Etablissement de la commission d'un crime
Mesurer	Description de la séquence d'évènements et des circonstances	Enquête préliminaire, recueil d'indices et de preuves matérielles
Analyser	Détermination des causes racine	Analyse des indices, des preuves matérielles, interrogatoires, constructions d'hypothèses ...
Améliorer	Développement des recommandations, écriture du rapport	Phase judiciaire
Contrôler	Implémentation et suivi, contrôle	Phase correctionnelle
Standardiser	Critique du processus d'investigation Amélioration du processus	Jurisprudence
Clôturer	Points sur les leçons à retenir	

Tableau III- 2 : Rapprochement des trois méthodologies

Quatre axes de recherche sont ainsi retenus pour la construction de notre proposition de démarche de résolution de problème :

- Le premier axe s'appuie sur les méthodes et outils existants : sélection des méthodes et outils les plus adaptés à notre contexte, enrichissement de ces entités, recherche de potentielles interactions positives entre elles.
- Le deuxième axe a pour objectif de compléter le panel d'outils disponibles en développement de nouveaux outils.
- Le troisième axe repose sur l'analyse des méthodologies d'autres domaines : emprunt de leurs méthodes et outils et adaptation à l'industrie.
- Le quatrième axe consiste en la création d'un guide pour servir de fil conducteur entre ces différents outils et méthodes.

2.4. CONCLUSION

L'objectif de nos travaux est donc de répondre à la question suivante :

Comment une entreprise de haute technologie peut-elle sélectionner judicieusement les problèmes qualité à traiter et en identifier les causes réelles en minimisant les essais et ce, dès les premières occurrences ?

Pour apporter une solution à cette problématique, nous avons vu qu'il faut proposer une méthode adaptée aux produits nouveaux de haute technologie et adaptable aux différents problèmes qui seront à traiter. Celle-ci doit permettre d'évaluer l'information disponible pour s'assurer des chances de résolution et doit donner un accent particulier à la description du problème des occurrences avec et sans défaut pour diminuer l'expérimentation.

L'étude bibliographique des méthodes et outils existants de résolution de problèmes classiques et des méthodes de criminologie et d'analyse des accidents nous a aidés à orienter la structure de résolution de problèmes présentée dans la partie suivante.

3. PROPOSITION D'UNE STRUCTURE

3.1. INTRODUCTION

La structure de notre proposition se base essentiellement sur le premier postulat :

Postulat 1 :

Une méthode de résolution de problème est ni bonne, ni mauvaise dans l'absolu, elle doit être évaluée dans un contexte pour lequel on pourra conclure qu'elle est adaptée ou non.

Partant de la réflexion que l'efficacité de la méthode dépend du contexte, il nous semble que cette dimension n'est pas prise en compte dans les démarches actuelles. L'idée est donc d'identifier le plus rapidement possible le contexte afin de construire une méthode au cas par cas adaptée à la situation étudiée particulière.

Dans cette partie, nous exposerons les bases conceptuelles permettant de définir ce contexte : le profil du problème et de son état méthodologique. Nous verrons ensuite comment l'établissement parallèle de ces deux statuts permet de construire une démarche de résolution de problème contextualisée.

3.2. BASES CONCEPTUELLES

3.2.1. Profil et état méthodologique du problème

Pour caractériser le contexte du problème, nous pensons qu'il faut introduire deux notions conceptuelles différentes :

- le profil du problème
- l'état méthodologique du problème

Le profil du problème peut être défini comme l'ensemble des caractéristiques :

- techniques du produit. Exemple : produits non démontables.
- physiques du problème. Exemple : mesure continue du défaut non possible.
- humaines du problème. Exemple : niveau de formation en statistiques des personnes en charge de sa résolution.
- techniques de l'ensemble des produits. Exemple : produits de haute technologie.
- organisationnelles. Exemple : entreprise avec une structure matricielle.
- socioculturelles. Exemple : culture américaine.

Dans notre cas d'étude, les trois derniers types de caractéristiques (propres à l'entreprise) sont fixées : celles des entreprises de haute technologie; ces éléments ont été décrits en chapitre I. Nous n'aborderons donc pas la distinction de ces caractéristiques. Ce travail pourra être envisagé pour des perspectives de recherche. En revanche, les trois premiers types de caractéristiques (propres au problème lui-même) sont évidemment variables, la méthode proposée doit répondre aux différents problèmes rencontrés.

L'état méthodologique, quant à lui, peut être défini comme le statut de l'avancée de la résolution du problème. Il est complètement indépendant du profil de problème et donc des caractéristiques propres au produit et à l'entreprise.

3.2.2. Principe méthodologique

Pourquoi établir le profil du problème et son état méthodologique ?

Une structure de base (phases et instrumentation) est choisie au départ.

Le croisement de ces deux évaluations – profil et état méthodologique du problème – induit la démarche de résolution de problème contextualisée à suivre : l'état méthodologique permet de sélectionner les phases ou étapes à réaliser de la structure de base, le profil du problème permet quant à lui de générer si besoin une instrumentation de substitution pour les cas où les outils de la structure de base ne seraient pas adaptés.

La Figure III- 1 expose ce principe.

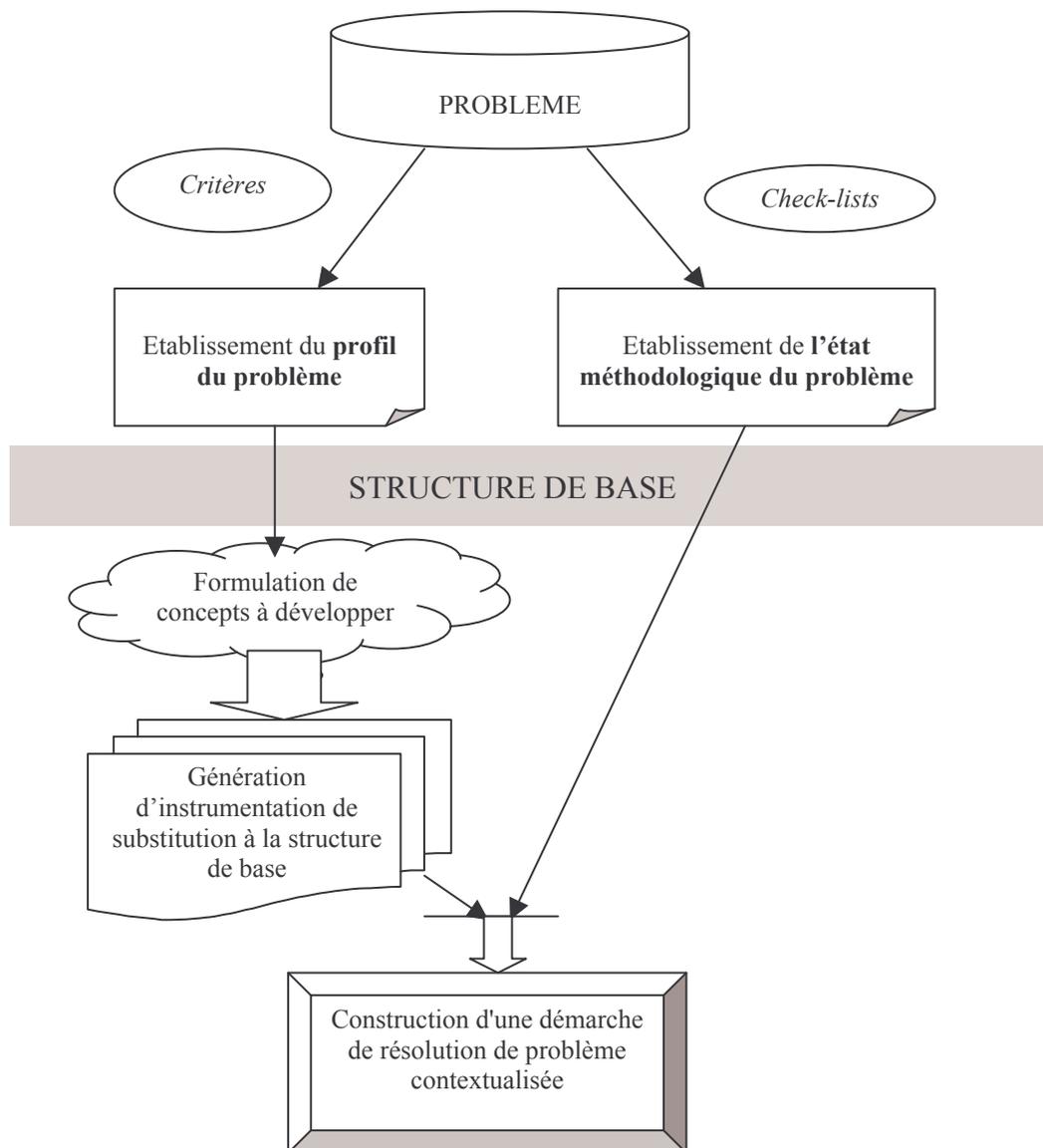


Figure III- 1 : Déroulement méthodologique

L'établissement du profil du problème a un double objectif : pointer les instrumentations de la structure de base qui ne sont pas adaptées aux caractéristiques de ce problème et aiguiller vers des instrumentations de substitution adéquates via des concepts à développer.

Il est sans doute utopique de vouloir le décrire de manière exhaustive, d'autant plus que la façon d'établir ce profil doit rester simple pour pouvoir être utilisée par un non-spécialiste. Etant donné les objectifs de cette description, il suffit de caractériser les éléments qui peuvent induire un changement dans l'instrumentation à utiliser. Pour établir ce profil, nous proposons donc un questionnaire de dix questions (critères) à trois niveaux de réponse que nous présenterons dans la partie 3.3.

La détermination du profil doit se faire en parallèle et en continu avec la conduite de la résolution du problème. Les modifications imposées par le profil pour les premières phases demandent peu d'informations, et plus on avance, plus le profil doit être affiné.

L'objectif de l'établissement de l'état méthodologique du problème est de déterminer les phases et étapes de la structure de base déjà validées afin de cibler plus rapidement les phases et étapes sur lesquelles travailler.

Pour établir cet état méthodologique, exposé en partie 3.4, nous proposons d'utiliser des check-lists représentant les états attendus et les « livrables » de fin des phases. Des check-lists ont déjà été proposées par Pillet [Pillet 2004], nous ne retravaillerons donc pas une proposition de nouvelles check-lists dans ce chapitre. Cependant, nous proposons une check-list de synthèse en annexe II; elle reprend les points essentiels à vérifier (épurgés des questions en rapport avec le profil du problème). La réponse à chaque point est une binaire.

3.3. ETABLISSEMENT DU PROFIL DU PROBLEME

3.3.1. Définition des critères et des niveaux

Pour caractériser le profil du problème, il nous faut avant tout définir une liste de critères. Nous avons vu qu'il était utopique de vouloir définir exhaustivement le profil. Il faut donc se ramener à l'objectif de l'établissement du profil du problème qui concerne le choix de l'instrumentation.

Pour ériger cette liste de critères, nous avons donc analysé de nombreux problèmes concrets et cherché quel critère du problème entraînait l'impossibilité d'utiliser tel outil ou de mener à terme telle phase (parmi les méthodes et outils présentés en chapitre II). Nous avons pu établir une liste de dix critères présentés dans le Tableau III- 3. Cette liste n'est pas figée et pourra évoluer dans le temps, la structure proposée reste valable.

Chaque critère est évalué selon une échelle sémantique comprenant trois niveaux. Le niveau 1 correspond aux situations engendrant le moins de contraintes et le niveau 3 aux situations les plus problématiques. Ces niveaux ne doivent pas être interprétés de façon discrète mais plutôt comme une échelle continue, le niveau 2 représentant un niveau intermédiaire.

3.3.2. Caractérisation du profil d'un problème

Ce Tableau III- 3 va donc servir de formulaire pour caractériser le profil du problème. Cette caractérisation va permettre ainsi d'orienter le choix de l'instrumentation à utiliser pour une meilleure adéquation possible avec le profil du problème. Elle devra donc être établie pour chaque nouveau problème à traiter

Avant de commencer une démarche de résolution formelle, le pilote évalue les caractéristiques intrinsèques du problème par ces dix critères. Cette évaluation devra être affinée au fur et à mesure du traitement du problème.

Critères	Questions	Niveau 1 Profil de base	Niveau 2 Profil intermédiaire	Niveau 3 Profil contraint
Nombre d'occurrences du défaut	Combien d'occurrences du défaut peut-on dénombrer ?	>10	3 à 10	1 à 3
Nombre de causes potentielles	Les causes potentielles sont-elles nombreuses ?	Peu nombreuses	Nombreuses	Impossible à déterminer
Possibilité de décomposition du produit	Le produit est-il décomposable ?	Oui, en majeure partie	Oui, en sous-ensemble	Non
Quantité de données disponibles	De quelle quantité d'information dispose-t-on ou peut-on disposer par produit défectueux ?	Nombreuses informations déjà disponibles	Informations potentiellement disponibles	Peu d'informations
Compétences en statistiques	Les personnes en charge de la résolution ont-elles des compétences en statistiques ?	Statistiques avancées	Statistiques de base	Aucune
Degré de connaissance technique	Quel est le degré de connaissance technique de ce problème ?	Fort	Moyen	Faible
Possibilité d'expérimentation	Peut-on envisager de faire des essais ?	Oui	Limité	Très peu
Nombre des autres problèmes d'enjeux similaires	Y a t il d'autres problèmes que celui-ci dans le même ordre d'enjeu ?	1 à 2	2 à 5	> 5
Possibilité de mesure physique continue	Peut-on envisager une mesure continue du défaut ?	Existe déjà	Envisageable	Non évidente
Possibilité d'analyse physique	Peut-on faire des analyses physiques du défaut ?	Déjà disponible	Envisageable	Non

Tableau III- 3 : Critères pour évaluer le profil du problème

3.4. GENERATION DE L'INSTRUMENTATION DE SUBSTITUTION

3.4.1. Choix de la structure de base

Le niveau 1 global du Tableau III- 3 correspond assez bien à la méthode Six Sigma [Harry *et al.* 2000]. La méthode Six Sigma constitue donc notre structure de base.

Prenons deux critères de ce tableau pour illustration : la quantité d'informations disponibles et les compétences en statistiques.

Si de nombreuses informations sont disponibles, alors la méthode Six Sigma est tout à fait adaptée de part les nombreux d'outils d'analyse qu'elle propose : tests de comparaison, analyse de corrélation ...

Concernant les compétences en statistiques des personnes en charge de la résolution de problèmes, les outils de Six Sigma conviennent parfaitement si ces compétences sont avancées et permettent d'obtenir d'excellents résultats.

3.4.2. Lien entre le profil du problème et l'instrumentation

Si un problème obtient une notation de 1 pour tous les critères, la méthode originelle est tout à fait adaptée. A partir du moment où un des critères est évalué différemment, cela signifie qu'un ou plusieurs outils et techniques proposés par Six Sigma ne sont plus optimales pour cette configuration. Par exemple, l'approche Shainin [Shainin 1993a] apporte dans certains cas des possibilités d'étendre la démarche de base pour répondre à des contraintes de niveau 2.

Dans notre cas d'étude, il est fréquent d'atteindre des notations de niveau 3 sur de nombreux critères. Le niveau 3 correspond d'ailleurs bien aux contraintes de notre contexte rappelées au début de ce chapitre. Or, peu de réponses de la littérature sont satisfaisantes pour ce niveau qui fera donc l'objet particulier de notre travail.

Reprenons pour illustration les deux critères précédents : la quantité d'informations disponibles et les compétences en statistiques.

Dès que l'information n'est pas directement disponible, il faut trouver d'autres outils permettant d'aller chercher cette information : les outils Shainin qui permettent de « faire parler les produits » sont plus adaptés dans ce cas. Par contre, s'il y a vraiment peu d'information disponible ou potentiellement disponible, ces outils ne sont plus suffisants, il faut développer une instrumentation particulière permettant de mener et d'orienter une véritable recherche d'informations.

Si seules les statistiques de base sont connues, des outils comme « Anciens contre Modernes » ou « Permutation non aléatoire de composants » (outils de Shainin) utilisant des notions comme les combinaisons et les limites naturelles sont plus compréhensibles. Par contre, si ces notions élémentaires ne sont pas acquises, il faut envisager d'autres outils plus accessibles.

3.4.3. Formulation des concepts à développer

Avant d'étudier les concepts à développer, rappelons tout d'abord la définition d'un concept qualité telle que l'énonce Bécharde [Bécharde *et al.* 2001] : **Le concept qualité est une abstraction, une représentation théorique et générale. De nature fondamentale, il se matérialise dans et par les méthodes, techniques et outils qu'il oriente selon les grands principes qualité sur lesquels il s'appuie. Exemple : La maîtrise de la variabilité, « Faire parler les produits ».**

Pour définir les concepts à développer selon les cas, nous avons étudié quelle phase était impactée à chaque fois qu'un des critères comportait une notation tendant vers le niveau 3. Nous avons pu ensuite établir pour chacun des cas le concept à développer pour répondre aux contraintes imposées

par le critère. Le Tableau III- 4 présente cet impact. L'analyse de ce tableau montre que les phases les plus marquées sont les phases « Mesurer » « Décrire » et « Analyser ». Ce premier constat pointe sur l'importance de ces trois phases. De plus, on peut noter que les concepts énoncés sont assez similaires pour une phase donnée quel que soit le critère tendant vers le niveau 3.

Chaque énoncé de concept doit se matérialiser en une instrumentation particulière de substitution par rapport à ce que propose Six Sigma. Cette déclinaison étant importante à réaliser et essentielle pour la réussite de la démarche, nous la détaillerons dans les parties suivantes (de 4. à 7.) pour les concepts associés à chacune des phases Reconnaître, Définir, Mesurer, Décrire et Analyser.

Critères au niveau 3	Reconnaître	Définir	Mesurer	Décrire	Analyser
Nombre d'occurrences du défaut → ≤ 3	Intégrer la notion de probabilité de résolution.		Faire parler les produits qui n'ont pas le défaut	Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	Faire parler la physique. Faire parler les produits, périodes et lieux avec et sans défaut.
Nombre de causes potentielles → Impossible à déterminer				Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	Faire parler la physique. Faire parler les produits, périodes et lieux avec et sans défaut.
Possibilité de décomposition du produit → Non				Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	Faire parler la physique. Faire parler les produits, périodes et lieux avec et sans défaut.
Quantité de données disponibles → Peu				Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	Faire parler la physique. Faire parler les produits, périodes et lieux avec et sans défaut.
Compétences en statistiques → Aucune					Filter les causes potentielles par la description. Proposer une expérimentation simple.
Degré de connaissance technique → Faible				Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	Faire parler les produits, périodes et lieux avec et sans défaut.
Possibilité d'expérimentation → Très peu				Approfondir la description du problème.	Filter les causes potentielles par la description. Proposer une expérimentation réduite.
Nombre des autres problèmes d'enjeux similaires → > 5	Intégrer la notion de probabilité de résolution. Travailler par niveau de résolution.	Adapter la répartition des rôles par phase.			
Possibilité de mesure physique continue → Non évidente			Faire parler les autres mesures	Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	Faire parler la physique. Faire parler les produits, périodes et lieux avec et sans défaut. Filter les causes potentielles par la description.
Possibilité d'analyse physique → Non				Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	Faire parler les produits, périodes et lieux avec et sans défaut.

Tableau III- 4 : Impact des critères sur les phases

3.5. ETABLISSEMENT DE L'ETAT METHODOLOGIQUE DU PROBLEME

3.5.1. Définition des phases

Dans la partie précédente, nous avons abordé la première évaluation du problème : son profil. Pour pouvoir construire la démarche de résolution de problème contextualisée, il va falloir maintenant établir la deuxième évaluation du problème, laquelle rappelons-le est indépendante de la première : l'état méthodologique du problème.

Pour ce faire, commençons par définir les phases de base retenues.

La structure de base retenue est donc Six Sigma. Nous proposons d'ajouter deux compléments, en terme de phases et d'étapes, au RDMAICSI [Harry *et al.* 2000] présenté en chapitre II, en rappelant que notre travail se focalise sur les phases Reconnaître à Analyser :

- l'ajout de l'étape « Contenir » empruntée à la méthode G8D [Ford 1999], laquelle sera intégrée à la phase Reconnaître
- la séparation de l'étape Décrire de la phase Mesurer pour en créer une phase à part entière.

L'ajout de l'étape Contenir nous semble primordial dans notre contexte où les nouveaux problèmes sont nombreux. N'étant pas possible de tous les résoudre en même temps, il est essentiel de garantir au moins l'atténuation voire la suppression de leurs effets non désirables.

Quant à l'étape Décrire, elle est habituellement incluse soit dans la phase Mesurer comme pour Six Sigma [Harry *et al.* 2000], soit dans la phase Analyser comme pour Shainin [Shainin 1993a]. Pour palier ce flou et mettre en valeur l'importance de cette étape, nous avons choisi de créer une phase à part entière. De plus, ce choix est conforté par l'analyse du Tableau III- 4 : Mesurer, Décrire et Analyser sont les étapes qui comportent le plus de concepts à développer (chacun propre à une des trois phases).

Nous pouvons donc détailler les phases et étapes sur lesquelles notre proposition va porter :

- Reconnaître : Séparer, Trier, Contenir et Choisir
- Définir
- Mesurer
- Décrire
- Analyser : Lister, Tester et valider

La phase **Reconnaître** comprend quatre étapes : Séparer, Trier, Contenir et Choisir. Pour pouvoir choisir le problème prioritaire à traiter, il est important auparavant de les séparer en problèmes distincts et unitaires. Après avoir énoncé les différents problèmes, il faut les trier par ordre de priorité. Pour les problèmes les plus prioritaires, l'objectif est d'envisager une action pour contenir le problème, pour diminuer son effet. On peut alors choisir le problème prioritaire à analyser.

Pour la phase **Définir**, l'énoncé du problème ayant été établi dans la phase précédente, on peut se focaliser sur la définition du périmètre du problème et de la démarche de résolution, notamment la répartition des rôles tout au long du processus.

Dans la phase **Mesurer**, nous nous focalisons sur l'objectif unique d'obtenir une mesure valide et adaptée.

La nouvelle phase **Décrire** consiste à recueillir et présenter tous les éléments factuels du problème.

La phase **Analyser** est composée de deux étapes séquentielles : Lister et Tester (valider). Dans un premier temps, l'ensemble des causes potentielles est listé. Puis, dans un deuxième temps, ces causes sont validées ou invalidées en les confrontant à la description établie précédemment et/ou par expérimentation.

3.5.2. Caractérisation de l'état méthodologique du problème

La liste des phases et étapes étant maintenant définie, chacune d'entre elles doit être caractérisée par un ou plusieurs états à atteindre. Ces états doivent refléter la situation finale méthodologique de la phase. La vérification de l'atteinte de ces états permettra d'évaluer chaque phase et étape et de donner son statut. Ce sera le rôle de la check-list décrite en annexe II.

Cette évaluation permettra donc de mettre en relief les phases et étapes :

- considérées comme clôturées
- ouvertes
- non commencées.

La construction de la structure méthodologique pourra alors s'établir suivant les deux dernières catégories de phases et d'étapes, permettant de répondre ainsi au souci d'efficacité de la méthode.

3.6. CONSTRUCTION DE LA DEMARCHE CONTEXTUALISEE

3.6.1. Schéma proposé

Le croisement des deux évaluations – profil et état méthodologique du problème – va permettre de construire une démarche de résolution de problèmes contextualisée.

Etudions sur quel schéma se structure cette démarche et quelle en est la dynamique.

Le schéma proposé de la démarche de résolution de problème est présenté dans la Figure III- 2.

Nous retrouvons les phases et étapes retenues et décrites précédemment. Celles-ci sont figées.

A chacune de ces phases et étapes, sont reliées :

- la liste des états à atteindre décrits dans l'annexe II. Ces check-lists permettant d'évaluer l'état méthodologique du problème sont statiques.
- l'instrumentation à utiliser. C'est la seule partie dynamique du schéma, elle va dépendre de l'évaluation du profil du problème et de son état méthodologique.

3.6.2. Dynamique du schéma

L'évaluation de l'état méthodologique permet d'activer (tous les états ne sont pas atteints) ou de désactiver (tous les états ont été atteints) les phases et étapes du schéma proposé. On obtient ainsi la liste des phases et étapes sur lesquelles travailler.

Pour chacune des phases et étapes restées actives, une instrumentation associée sera proposée. Celle-ci sera déterminée en fonction de l'évaluation du profil du problème :

- pour les étapes non impactées par la notation des critères, ce sera l'instrumentation de Six Sigma,
- pour les étapes impactées par la notation des critères, ce sera l'instrumentation de substitution exposée dans les parties suivantes de ce chapitre.

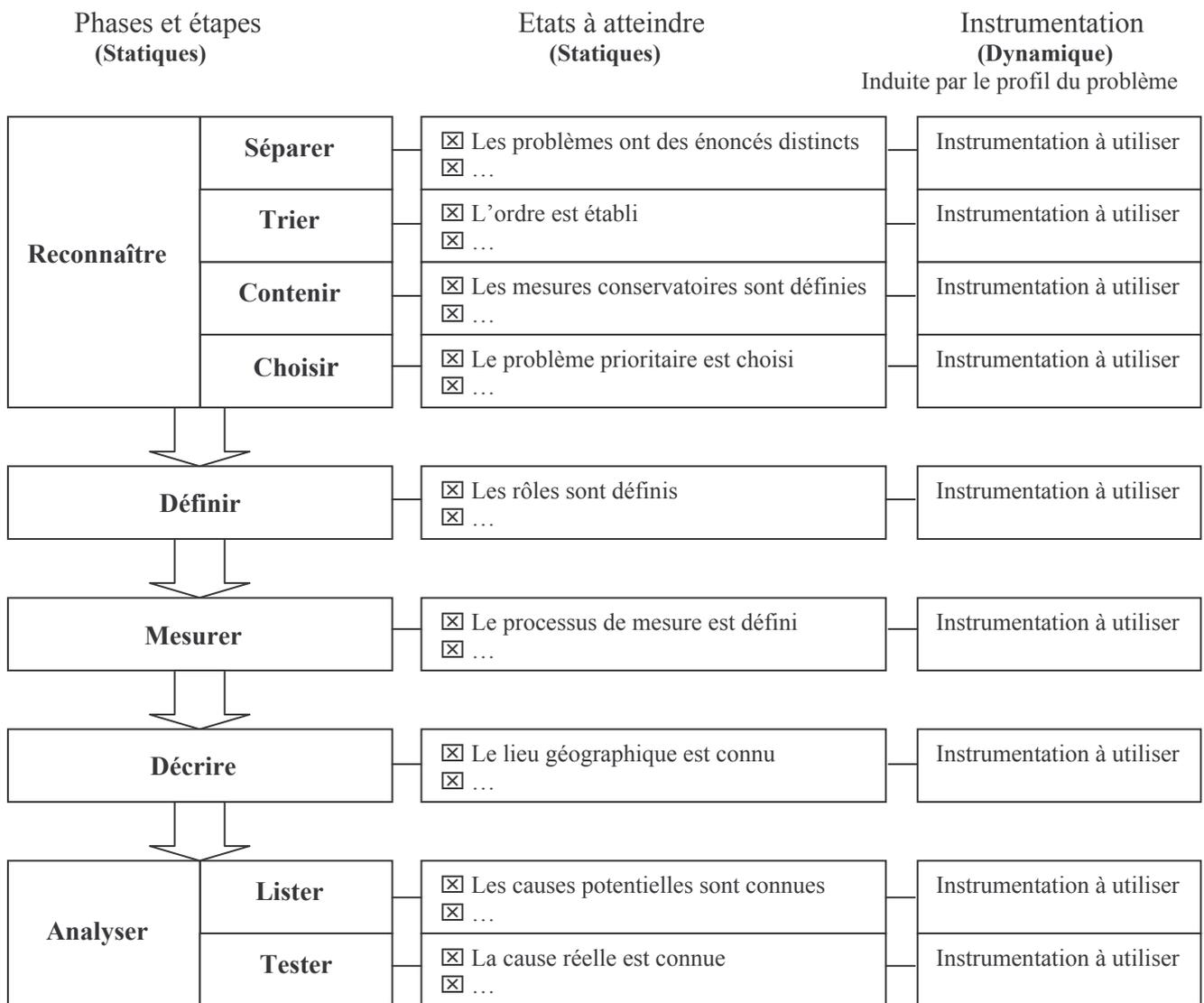


Figure III- 2 : Schéma de la démarche de résolution de problèmes

3.7. CONCLUSION

Nous avons vu dans cette partie que la structure de base de Six Sigma et l'instrumentation associée peuvent parfaitement convenir pour certains contextes et doit être modifiée pour d'autres.

C'est l'établissement du profil du problème caractérisé par dix critères liés au contexte du problème lui-même qui va nous permettre d'orienter l'instrumentation à utiliser.

L'établissement de l'état méthodologique, quant à lui, va permettre de cibler plus rapidement les phases et étapes sur lesquelles travailler.

Les prochaines parties de ce chapitre sont consacrées à l'instrumentation de substitution à Six Sigma qui doit être proposée : comment les concepts énoncés dans le Tableau III- 4 peuvent-ils être « traduits » en outils ?

4. INSTRUMENTATION DE SUBSTITUTION POUR LA PHASE RECONNAÎTRE

4.1. INTRODUCTION

Dans la précédente partie, nous avons vu que l'instrumentation proposée par la structure de base (Six Sigma) doit subir quelques modifications lorsque certains critères du profil du problème deviennent plus sévères. Le Tableau III- 4 présentait l'impact des critères sur les phases.

La phase Reconnaître est impactée par deux critères lorsqu'ils atteignent le niveau 3 : le nombre d'occurrences du défaut faible et le nombre d'autres problèmes d'enjeux similaires élevé. La Figure III- 3 resitue cette partie.

Reconnaître	Séparer	<input checked="" type="checkbox"/> Les problèmes ont des énoncés distincts <input checked="" type="checkbox"/> ...	
	Trier	<input checked="" type="checkbox"/> L'ordre est établi <input checked="" type="checkbox"/> ...	
	Contenir	<input checked="" type="checkbox"/> Les mesures conservatoires sont définies <input checked="" type="checkbox"/> ...	
	Choisir	<input checked="" type="checkbox"/> Le problème prioritaire est choisi <input checked="" type="checkbox"/> ...	Formulaire de filtrage

Critères au niveau 3	Reconnaître	Définir	Mesurer	Décrire	Analyser
Nombre d'occurrences du défaut → ≤ 3	Intégrer la notion de probabilité de résolution.				
Nombre des autres problèmes d'enjeux similaires → > 5	Intégrer la notion de probabilité de résolution. Travailler par niveau de résolution.				

Figure III- 3 : Etapes, critères et concepts pour la phase Reconnaître

Lorsque ces critères atteignent ces niveaux, les deux concepts à développer en instrumentation de substitution sont :

- Intégrer la notion de probabilité de résolution
- Travailler par niveau de résolution.

Pour choisir le ou les problèmes à traiter, les outils utilisés habituellement ne sont pas suffisants. D'une part, leurs critères de priorisation ne sont plus assez discriminants si les problèmes ont des enjeux similaires. D'autre part, ils n'intègrent pas la notion de probabilité de résolution, qui n'est pourtant pas triviale dans le cas où le nombre d'occurrences du défaut est faible. Nous verrons dans la partie 4.2 quelle instrumentation nous pouvons proposer en introduisant une nouvelle notion : la disponibilité de l'information pertinente pour estimer la probabilité de résolution.

De plus, le nombre de problèmes à régler étant important, il est primordial de pouvoir déterminer rapidement le niveau de résolution requis, c'est-à-dire s'il peut être résolu par une action immédiatement identifiable ou si une analyse plus poussée est requise. Cette partie-ci est peu abordée dans la littérature. Nous verrons dans la partie 4.3 comment nous définissons ces niveaux et quelle aide méthodologique nous pouvons proposer.

4.2. BESOIN D'INTEGRER LA NOTION DE PROBABILITE DE RESOLUTION

4.2.1. Analyse de la littérature

De nombreux outils et techniques existent dans la littérature pour choisir le ou les problèmes prioritaires. On peut citer par exemple :

- L'Evaluation de Situation de Kepner Tregoe [Kepner *et al.* 1981] basée sur des critères d'importance, d'urgence et de tendance : cette divergence entre la norme et la réalité pose-t-elle un problème urgent ? Quelle est son importance ? Dans quel sens évolue la divergence et est-elle susceptible de grandir ?
- les outils de la qualité adaptés pour fixer des priorités parmi ceux cités au chapitre II [Jayaram *et al.* 1997] : Diagramme de Pareto du taux de rebuts, matrices multicritères ...

Dans tous les outils proposés, on retrouve toujours les mêmes critères : gravité, coût, détectabilité, tendance, risque, sécurité ...

Selon notre analyse, il manque une notion fondamentale : l'évaluation de la disponibilité des informations pertinentes, c'est-à-dire dispose-t-on d'assez d'éléments pour espérer une résolution ? Notamment lorsque les produits et les procédés sont jeunes, les informations et la connaissance sont morcelées et le choix de l'information à enregistrer est difficile à définir. La disponibilité de l'information est donc encore moins évidente. Il nous semble donc majeur de prendre en compte cette notion. Après étude des méthodologies autres qu'industrielles, il apparaît que cette notion est déjà utilisée dans la criminologie. Nous allons voir dans le prochain paragraphe comment est outillée cette notion et comment nous proposons de l'adapter pour notre contexte industriel.

Notre proposition dans cette partie se base donc essentiellement sur le deuxième postulat énoncé dans la première partie de ce chapitre :

Postulat 2 :

Dans une démarche de résolution de problème, la disponibilité de l'information pertinente conditionne les chances de résolution.

4.2.2. Proposition d'instrumentation

Dans le domaine de la criminologie, les travaux de Greenwood [Greenwood *et al.* 1975] ont clairement démontré que la majorité des crimes résolus par les services policiers le sont au cours des instants qui suivent la perpétration du crime. Diverses recherches antérieures avaient déjà permis de mettre en évidence que la résolution des crimes était redevable davantage aux renseignements recueillis lors de l'enquête préliminaire qu'aux efforts déployés par la suite. Aussi, l'Institut de Recherche de Stanford proposa en 1973 [Greenberg 1973] un système de filtrage des enquêtes, basé sur des cotes de pondération mathématique pour différents facteurs pouvant aider à la résolution des crimes. Ainsi, l'enquête ne se poursuivra que pour un crime majeur ou parce que les éléments de preuves, dans le cas d'un crime mineur, laissent croire à une résolution possible. Le total à dépasser est fixé à 10.

L'utilisation d'un tel formulaire semble très utile pour prioriser le traitement des problèmes. Dans le Tableau III- 5, nous proposons une adaptation des critères utilisés pour l'enquête criminelle afin de pouvoir l'utiliser dans le cas d'une démarche de résolution de problèmes dans l'industrie.

Critères pour l'enquête criminelle	Barème	Critères pour la résolution de problèmes	Barème
Crime avec violence - dans tous les cas	10	Rebuts constatés - rebuts produits finis - rebuts composants - pas de rebut	10 1 à 9 0
Période approximative écoulée - 0 à 1 heure - 1 à 12 heures - 12 à 24 heures	4 3 1	Période approximative écoulée - une demi-journée - un jour - deux jours	4 3 1
Identification du ou des suspects - clairement identifiés - connus - déjà vus - description complète - description du visage - description des vêtements	10 7 5 7 3 3	Identification des causes potentielles - causes clairement identifiées - type de causes identifié - grande famille de causes identifiée	10 7 5
Mode de déplacement - n° immatriculation - couleur - marque / modèle - indice particulier	10 2 2 2	Mode de manifestation - localisation géographique identifiée - localisation sur le produit identifiée - apparition dans le temps identifiée - liste de tous les produits concernés disponible	2 2 2 2
Nom ou rapport d'un témoin - témoin de la scène de l'évènement	10	Nom ou rapport d'un témoin - témoin de la scène de l'évènement	10
Preuve technique - empreinte digitale - empreinte de pas - empreinte de pneu	7 5 5	Preuve technique - mode de création physique du défaut identifié	5

Tableau III- 5 : Formulaire de filtrage des problèmes

L'évaluation de l'information disponible ou potentiellement disponible peut donc être établie grâce à ce formulaire. Nous proposons d'augmenter le total à dépasser à 20 pour estimer que le problème peut ou doit être traité, la présence d'un « témoin » (note à 10) étant la plupart du temps vraie pour tous les défauts. Cette valeur peut être adaptée à chaque entreprise mais doit être évidemment fixe pour tous les problèmes. On peut aussi se servir de ce formulaire comme outil de comparaison si le choix doit se porter sur un problème parmi plusieurs.

4.3. BESOIN DE TRAVAILLER PAR NIVEAU DE RESOLUTION

4.3.1. Analyse de la littérature

Dans la plupart des méthodes de la littérature [Shainin 1993a] [Hanh *et al.* 2000], l'ensemble des problèmes est priorisé pour établir un « top 5 » des problèmes qui seront traités ensuite chacun par un groupe de personnes utilisant la même méthodologie.

Nous avons vu précédemment un moyen de choisir les problèmes en fonction de leur probabilité de résolution. Cependant ceci n'est pas suffisant : cette instrumentation répond à la question « quels problèmes traiter en priorité ? » mais ne dit pas comment les traiter. Selon les problèmes, nous pensons que le niveau de résolution peut être différent. En effet, certains problèmes peuvent être résolus par une action immédiate alors que d'autres nécessitent une analyse plus poussée.

Les deux grands types de niveaux que l'on peut trouver sont :

- actions correctives gérées
- analyse de causes

4.3.2. Proposition d'instrumentation

L'idée est donc de proposer une aide méthodologique pour déterminer le niveau puis pour mener à bien le travail. Celle-ci est en fait déjà incluse dans le principe de construction de la démarche de résolution de problèmes que nous proposons.

En effet, l'établissement de l'état méthodologique du problème via le système des check-lists va permettre de tout de suite cibler si une analyse des causes est requise ou si l'action à mener concerne plutôt la mise en place d'une solution.

L'établissement du profil du problème va permettre, quant à lui, de proposer l'instrumentation adéquate.

4.4. CONCLUSION

Dans la phase Reconnaître, les deux critères limitant sont le nombre important de problèmes d'enjeux similaires et la faible occurrence de chaque problème.

Pour affecter des priorités aux traitements des problèmes, nous avons vu que la prise en compte de critères tels que le coût, la gravité, l'urgence ou la tendance du problème ne suffit pas. Il manque une notion fondamentale : la disponibilité de l'information pertinente.

Cette notion est abordée dans les enquêtes criminelles. Elle est outillée par un formulaire de filtrage qui peut être adapté à la résolution de problème en industrie. Le principe de ce formulaire est d'évaluer les informations disponibles et d'estimer si celles-ci sont suffisantes pour espérer une résolution du problème.

De plus, tous les problèmes à traiter ne le sont pas au même « niveau ». Pour certains, la cause est connue, il faut donc mettre rapidement en place une action corrective alors que pour d'autres il faut d'abord initier une analyse de causes plus fine.

Le principe de construction de la démarche de résolution de problèmes que nous proposons permet de définir ce niveau, via l'établissement de l'état méthodologique, et de proposer des outils adaptés, via l'établissement du profil du problème.

5. INSTRUMENTATION DE SUBSTITUTION POUR LES PHASES DÉFINIR ET MESURER

5.1. INTRODUCTION

Dans cette partie, nous allons aborder les instrumentations de substitution pour les phases Définir et Mesurer.

La phase Définir est impactée par un seul critère du profil du problème lorsqu'il atteint le niveau 3 : le nombre d'autres problèmes d'enjeux similaires élevé. Le concept à développer dans ce cas est l'adaptation de la répartition des rôles par phase. La Figure III- 4 resitue cette partie.

Nous verrons dans la partie 5.2 quel fonctionnement est le mieux adapté à ce critère. Doit-on travailler en groupe ? Doit-on conserver la même constitution du groupe tout au long de la démarche ? Nous évoquerons dans cette partie les rôles fonctionnels à l'intérieur d'une résolution de problème donnée et non pas la répartition des rôles macroscopiques type Black Belt ou Green Belt de Six Sigma [Hahn *et al.* 2000].

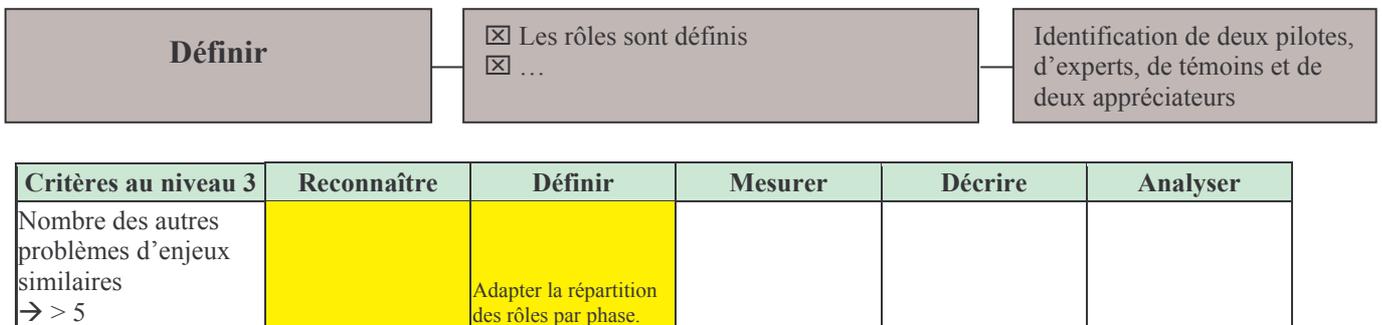


Figure III- 4 : Etapes, critères et concepts pour la phase Définir

Quant à la phase Mesurer, elle est impactée par deux critères lorsqu'ils atteignent le niveau 3 : le nombre d'occurrences de défaut faible et la difficulté à trouver une mesure continue évidente du défaut. La Figure III- 5 resitue cette partie.

Nous verrons en partie 5.3 pourquoi cette phase est importante et comment il est possible d'instrumentaliser les deux concepts à développer : « Faire parler les produits qui n'ont pas le défaut » et « Faire parler les autres mesures ».

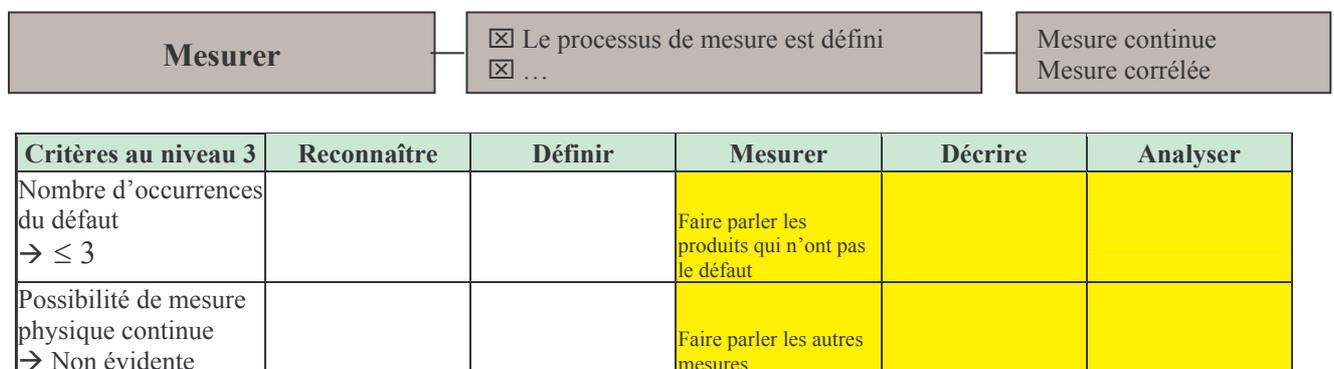


Figure III- 5 : Etapes, critères et concepts pour la phase Mesurer

5.2. BESOIN D'ADAPTER LA REPARTITION DES ROLES

5.2.1. Analyse de la littérature

Dans la littérature, peu de méthodes évoquent la répartition des rôles à l'intérieur de la démarche de résolution de problèmes. Généralement, un groupe de travail est créé dès le choix du problème à traiter et ces personnes sont en charge de mener la démarche jusqu'à la mise en place de solutions et leur pérennisation sans distinction de rôles précis, mis à part celui du pilote. Le pilote est la personne qui a en charge la conduite de la résolution, il maîtrise la méthode et il est souhaitable qu'il ait des connaissances opérationnelles sur le sujet [Pillet 2003].

Prenons pour exemple l'étape de la recherche des causes potentielles. Dans la grande majorité des méthodes [Harry *et al.* 2000] [Hosotani 1997], il n'y a volontairement pas de rôle défini : toutes les personnes peuvent intervenir au même titre les unes que les autres. La recherche de causes commence par une séance de créativité type Brainstorming où tout le monde doit pouvoir donner ses idées, même les candides en la matière. Cette organisation peut vite conduire à des Ishikawa comportant des centaines de branches sans pour autant être sûr qu'il y ait la vraie cause !

Quant à la méthode Shainin, elle est diamétralement opposée : le principe est de ne faire parler que les produits ! [Shainin 1993a]. Dans notre cas d'étude, l'analyse doit pouvoir être réalisée dès les premières occurrences sur des produits fort complexes et encore en cours d'évolution. On ne peut donc pas se permettre de ne faire parler que les produits et de n'autoriser aucun avis de la part des experts.

Il faudrait donc trouver une organisation pour que les personnes interviennent selon des rôles qui auraient été préalablement définis. De plus, cela permettrait de ne plus monopoliser un groupe entier pour toutes les phases de la résolution.

Si nous regardons du côté des autres méthodes dont nous avons déjà transposé certains concepts ou outils, nous nous apercevons que la répartition des rôles est parfaitement établie, notamment dans le processus d'enquête criminelle.

Nous allons voir dans le paragraphe suivant comment ces rôles sont répartis et comment nous pouvons adapter cette répartition pour notre contexte.

5.2.2. Proposition d'organisation

Etudions la répartition des rôles dans les enquêtes criminelles [Prévost 1988] :

- L'enquêteur
- Le témoin
- Le juge
- L'expert

L'enquêteur est celui qui mène l'enquête. Il doit faire preuve aussi bien de qualités personnelles (jugement, esprit d'initiative, sens de l'observation, maîtrise de soi, esprit d'analyse et de synthèse) que de qualités professionnelles (intégrité, politesse et discrétion) définies par le code de déontologie et de discipline. Outre les perquisitions et les interrogations, il a en charge le rapport d'enquête et le témoignage devant la cour.

Un témoin ordinaire ne peut témoigner, en général, que sur des faits dont il a eu personnellement connaissance.

Le juge tire des conclusions à partir des faits.

Quant aux questions qui exigent des connaissances particulières, un expert dans le domaine peut tirer des conclusions et exprimer son avis. Un expert est celui qui a acquis des connaissances

spéciales, par ses études ou par son expérience dans un domaine particulier. Il ne peut témoigner que sur une question qui relève de sa spécialité et après avoir été reconnu expert par le juge. Il n'enquête pas.

Comment pourrions-nous adapter cette répartition des rôles ?
La Figure III- 6 présente une adaptation possible.

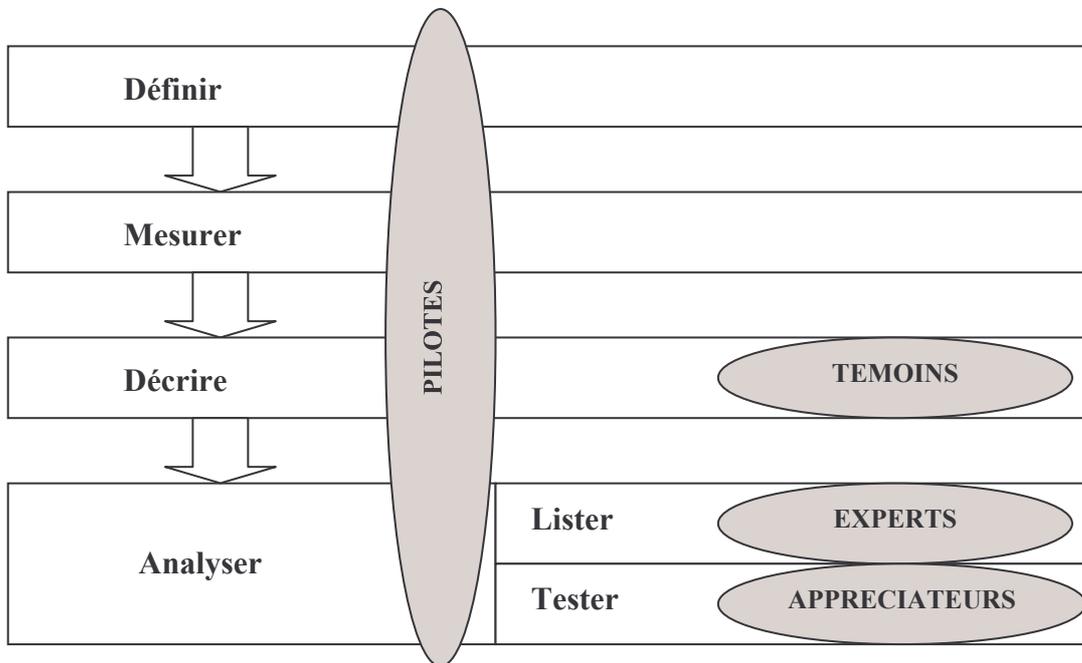


Figure III- 6 : Proposition de rôles dans une démarche de résolution de problèmes

Les pilotes (équivalent à l'enquêteur)

Le rôle de pilote consiste à diriger et à guider les actions pour résoudre le problème. Pour des raisons de disponibilité, pour assurer un relais au moindre contre-temps et pour avoir un contre-pouvoir, nous proposons de doubler cette fonction. Deux pilotes mènent alors la résolution du problème, ils réunissent les personnes nécessaires au moment opportun, il n'y a plus de groupe de travail à proprement parlé. Ils sont choisis en fonction des mêmes qualités requises pour un enquêteur.

Les témoins

Le rôle de témoin est de communiquer tous les faits relatifs à l'apparition du défaut. Il s'agit des personnes présentes sur le terrain, par exemple les opérateurs dans le cas des problèmes en fabrication. Ils sont interrogés par les pilotes lors de la phase Décrire.

Les experts

Le rôle d'expert est d'analyser les faits recueillis par les pilotes et d'émettre des hypothèses quant à l'explication du défaut. Il s'agit d'opérateurs expérimentés sur la partie du procédé concernée ou de techniciens spécialisés dans ce domaine (et reconnus comme tels). Ils interviennent dans la phase Analyser lors de l'étape « Liste des causes potentielles ».

Les appréciateurs (équivalent au juge)

Le rôle d'appréciateur consiste à valider ou invalider la cause la plus probable mise en relief dans le rapport des pilotes. Pour des raisons d'impartialité, nous proposons de doubler également cette fonction. Il s'agit forcément de personnes tierces.

Cette répartition des rôles empruntée à l'enquête criminelle présente trois avantages :

- Elle garantit une cohérence des actions menées grâce au travail des pilotes présents tout au long de la démarche.
- Elle permet de mieux affecter les ressources en faisant intervenir les personnes qu'au moment défini pour leur rôle.
- Elle permet de poser un juste milieu entre les deux « écoles » des méthodes de résolution de problèmes classiques : baser essentiellement la liste des causes sur le jugement des personnes et ne faire parler que les produits (méthode Shainin). En effet, témoins et experts sont parfaitement distingués concernant le témoignage d'opinion. De plus, l'appréciateur est présent pour vérifier que les preuves du « coupable » sont bien réelles.

Nous pensons donc que la monopolisation d'un même groupe de personnes tout au long de la résolution n'est pas nécessaire et n'est pas le plus efficient. Le principe de base est d'échanger au moment opportun avec les personnes expertes ou en relation avec le produit ayant le défaut et de donner un cadre méthodologique pour guider ces relations.

5.3. BESOIN DE TRAVAILLER LA MESURE

5.3.1. Introduction

Les produits et les procédés des entreprises de haute technologie étant complexes et innovants, ils requièrent la plupart du temps des moyens et des méthodes de mesure souvent spécifiquement développés pour l'entreprise. Mais ces produits et procédés sont jeunes, ils sont donc en constante évolution. Or les méthodes et moyens de mesure conçus sur-mesure ne sont pas forcément robustes envers tous ces changements. Il est donc d'autant plus important de travailler sur cette phase pour les valider.

Pour être rigoureux, on ne devrait pas parler ici de moyen de mesure mais de moyen de contrôle. En effet, il est souvent impossible de disposer d'un étalon pour ces mesures « personnalisées », on ne peut donc pas les comparer à une grandeur physique connue et référencée. La difficulté du suivi des ces instruments ne s'en trouve qu'accrue. Pour des raisons de langage usuel, nous conserverons tout de même ce terme.

5.3.2. Besoin de faire parler les produits qui n'ont pas le défaut

Un des critères limitatifs ici est le nombre d'occurrences faible du défaut. Pour accroître le domaine d'étude, il est donc intéressant de faire parler tous les produits et non seulement ceux qui ont le défaut. Le but est aussi de pouvoir étudier et comparer dans toutes les dimensions (physiques, géographiques, temporelles ...) les produits qui ont le défaut et ceux qui ne l'ont pas.

L'étude des dimensions temporelles et géographiques fera l'objet de la partie 6.3.

Pour les dimensions physiques de l'ensemble des produits, un moyen est d'utiliser une mesure continue permettant d'étudier la graduation physique des produits avec et sans défaut.

5.3.3. Besoin de faire parler les autres mesures

La mesure la plus judicieuse à utiliser n'est pas forcément la mesure du problème qualité.

Pour introduire cette idée, reprenons les mots de Taguchi [Taguchi 1994] : « *Pour améliorer la qualité, ne mesurer pas la qualité !* ». Traditionnellement, ce sont les symptômes qui sont mesurés : nombre de défauts, nombre de rebuts ... Avec cette approche, la mesure reflète effectivement un besoin d'actions correctives mais n'oriente pas le choix de celles-ci : la mesure telle qu'elle est définie représente un constat final et n'est reliée à aucun paramètre du produit ou paramètre du procédé.

Il faut trouver une « manifestation » mesurable du phénomène qui crée la non qualité, même si cette manifestation n'est pas handicapante sur le produit. La mesure doit traduire la variabilité autour de la fonction idéale du produit ou du procédé. Il faut chercher une mesure corrélée au défaut constaté, plus en amont de la chaîne de manifestation du défaut.

5.4. CONCLUSION

Dans cette partie, nous avons proposé des aides méthodologiques pour parer aux effets des critères : nombre de problèmes d'enjeux similaires à traiter important, nombre d'occurrences du défaut faible et difficulté d'établir une mesure physique continue pour ce défaut sur les phases Définir et Mesurer.

En ce qui concerne la phase Définir, nous avons vu qu'une organisation possible adaptée peut être empruntée à l'enquête criminelle. Deux pilotes mènent la démarche et sont garants de sa cohérence. Les autres personnes interviennent ponctuellement selon des rôles préalablement définis : témoins, experts et appréciateurs. La monopolisation d'un groupe de travail n'est pas l'organisation la plus efficace pour résoudre pour un problème.

Quant à la validation de la mesure, ce n'est pas une simple formalité lorsque les méthodes et moyens de mesure sont nouveaux et qu'ils doivent s'adapter à des produits et des procédés en constante évolution. La phase « Mesurer » est donc particulièrement critique dans le cas de notre étude.

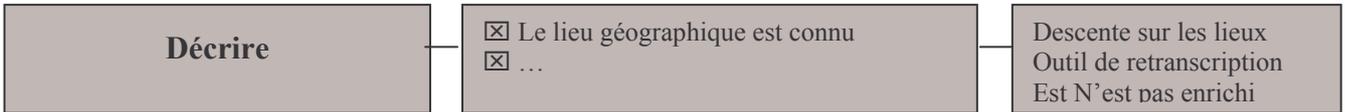
S'attacher à rechercher une mesure continue, outre les avantages classiques que cela comporte par rapport à une mesure par attribut, permet de pallier la faible occurrence du nombre de défauts en incluant les produits n'ayant pas le défaut dans l'analyse.

La recherche de cette mesure ne doit pas se focaliser sur le défaut lui-même. Elle doit se rapprocher le plus possible du phénomène créant la variabilité.

6. INSTRUMENTATION DE SUBSTITUTION POUR LA PHASE DECRIRE

6.1. INTRODUCTION

Cette partie a pour objectif de présenter l'instrumentation de substitution pour la phase Décrire lorsque les critères rappelés dans la Figure III- 7 atteignent le niveau 3. Le concept à développer est l'approfondissement de la description du problème et du relevé d'informations.



Critères au niveau 3	Reconnaître	Définir	Mesurer	Décrire	Analyser
Nombre d'occurrences du défaut → ≤ 3				Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	
Nombre de causes potentielles → Impossible à déterminer				Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	
Possibilité de décomposition du produit → Non				Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	
Quantité de données disponibles → Peu				Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	
Degré de connaissance technique → Faible				Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	
Possibilité d'expérimentation → Très peu				Approfondir la description du problème.	
Possibilité de mesure physique continue → Non évidente				Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	
Possibilité d'analyse physique → Non				Approfondir la description du problème et le relevé d'informations.	

Figure III- 7 : Etapes, critères et concepts pour la phase Décrire

L'objectif de la phase Décrire est de préparer la phase Analyser.

On retrouve donc ici tous les critères qui limitent la partie Analyser comme la faible occurrence du nombre de défauts ou la réduction de l'expérimentation possible. La description qui devra donc être la plus étayée possible va permettre de jouer deux rôles importants pour les étapes de la phase Analyser :

- le ciblage des causes potentielles grâce à l'analyse de la description
- la validation des causes potentielles « sur papier » : les faits vont servir de filtre aux causes.

Notre proposition se base essentiellement sur les deux derniers postulats énoncés dans la première partie de ce chapitre :

Postulat 3 :

Le développement de la description du problème est le moyen le plus efficace pour réduire le nombre d'essais dans la recherche et la validation des causes.

Postulat 4 :

Pour résoudre un problème, les occurrences sans défaut sont aussi riches d'informations que les occurrences avec défaut.

6.2. BESOIN D'APPROFONDIR LE RELEVÉ D'INFORMATION

6.2.1. Analyse de la littérature

Bien que présente dans l'ensemble des méthodes, il apparaît que cette étape d'extraction d'information mérite d'être renforcée, formalisée. Nous avons identifié quatre sources principales d'informations :

- la connaissance des acteurs qui représente à la fois les faits dont ils ont été témoins, les *a priori* et les connaissances théoriques
- les bases de données qui représentent l'ensemble des enregistrements, documents, et formalisations diverses
- le produit et le procédé (au sens processus physique)
- le lieu où le défaut a été créé

La Figure III- 8 présente l'ordre de grandeur du taux d'exploitation de ces sources par les méthodes classiques de résolution de problèmes.

Toutes les sources ne sont pas également exploitées. Les méthodes proposées, notamment les approches statistiques, sont particulièrement appropriées pour extraire et exploiter l'information sur le produit et dans les bases de données. Elles sont par contre moins adaptées pour extraire l'information pertinente de la connaissance des acteurs du terrain et occultent presque complètement les informations disponibles sur le lieu. Elles ne proposent pas non plus une mise en cohérence de l'information de ces différentes sources.

La même analyse peut résulter de l'étude de la matrice d'impact entre les outils classiques de la résolution de problème et les sources d'information (voir Tableau III- 6). La notation retenue est la suivante : 9 correspond à une utilisation importante de la source d'information et 1 correspond à une utilisation très partielle de cette source. Peu ou pas d'outils sont disponibles pour extraire et analyser les informations relatives au lieu.

L'instrumentation pour cette étape a donc un double objectif : approfondir le relevé d'informations de toutes les sources et proposer une unification de ces différents relevés.

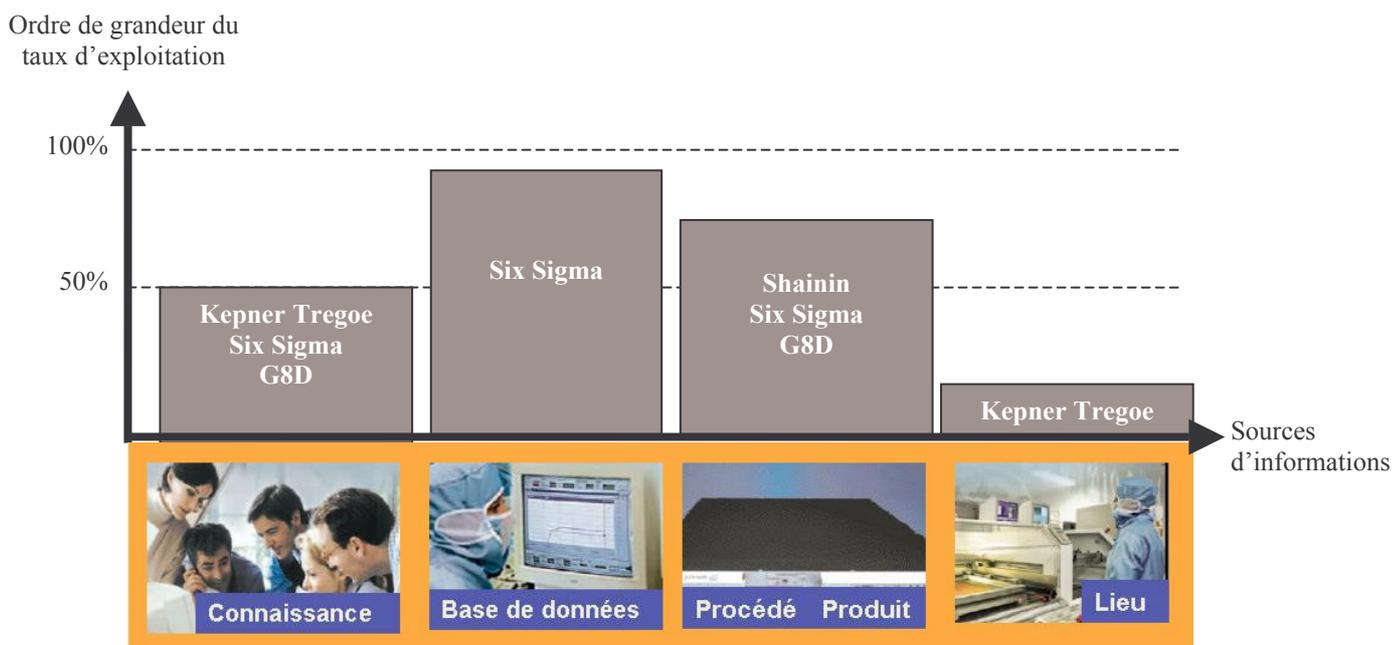


Figure III- 8 : Exploitation des sources d'informations par les méthodes classiques

	Diagramme d'Ishikawa	Plan d'expériences	Outils d'analyse de données	Est, N'est Pas	Outils Shainin	Outils de cartographie	Fiche de relevé de données	...
Connaissance	9	3		9	3	3		
Base de Données			9	1		9		
Produit et Procédé		9			9	3	9	
Lieu				1				

Tableau III- 6 : Exploitation des sources d'informations par les outils classiques

6.2.2. Outil de retranscription

Si l'on reprend la comparaison du découpage des phases avec les méthodologies des analyses des accidents et des enquêtes criminelles, présentée dans le Tableau III- 1 en début de chapitre, on peut noter la présence d'une phase initiale supplémentaire dans ces deux autres processus : l'investigation sur le lieu [Livingston *et al.* 2001] [Prévost 1988]. Cette première investigation permet de compléter notamment la définition du problème en une véritable description en recueillant au plus tôt un maximum d'informations (matérielles et témoignages). Elle permet ainsi de palier le non-enregistrement éventuel des informations pertinentes et de visualiser des indices évidents sur le terrain.

Nous proposons donc de systématiser cette investigation sur site à chaque nouvelle occurrence du défaut (pour rappel : le nombre d'occurrences est faible dans notre contexte). Celle-ci est prise en compte par la répartition des rôles que nous avons proposé précédemment : les pilotes vont sur le terrain et « interrogent » les témoins sur les faits dont ils ont eu connaissance.

Pour amorcer ce recueil d'indices, on peut réutiliser les outils utilisés dans l'analyse des accidents [Livingston *et al.* 2001] pour décrire la séquence d'évènements et les circonstances : les diagrammes de séquences.

Ces diagrammes décrivent les évènements, les conditions, les facteurs, les acteurs ... Différents codes de représentation sont possibles selon qu'il y a des preuves ou non.

Ces diagrammes représentent le squelette du recueil d'informations et ils assurent que l'information disponible n'est pas oubliée ou perdue au cours de l'investigation. Ils seront modifiés et annotés au fur et à mesure de chaque nouvelle collecte d'informations. Ils vont servir de base pour construire une description plus formelle décrite dans la partie suivante.

Pour la résolution de problèmes, nous proposons le modèle présenté en Figure III- 9.

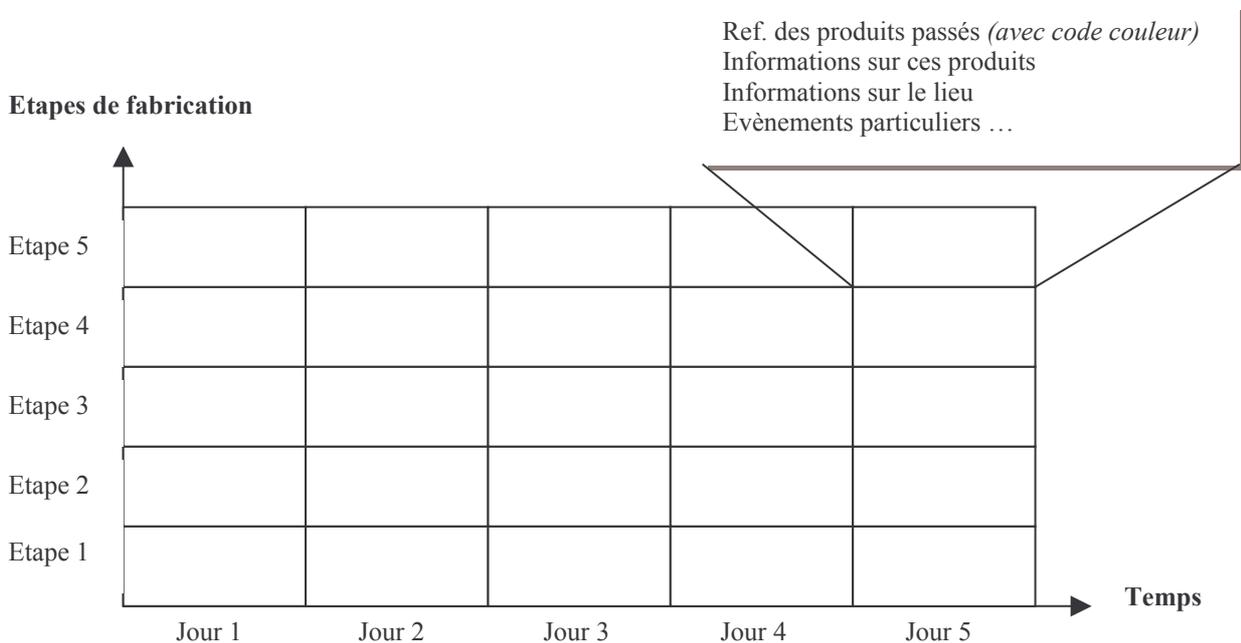


Figure III- 9 : Outil de retranscription

Ce diagramme comporte en abscisse l'axe du temps et en ordonnée les étapes de fabrication.

Chaque case est annotée des informations relatives à cette unité de temps et unité de lieu :

- Références des produits passés avec le code couleur suivant : en rouge les produits ayant le défaut, en vert les autres,
- Données relatives à ces produits pour cette étape,
- Evènements critiques : modification dans le procédé, pannes ...

Ce diagramme permettra :

- de donner une description objective du problème et des circonstances avec une vision séquentielle pour la recherche de causes,
- d'identifier les zones de lacunes d'informations,
- de mettre en relief les évidences via le code couleur,
- d'identifier les facteurs causaux.

6.3. BESOIN D'APPROFONDIR LA DESCRIPTION

6.3.1. Analyse de la littérature

La description consiste en la centralisation de toutes les informations pertinentes du problème dans toutes ses dimensions (temporelles, géographiques ...). La structure « Est / n'est pas » de Kepner Tregoe [Kepner *et al.* 1980] présentée dans le Tableau III- 7 nous paraît être un bon cadre méthodologique car elle permet effectivement de décrire le problème et son complément dans toutes les dimensions (quoi, où, quand, combien) et de définir ainsi le périmètre critique du problème. Plus tard, elle servira de filtre efficace pour les causes potentielles. Cette structure est aussi particulièrement intéressante pour mettre en relief la dimension de l'information manquante ou à compléter.

Cependant, cette structure ne propose pas d'outils pour aider au remplissage du tableau. Ce qui peut poser deux problèmes majeurs sur le terrain :

- soit les personnes ne connaissent pas l'information. N'ayant pas d'outil pour la rechercher, la case correspondante du tableau reste vide. La structure perd alors de son rôle de filtre.
- soit les personnes croient connaître l'information mais à tort. Ne disposant pas d'outil pour confirmer leurs affirmations, l'information n'est pas vérifiée. Dans ce cas, le risque est encore plus grand : ce filtre ainsi établi pourra éliminer les causes réelles de part cette fausse information.

	EST	N'EST PAS
Q U O I	Quel est l'objet ? Et plus précisément ?	Quels sont les autres objets similaires qui pourraient aussi être défectueux mais qui ne le sont pas ?
	Quel est le défaut ? Et plus précisément ?	Quels sont les autres défauts que l'objet pourrait avoir, mais qu'il n'a pas ?
O Ù	Où géographiquement, observe-t-on l'objet défectueux ? Et plus précisément ?	A quel autre endroit pourrait-on l'observer mais ne l'observe-t-on pas ?
	Où, sur l'objet, observe-t-on le défaut ? Et plus précisément ?	A quel autre endroit de l'objet pourrait-on l'observer mais ne l'observe-t-on pas ?
Q U A N D	Quand historiquement, a-t-on enregistré ce problème pour la première fois ? Et plus précisément ?	A quel autre moment aurait-on pu l'enregistrer, mais ne l'a-t-on pas enregistré ?
	Quelle est sa fréquence d'apparition ?	Quelle autre fréquence aurait-on pu avoir et n'a-t-on pas eue ?
	Quand, dans le cycle de vie de l'objet, ce défaut apparaît-il ? Et plus précisément ?	A quelles autres étapes de la vie de l'objet le défaut aurait-il pu apparaître et n'apparaît pas ?
C O M B I E N	Combien y a-t-il d'objets défectueux ?	Combien d'objets pourraient être défectueux, mais ne le sont pas ?
	Quelle est la dimension (taille, nombre ...) du défaut ?	Quelles autres dimensions (taille, nombre ...) pourrait-on constater ?
	Quelle est la tendance ?	A quelles tendances pourraient-on s'attendre, qui ne sont pas observées ?

Tableau III- 7 : Structure d'origine du "Est, N'est pas"

6.3.2. Est N'est pas enrichi

L'idée est donc de proposer une instrumentation permettant : et de cibler les informations pertinentes, et de centraliser ces informations, et de proposer l'outil adéquat pour chaque relevé d'information.

Nous proposons donc de reprendre la structure d'Analyse de Problème de Kepner Tregoe pour collecter l'information pertinente et d'associer à chaque groupe de questions un outil permettant d'apporter ou de valider l'information recherchée. Un premier travail a donc consisté à cibler les outils adéquats pour former des interactions positives entre cette structure et ces outils [Avrillon *et al.* 2005a].

L'utilisation de ce « Est N'est pas enrichi » en pratique a permis d'améliorer significativement le recueil d'informations en termes de quantité, de qualité et de pertinence.

Le Tableau III- 8 présente cette proposition : les outils utilisés dans le système Shainin sont sur fond blanc, les autres outils qualité sur fond grisé.

	EST	Faux-Jumeaux	N'EST PAS
Q U O I	Quel est l'objet ? Et plus précisément ?		Quels sont les autres objets similaires qui pourraient aussi être défectueux mais qui ne le sont pas ?
		Permutation non aléatoire de composants	
O U	Quel est le défaut ? Et plus précisément ?		Quels sont les autres défauts que l'objet pourrait avoir, mais qu'il n'a pas ?
	Où géographiquement, défectueux ? Et plus précisément ?	Diagramme de processus	A quel autre endroit pourrait-on l'observer mais ne l'observe-t-on pas ?
Q U A N D	Où, sur l'objet, observe-t-on le défaut ? Et plus précisément ?	Graphique de concentration	Où, sur l'objet, observe-t-on le défaut mais ne l'observe-t-on pas ?
	Quand historiquement, a-t-on enregistré ce problème pour la première fois ? Et plus précisément ?		A quel autre moment aurait-on pu l'enregistrer, mais ne l'a-t-on pas enregistré ?
C O M B I E N	Quelle est sa fréquence ?	Multi-Vari	Quelle est sa fréquence, mais n'a-t-on pu avoir et n'a-t-on pas ?
	Quand, dans le cycle de vie de l'objet le défaut apparaît-il ? Et plus précisément ?	Typologie de l'ADAQ	Quand, dans le cycle de vie de l'objet le défaut apparaît-il, mais n'apparaît pas ?
C O M B I E N	Combien y a-t-il d'objets défectueux ?		Combien d'objets pourraient être défectueux, mais ne le sont pas ?
	Quelle est la dimension du défaut ?	Fiche de relevés	Quelle est la dimension du défaut (taille, nombre ...) pourrait-on constater ?
	Quelle est la tendance ?		A quelles tendances pourraient-on s'attendre, qui ne sont pas observées ?

Tableau III- 8 : Structure enrichie du "Est, N'est pas"

Quel est le principe de cette instrumentation ?

Le pilote doit répondre à chaque question du tableau « Est N'est pas » dans le but d'avoir la description la plus complète possible. Si la réponse est connue alors cela signifie qu'elle pourrait être démontrée par l'outil proposé correspondant. Si la réponse n'est pas connue avec certitude alors le pilote utilise l'outil préconisé pour apporter un résultat. Nous verrons dans le paragraphe suivant l'utilité de chacun des outils dans notre proposition.

Il est important de préciser que la description d'un problème n'est surtout pas statique. Ce n'est pas parce que cette phase figure en début de démarche de résolution de problèmes qu'il ne faut pas revenir dessus tout au long du processus. Au contraire, nous pensons qu'il faut reboucler régulièrement sur cette description, notamment dans le cas où de nouvelles occurrences de défaut apparaîtraient au cours de l'analyse : elles peuvent apporter de précieuses informations et même parfois remettre en question les précédentes affirmations.

6.3.3. Sélection des outils dans le Est N'est pas enrichi

Les outils de génération d'indices de la méthode Shainin [Shainin 1993a] permettent de cibler rapidement les variables intéressantes à étudier en « faisant parler les produits » justement en utilisant la comparaison des produits « bons » et « mauvais ». Le principe de base étant commun entre les deux méthodes (Shainin et Kepner Tregoe), nous proposons d'utiliser quatre des outils Shainin [Shainin 1993a] pour instrumentaliser cette structure « Est / n'est pas » :

- Multi-Vari
- Faux-Jumeaux
- Permutation non aléatoire de composants
- Graphique de concentration

Afin de compléter cette instrumentalisation, nous proposons d'ajouter en plus deux outils :

- Diagramme du processus, outil de base de qualité
- Typologie de manifestation du défaut, outil de l'ADAQ (Analyse des Défauts pour l'Amélioration de la Qualité) [Bernard *et al.* 2001]

Multi-Vari permet de déterminer, par des prélèvements successifs de produits dans le processus de production, quelle est la plus grande famille de variation de la mesure du problème : « inter unité », « intra unité » ou « temporelle ». On peut alors éliminer toutes les causes qui ne concordent pas avec cette famille. Ce tracé graphique pourra nous permettre de visualiser le mode d'apparition du défaut dans le temps de la ligne « QUAND ».

Faux-Jumeaux permet d'étudier la famille de variation « inter unité » plus en détail. Des paires de produits, un bon et un mauvais proches dans le processus de production, sont analysées afin d'identifier les différences répétitives entre le bon et le mauvais produit de chaque paire qui constitueront alors de précieux indices. Cet outil va donc aider au remplissage de toutes les lignes du tableau « Est / n'est pas ».

Permutation non aléatoire de composants permet d'étudier la famille de variation « inter unité » plus en détail lorsque les produits sont démontables. Le principe est de permuter les composants entre un produit très bon et un très mauvais jusqu'à ce que la mesure du problème s'inverse : le ou les composants à l'origine du problème sont alors démasqués. L'insertion de cet outil permet donc de définir avec plus de précision le « QUOI » du problème, l'analyse sera ensuite ciblée sur le composant ou le sous-ensemble en question plutôt que sur le produit fini.

Graphique de concentration permet d'étudier la famille de variation « intra unité » plus en détail. Cet outil propose d'établir un schéma de localisation des défauts afin d'identifier si le défaut a une localisation particulière sur le produit, ce qui est tout à fait en adéquation avec la ligne « OU » de la structure de Kepner Tregoe.

Le Diagramme du processus permet de visualiser l'étape et la localisation géographique d'apparition du défaut. La déclinaison de cet outil au cycle de vie du produit (du fournisseur au client) pour la ligne « OU » permet de localiser précisément les lieux d'apparition du défaut.

La Typologie de manifestation du défaut aide à renseigner la typologie de manifestation dans le temps de la ligne « QUAND » en proposant les différents schémas possibles présentés dans le Tableau III- 9 : sporadique, dérive, seuil, cyclique.

Sporadique	
Dérive	
Seuil	
Cyclique	

Tableau III- 9 : Typologie de manifestation du défaut de l'ADAQ [Bernard *et al.* 2001]

6.4. CONCLUSION

L'instrumentation proposée pour cette phase permet bien de répondre aux contraintes identifiées et aux manques relevés dans les autres méthodes. Elle garantit que toutes les dimensions du problème sont bien étudiées et que toutes les sources d'informations sont exploitées.

Le lieu est la source d'information la moins exploitée par les méthodes classiques de résolution de problèmes. Pourtant, cette source peut apporter des précisions très utiles, notamment si l'information pertinente n'est pas enregistrée. Il est donc important de la systématiser.

Les diagrammes de séquences utilisés pour l'investigation des accidents sont un excellent support de centralisation et d'agencement de toute information recueillie au cours de la résolution.

La structure enrichie du « Est N'est pas » permet de répondre à trois besoins :

- lister exhaustivement toutes les dimensions du problème à décrire
- centraliser, organiser et mettre en cohérence toutes les réponses obtenues, quelle que soit la dimension
- fournir des outils de justification des réponses apportées.

De plus, elle apporte une réponse méthodologique d'une relative souplesse : les outils préconisés ne sont à utiliser qu'en cas de besoin. Ils jouent donc bien leur rôle de support.

7. INSTRUMENTATION DE SUBSTITUTION POUR LA PHASE ANALYSER

7.1. INTRODUCTION

La partie précédente était consacrée à la description du problème. La phase suivante abordée dans cette partie consiste à lister les causes potentielles (première étape, traitée en 7.2) et à les valider ou invalider (deuxième étape, traitée en 7.3).

Nous allons étudier l'instrumentation de substitution à proposer pour cette phase lorsque certains critères du profil du problème atteignent le niveau 3. Ces critères étant différents pour les deux étapes, nous les rappellerons en introduction de chacune des deux sous-parties.

Notre proposition se base essentiellement sur les deux derniers postulats énoncés dans la première partie de ce chapitre :

Postulat 3 :

Le développement de la description du problème est le moyen le plus efficace pour réduire le nombre d'essais dans la recherche et la validation des causes.

Postulat 4 :

Pour résoudre un problème, les occurrences sans défaut sont aussi riches d'informations que les occurrences avec défaut.

7.2. LISTE DES CAUSES

7.2.1. Introduction

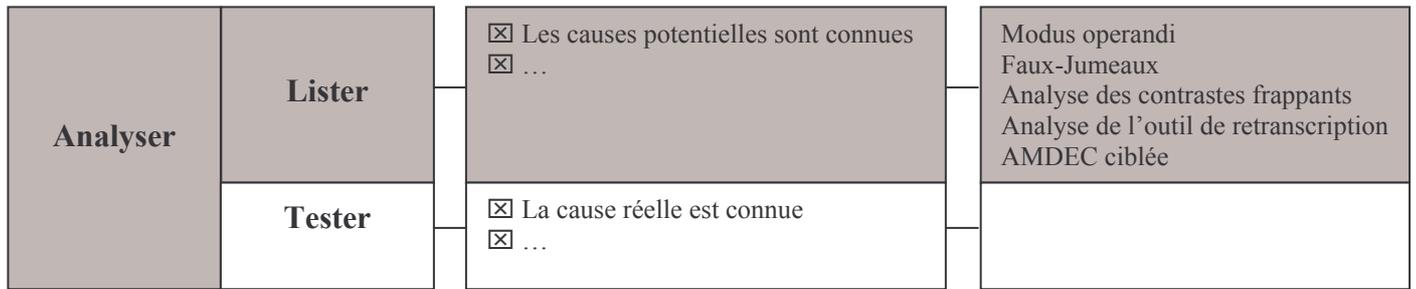
Les critères impactant l'étape de la liste des causes potentielles sont rappelés dans la Figure III- 10.

Habituellement, cette liste est initiée par une séance de brainstorming autour d'un outil type Ishikawa. Or, lorsque le problème est nouveau sur un produit jeune, les occurrences du défaut sont peu nombreuses et le degré de connaissance technique perfectible, il est donc très difficile d'énumérer la liste de toutes les causes potentielles.

L'approche classique peut donc être difficilement utilisée et comporte un risque non négligeable : la cause réelle peut être ignorée dans la liste sans qu'il y ait de moyen de le savoir.

L'instrumentation proposée doit donc permettre d'établir une liste des causes possibles en se basant sur la description établie précédemment et sur l'expertise des personnes. Pour ce faire, plusieurs concepts sont à développer :

- Faire parler la physique
- Faire parler les produits avec et sans défaut
- Faire parler les périodes avec et sans défaut
- Faire parler les lieux avec et sans défaut



Critères au niveau 3	Reconnaître	Définir	Mesurer	Décrire	Analyser
Nombre d'occurrences du défaut → ≤ 3					Faire parler la physique. Faire parler les produits, périodes et lieux avec et sans défaut.
Nombre de causes potentielles → Impossible à déterminer					Faire parler la physique. Faire parler les produits, périodes et lieux avec et sans défaut.
Possibilité de décomposition du produit → Non					Faire parler la physique. Faire parler les produits, périodes et lieux avec et sans défaut.
Quantité de données disponibles → Peu					Faire parler la physique. Faire parler les produits, périodes et lieux avec et sans défaut.
Degré de connaissance technique → Faible					Faire parler les produits, périodes et lieux avec et sans défaut.

Figure III- 10 : Critères et concepts pour l'étape Lister les causes

7.2.2. Faire parler la physique

La première technique utilisable pour lister les causes est à emprunter à l'enquête criminelle [Prévost 1988] : le « *modus operandi* » (façon d'opérer). Chaque criminel, par habitude ou par besoin physique ou psychologique, développe en effet une façon propre d'opérer qui finit par le caractériser.

En industrie, l'étude de la signature et la validation de la physique du défaut peuvent aussi effectivement beaucoup nous apprendre sur la nature de la cause réelle ou même directement la cause. Par exemple, un seul pixel isolé défectueux dans une image numérique sera plus probablement dû à une photodiode défectueuse qu'à une particule sur la diode qui aurait généralement affecté les pixels voisins.

Cette étude fait aussi appel à la répartition des rôles définie dans la partie 5.2 : seuls les experts peuvent relier une signature physique de défaut avec un type de causes.

Cet aspect est peu abordé dans les méthodes classiques. Or, lorsque les données disponibles ne sont pas importantes et les produits sont complexes, il serait dommage de se priver de la connaissance des experts.

7.2.3. Faire parler les produits avec et sans défaut

Un autre principe à développer consiste à faire parler les produits avec et sans défaut.

Le premier outil qui peut être utilisé est l'outil Faux-Jumeaux de Shainin [Shainin 1993a] qui permet d'identifier une différence répétitive entre les « bons » et les « mauvais » en étudiant des paires de produits fabriqués successivement dans le temps.

La deuxième technique est à emprunter à Kepner Tregoe [Kepner *et al.* 1980] : l'étude des contrastes frappants. Certaines lignes du « Est N'est pas » font apparaître un contraste particulièrement frappant entre le « Est » et le « N'est pas ». Par exemple, un défaut apparaît sur un type de produit A mais pas sur un type de produit B. L'approche consiste alors à lister toutes les particularités du produit A par rapport au produit B. Les causes potentielles sont ainsi bien liées à des faits avérés.

7.2.4. Faire parler les lieux et périodes avec et sans défaut

Pour faire parler les lieux et les périodes, trois techniques peuvent être utilisées :

- la technique des contrastes frappants de Kepner Tregoe sur les lignes OU et QUAND du « Est N'est pas »
- l'analyse de l'outil de retranscription décrit en 6.2
- une AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité) simplifiée ciblée sur le défaut et ses particularités (découlées du « Est, N'est pas ») afin d'identifier les étapes critiques. Par exemple, noter la criticité de toutes les étapes du processus par rapport à un défaut qui n'apparaît qu'en haut à gauche sur le produit.

L'étude des différentes périodes et étapes de fabrication pour la recherche de causes permet d'avoir une vision plus proche de la réalité que la traditionnelle vision « boîte noire » des méthodes classiques de résolution de problèmes telle que Six Sigma [Goh 2001]. Cette dernière vision très simplificatrice – le système est considéré comme une boîte noire avec des facteurs d'entrée x_i qui agissent sur la sortie y – occulte complètement la vision séquentielle. Cette nouvelle vision est particulièrement bien prise en compte dans le processus d'investigation des accidents [Livingston *et al.* 2001] où la notion de temps est ajoutée : le séquençement des x_i a aussi une influence sur la réponse y . La Figure III- 11 représente cette différence de vision : (a) la vision « Boîte noire » des méthodes classiques et (b) la vision séquentielle du processus d'investigation des accidents.

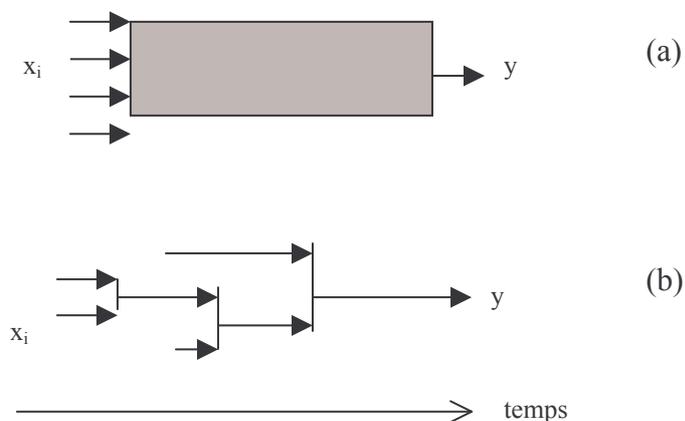


Figure III- 11 : Vision "Boîte noire" et vision séquentielle

7.3. TEST DES CAUSES

7.3.1. Introduction

Cette étape consiste à valider ou invalider les causes listées comme potentielles dans l'étape précédente. Les outils proposés par Six Sigma [Pyzdek 2001] [Goh 2001] pour tester les causes sont les plans d'expériences.

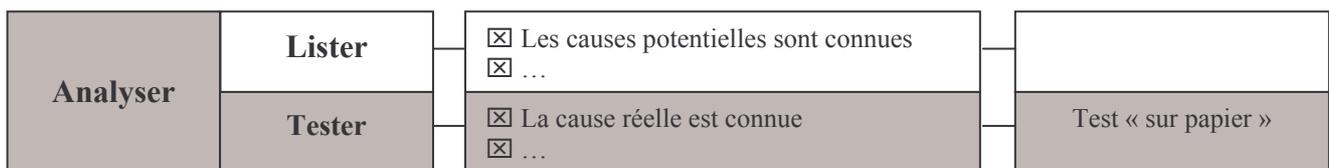
Comme le présente la Figure III- 12, trois critères du profil du problème impactent cette étape lorsqu'ils tendent vers le niveau 3 et minimisent les possibilités d'utiliser ces outils :

- Les compétences en statistiques peu développées
- Le nombre d'essais acceptable faible
- La difficulté de trouver une mesure physique continue du problème

Cette configuration nous amène à développer deux pistes :

- La recherche d'un moyen permettant de tester ces causes sans faire d'essais dans la mesure du possible. Nous appelons ce test « test sur papier ».
- La recherche d'un moyen de proposer une expérimentation suffisamment astucieuse pour réduire le nombre d'essais et suffisamment simple à analyser. Nous appelons ce test « test en réel ».

Nous verrons dans les paragraphes suivants comment peuvent être instrumentalisés ces deux tests. Ils peuvent être réalisés séparément ou séquentiellement.



Critères au niveau 3	Reconnaître	Définir	Mesurer	Décrire	Analyser
Compétences en statistiques → Aucune					Filtrer les causes potentielles par la description. Proposer une expérimentation simple.
Possibilité d'expérimentation → Très peu					Filtrer les causes potentielles par la description. Proposer une expérimentation réduite.
Possibilité de mesure physique continue → Non évidente					Filtrer les causes potentielles par la description.

Figure III- 12 : Critères et concepts pour l'étape Tester les causes

7.3.2. Test « sur papier »

Le test « sur papier » consiste à confronter nos hypothèses (liste des causes potentielles) aux faits. Il est très utilisé dans la méthode de Kepner Tregoe [Kepner *et al.* 1980]. Il permet d'éliminer des causes potentielles en contradiction avec les faits observés, sans expérimentation.

Dans un souci d'apporter une aide méthodologique toujours la plus outillée possible, nous proposons un support pour réaliser ce test en empruntant la notation de l'analyse causale de l'ADAQ [Bernard *et al.* 2001].

L'Analyse causale de l'ADAQ

L'analyse causale permet de formaliser le travail naturel de choix des caractéristiques suspectes. L'objectif de l'analyse causale est de faire une sorte d'AMDEC rétrospective compte tenu du problème qualité qui est posé. La notation consiste à donner, pour chaque cause potentielle, une note de 1 à 10 pour les trois critères suivants :

- Relation *a priori* avec le défaut : On répond à la question suivante « est-ce que cette caractéristique, si elle s'écarte de la valeur cible, peut créer un défaut ? »
- Niveau de maîtrise atteint sur cet état : Le processus qui conduit à l'obtention de cette caractéristique est-il maîtrisé ? Pour répondre à cette question, l'utilisation du diagramme de Pylipow [Pylipow 2000] qui permet de quantifier l'état de maîtrise d'un processus est préconisée.
- Adéquation avec la typologie de la manifestation : On juge si la façon dont se manifeste le défaut est compatible avec la suspicion de cette caractéristique.

Le produit des trois notes donne un indice de suspicion. Plus cet indice est élevé, plus la cause potentielle doit être retenue.

Proposition d'adaptation

Il est souvent difficile de donner une note de relation *a priori* avec le défaut en répondant simplement à la question posée, notamment lorsque les produits sont jeunes et complexes. Nous proposons donc d'établir cette note de relation *a priori* avec le défaut d'après le Est N'est pas, en la décomposant en cinq notes : pour le QUOI pour le OU, pour le QUAND et pour le COMBIEN. La note du quand comprend donc l'adéquation avec la typologie de manifestation.

La note attribuée pour chacune des quatre dimensions est de 0 si la cause n'explique pas la description (permet d'être éliminatoire lors de la multiplication finale) et de 1 (si la cause peut expliquer la description).

Concernant la note pour le niveau de maîtrise atteint sur cet état, nous conservons la proposition de l'ADAQ. Nous pensons que la prise en compte originale de cette notion est vraiment judicieuse et est particulièrement bien adaptée à notre contexte. Tous les procédés de fabrication n'étant pas stabilisés, il existe effectivement des différences de maîtrise des paramètres. Nous n'avons pas retrouvé cette notion dans les autres méthodes.

La note attribuée est de 1 si le niveau d'attention requis est bas (effectué par une machine par exemple) et de 2 s'il est élevé.

Le produit de ces deux notes nous donne un indice de suspicion.

7.3.3. Test en réel

Le test en réel, contrairement au test « sur papier », consiste à valider les causes potentielles par expérimentation. Nous avons vu que cette partie devait être plutôt limitée. On l'utilisera donc préférentiellement après le test « sur papier » qui aura joué un premier rôle de filtre. Ce test pourra aussi être utilisé pour décomposer la cause retenue par le test précédent en variables élémentaires.

On souhaite donc pouvoir trier des causes potentielles en peu d'essais. Plusieurs solutions dans la littérature existent. Nous avons étudié ces solutions et proposé une alternative nommée « plans dichotomiques » [Avrillon *et al.* 2003] dans le prochain chapitre (chapitre IV). Nous invitons donc le lecteur à ce reporter à ce chapitre pour cette partie.

7.4. CONCLUSION

La phase Analyser est de loin la plus dépendante des critères du profil du problème. Très vite les outils proposés par Six Sigma deviennent difficilement applicables dès qu'un des critères tend vers un niveau 3, que ce soit le diagramme d'Ishikawa pour lister les causes potentielles ou les outils statistiques pour valider ou invalider les causes.

Pour lister les causes potentielles, il faut donc « faire parler » la description du problème et la confronter à l'expertise des personnes. D'où la nécessité d'avoir la description la plus étayée possible.

Nous avons vu comment certains des outils des méthodes classiques comme « Faux-Jumeaux » de Shainin et d'autres outils de différentes méthodologies comme l'étude du « *modus operandi* » des enquêtes criminelles permettaient de proposer une instrumentation allant dans ce sens.

Cette approche permet de cibler les causes potentielles et de garantir leur pertinence en tant que telles.

Pour valider ou invalider les causes potentielles, une approche efficace consiste à réaliser un premier test « sur papier » en les confrontant à la description du problème. Les causes qui ne sont pas en concordance avec la totalité de la description sont ainsi éliminées. La pratique montre que ce test est un filtre particulièrement efficace.

Les causes encore « en course » sont ensuite testées par expérimentation. Celle-ci doit comporter le minimum d'essais et être facilement analysable.

8. CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de proposer une démarche de résolution de problèmes adaptée aux jeunes entreprises de haute technologie et adaptable pour chacun de leurs problèmes qualité.

Comment une entreprise de haute technologie peut-elle sélectionner judicieusement les problèmes qualité à traiter et en identifier les causes réelles en minimisant les essais et ce, dès les premières occurrences ?

La démarche proposée est fondée sur une structure de base proche de Six Sigma.

L'évaluation du profil de problème via dix critères permet d'identifier les phases ou les étapes pour lesquelles il faudra suggérer une instrumentation de substitution.

Pour définir cette instrumentation de substitution, nous avons travaillé sur trois axes :

- La sélection de méthodes et outils les plus adaptés à notre contexte, l'enrichissement de ces entités et la recherche de potentielles interactions positives entre elles.
- Le développement de nouveaux outils.
- L'emprunt de méthodes et outils d'autres domaines (criminologie et analyse des accidents) et leur adaptation à l'industrie.

Une deuxième évaluation – état méthodologique du problème – permet de déterminer les phases et étapes non clôturées et de cibler ainsi le travail à réaliser.

L'ensemble de ces deux états permet de moduler la structure de base à souhait.

En ce qui concerne l'instrumentation, dans ce chapitre, nous avons traité les phases et étapes amont au test des causes en réel (expérimentation). Ce dernier étant particulièrement critique dans notre contexte, nous le traiterons dans le chapitre suivant : Chapitre IV – Le problème particulier de l'expérimentation.

L'application industrielle de l'ensemble de cette démarche sera abordée au chapitre V.

Une maquette est en cours de réalisation pour proposer une assistance dans la définition du profil du problème, dans l'établissement de son état méthodologique et dans la construction automatique de la démarche associée.

Chapitre IV

Le problème particulier de l'expérimentation dans la phase Analyser

Ce chapitre a pour objectif d'aborder le problème particulier de l'expérimentation dans la phase Analyser de la démarche de résolution des problèmes qualité des produits nouveaux de haute technologie.

Nous tenterons de répondre aux questions suivantes : quel doit être le rôle et l'apport de la partie expérimentation dans la recherche et la validation des causes ? Quelles sont les contraintes à prendre en compte pour cette partie expérimentation ? Quels sont les méthodes et outils existants proposant une expérimentation adéquate ? Quelle stratégie peut-on retenir ? Est-ce suffisant pour notre contexte ?

1. INTRODUCTION

Dans une démarche de résolution de problèmes, l'expérimentation peut être utilisée essentiellement dans deux phases : la phase Analyser et la phase Améliorer.

Pour la phase Analyser, l'expérimentation a pour objectif d'identifier les facteurs influents (causes réelles) sur la réponse étudiée (mesure du problème). Pour la phase Améliorer, l'expérimentation a pour objectif d'optimiser cette réponse.

Même si ces deux types d'expérimentation présentent des similitudes en terme de démarche, elles sont méthodologiquement indépendantes en terme d'outils. Par exemple, pour les plans d'expériences, les outils correspondant à la phase Analyser sont principalement des plans de criblage alors que les outils correspondant à la phase Améliorer sont plutôt des plans de modélisation.

Nous avons vu précédemment dans le chapitre III que notre travail de recherche se focalise sur les phases Reconnaître à Analyser. Nous allons donc aborder dans ce chapitre uniquement la partie expérimentation pour la phase Analyser. La partie expérimentation dans la phase Améliorer pourra être envisagée dans des perspectives de recherche.

L'expérimentation pour l'identification des facteurs influents (tests des causes potentielles) pose un problème crucial dans notre contexte. En effet, elle doit répondre à deux contraintes aux conséquences contradictoires comme l'expose la Figure IV- 1.

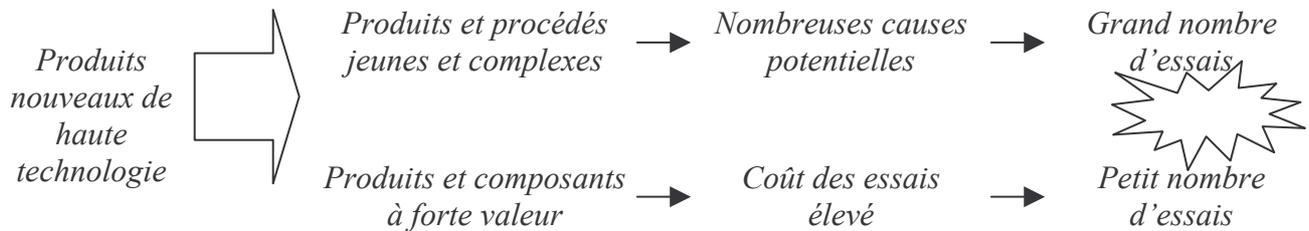


Figure IV- 1 : Contraintes pour l'expérimentation

D'une part, les produits nouveaux de haute technologie et leurs procédés associés sont jeunes et complexes. Les causes potentielles (facteurs) sont donc nombreuses, ce qui implique un grand nombre d'essais à réaliser.

D'autre part, ces produits étant à forte valeur, le coût de chaque essai est élevé. Le nombre d'essais sera donc à limiter.

L'objectif est donc d'étudier de nombreux facteurs en un minimum d'essais.

Nous verrons dans une première partie quelles stratégies peuvent être proposées pour réduire l'expérimentation : réduire le nombre de facteurs à étudier, réduire le nombre d'essais à réaliser, réduire le coût de chaque essai.

Dans une deuxième partie, nous nous focaliserons sur les techniques pour réduire le nombre d'essais à réaliser : les plans d'expérience de criblage. Nous verrons les types de plans de la littérature qui répondent au mieux à ces contraintes.

Enfin, dans une troisième partie, nous exposerons notre proposition de plan d'expérience : les plans dichotomiques. Nous l'illustrerons par un exemple de la littérature et nous discuterons des limites de cette technique.

2. STRATEGIES POUR REDUIRE L'EXPERIMENTATION

2.1. INTRODUCTION

Parmi les démarches de résolution de problèmes existantes étudiées au chapitre II, nous pouvons identifier deux grands types de stratégies pour diminuer l'expérimentation :

- Le ciblage en amont des facteurs à étudier
- L'agencement efficient de l'expérience

Par rapport à notre proposition de démarche de résolution de problèmes exposée en chapitre III, ces deux stratégies correspondent respectivement dans la phase Analyser aux étapes :

- « lister les causes » et « test sur papier »
- « test en réel »

Le premier type de stratégies est très représentatif des méthodes de Shainin [Shainin 1993a] et de Kepner Tregoe [Kepner *et al.* 1980], lesquelles sont très complémentaires pour le ciblage des facteurs en amont de l'expérimentation, comme nous l'avons vu au chapitre III. Shainin propose plutôt des outils de génération d'indices pour établir une liste consolidée des facteurs potentiels, alors que Kepner Tregoe est plus axé sur la validation de l'influence potentielle de ces facteurs.

Le deuxième type de stratégies est plutôt représentatif de la méthode Six Sigma [Harry *et al.* 2000]. Il est constitué des plans d'expérience de criblage. Il consiste à proposer un agencement de l'expérience minimisant le nombre d'essais à réaliser soit par la prise en compte de la connaissance, soit par un arrangement gigogne, soit par un arrangement mathématique.

Nous adjoindrons un troisième type de stratégies à utiliser lorsque le nombre de facteurs à étudier et le nombre d'essais à réaliser ne sont plus compressibles : la variation du support d'expérimentation (virtuel, factice ou partagé).

Ces trois types de stratégies constitueront le plan de cette partie. Bien qu'habituellement utilisées indépendamment, nous pensons qu'une utilisation conjointe de celles-ci peut apporter une approche encore plus efficace.

2.2. DES EXPERIMENTATIONS MIEUX CIBLEES

2.2.1. Introduction

Pour introduire cette première stratégie, nous pourrions reprendre une phrase de Shainin qui fait toute la force de son approche : « *Pour qu'une stratégie soit efficiente, l'expérimentation, bien que nécessaire, doit rester une petite partie de la résolution de problèmes. Il faut avant tout chercher des indices en observant les variations du procédé, en faisant parler les produits afin de s'assurer d'avoir ciblé les variables réellement influentes* » [Shainin 1993b].

L'objectif ici est donc de cibler en amont les facteurs à étudier, de s'assurer que les facteurs testés aient une certaine chance d'être réellement influents.

Cette plausibilité est établie par :

- le mode de sélection des facteurs potentiels : il doit être relié à des observations,
- l'adéquation de ces facteurs aux faits : les facteurs retenus ne doivent être en contradiction avec aucune partie de la description du problème.

2.2.2. Choix des facteurs par génération d'indices

La démarche Shainin [Shainin 1993b] propose des outils de génération d'indices pour « faire parler les produits » et dessiner peu à peu la liste des facteurs potentiels (appelés « X » dans la méthode Shainin).

L'enchaînement des outils proposés s'apparente à un « entonnoir à X » comme le présente la Figure IV- 2. Au début de l'entonnoir, tous les facteurs sont potentiellement influents.

Les cinq premiers outils, appelés outils de génération d'indices, permettent d'identifier :

- dans un premier temps : la famille de variation du défaut (dans le temps, inter unité, intra unité) – Outil : Multi-Vari
- dans un deuxième temps : les parties du procédé ou du produit à mettre en cause, en relation avec la famille de variation identifiée – Outils : Permutation non aléatoire de composants (PNAC), Diagramme de concentration, Recherche dans produit/process.
- dans un troisième temps : les facteurs de ces parties du procédé ou produit à retenir – Outils : Faux-Jumeaux, Recherche dans produit/process.

Les trois derniers outils de l'entonnoir (fond hachuré) correspondent à la partie « expérimentation » : Permutation non aléatoire de variables (PNAV), Plan complet et Anciens contre Modernes.

Il est intéressant de noter que Shainin distingue :

- les essais qui ne demandent pas de fabrication de nouveaux produits et de modification dans le procédé type prélèvement de pièces et montage/démontage de produits. Pour Shainin, ce n'est pas de l'expérimentation. Exemple : PNAC.
- les essais qui demandent la fabrication de nouveaux produits et / ou des modifications dans le procédé type modification d'une caractéristique. Exemple : PNAV.

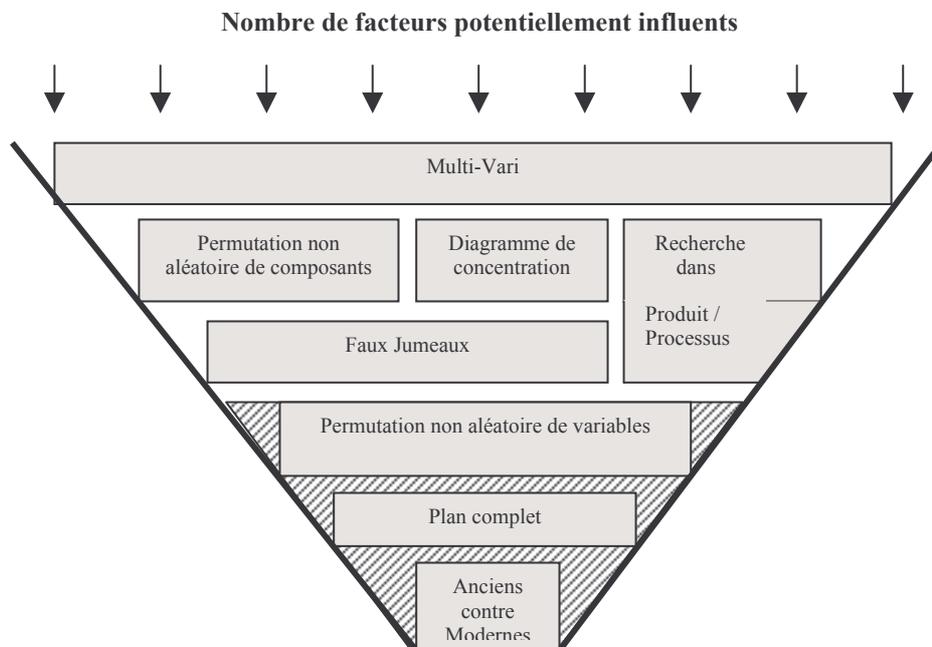


Figure IV- 2 : Entonnoir à X de Shainin

Dans le chapitre III partie 7.2, nous avons présenté d'autres instrumentations permettant aussi de générer des indices, basées sur la description du problème et sur l'expertise des personnes. Pour rappel, elles avaient pour objectif de « faire parler » :

- la physique
- les produits avec et sans défaut
- les périodes avec et sans défaut
- les lieux avec et sans défaut

Il est bien-sûr possible aussi d'utiliser les méthodes classiques d'analyse de données (méthodes de segmentation, de classification, de discrimination ...) pour sélectionner les facteurs en amont. Cependant, l'utilisation de ces méthodes demande que l'information pertinente ait bien été enregistrée dans les bases de données, ce qui est loin d'être toujours vérifié dans le cas des produits nouveaux de haute technologie.

2.2.3. Validation des facteurs par la description

La validation des facteurs par la description correspond au « test sur papier » que nous avons décrit dans le chapitre III.

Pour rappel, le test « sur papier » consiste à confronter les hypothèses (liste des facteurs potentiellement influents) aux faits. Il est très utilisé dans la méthode de Kepner Tregoe [Kepner *et al.* 1980]. Il permet d'éliminer les facteurs qui sont en contradiction avec les faits observés, et agit donc comme un premier filtre avant l'expérimentation.

Dans le chapitre III, nous avons proposé un support instrumental dérivé de la notation de l'ADAQ [Bernard *et al.* 2001] permettant d'obtenir un indice de suspicion pour chacun des facteurs.

2.3. DES EXPERIMENTATIONS MIEUX AGENCEES

2.3.1. Introduction

L'objectif de ce type de stratégie est de proposer un agencement d'expérience permettant de réduire le nombre d'essais pour un nombre de facteurs donné. *Nota : Une expérience est un ensemble de traitements expérimentaux (essais).*

On retrouve trois stratégies de ce type :

- La prise en compte de la connaissance
- L'arrangement gigogne
- L'arrangement mathématique

Les plans d'expérience cités ci-après seront présentés dans la partie 3.

2.3.2. Prise en compte de la connaissance

La prise en compte de la connaissance se traduit par un indice de priorité ou une probabilité *a priori* de l'influence des facteurs et / ou par une supposition *a priori* du sens de l'effet des facteurs. Elle permet quatre utilisations en vue de réduire l'expérimentation.

La première utilisation consiste à ordonner les facteurs d'après un indice de priorité. Ce classement va définir la séquence des essais à réaliser. Les essais sont analysés au fur et à mesure et l'expérience est arrêtée dès que les facteurs influents ont été repérés. Les outils type utilisant cette stratégie sont les plans « un facteur à la fois » [Shainin *et al.* 1990] mais on retrouve aussi cette utilisation dans les « plans par groupes de facteurs » [Watson 1961] [Patel 1962] et la « bifurcation séquentielle » [Bettonvil 1990].

La deuxième utilisation consiste à utiliser la connaissance *a priori* du sens des effets des facteurs pour affecter les modalités afin que tous les effets soient positifs. Les facteurs peuvent ainsi être traités par groupe sans risque de compensation des effets. Les outils utilisant cette technique sont les mêmes que ceux cités pour la première utilisation.

La troisième utilisation consiste à combiner ces probabilités *a priori* avec les résultats des essais. Cette technique permet de consolider le résultat de l'expérience et évite de répliquer les essais. Les principaux outils représentatifs de cette utilisation sont les « plans flous bayésiens » [Rochon 1997].

La quatrième utilisation consiste à émettre des hypothèses sur les effets des facteurs et leurs interactions pour diminuer le nombre d'inconnues du modèle supposé. Par exemple, on soupçonne que telle interaction n'est pas significative et on choisit donc de la considérer comme nulle. Les outils utilisant cette technique sont les plans d'expérience fractionnaires (fraction régulière de plan complet) [Box *et al.* 1961] et les plans sursaturés [Lin 1993].

2.3.3. Arrangement gigogne

Une autre stratégie consiste à étudier des ensembles de facteurs, qui sont ensuite décomposés en sous-ensembles jusqu'à atteindre les facteurs élémentaires. Cette approche est très utilisée dans la méthode Shainin et par certains plans d'expériences de criblage comme les « plans par groupes de facteurs » ou la « bifurcation séquentielle ».

Dans le Système de Shainin, les premiers éléments étudiés sont les sous-ensembles du produit. En utilisant des outils comme PNAC et PNAV, des permutations entre un produit bon et un produit mauvais permettent d'identifier le sous-ensemble en cause. Cette permutation est alors déclinée aux composants de ce sous-ensemble puis aux variables du composant précédemment incriminé.

Ce principe permet de ne pas avoir à tester toutes les variables élémentaires.

De plus, les premiers essais consistent à des démontages et des remontages, ils demandent donc du temps mais pas de fabrication supplémentaire. Dans le cas de produits nouveaux de haute technologie, la fabrication d'un produit est plus chère que son démontage.

Dans les plans d'expérience par groupes de facteurs, les facteurs sont testés par bloc au départ pour identifier le ou les groupes influents. Ensuite, les facteurs sont traités individuellement à l'intérieur de ces groupes.

Pour la bifurcation séquentielle, le processus est légèrement différent : les facteurs sont divisés en deux parties et on teste la première par rapport à la seconde. Cette procédure est ensuite déclinée dans toutes les parties influentes.

2.3.4. Arrangement mathématique

Une dernière stratégie d'agencement d'expérience est l'arrangement mathématique.

En fonction d'hypothèses de départ concernant les effets et interactions potentiellement actifs et de la précision souhaitée sur les estimations de ceux-ci, des tables de séquence d'essais sont construites selon des règles mathématiques permettant de proposer le nombre optimal d'essais pour l'analyse souhaitée.

La plupart des plans de criblage sont représentatifs de cette stratégie. Les plus significatifs sont les plans fractionnaires et les plans sursaturés.

2.4. DES EXPERIMENTATIONS MOINS COUTEUSES

2.4.1. Introduction

Lorsque le nombre de facteurs à étudier et le nombre d'essais ne sont plus compressibles, il existe encore un moyen de réduire l'expérimentation : réduire le coût de chaque essai !

Nous proposons de dissocier trois techniques possibles : la simulation, l'utilisation de support factice et la combinaison de plusieurs essais sur un même produit. Ces trois techniques ne sont pas applicables à tous les problèmes mais peuvent être très utiles dans certains cas.

Il n'existe pas d'outils à proprement parler dans la littérature pour les deux dernières techniques car elles sont plutôt basées sur le pragmatisme. Mais conduisant tout-de-même à une réduction notable de l'expérimentation, nous avons choisi de les mentionner dans cette partie.

2.4.2. Simulation

La simulation est un véritable outil d'investigation à part entière. Elle intervient dans de nombreux domaines de l'industrie, plus souvent lors de la conception. Dans l'industrie électronique, par exemple, elle intervient dans la conception de nouveaux circuits et le nombre de prototypes réels, dont le coût et les temps de réalisation sont souvent très importants, est de plus en plus réduit.

La simulation permet de faire varier les paramètres d'un phénomène physique, ou de les introduire progressivement pour aboutir à un modèle plus complexe et plus fidèle à la réalité. Cette approche peut être très efficace dans de nombreux cas. Cependant, il est difficile de prendre en compte tous les paramètres de l'environnement. De plus, la simulation utilise les lois connues pour montrer un phénomène, ce qui n'est pas toujours évident dans le cas des produits nouveaux de haute technologie.

2.4.3. Utilisation de support factice

Dans le cas où l'objet du défaut est déjà ciblé sur une partie du produit fini ou une partie du procédé de fabrication, il est possible d'utiliser un support factice. Il faut cependant s'assurer auparavant que le support (réel et factice) n'a aucun effet et aucune interaction avec les autres facteurs étudiés.

Par exemple, on a identifié que le problème était lié à un procédé de collage de modules électroniques sur une dalle de photodiodes. L'objectif de l'expérimentation est d'identifier les variables du procédé de collage qui sont influentes pour ce défaut. Plutôt que d'utiliser une véritable

dalle de photodiodes dont le coût est élevé, on peut imaginer de coller ces modules sur une dalle de verre.

Cette utilisation est adaptée lorsque le défaut peut être mesuré sur la partie isolée du produit étudié. Dans le cas contraire, on utilisera plutôt la deuxième technique proposée ci-dessous.

2.4.4. Combinaison de plusieurs essais sur un même produit

La technique de « combinaison de plusieurs essais sur un même produit » peut être appliquée dans deux cas différents. Reprenons l'exemple du paragraphe précédent pour illustration et imaginons que cette fois-ci le défaut ne puisse être mesuré qu'après l'assemblage final de la quasi-totalité du produit.

Premièrement, on peut considérer qu'un module correspond à un essai. Autrement dit, chaque configuration de collage à tester sera réalisée sur un des modules du même produit. Selon le nombre de modules présents par produit et le nombre d'essais à réaliser, l'expérience peut même être répliquée et ne nécessiter qu'un ou deux produits.

Deuxièmement, on peut combiner cette séquence d'expérience avec une autre. L'autre expérimentation doit concerner un défaut d'une autre partie du produit qui n'est pas en interaction avec les modules. Les supports des deux expérimentations d'objectifs pourtant différents seront donc communs.

2.5. POSITIONNEMENT DE CES EXPERIMENTATIONS

Nous venons de lister les différentes stratégies existantes pour réduire l'expérimentation. Le Tableau IV- 1 résume ces stratégies.

L'étude de leurs différents objectifs montre bien qu'elles ne jouent pas au même niveau et permet de les situer les unes par rapport aux autres. Chacune propose de jouer sur un paramètre différent : le nombre de facteurs à étudier, le nombre d'essais à réaliser, le coût de chaque essai.

Objectif	Type de stratégies	Stratégies	Outils
Réduire le nombre de facteurs à étudier	Ciblage en amont des facteurs à étudier	Choix des facteurs par génération d'indices	Outils Shainin Etude des contrastes frappants (Kepner Tregoe)
		Validation des facteurs par la description	Confrontation au Est N'est pas (Kepner Tregoe)
Réduire le nombre d'essais à réaliser	Agencement efficient de l'expérience	Arrangement gigogne	Plans par groupes de facteurs Bifurcation séquentielle
		Prise en compte de la connaissance	Plans Flous Bayésiens Plans un facteur à la fois Plans par groupes de facteurs Bifurcation séquentielle
		Arrangement mathématique	Plans fractionnaires Plans sursaturés
Réduire le coût de chaque essai	Variation du support d'expérimentation	Simulation	Tous les types de plans
		Utilisation de support factice	Tous les types de plans
		Combinaison de plusieurs essais sur un même produit	Tous les types de plans

Tableau IV- 1 : Stratégies pour réduire l'expérimentation

L'idée serait donc de les associer pour atteindre une réduction maximale de l'expérimentation. Leurs objectifs étant clairement identifiés et distincts, une utilisation séquentielle de ces trois stratégies est tout à fait adaptée.

La Figure IV- 3 présente cette association et la relie à notre structure de base de résolution de problèmes décrite en chapitre III.

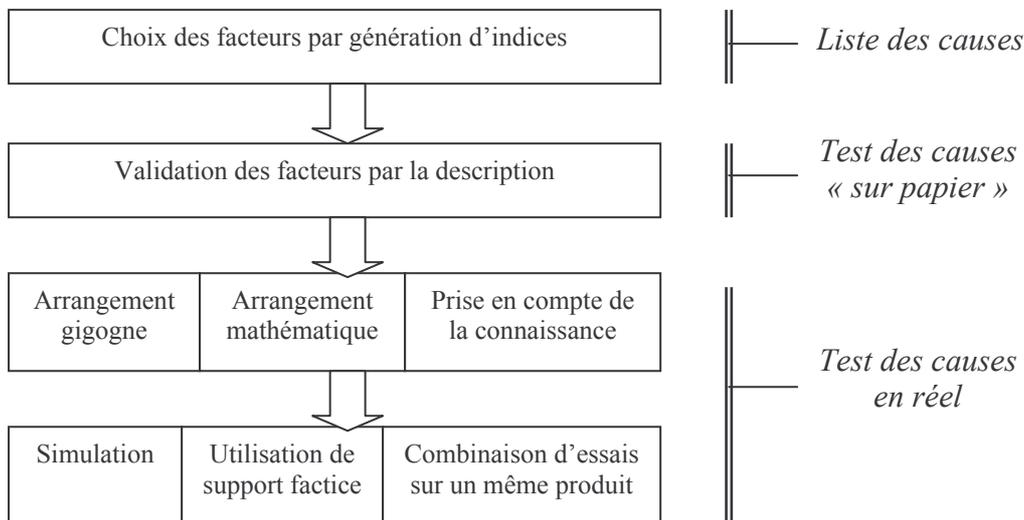


Figure IV- 3 : Association des stratégies pour une réduction optimale de l'expérimentation

La combinaison des trois types de stratégies permet d'adresser tous les axes possibles de travail pour réduire l'expérimentation.

Commencer par le ciblage des facteurs en amont permet de réduire le nombre de facteurs à étudier et d'augmenter la chance que les facteurs influents aient bien été isolés.

Enchaîner par un agencement efficace de l'expérience permet de jouer ensuite sur le nombre d'essais à conduire pour étudier les facteurs préalablement sélectionnés.

Terminer par une réflexion sur le support d'expérimentation (virtuel, factice, partagé) peut diminuer le coût de chaque essai retenu.

2.6. CONCLUSION

Nous avons distingué trois types de stratégies pour réduire l'expérimentation dont l'utilisation séquentielle pouvait apporter une efficacité optimale :

- Le ciblage en amont pour réduire le nombre de facteurs à étudier
- L'agencement efficace de l'expérience pour minimiser le nombre d'essais à réaliser
- La variation du support d'expérimentation pour diminuer le coût de chaque essai

Le ciblage en amont des facteurs est de loin la stratégie la plus efficace pour réduire l'expérimentation et pour s'assurer que les facteurs influents aient bien été isolés. L'instrumentation correspondante que nous retenons a été décrite dans le chapitre III.

Pour agencer les essais de manière efficiente, nous avons vu qu'il existait trois principaux moyens :

- La prise en compte de la connaissance, par le biais de probabilité *a priori* ou d'indice de priorité sur l'influence des facteurs, de leurs interactions et du sens des effets, permet de réduire le nombre d'inconnues du modèle ou de ne pas répliquer les essais.
- L'arrangement gigogne permet de conduire expérimentation et analyse simultanément et d'éliminer rapidement un grand nombre de facteurs au fur et à mesure des essais.
- L'arrangement mathématique, base des plans d'expérience, permet de proposer un nombre optimal d'essais en fonction des hypothèses posées au départ.

Les outils correspondants à cette deuxième stratégie, c'est-à-dire les plans d'expérience de criblage, feront l'objet de la partie suivante.

Concernant la troisième stratégie, la première technique – la simulation – s'avère très utile en terme de réduction de coût. Quant aux deux autres techniques – utilisation de support factice et combinaison de plusieurs essais sur un même produit – leur aspect très pratique et peu théorique ne doit pas sous-estimer leur apport. Dans de nombreux cas, elles peuvent apporter une réduction significative du coût de l'expérimentation. De plus, nous avons vu que dans notre contexte le coût des produits était tel que même peu d'essais étaient encore trop cher. C'est en fait cette troisième stratégie qui nous autorise à étudier tout de même les différents outils d'expérimentation.

3. PLANS D'EXPERIENCE DE CRIBLAGE

3.1. INTRODUCTION

Dans cette partie, nous présentons les différents outils permettant un agencement efficace de l'expérimentation pour minimiser le nombre d'essais à réaliser : les plans d'expérience de criblage.

Un plan d'expérience est une stratégie de planification d'expériences permettant d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique.

Comme nous l'avons aperçu rapidement en introduction de ce chapitre, il existe deux types de plans d'expérience méthodologiquement différents :

- Les plans pour la recherche de facteurs influents, plans de criblage
- Les plans de modélisation ou plans pour l'étude de surface de réponses.

Notre étude concerne le premier type de plans, notre objectif étant d'identifier les facteurs influents et non de modéliser précisément la variation de la réponse.

Le choix du plan d'expérience dépend de la nature des questions à traiter, du degré de généralité recherché pour les conclusions et des ressources disponibles. Dans notre cas, nous nous intéressons aux plans de criblage permettant d'étudier un certain nombre de facteurs (de l'ordre de quelques unités à une ou deux dizaines de facteurs) en un minimum d'essais. Nous présentons dans la Figure IV- 4 les plans de ce type en fonction du nombre de facteurs. Notre domaine d'étude est la partie grisée.

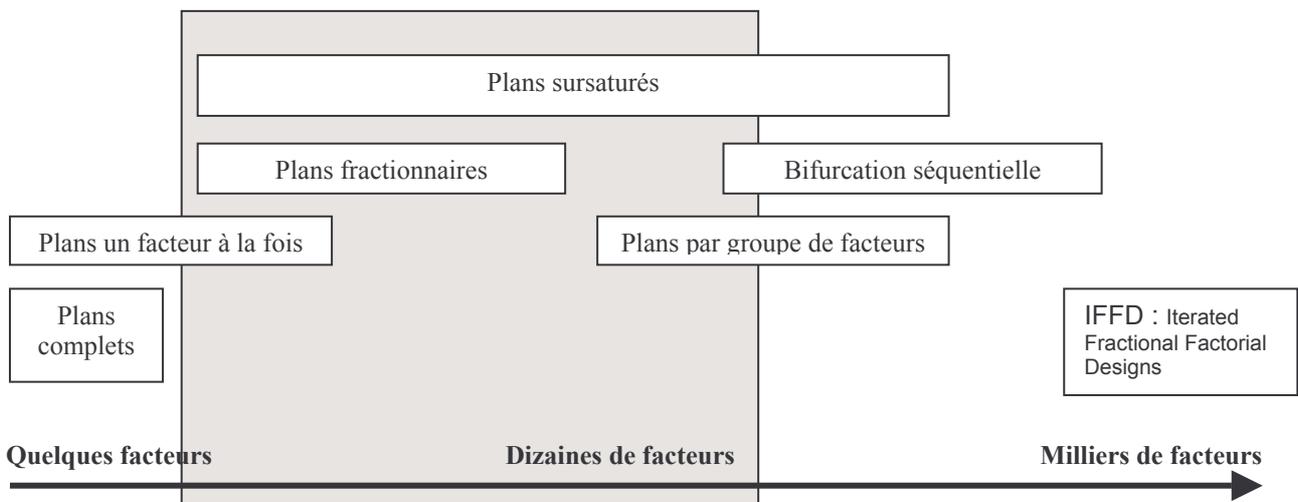


Figure IV- 4 : Plans de criblage en fonction du nombre de facteurs

Dans cette partie, nous commencerons par un rappel des notions élémentaires extraites d'un tutorial de Louvet [Louvet 2003], de la thèse de Scibilia [Scibilia 2000] et de norme [ISO 3534-3].

Ensuite, nous aborderons les plans de criblage de la littérature adaptés *a priori* à notre contexte : les plans « un facteur à la fois », les plans fractionnaires, les plans sursaturés, les plans par groupes de facteurs et la bifurcation séquentielle.

3.2. RAPPEL DES NOTIONS ELEMENTAIRES

La notion de modèle

Un modèle est une description associant la variable de réponse aux variables de prédiction et comprenant les hypothèses associées (étroitement liées au choix du type de plans d'expérience). Dans notre cas (plans de criblage), le modèle utilisé est de type additif.

La notion de facteurs et de modalités

Pour les plans de criblage, les facteurs peuvent être qualitatifs ou quantitatifs. La seule restriction en termes de nombre de facteurs sera dictée par le nombre d'inconnues du modèle et le nombre d'essais à réaliser pour l'estimation de ces inconnues.

Quant aux niveaux particuliers de ces facteurs retenus pour ce type d'étude, on parle de modalités : on veut détecter des « marches » et non modéliser la réponse. Les modalités des facteurs sont réputées maîtrisables et contrôlables par l'expérimentateur lors de la mise en œuvre du plan d'expérience.

La notion d'effet et d'interaction

L'effet d'un facteur correspond au changement de la réponse modélisée ou observée, lorsque ce facteur subit, de façon volontaire ou non, un changement dans son état.

L'interaction est l'effet pour lequel l'influence apparente d'un facteur sur la réponse dépend d'un ou de plusieurs autres facteurs.

La notion d'alias

Un alias correspond à une action (effet ou interaction) totalement confondue avec une autre action (effet ou interaction) en raison de la nature de l'expérience (plans fractionnaires).

La notion de domaine expérimental

Le domaine expérimental est représenté par l'ensemble des combinaisons réalisables entre les modalités des facteurs. Il possède un cardinal fini obtenu par analyse combinatoire.

Le domaine expérimental doit permettre de voir des variations significatives dans la réponse puisque c'est à partir de la restitution de ces variations par un modèle que l'on définira les effets.

La notion d'orthogonalité

Un plan orthogonal est un plan dans lequel toutes les paires de facteurs, à chacun de leurs niveaux, figurent ensemble un même nombre de fois.

Un plan orthogonal est optimal pour estimer et comparer les actions des facteurs. L'orthogonalité facilite les calculs (comparaison de simples moyennes arithmétiques) et minimise les incertitudes.

Le principe d'hérédité

Les interactions actives sont le plus souvent celles qui associent des facteurs principaux qui ont eux même un effet important.

Le principe de Pareto ou de parcimonie

Il est fondé sur la constatation que souvent à l'issue d'un plan de criblage, la proportion de facteurs réellement influents parmi les facteurs étudiés est faible.

3.3. PLANS « UN FACTEUR A LA FOIS »

3.3.1. Description

Ces plans consistent tout simplement à faire varier le niveau d'un seul facteur à la fois. Bien que beaucoup critiqué, ce type de plan peut se révéler utile lorsqu'il y a beaucoup de facteurs et que le phénomène est compliqué. On n'obtient aucune interaction, seuls les effets principaux sont connus.

Shainin [Shainin 1993a] propose une version un peu plus élaborée de la traditionnelle technique « un facteur à la fois » : Permutation non aléatoire de variables. Six essais préliminaires (trois essais aux modalités *a priori* meilleures des facteurs puis trois essais aux modalités *a priori* pires) sont réalisés afin de s'assurer que parmi les facteurs sélectionnés se trouvent les facteurs réellement actifs. Les modalités « meilleures » et « pires » sont fixées de manière à obtenir tous les effets dans le même sens. Chaque facteur est ensuite testé un à un dans l'ordre décroissant d'influence *a priori*; la réponse obtenue est comparée à celles des deux séries d'essais préliminaires. Un dernier essai de bouclage permet de valider la liste des facteurs révélés influents.

3.3.2. Discussion

Ledolter et Swersey [Ledolter *et al.* 1997] ont apporté de nombreuses critiques négatives à cette Permutation non aléatoire de variables :

- Les multiples comparaisons de chaque essai avec les deux séries de la première étape ignorent toute l'information contenue dans les autres essais.
- Le nombre d'essais dépend de la capacité à classer correctement les facteurs et à identifier correctement leur modalité meilleure. Or, on remarque que cela entraîne souvent un nombre d'essais plus élevé que pour un plan fractionnaire.
- Les essais ne sont pas réalisés aléatoirement, ce qui peut poser un grand problème si une tendance avec le temps existe.
- Si des facteurs sont influents par leur interaction mais pas par leurs effets, alors cette variation « un à la fois » va amener à conclure qu'ils ne sont pas influents et ces facteurs ne seront pas retenus.
- Si des facteurs sont influents par leurs effets que l'on se trompe pour certains pour fixer les modalités (inversion) alors, dans la première étape, les effets risquent de se compenser et on conclura à tort que les facteurs influents n'ont pas été sélectionnés.

Ledolter et Swersey montrent que les plans d'expérience fractionnaires orthogonaux constituent une approche plus efficace, ils sont moins sensibles à la variabilité des données et nécessitent souvent un nombre d'essais moins important.

En revanche, nous pensons que la Permutation non aléatoire de Shainin présente au moins un avantage majeur comparé aux plans d'expériences fractionnaires : l'étape préliminaire permet de s'assurer que les facteurs influents sont bien présents parmi les facteurs étudiés.

3.4. PLANS FRACTIONNAIRES ORTHOGONAUX

3.4.1. Description

Les plans fractionnaires [Box *et al.* 1961] permettent d'étudier plusieurs facteurs et, si l'on sait bien interpréter les modèles sous-jacents (théorie des alias), on peut détecter les interactions entre les facteurs. Plusieurs variantes ont été proposées : plans de Plackett et Burman [Plackett *et al.* 1946], tables de Taguchi [Taguchi 1987] ... Ils sont tous basés sur des matrices d'Hadamard et sont parmi les plans les plus utilisés.

Une matrice d'Hadamard [Hadamard 1893] est une matrice qui possède les propriétés suivantes :

- elle est carrée
- elle possède un nombre de lignes (ou de colonnes) multiple de quatre
- ses éléments sont uniquement des +1 ou des -1
- le produit scalaire de deux colonnes (ou de deux lignes) est toujours égal à zéro. Ces matrices sont donc orthogonales.

Un plan fractionnaire dans lequel une action d'ordre I (effet d'un facteur) et une action d'ordre II (interaction entre deux facteurs) sont aliassées est catégorisé de plan de résolution III (I+II). Sur le même principe, on trouve aussi des plans fractionnaires de résolution IV et V. Résolution du plan et nombre d'essais requis varient dans le même sens.

Il existe aussi des tables spécifiques comme la L12 ou L18 de Taguchi dont l'objectif est seulement de sélectionner les facteurs influents, les interactions ne peuvent pas être étudiées.

Pour réduire le nombre d'essais en termes de réplication dans un plan fractionnaire, Rochon [Rochon 1996] propose une approche originale : l'utilisation conjointe des techniques de retours d'expériences et des plans d'expérience : les plans d'expérience flous bayésiens (PEFB). Les PEFB ont pour objectif d'enrichir les résultats d'un plan d'expérience par les estimations des experts en mixant les deux informations. Les plans fractionnaires traitant les données expérimentales et les données d'experts sont transformés en expertons. Le théorème de Bayes généralisé aux expertons permet de les combiner afin d'obtenir un experton *a posteriori*. Celui-ci est ensuite retranscrit en un plan d'expérience appelé PEFB qui sera traité de manière classique.

La principale difficulté en terme général reste l'extraction de connaissances des experts : ceux-ci ont une connaissance globale des phénomènes qui est très difficile à décortiquer. Cette dernière remarque et contrainte est particulièrement discriminante dans le cas de produits nouveaux et de haute technologie.

3.4.2. Discussion

Longtemps considérés comme un moyen efficace de réduire le nombre d'essais, les plans fractionnaires sont cependant contraints à la règle suivante : le nombre minimal d'essais à réaliser est limité par le nombre d'inconnues du modèle étudié.

Or, dans le cadre du criblage, la liste des facteurs potentiellement influents peut être importante. L'orientation des recherches s'est donc rapidement tournée vers des techniques admettant moins d'essais que le nombre d'inconnues du modèle, tels que les plans sursaturés [Lin 1993].

De plus, les plans fractionnaires ne comprennent aucun verrouillage d'entrée garantissant que les facteurs influents ont bien été sélectionnés. On prend donc le risque de réaliser les essais sans cette vérification.

3.5. PLANS SURSATURÉS

3.5.1. Description

Les plans sursaturés (SSDs) permettent d'étudier k facteurs en n essais où $k > n-1$. Le concept des SSDs a pour origine Satterthwaite [Satterthwaite 1959] puis a été développé par Booth et Cox [Booth *et al.* 1962]. Les SSDs ont ensuite connu peu d'intérêt pendant une trentaine d'années jusqu'à ce que Lin [Lin 1993] les remette au goût du jour. Pour une description détaillée de l'historique de ces plans et de leur développement actuel, nous invitons le lecteur à se reporter à [Lin 2000] et à [Cela 2005].

Plusieurs auteurs proposent des principes de construction différents.

Par exemple, Lin [Lin 1993] propose de construire les plans sursaturés en utilisant des moitiés de matrices d'Hadamard. Ces plans, faciles à construire, permettent d'étudier $m-2$ facteurs en $m/2$ essais où m est le numéro d'ordre de la matrice d'Hadamard utilisée.

Wu [Wu 1993] utilise les colonnes des effets et des interactions d'ordre II de toute matrice d'Hadamard d'ordre m . Les plans qui en résultent ont m essais et s'accommodent bien jusqu'à $m(m-1)/2$ facteurs. Pour étudier k facteurs avec $k > m(m-1)/2$ facteurs, le choix des colonnes devient délicat.

Quant aux méthodes d'analyse, elles sont là aussi nombreuses et plutôt complexes de surcroît. Les plus utilisées sont les tracés de normalité, les régressions pas à pas (stepwise), les régressions ridge [Lin 2000] et les régressions PLS (Partial Least Squares) [Louvet 2003].

3.5.2. Discussion

Les plans sursaturés sont utiles lorsque le nombre de facteurs réellement influents est très petit comparé au nombre total de facteurs considérés dans l'étude. Cependant, ils ne sont pas robustes par rapport au non-respect de cette hypothèse.

De plus, l'interprétation de tels plans n'est pas aisée et ne peut être effectuée qu'à la fin de tous les essais. On prend donc encore le risque de réaliser des essais alors que les facteurs influents n'ont pas été sélectionnés.

3.6. PLANS PAR GROUPE DE FACTEURS

3.6.1. Description

Les plans par groupe de facteurs consistent non pas à étudier des facteurs distinctement comme le font les approches précédentes mais à considérer des groupes de facteurs. Cette technique est utile lorsque l'on pense que parmi un grand nombre de facteurs seuls quelques uns sont actifs.

Dans cette méthode introduite par Watson [Watson 1961], les facteurs sont regroupés logiquement en g groupes de k facteurs. La première étape a pour objectif d'identifier les groupes influents (m) à l'aide de plans fractionnaires. Puis, les facteurs de ces groupes sont étudiés individuellement avec le même type de plans dans une deuxième étape. En théorie, $g+1$ essais sont requis pour la première étape et mk essais pour la deuxième.

Patel [Patel 1962] propose une méthode en plus de deux étapes. Initialement, les facteurs sont regroupés en g_1 groupes et g_1+1 essais sont conduits pour identifier les groupes influents. Ensuite, chaque groupe influent est lui-même divisé en g_2 groupes qui seront étudiés en g_2+1 essais. La procédure se répète ainsi jusqu'à arriver au niveau des facteurs élémentaires. Ceux-ci sont alors testés par un plan « un facteur à la fois ».

3.6.2. Discussion

Cette approche est très intéressante dans notre contexte en terme de construction. Le fait de traiter les facteurs par groupe permet de réduire considérablement le nombre d'essais.

Les essais sont analysés au fur et à mesure qu'ils sont conduits, ce qui permet de mieux garantir leur intérêt (on ne fait pas des essais sur des facteurs non influents).

En revanche, si les hypothèses de départ ne sont pas respectées (non-compensation des effets par exemple), les résultats seront erronés et il faudra recommencer un autre type de plan traitant les facteurs individuellement.

3.7. BIFURCATION SEQUENTIELLE

3.7.1. Description

A l'origine, la bifurcation séquentielle a été développée dans le cadre d'un travail de thèse de doctorat par Bettonvil [Bettonvil 1990] partant d'une idée originale de Jacoby et Harrison [Jacoby *et al.* 1962]. Cette proposition est résumée par Bettonvil et Kleijnen dans [Bettonvil *et al.* 1997]. D'autres auteurs ont aussi étudié la bifurcation séquentielle : Cheng [Cheng 1997] et Campolongo [Campolongo *et al.* 2000].

Pour commencer, les facteurs sont classés par ordre croissant d'influence *a priori* et leurs modalités sont arrangées pour que tous les effets soient positifs.

La première étape consiste à valider le choix des facteurs. Deux essais sont conduits : tous les facteurs à leurs modalités hautes puis tous les facteurs à leurs modalités basses. La procédure continue seulement si la différence entre les deux réponses est significative.

La prochaine étape consiste à partager en deux le groupe actuel de variables (en taille de puissance de deux). Bettonvil et Kleijnen [Bettonvil *et al.* 1997] conseillent de rassembler les facteurs de même type (comme par exemple les facteurs du produit d'un côté et les facteurs environnementaux de l'autre) et d'autres auteurs proposent de les diviser en deux parties de taille égale [Cheng 1997]. Tous les facteurs de la première partie sont alors testés à leurs modalités basses et tous les facteurs de la deuxième partie à leurs modalités hautes. Si la réponse est sensiblement la même que l'une des deux premiers essais alors une des deux parties peut être éliminée.

Cette procédure se répète jusqu'à avoir identifié les facteurs influents.

3.7.2. Discussion

La bifurcation séquentielle est particulièrement efficace lorsqu'il s'agit d'identifier peu de facteurs influents parmi un très grand nombre de facteurs (plusieurs centaines).

La réussite de cette technique dépend de la validité des hypothèses de base, notamment le sens connu des effets et la faible proportion de facteurs influents. Si ces conditions ne sont pas respectées, la bifurcation séquentielle peut conduire à de nombreux essais pour des résultats difficilement exploitables. Cependant, cette procédure d'élimination rapide de larges groupes de facteurs est très intéressante pour notre étude. Nous avons donc eu pour idée de reprendre cette approche de bifurcation avec une technique permettant le traitement optimal des essais réalisés même lorsque les hypothèses de départ ne s'avèrent pas vérifiées. Nous aborderons cette proposition dans la prochaine partie : les plans dichotomiques.

3.8. CONCLUSION

Dans notre contexte, l'expérimentation par un plan de criblage doit répondre à cinq critères :

- Peu d'essais pour étudier les facteurs retenus pour l'étude
- Robustesse de la méthode quant au nombre de facteurs influents : la méthode est-elle impactée si le nombre de facteurs réellement influents est important ?
- Délai d'exploitation des résultats : les essais peuvent-ils être analysés au fur et à mesure de leur réalisation ou l'exploitation se fait-elle *in fine* ?
- Validation rapide de la pertinence des facteurs retenus : y a-t-il une vérification préliminaire des facteurs choisis au début de la campagne d'essais afin de s'assurer que les facteurs influents ont bien été sélectionnés ?
- Dépendance de la connaissance *a priori* : quelle est l'importance de la connaissance *a priori* des experts (sens des effets, hiérarchisation des facteurs ...) pour la réussite de la méthode ?

Le Tableau IV- 2 présente l'évaluation des différents plans de criblage étudiés. Pour chaque critère, nous avons classé les différentes techniques de 1 à 5, la note 1 correspondant à la technique qui répond le mieux au critère étudié et la note 5 à la technique qui répond le moins bien à ce critère.

La bifurcation séquentielle permet un traitement en peu d'essais de part son processus d'élimination de larges groupes de facteurs.

Les plans fractionnaires ne sont quasiment pas impactés par un nombre important de facteurs influents et par une faible connaissance *a priori*.

Quant à la Permutation non aléatoire de Shainin, elle présente deux avantages considérables : l'étape préliminaire permet de s'assurer que les facteurs influents ont bien été sélectionnés et chaque essai est suivi d'une analyse.

Pour notre proposition qui sera abordée dans la partie suivante, nous nous sommes astreints à utiliser les avantages principaux de ces techniques.

	Peu d'essais	Robustesse de la méthode quant au nombre de facteurs influents	Délai d'exploitation des résultats	Validation rapide de la pertinence des facteurs retenus	Dépendance de la connaissance <i>a priori</i>
Permutation non aléatoire de variables	5	2	1	1	4
Plans fractionnaires	4	1	4	5	1
Plans sursaturés	3	5	5	4	2
Plans par groupe de facteurs	2	3	3	3	3
Bifurcation séquentielle	1	4	2	2	5

Tableau IV- 2 : Comparaison des plans de criblage

4. LES PLANS DICHOTOMIQUES

4.1. INTRODUCTION

Dans la partie précédente, nous avons décrit les différents plans existants permettant de réduire l'expérimentation.

Les plans pour lesquels les alias sont le mieux maîtrisés et pour lesquels les hypothèses de départ sont moindres sont les plans fractionnaires. Or, ce sont les plans qui requièrent le plus d'essais.

Les plans sursaturés, les plans par groupes de facteurs et la bifurcation séquentielle, à l'inverse, sont ceux qui requièrent le moins d'essais mais ne sont valables que si les hypothèses de départ sont vérifiées. Le choix entre ces deux catégories de plans doit se faire au départ car les essais préconisés ne sont pas les mêmes.

Dans notre contexte, la forte valeur des produits nous force à réduire le plus possible les essais mais nous interdit de prendre le risque de faire des essais qui ne seront pas analysables si les hypothèses de départ ne sont pas vérifiées. De plus, cette expérimentation est intégrée dans le cadre d'une démarche de résolution de problèmes, l'analyse des essais doit donc être facilement compréhensible et interprétable.

Dans cette partie, nous proposons un nouveau type de plans répondant à ces contraintes : les plans dichotomiques [Avrillon *et al.* 2003] [Avrillon *et al.* 2005b].

Nous verrons dans un premier temps quel est le principe de ces plans, quelles sont les hypothèses à vérifier pour obtenir un nombre d'essais minimum et comment ces essais peuvent être réutilisés si ces hypothèses s'avèrent erronées.

Dans un deuxième temps, nous présenterons en détail le déroulement de ces plans, c'est-à-dire comment sont définis les essais à réaliser.

Dans un troisième temps, nous proposerons une analyse qui peut être utilisée pour identifier les facteurs ou groupes de facteurs influents.

Nous illustrerons nos propositions par un exemple de la littérature dans un quatrième temps et nous terminerons cette partie par une discussion des limites de cette technique.

4.2. PRINCIPES ET HYPOTHESES

4.2.1. Principes et propriétés

Le principe de base des plans dichotomiques est de choisir les essais d'un plan fractionnaire permettant de statuer sur des groupes de facteurs gigognes en un minimum d'essais tout en conservant la possibilité de revenir sur un plan fractionnaire classique au moindre doute (hypothèse de départ « bancale »).

Pour ce faire, nous combinons trois principes :

- La dichotomie : méthode de tri la plus rapide pour atteindre les facteurs influents parmi de nombreux facteurs (lorsque la réponse est unique).
- Le groupement de facteurs : cette technique permet de traiter des « macro-facteurs »
- La propriété des colonnes impaires des tables de Taguchi : la deuxième partie de la table et la réplication de la première partie.

Prenons pour exemple la table L16 pour l'étude de huit facteurs à partir des colonnes impaires et pour une résolution IV, présentée dans le Tableau IV- 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	a ₀		b ₀		c ₀		d ₀		e ₀		f ₀		g ₀		h ₀
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Tableau IV- 3 : Table L16

Les essais des lignes 1 et 9 permettent de s'assurer que les facteurs influents ont bien été sélectionnés, sur la même base que l'étape préliminaire de la bifurcation séquentielle [Bettonvil 1990] ou de Permutation non aléatoire de variables de Shainin [Bothe 2000].

Les essais des lignes 2 et 10 permettent d'étudier l'influence de la première moitié de la liste des facteurs et celle de la deuxième moitié; les essais des lignes 3 et 11 l'influence de chaque quart des facteurs. La procédure se poursuit ainsi jusqu'à atteindre les facteurs influents.

Les quatre premiers essais à réaliser sont présentés dans le Tableau IV- 4. Le principe de la technique consiste donc en une série dichotomique de macros plans complets type 2². De par leur construction, les plans dichotomiques conservent les propriétés d'orthogonalité. De plus, le fait de systématiquement traiter des plans d'expériences à 4 essais au moins, ils héritent des propriétés de précision sur l'estimation des coefficients que ne possèdent pas les plans « un facteur à la fois ».

N° Essais ↓	Lig L16 ↓	Groupe A2				Groupe B2				Réponses
		Groupe A1		Groupe B1		Groupe C1		Groupe D1		
		a ₀	b ₀	c ₀	d ₀	e ₀	f ₀	g ₀	h ₀	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	y ₁
2	9	2	2	2	2	2	2	2	2	y ₂
3	2	1	1	1	1	2	2	2	2	y ₃
4	10	2	2	2	2	1	1	1	1	y ₄

Tableau IV- 4 : Les quatre premiers essais du plan dichotomique pour huit facteurs

4.2.2. Hypothèses

Abordons maintenant les différentes hypothèses de départ des plans dichotomiques :

- (i) Très peu de facteurs sont influents,
- (ii) Les directions des effets sont connues,
- (iii) L'écart-type expérimental est faible par rapport aux effets.

Ces hypothèses, strictes d'un premier abord mais communément rencontrées pour la majorité des plans de criblage, sont avant tout posées pour apporter une première structure de travail. Il sera toujours possible de retourner à un plan fractionnaire si au moins l'une d'elles ne s'avérait pas vérifiée.

La première hypothèse, correspondant au principe de parcimonie dans la littérature, concerne la proportion de facteurs influents parmi les facteurs étudiés; le principe de dichotomie est d'autant plus efficace que le nombre de facteurs réellement influents est petit.

Avec la deuxième hypothèse, les modalités des facteurs sont fixées de telle sorte que tous les effets soient dans la même direction, auquel cas il ne peut y avoir de compensation des effets (à l'intérieur d'un même groupe de facteurs).

La dernière hypothèse signifie que les effets sont grands comparés à l'écart-type expérimental. Tous les facteurs influents seront détectés et le seul problème est de conduire l'expérimentation en un minimum d'essais.

4.3. DEROULEMENT

4.3.1. Déroulement de base

Les principes et hypothèses des plans dichotomiques étant définis, nous pouvons aborder le déroulement de ce type de plans, c'est-à-dire comment sont affectés les facteurs aux colonnes impaires des tables de Taguchi et comment sont choisis les essais à réaliser.

Tous les facteurs à étudier sont classés par ordre croissant d'influence *a priori* et affectés ainsi aux colonnes impaires d'une table de Taguchi. La première moitié de cette liste est regroupée en un macro facteur A1 et la deuxième en macro facteur B1. L'ordre de classement de la liste permet de rassembler les facteurs dont les effets sont *a priori* les plus significatifs.

Pour chaque facteur, les modalités 1 et 2 sont fixées selon la direction *a priori* de son effet sur la réponse.

Les deux premiers essais réalisés – tous les facteurs à la modalité 1 puis tous les facteurs à la modalité 2 – permettent de s'assurer que les facteurs influents ont bien été sélectionnés (par observation d'une différence significative des réponses de ces deux essais).

Deux essais supplémentaires sont réalisés afin de constituer un macro plan complet avec les deux groupes de facteurs A1 et B1. Supposons que seul le facteur B1 soit significatif. Ce groupe de facteur est alors séparé en deux sous-groupes C2 et D2 et les deux essais manquants pour constituer un second macro plan complet sont réalisés. La recherche dichotomique se poursuit ainsi jusqu'à obtenir la liste des facteurs influents. Le Tableau IV- 5 récapitule les essais pour huit facteurs (si le classement initial des facteurs est correct).

			Facteurs							
			A1				B1			
			A2		B2		C2		D2	
			h	g	f	e	d	c	b	a
Col L16 ⇒			1	3	5	7	9	11	13	15
Col L8 ⇒					2	3	4	5	6	7
Lig L16 ⇓	Lig L8 ⇓	Lig L4 ⇓								
1	1		1	1	1	1	1	1	1	1
9			2	2	2	2	2	2	2	2
2	2		1	1	1	1	2	2	2	2
10			2	2	2	2	1	1	1	1
3	3	4	1	1	2	2	1	1	2	2
11		1	2	2	1	1	2	2	1	1
5	5	2	1	2	1	2	1	2	1	2
6	6	3	1	2	1	2	2	1	2	1

Tableau IV- 5 : Récapitulatif des essais réalisés pour huit facteurs

Classement initial des facteurs incorrect

Supposons qu'après le premier plan complet, les deux macros facteurs A1 et B1 se révèlent influents. Or, selon notre hypothèse (i), seuls quelques facteurs sont réellement influents. Notre premier découpage n'est donc pas approprié. Le classement *a priori* des facteurs selon leur influence doit être remis en question, un autre découpage sera donc effectué. Pour répartir les facteurs, le même principe que le couple des lignes 2 et 10 de la table L16 de Taguchi peut être repris avec tous les couples des lignes x et $x+8$ de la L16. Par exemple, les lignes 3 et 11 proposent le découpage suivant :

- Groupe 1 : facteurs h, g, d, c
- Groupe 2 : facteurs f, e, b, d.

4.3.2. Généralisation

Une stratégie consisterait à tester les lignes 1 et $\frac{n}{2}+1$ de la table L_n , puis les lignes 2 à $\frac{n}{2}$ en s'arrêtant dès qu'un essai donne le même résultat que la ligne 1 ou $\frac{n}{2}+1$.

A partir de la dichotomie trouvée, on peut alors passer à l'étape suivante.

Si on arrive à la ligne $\frac{n}{2}$, on obtient un plan orthogonal de résolution III avec un essai de confirmation : la ligne $\frac{n}{2}+1$.

Cette procédure est décrite dans la Figure IV- 5.

La notation (*) sur ce schéma correspond à des essais qui peuvent avoir déjà été réalisés lors d'un découpage précédent.

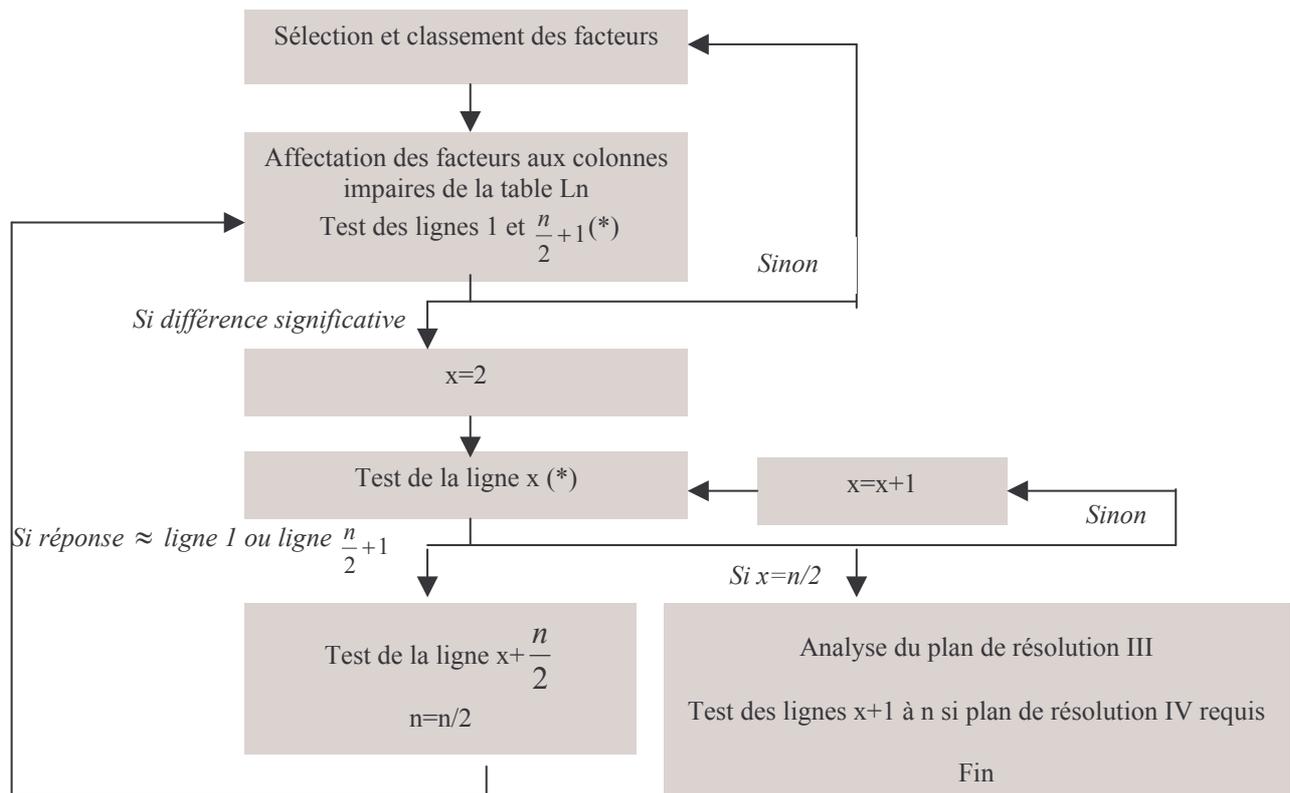


Figure IV- 5 : Procédure de définition des essais à réaliser

4.4. ANALYSE POUR DISSOCIER LES EFFETS SIGNIFICATIFS

4.4.1. Approche par le test z

Nous allons étudier les méthodes d'analyse qui peuvent être utilisées pour valider les découpages, c'est-à-dire dissocier les effets significatifs.

La première est le test z : comparaison de moyennes avec variances connues.

Cette approche, nécessitant de connaître l'écart type expérimental, permet de valider la différence significative entre les réponses des deux premiers essais pour vérifier que tous les facteurs influents ont bien été sélectionnés.

Elle permet aussi de valider le premier découpage en macro-facteurs en testant successivement la réponse du troisième essai avec celle du premier puis du deuxième essai. Si un des tests est significatif alors ce premier découpage est validé et on peut déterminer quel macro-facteur est actif.

4.4.2. Approche par un test de valeurs aberrantes

Cette deuxième approche basée sur un test de valeurs aberrantes est une alternative à la précédente pour valider le premier découpage dès le troisième essai. Le principe est le suivant : si la réponse du premier ou du deuxième essai est aberrante parmi la série des trois réponses alors le découpage est validé.

Nous proposons d'utiliser par exemple le test de Dixon [Dixon 1950].

Classons les trois réponses par ordre de valeur croissante et nommons-les respectivement : y_I , y_{II} et y_{III} .

Le nombre d'observations étant égal à trois, on calcule les rapports suivants (selon la procédure de Dixon) :

$$R = (y_{II} - y_I) / (y_{III} - y_I) \text{ pour tester la réponse } y_I$$

$$R = (y_{III} - y_{II}) / (y_{III} - y_I) \text{ pour tester la réponse } y_{III}$$

La table de Dixon, dont l'extrait est donné dans le Tableau IV- 6, indique les valeurs critiques de ces rapports au niveau de risque 10 %, 5 % et 1 %. La règle à adopter est la suivante : si la valeur du rapport calculé est supérieure à la valeur critique, l'observation peut être considérée comme aberrante (au risque donné), le découpage est donc validé.

n	10%	5%	1%
3	0,886	0,941	0,988

Tableau IV- 6 : Extrait de la table de Dixon pour n=3

4.4.3. Approche par le test t

A partir du quatrième essai, on peut utiliser une autre approche : agrégations successives par le test t de Student. Le test t est un test de comparaison de moyennes avec variances estimées. Cette approche permet de comparer les réponses du découpage testé.

La réponse du premier essai y_1 et celle du deuxième essai y_2 représentent chacune deux points d'attache. La réponse du troisième essai a été rattachée à l'une de ces deux réponses selon le résultat des tests précédents (sous réserve que le premier découpage ait été validé).

Chaque réponse suivante est ensuite agrégée à l'un des deux points d'attache. On teste la différence entre les deux nouveaux groupes ainsi créés par le test t . Cette action est renouvelée en agrégeant la réponse à l'autre point d'attache.

Si la différence des moyennes est significative pour une seule des deux agrégations, le découpage est validé et la réponse est agrégée définitivement au groupe concerné.

Nous allons voir l'application de ces différentes approches sur un exemple d'illustration.

4.5. EXEMPLE

4.5.1. Introduction

Illustrons notre proposition de plans dichotomiques par la reprise d'un exemple de la littérature.

L'exemple choisi est extrait de [Pyzdek 2001] (p525). Il s'agit d'améliorer un processus de soudure pour lequel huit facteurs *a priori* influents dans ce processus ont été sélectionnés. Pour des raisons de commodité, nous nommerons ces facteurs : a, b, c, d, e, f, g et h.

Cet exemple est traité avec un plan fractionnaire de résolution IV permettant d'étudier les huit facteurs, voir Tableau IV- 7.

	a	b	c	d	e	f	g	h	Y
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	65
2	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	85
3	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	58
4	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	57
5	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	63
6	1	1	1	1	1	1	1	1	75
7	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	77
8	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	60
9	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	67
10	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	56
11	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	63
12	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	81
13	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	73
14	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	87
15	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	75
16	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	84

Tableau IV- 7 : Plan fractionnaire issu de l'exemple [Pyzdek 2001]

L'analyse de la variance des résultats montre que seuls les effets des facteurs b et d sont significatifs et nous permet de modéliser le système étudié par l'équation suivante (en ne reprenant que les facteurs influents) :

$$Y_{\sim} = 70,375 - 4b + 9,25d \quad (1)$$

4.5.2. Transposition dans la table L16 de Taguchi

Avant de traiter cet exemple avec les plans dichotomiques, nous allons le retransposer dans une table de Taguchi L16, présentée dans le Tableau IV- 8. Pour ce faire, nous utiliserons l'équation (1) en ajoutant un bruit gaussien de moyenne 0 et d'écart-type correspondant à l'écart-type résiduel du modèle (2,014).

Ne connaissant pas le problème réel, nous conservons le classement alphabétique des facteurs : a est le facteur *a priori* le plus influent et h le moins influent.

Pour l'affectation des modalités, il faut inverser celles du facteur b à cause de la direction de son effet sur la réponse. Pour ne pas qu'il ait risque de confusion, ces « nouvelles » modalités seront désignées par 1 et 2. Le modèle est donc le suivant :

$$Y_{\sim} = 70,375 + 4b + 9,25d \quad (2)$$

	1	3	5	7	9	11	13	15			
	h	g	f	e	d	c	b	a	Y théorique	Bruit	Y théorique + Bruit
1	1	1	1	1	1	1	1	1	57,13	-0,60	56,52
2	1	1	1	1	2	2	2	2	83,63	-0,57	83,05
3	1	1	2	2	1	1	2	2	65,13	2,57	67,70
4	1	1	2	2	2	2	1	1	75,63	-1,49	74,13
5	1	2	1	2	1	2	1	2	57,13	1,41	58,54
6	1	2	1	2	2	1	2	1	83,63	3,49	87,12
7	1	2	2	1	1	2	2	1	65,13	-4,40	60,73
8	1	2	2	1	2	1	1	2	75,63	0,47	76,10
9	2	2	2	2	2	2	2	2	83,63	2,21	85,83
10	2	2	2	2	1	1	1	1	57,13	-2,19	54,94
11	2	2	1	1	2	2	1	1	75,63	-1,39	74,23
12	2	2	1	1	1	1	2	2	65,13	-3,40	61,72
13	2	1	2	1	2	1	2	1	83,63	-3,72	79,91
14	2	1	2	1	1	2	1	2	57,13	-1,97	55,16
15	2	1	1	2	2	1	1	2	75,63	-1,56	74,07
16	2	1	1	2	1	2	2	1	65,13	-4,27	60,86

Tableau IV- 8 : Table L16 correspondant à l'exemple [Pyzdek 2001]

4.5.3. Déroulement des essais selon un plan dichotomique

Le Tableau IV- 9 présente les essais réalisés. Examinons l'analyse de chaque essai en détail.

N° Essai ↓	Lig L16 ↓	Facteurs								Y théorique + bruit	Analyse
		A1				B1					
		A2		B2		C2		D2			
		h	g	f	e	d	c	b	a		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	56,52	Différence significative : sélection des facteurs validée	
2	9	2	2	2	2	2	2	2	85,83		
3	2	1	1	1	1	2	2	2	83,05	Facteurs influents dans le groupe B1	
4	10	2	2	2	2	1	1	1	54,94		
5	3					1	1	2	2	67,70	Facteurs influents dans les groupes C2 et D2. Il faut envisager un autre découpage.
6	4					2	2	1	1	74,13	
7	5					1	2	1	2	58,54	Autre découpage : C2' (a c) et D2' (b d). Facteurs influents dans le groupe D2'.
8	6					2	1	2	1	87,12	

Tableau IV- 9 : Plan dichotomique correspondant à l'exemple [Pyzdek 2001]

Analyse des essais 1 et 2

Pour valider la différence significative entre ces deux réponses, on utilise le test z avec un écart type de 2,014 (écart type résiduel du modèle).

On obtient la fonction discriminante suivante : $z_0 = 10,29 > 1,96$ (z limite pour un risque alpha de 0,05). L'écart est donc significatif : les facteurs influents ont bien été sélectionnés.

Analyse de l'essai 3

Pour valider le premier découpage A1 / B1, on applique le test de Dixon aux trois premiers essais :

$$y_I = y_1 = 56,52 < y_{II} = y_3 = 83,05 < y_{III} = y_2 = 85,83$$

$$R = (83,05 - 56,52) / (85,83 - 56,52) = 0,905 > 0,886 \rightarrow \text{pour tester la réponse } y_1$$

$$R = (85,83 - 83,05) / (85,83 - 56,52) = 0,095 < 0,886 \rightarrow \text{pour tester la réponse } y_3$$

La réponse y_1 peut être considérée comme « aberrante » par rapport à y_2 et y_3 . On peut donc valider le découpage A1 / B1 et conclure que les facteurs influents sont situés dans le groupe B1.

Analyse de l'essai 4

L'analyse de l'essai 4 n'a pour objectif que de confirmer la validation précédente du premier découpage A1 / B1 par le test t. L'hypothèse nulle de ce test est l'égalité des deux moyennes. Dans la Figure IV- 6, « p associé » correspond à la probabilité associée à cette hypothèse nulle.

Cette figure nous montre que ce découpage est bien correct : seul le groupe B1 est donc influent.

Découpage		Analyse			
85,83	n	2	n	2	
83,05	moy	84,44	moy	55,73	
54,94	sigma	1,966	sigma	1,117	
56,52	sigma intra		1,599		
	t calculé		17,957		
	p associé		0,003		
	Groupes valides				

Figure IV- 6 : Test t pour le découpage A1 / B1 (essai 4)

Analyse des essais 5 et 6

L'analyse des essais 5 et 6 a pour objectif de valider ou d'invalider le découpage C2 / D2. La Figure IV- 7 nous montre que l'agrégation de chacun de ces essais est valide pour les deux points d'attache. Le découpage ne peut donc être validé. Il faut envisager un autre découpage.

Découpage		Analyse			
85,83	n	3	n	2	
83,05	moy	78,86	moy	55,73	
67,7	sigma	9,764	sigma	1,117	
54,94	sigma intra		7,302		
56,52	t calculé		3,168		
	p associé		0,051		
	Groupes valides				

Découpage		Analyse			
85,83	n	2	n	3	
83,05	moy	84,44	moy	59,72	
67,7	sigma	1,966	sigma	6,956	
54,94	sigma intra		5,287		
56,52	t calculé		4,676		
	p associé		0,018		
	Groupes valides				

Découpage		Analyse			
85,83	n	3	n	2	
83,05	moy	81,04	moy	55,73	
74,23	sigma	6,056	sigma	1,117	
54,94	sigma intra		4,552		
56,52	t calculé		5,559		
	p associé		0,011		
	Groupes valides				

Découpage		Analyse			
85,83	n	2	n	3	
83,05	moy	84,44	moy	61,9	
74,23	sigma	1,966	sigma	10,71	
54,94	sigma intra		8,050		
56,52	t calculé		2,800		
	p associé		0,068		
	Groupes valides				

Figure IV- 7 : Test t pour le découpage A2 / B2 (essais 5 et 6)

Analyse des essais 7 et 8

L'analyse des essais 7 et 8 a pour objectif de valider ou d'invalidier le nouveau découpage C2' / D2' : regroupement des facteurs *a* et *c* et des facteurs *b* et *d*. La Figure IV- 8 nous montre que l'agrégation de l'essai 7 est valide pour un seul point d'attache (représenté par les essais 1 et 4) et celle de l'essai 8 également (point d'attache représenté par les essais 2 et 3). Ce nouveau découpage est donc correct, les facteurs influents sont *b* et *d*.

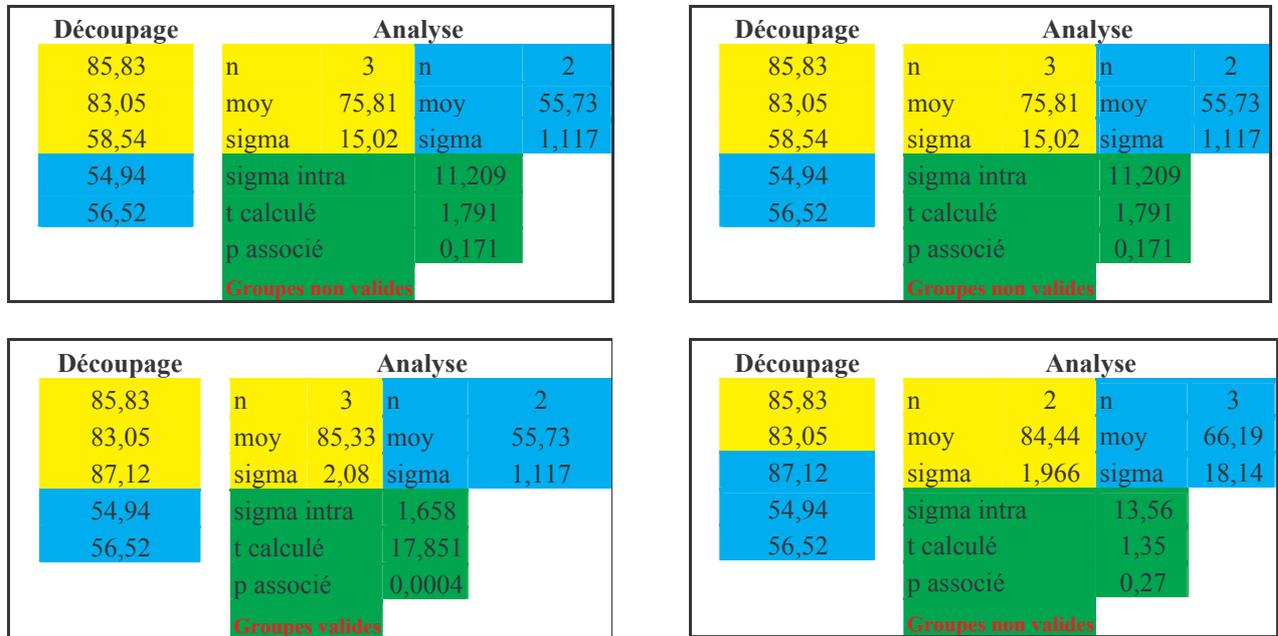


Figure IV- 8 : Test t pour le découpage C2' / D2' (essais 7 et 8)

Estimation des effets des facteurs influents

Il est possible d'obtenir un ordre de grandeur des effets de *b* et *d* par un plan complet 2² dont les essais ont déjà tous été réalisés, voir Tableau IV- 10 :

- Ligne 1 de la L4 ↔ essais 1, 4 et 7
- Ligne 2 de la L4 ↔ essai 5
- Ligne 3 de la L4 ↔ essai 6
- Ligne 4 de la L4 ↔ essais 2, 3 et 8

N° Essai ↓	d	b	Moyenne des réponses
1, 4, 7	1	1	56,67
5	2	2	85,33
6	1	2	67,7
2, 3, 8	2	1	74,13

Tableau IV- 10 : Analyse des facteurs influents par plan complet de l'exemple [Pyzdek 2001]

On obtient le modèle suivant, très proche du modèle (2) obtenu avec 16 essais et illustré dans la Figure IV- 9 :

$$Y \sim = 70.958 + 5,56b + 8,77d + 0,043 bd \quad (3)$$

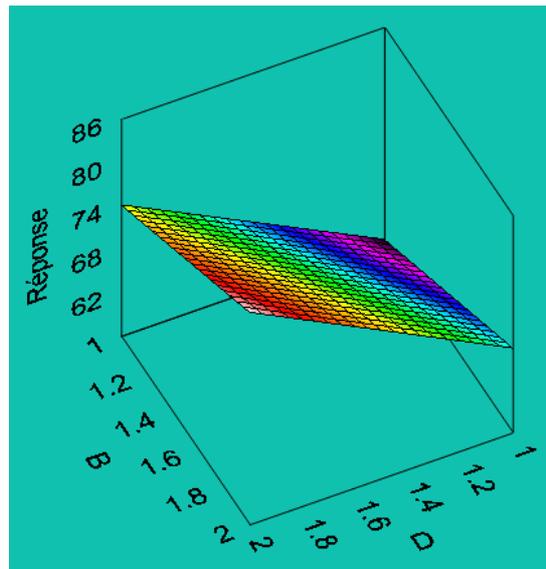
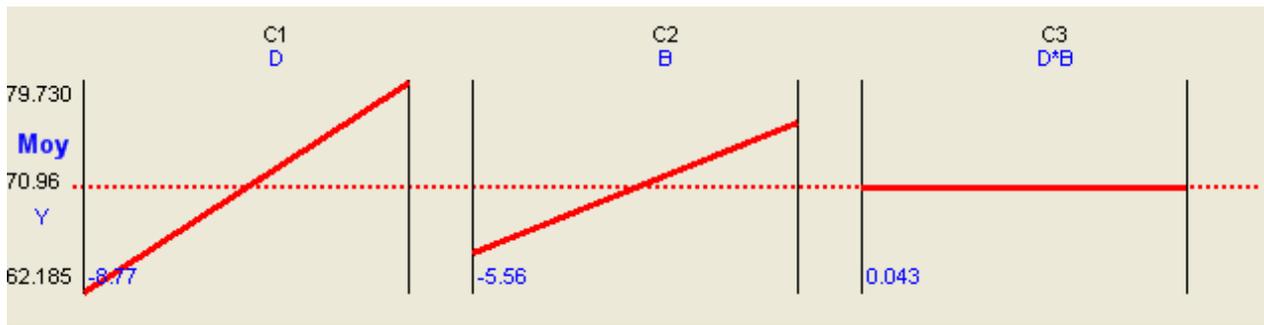


Figure IV- 9 : Graphique des effets et des interactions de l'exemple [Pyzdek 2001]

4.5.4. Conclusion des essais réalisés

Nous retrouvons donc en huit essais (au lieu de 16 pour les plans fractionnaires) les deux facteurs significatifs : *b* et *d*.

Le nombre d'essais aurait encore pu être réduit. En effet, les essais 4 et 8 n'étaient pas indispensables.

Le découpage C2 / D2 ayant été invalidé par l'essai 3, il était inutile de conduire l'essai 4 qui reprend le même découpage.

Quant à l'essai 8, l'essai précédent avait déjà montré que les facteurs *b* et *d* étaient influents et, pour l'analyse de la L4 du Tableau IV- 10, la configuration de ces facteurs (*b* et *d* au niveau 2) a déjà été testée aux essais 2 et 3.

La même conclusion aurait donc pu être atteinte en six essais.

Notons que le nombre d'inconnues du modèle sans interaction seraient de 9. Dans notre plan, avec six essais (soit trois de moins que le nombre théoriquement minimal), nous avons pu étudier les facteurs influents et leur interaction.

4.6. DISCUSSION SUR LES LIMITES DE L'APPROCHE PROPOSEE

Dans les différents cas étudiés avec les plans dichotomiques, quatre types de situations posant problème ont été décelés :

1. Le nombre de modalités d'un ou plusieurs facteurs est supérieur à 2.
2. Le nombre des facteurs est impair.
3. La réponse du système est multiple.
4. La réponse est qualitative.

1. Le nombre de modalités d'un ou plusieurs facteurs est supérieur à 2.

Les facteurs et les modalités *a priori* sont choisis parmi une infinité de facteurs et parmi une infinité ou un grand nombre de modalités potentielles.

Les deux premiers essais du plan dichotomique permettent de savoir si on a isolé les facteurs influents. S'il y a une différence significative entre les réponses de ces deux essais, on continue la procédure des plans dichotomiques (quitte à tester à la fin d'autres modalités sur les facteurs révélés influents). S'il n'y a pas de différence significative alors on peut remettre en question les facteurs ou les modalités.

Il faut donc se ramener à un nombre de modalités égal à 2 et les premiers essais confirmeront ou infirmeront le choix des modalités retenues.

Le choix *a priori* difficile est facilité par le travail réalisé en amont dans la résolution de problème, notamment l'approfondissement de la description du problème et l'analyse des produits avec et sans défaut.

2. Le nombre des facteurs est impair.

La procédure de découpage des plans dichotomiques reste la même. Les colonnes restantes du plan sont simplement « vides ».

3. La réponse du système est multiple.

C'est une vraie limite de notre proposition. Les plans dichotomiques ne sont adaptés que pour le cas où la réponse est unique, la dichotomie ne pouvant s'opérer que sur un seul critère.

4. La réponse est qualitative.

Comme pour tout type de plans d'expérience, il faut se ramener dans ce cas à une réponse quantitative. Plusieurs auteurs ont travaillé sur cette proposition. Le lecteur pourra notamment se reporter à [Pillet *et al.* 2005].

4.7. CONCLUSION

L'idée de base des plans dichotomiques est de reconstituer une dichotomie en utilisant les propriétés des colonnes impaires des tables de Taguchi.

Ce système comporte deux avantages majeurs.

Premièrement, il permet ainsi de diminuer significativement le nombre d'essais à réaliser en éliminant de larges groupes de facteurs si les hypothèses de départ sont vérifiées.

Deuxièmement, les essais réalisés peuvent être réutilisés et analysés dans un plan fractionnaire classique si au moins une des hypothèses s'avère erronée.

Le déroulement des plans dichotomiques permet d'abord de s'assurer que les facteurs influents ont bien été sélectionnés avant de dérouler toute la campagne d'essai.

La procédure de partage des facteurs permet de valider rapidement le classement *a priori* d'ordre d'influence des facteurs ou, le cas échéant, de proposer un autre regroupement. Les facteurs n'ayant pas d'influence sont très vite éliminés.

Dans tous les cas, les essais étant empruntés à un plan fractionnaire, il est toujours possible de revenir à une analyse classique de ce type de plan. Le nombre d'essais maximum correspond donc au nombre d'essais d'un plan de résolution III ou IV selon le degré de précision recherché.

5. CONCLUSION

Ce chapitre concerne la partie expérimentation de la phase Analyser dans une démarche de résolution de problèmes. Les contraintes de notre contexte demandent de tester de nombreux facteurs (causes potentielles) en un minimum d'essais. L'expérimentation, bien que nécessaire, doit rester une petite partie de la résolution de problème.

Pour réduire l'expérimentation, on peut jouer sur trois paramètres séquentiellement :

- Le ciblage en amont pour réduire le nombre de facteurs à étudier
- L'agencement efficace de l'expérience pour minimiser le nombre d'essais à réaliser
- La variation du support d'expérimentation pour diminuer le coût de chaque essai

Le ciblage des facteurs en amont a été étudié dans le chapitre III.

La variation de support d'expérimentation est une stratégie très utile dans certains cas : soit par la simulation (support virtuel), soit par l'utilisation d'un support factice, soit par la combinaison de plusieurs essais sur un même produit.

Concernant l'agencement efficace des essais, nous avons proposé une nouvelle approche : les plans dichotomiques. Cette technique permet de réduire significativement le nombre d'essais à réaliser si certaines hypothèses de départ sont respectées et permettent de réutiliser ces essais dans un plan fractionnaire le cas échéant.

Il reste de nombreuses perspectives de recherche et d'amélioration de cette technique, notamment la proposition d'une méthode de classement des facteurs et l'étude de la robustesse des méthodes d'analyse proposées.

Chapitre V

Application industrielle

Ce chapitre a pour objectif de présenter l'application industrielle de la démarche de résolution de problèmes proposée, de l'instrumentation associée et de l'organisation dans laquelle elle peut s'insérer.

Nous tenterons de répondre aux questions suivantes : Comment la démarche, les techniques et les outils proposés peuvent-être concrètement appliqués ? Quelle est l'organisation à mettre en place ? Quels ont été les apports perçus par les utilisateurs ?

1. INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les particularités des produits nouveaux de haute technologie et nous avons proposé une structure de résolution de problème adaptée et adaptable à ce contexte. La démarche proposée et son instrumentation associée ont été appliquées pour de nombreux cas de problèmes dans la société TRIXELL dans le cadre de la convention CIFRE.

L'objectif de ce chapitre n'est pas de présenter l'ensemble de ces cas mais de montrer comment la démarche peut être appliquée concrètement, quelle est l'organisation à mettre en place, quelles ont été les difficultés rencontrées et les apports notés.

Nous commencerons dans un premier temps par une brève description de la société TRIXELL et de ses produits pour montrer qu'elle illustre bien le cas des produits nouveaux de haute technologie.

Dans un deuxième temps, nous présenterons l'organisation et la gestion de la résolution de problèmes et plus généralement de la qualité en production qui peuvent être mise en place.

Nous détaillerons dans un troisième temps un cas concret d'application de la démarche de résolution de problème : les ESD *B*. Nous avons choisi de présenter ce cas car la démarche a été déroulée quasiment dans son ensemble et il illustre bien les apports et les difficultés rencontrées.

Dans un quatrième temps, un exemple d'application des plans dichotomiques sera exposé : le criblage des facteurs influents sur la température interne d'un des produits.

Pour des raisons de confidentialité, certaines informations relatives à la société ont été masquées ou modifiées (en italique).

2. L'ENTREPRISE TRIXELL ET SES PRODUITS

2.1. INTRODUCTION

L'objectif de cette partie est de présenter un exemple de produits nouveaux de haute technologie : les PIXIUM de la société TRIXELL. Une présentation plus détaillée de l'entreprise et de ses produits est donnée en annexe I.

TRIXELL est une société commune (joint-venture) créée en 1997 entre Thalès Electron Devices (51 %), Philips Medical Systems (24,5 %) et Siemens Medical Solutions (24,5 %) engagée dans le développement, l'industrialisation et la fabrication d'une famille complète de détecteurs radiologiques numériques destinés à l'imagerie médicale. La création de TRIXELL a permis d'accélérer la mise sur le marché de détecteurs numériques innovants, les trois actionnaires partageant les coûts de développement (150 millions d'euros) pendant près de dix ans de recherche et avec plus de 100 brevets déposés. Les premiers produits en série ont été fabriqués en 2001. Trois produits sont fabriqués à ce jour : le PIXIUM 4600, le PIXIUM 4800 et le PIXIUM 4700.

« Le développement de TRIXELL était un réel challenge dans le secteur en croissance de l'imagerie radiologique. Nous avons développé une gamme de détecteurs aussi bien pour la radiographie que pour la radioscopie. Ils contribuent à la révolution numérique dans la radiologie comme les caméras numériques l'ont fait dans la photographie. Depuis 8 ans, TRIXELL a atteint ses objectifs pour devenir aujourd'hui le leader incontesté de son domaine », déclare Paul de Groot, Président Directeur Général de TRIXELL.

Leader mondial des détecteurs numériques destinés à l'imagerie radiologique, TRIXELL a célébré le 29 juin dernier la livraison de son 5000^{ème} produit ! La société a multiplié son effectif par 8 depuis sa création, employant aujourd'hui 280 personnes, dont 80 ingénieurs. Avec une croissance de plus de 50 % par an depuis 2000, TRIXELL accroît ses parts de marché et fournit aujourd'hui les plus grands fabricants de systèmes radiologiques dans le monde. TRIXELL continue d'investir dans la recherche et le développement pour élargir sa gamme de détecteurs. Dans le monde, près de 2000 services de radiologie utilisent déjà des systèmes équipés de détecteurs de TRIXELL.

Près de la moitié des détecteurs installés dans le monde entier ont été développés et fabriqués par TRIXELL.

2.2. PRESENTATION DES PRODUITS DE LA SOCIETE TRIXELL

2.2.1. Principe de fonctionnement

Les détecteurs de TRIXELL, appelés PIXIUM, convertissent directement les rayons X en signal numérique.

Le principe de fonctionnement du détecteur est le suivant :

- Un écran scintillateur (iodure de césium, CsI) convertit les rayons X en lumière visible.
- Cette lumière active une matrice de photodiodes (réalisée en silicium amorphe). L'adressage de chaque pixel est matriciel, il s'effectue par ligne, pour la sélection d'un rang et par colonne pour la lecture du signal via un interrupteur, qui est soit une diode en couche mince soit un transistor en couche mince (TFT). Les charges électriques sont lues en parallèle sur un seul rang.

- Les signaux sont ensuite multiplexés et numérisés à l'intérieur du détecteur. Les données sont transmises au système d'acquisition où s'effectue le traitement numérique, par une liaison fibre optique.

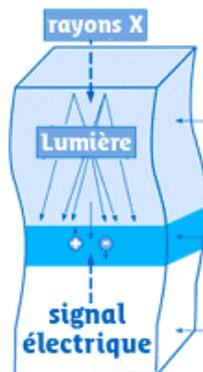


Figure V- 1 : Transformation des rayons X en signal électrique

2.2.2. Le PIXIUM 4600 : La référence technologique dans l'imagerie numérique

Dédié aux équipements radiographiques en remplacement du film, le PIXIUM 4600 bénéficie de l'ensemble des compétences réunies au sein de TRIXELL : la maîtrise des technologies clés de la détection radiologique, l'expertise des critères qualitatifs de l'image médicale et l'expérience dans les spécifications d'utilisation et d'intégration dans les équipements. Le PIXIUM 4600 a été le premier détecteur fabriqué par TRIXELL.

Par ses performances, le PIXIUM 4600 apporte les améliorations significatives aux conditions d'exploitation des équipements radiographiques en terme de rapidité d'acquisition de l'image, d'économie de temps, de la qualité d'image et de gestions de celles-ci.

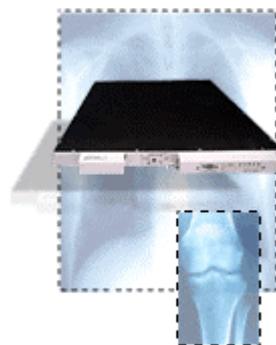


Figure V- 2 : Le PIXIMUM 4600

2.2.3. Le PIXIUM 4800 : Détecteur numérique pour radiologie dynamique

Le détecteur numérique dynamique PIXIUM 4800 utilise la même technologie que le PIXIUM 4600 : un scintillateur d'iodure de césium couplé à une matrice en silicium.

Le PIXIUM 4800 est le premier dans la famille des détecteurs dynamiques. Il génère des images de haute qualité, parfaitement uniformes, riches en nuances, sans phénomène de distorsion. Ces images dynamiques sont disponibles en temps réel pour le diagnostic, d'éventuels traitements, voire la reconstruction en trois dimensions.

Par ses performances, le PIXIUM 4800 rend possible une réduction significative des doses X d'examen et permet de limiter les doses de liquide de contraste injectées, augmentant ainsi confort et sécurité des patients.



Figure V- 3 : Le PIXIUM 4800

2.2.4. Le PIXIUM 4700 : Détecteur numérique dédié à la radiologie temps réel

Le PIXIUM 4700 bénéficie d'une haute résolution (154 μm pixel) et ses nombreux modes de fonctionnement permettent d'effectuer tout type d'examens d'angiographie et de radiologie conventionnelle dans les meilleures conditions d'ergonomie.

Le PIXIUM 4700 apporte une performance numérique inédite, avec un contraste élevé, une haute résolution spatiale et temporelle, à dose réduite.

Il profite de la technologie développée par TRIXELL - association d'un scintillateur en iodure de césium et d'une matrice en silicium amorphe - offrant ainsi des fonctionnalités en statique et dynamique avec une excellente qualité d'image.



Figure V- 4 : Le PIXIUM 4700

2.3. DES PRODUITS NOUVEAUX ET DE HAUTE TECHNOLOGIE

2.3.1. Des produits innovants

Les détecteurs numériques développés par TRIXELL constituent une avancée majeure dans l'exploitation et les performances des nouveaux systèmes de radiologie médicale.

Les bénéfices vis-à-vis des solutions existantes sont les suivantes :

- Productivité : image immédiate, pas de traitement de film, un seul cliché
- Accès en réseau : diffusion des images, archivage des images
- Diagnostic amélioré : traitement de l'image, image sans distorsion, image grand champ et de haute résolution, réduction de la dose des X.

La dynamique du détecteur assure aux praticiens la disponibilité d'un cliché de haute qualité en une seule exposition, contribuant ainsi à la précision du diagnostic et à la réduction du temps d'attente des patients. Les détecteurs numériques de TRIXELL améliorent considérablement les conditions de travail par rapport aux solutions conventionnelles : accès instantané à des images de grande qualité, fiabilité, faible dose.

Ce sont ces critères clés qui ont conduit TRIXELL à choisir cette technologie : un scintillateur à iodure de césium, couplé à une matrice en silicium amorphe, et piloté par une électronique haute performance dédiée.

2.3.2. Des technologies complexes

Près de 15% du chiffre d'affaires est dédié à la Recherche et Développement.

Cette technologie est nouvelle et composée de multiples transformations de signal comme nous l'avons vu précédemment : rayons X → lumière → signal électrique → signal numérique.

Les briques technologiques utilisées dans les produits ont été spécifiquement développées pour (et souvent par) TRIXELL. Il en va de même pour les procédés de fabrication associés. L'élaboration de ces briques technologiques produits et procédés recouvre plusieurs métiers différents dont le savoir-faire est très pointu : physique, chimie, mécanique (assemblage), métallurgie (soudure), microconnectique, électronique (conception, tests, optimisation du fonctionnement des détecteurs). Cette interaction de métiers différents et de technologies nouvelles accroît la complexité de conception et de fabrication.

La haute technicité et la singularité de ces produits engendrent des coûts élevés de développement, de prototypage et de fabrication pour les produits finis comme pour les sous-ensembles achetés (exemple : matrice de photodiodes). Un détecteur coûte plusieurs dizaines de milliers d'euros.

De plus, ces produits étant liés à un nouveau besoin dérivé d'une technologie nouvelle, leur configuration, leurs fonctions détaillées et leurs spécifications évoluent constamment même pendant et après la phase d'industrialisation.

2.4. CONCLUSION

Les produits de TRIXELL illustrent bien les spécificités des produits nouveaux de haute technologie listées en chapitre I et rappelées dans le Tableau V- 1.

La société est en pleine mutation : elle est passée en quelques années d'une unité de recherche à une véritable industrie. La surface du site a doublé et le nombre de monteurs et opérateurs a été multiplié par six. Bien que d'autres produits soient aujourd'hui en cours de développement et en cours d'industrialisation, un nouvel objectif s'impose désormais à TRIXELL : la maîtrise de ses processus de production afin de diminuer les coûts de production, le temps de cycle et d'améliorer ses rendements.

Spécificités	Contraintes
Briques technologiques et procédés associés nouveaux et évolutifs	Nombre important de problèmes à traiter Difficulté d'établir une liste exhaustive de causes possibles Difficulté d'accéder à l'information pertinente
Interaction de plusieurs métiers	Morcellement de l'information Pas de vision globale
Forte valeur des produits	Peu d'occurrences pour l'analyse Partie amont à l'expérimentation majeure Expérimentation limitée

Tableau V- 1 : Spécificités des produits nouveaux de haute technologie

3. VERS LA MAITRISE DE LA QUALITE EN PRODUCTION DES PRODUITS

3.1. INTRODUCTION

Cette maîtrise des processus de production comporte deux volets :

- La mise en place d'un système de production permettant de réduire la variabilité sous toutes ses formes (méthodologique, procédé, produit) afin de réduire l'occurrence de non performance.
- La mise en place d'une démarche de résolution de problèmes adaptée et adaptable pour l'entreprise et capable de répondre efficacement aux non-conformités constatées.

Si le travail théorique présenté dans cette thèse a principalement concerné la seconde partie, le travail dans l'entreprise a porté sur les deux volets du déploiement d'un système plus global cadrant les actions d'amélioration des non-performances. Par non-performance, nous entendons plusieurs éléments : qualité, coûts, délais, sécurité, environnement. Nous présenterons dans la partie 3.2 notre proposition : l'Automaîtrise [Pillet *et al.* 2003].

Cette approche montre qu'il y a trois aspects à prendre en compte : l'aspect formalisation, l'aspect progrès et l'aspect anti-recul. Nous verrons dans les parties 3.3, 3.4 et 3.5 comment peuvent être mis en œuvre ces trois aspects.

3.2. UNE ORGANISATION COHERENTE

L'automaîtrise est une approche globale des moyens de production permettant de garantir leur performance et de se protéger contre les défauts récurrents. Elle consiste à mettre en œuvre une analyse globale d'un processus afin de maîtriser les trois aspects formalisation, progrès, anti-recul permettant de donner la cohérence au niveau du poste de travail à l'ensemble des démarches de progrès mises en œuvre dans l'entreprise.

Sur la Figure V- 5 présentant la démarche de l'automaîtrise, nous retrouvons :

- La partie formalisation dont l'objectif est de prévenir l'apparition d'une non-performance. Cette partie part de l'analyse globale du processus pour déterminer les postes critiques et consiste à identifier de façon préventive tous les foyers de non-performance. Dans cette partie, les actions seront prises de manière à bloquer l'apparition des défaillances, et à donner l'autonomie à l'opérateur.
- La partie progrès qui doit être activée à chaque fois qu'on a identifié un problème qualité méritant une analyse plus approfondie et prouvant ainsi l'insuffisance du système actuel. Dans cette partie, on cherchera les causes de la défaillance et les actions correctives à mettre en place. Une réflexion sera aussi menée sur la généralisation possible des actions entreprises. Un système de gestion des résolutions de problèmes devra être mis en place.
- La partie anti-recul est réalisée par la mise en place d'un système d'indicateurs de performance fondé sur un audit de poste en automaîtrise.

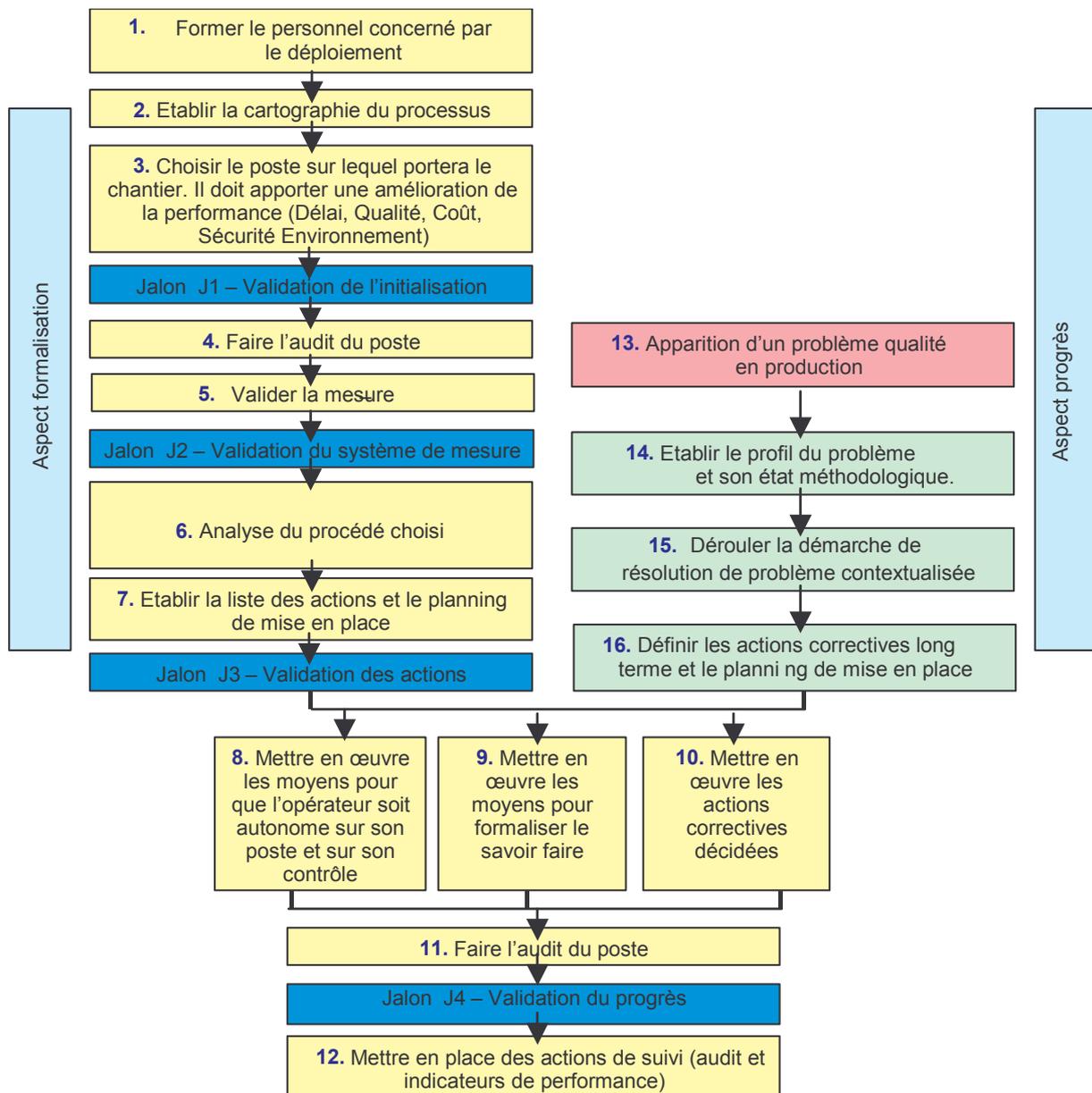


Figure V- 5 : Démarche de mise en oeuvre de l'automatisation

3.3. PARTIE FORMALISATION

Etudions de plus près la partie « Formalisation » de cette organisation. Cette partie est d'autant plus importante dans un contexte comme TRIXELL où la réelle phase de production est jeune. Elle consiste à formaliser un processus permettant de réduire au maximum la variabilité et de prévenir ainsi l'apparition des défauts.

Les chantiers, notamment les premiers, doivent être judicieusement choisis pour qu'un impact significatif puisse être apporté. A TRIXELL, chaque chantier est constitué d'un pilote, d'un technicien procédé et d'un opérateur.

Les étapes suivantes concernent ensuite le processus de mesure et le processus de production. Ces deux processus sont volontairement dissociés, chacun étant décomposé en 5 M (voir Tableau V- 2). Cette vision permet de ne pas sous-estimer l'importance du processus de mesure.

	Processus de production	Processus de Mesure
Matière	Matières utilisées	Mesurande
Moyen	Moyen de production	Moyen de mesure
Méthode	Procédure et paramètres retenus pour réaliser le produit	Procédure retenue pour faire la mesure
Main d'œuvre	Opérateur	Opérateur
Milieu	Environnement de production	Environnement de la mesure

Tableau V- 2 : Décomposition des processus de production et de mesure en 5M

La maîtrise du processus de mesure est un préalable : on ne sait rien faire si on ne sait pas mesurer. C'est pourquoi les étapes 4 et 5 concernent la mesure. Les actions clés pour maîtriser les processus de mesure peuvent être celles présentées dans le Tableau V- 3 (liste non exhaustive et non minimaliste).

Le jalon J2 consiste à vérifier que le juste nécessaire a été réalisé pour donner à l'opérateur l'autonomie pour les contrôles et les mesures. Cette première partie correspond plus ou moins à la mise en œuvre de l'autocontrôle en production au sens anglo-saxon du terme (Self Inspection).

Action	M concernés	Obligatoire
Mise en place d'une gestion des moyens de mesure	Moyen	Oui
Validation de la procédure de mesure par un test R&R	Méthode Mesurande Main d'œuvre Milieu	Oui
Rédaction d'un descriptif de la procédure de mesure retenue	Méthode Main d'œuvre Milieu Mesurande	Si nécessaire
Rédaction d'un plan de contrôle récapitulatif l'ensemble des contrôles à réaliser, les fréquences ...	Méthode	Oui

Tableau V- 3 : Actions de maîtrise du processus de Mesure

Pour la maîtrise des processus de production, la première étape est d'identifier les défaillances potentielles du poste de travail. L'AMDEC Processus (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité) peut être utilisée en validant les 5 M du processus. Pour chaque M on doit identifier les occurrences de pertes de performance potentielles, leur gravité, et les démarches à mettre en place pour éviter l'apparition ou en limiter les conséquences.

L'étude AMDEC permet entre autre de dimensionner correctement la documentation nécessaire sur le poste. Le danger consiste à mettre une documentation pléthorique difficile voire impossible à maintenir dans le temps. Pour illustrer ce point, prenons la fiche de poste que l'on retrouve dans de très nombreuses entreprises. Son but est de décrire les opérations qui sont réalisées sur le poste.

Pour définir le niveau de détail nécessaire dans la rédaction d'une fiche de poste, nous avons identifié les utilisations de cette fiche :

- Support de formation dans le cas d'un nouvel opérateur prenant le poste,
- Aide mémoire lorsqu'un opérateur refait une tâche après un certain délai,
- Support en cas d'audit de processus pour valider que l'on ne s'est pas éloigné du standard.

La rédaction d'une fiche de poste doit être réalisée dans cet objectif, on ne cherchera pas l'exhaustivité, mais plutôt une fonction d'aide mémoire et de support de formation. Les documentations peuvent parfois avantageusement prendre des formes informatiques ou multimédia.

Un exemple d'actions qui peuvent être mises en place est donné dans le Tableau V- 4.

Il est par contre indispensable que les pilotes des chantiers connaissent parfaitement ces méthodes et outils afin de dimensionner au juste nécessaire les actions à mettre en place. Des campagnes de formation notamment à la MSP sont actuellement en cours à TRIXELL pour les techniciens comme pour les opérateurs. Pour faciliter l'intégration de cette culture, une attention particulière s'est aussi portée sur le choix du logiciel de MSP afin qu'il corresponde exactement au mode de suivi des produits de haute technologie (ordre de fabrication unitaire) et qu'il soit le plus convivial possible.

Actions, méthodes et outils	M concernés
Rédaction d'une fiche de poste décrivant les étapes essentielles du processus	Méthode
Tableau de polyvalence des opérateurs permettant de savoir qui peut travailler où	Main d'œuvre
MSP (Maîtrise Statistique des Procédés)	Méthode Moyen
Suivi des capacités	Méthode Moyen
Mise en place de points zéro défaut (Poka Yoke)	Moyen Méthode Main d'œuvre
Utilisation de VOM (Visual Operations Management) qui consiste à utiliser intensivement des symboles plutôt que des mots	Main d'œuvre Méthode
Mise en place de check lists	Main d'œuvre Méthode
5S (méthode pour avoir un environnement de travail propre, rangé et ergonomique)	Milieu Main d'œuvre
Auto-maintenance	Moyen
Fiche de données de sécurité (FDS)	Main d'œuvre Milieu

Tableau V- 4 : Actions de maîtrise du processus de Production

3.4. PARTIE PROGRES

La première phase de la mise en place de l'automatisme est principalement fondée sur une approche préventive. Il n'est pas exclu que malgré un travail en profondeur de formalisation et de réduction des risques une défaillance intervienne.

Chaque fois qu'une défaillance intervient, c'est le signe que les actions mises en œuvre ne sont pas satisfaisantes. Il faut donc rentrer dans une phase dynamique de progrès. La mise en place de l'automatisme doit inclure une démarche rigoureuse de résolution de problèmes.

Pour cela les problèmes rencontrés sont traités suivant la démarche de résolution de problèmes contextualisée décrite dans le chapitre III. L'évaluation du profil du problème permet de choisir une instrumentation adéquate. L'établissement de l'état méthodologique permet d'identifier si une action corrective peut être immédiatement proposée ou si une analyse plus approfondie est requise.

Chaque résolution de problème doit être parfaitement documentée et archivée. Nous proposons un formulaire de gestion de résolution de problème en annexe IV. Ce formulaire a été particulièrement bien adopté dans l'entreprise. Il permet de centraliser en quelques pages toutes les informations nécessaires quant au travail réalisé.

Quant aux formations à la démarche de résolution de problèmes contextualisée, 45 personnes sont actuellement formées, aussi bien dans la direction technique que dans la direction industrielle. La Figure V- 6 montre l'évolution de l'appropriation de cette méthode par l'entreprise entre fin 2002 et fin 2004. La grille EMSE (Existence, Méthode, Systématisation, Excellence) élaborée pour cet indicateur est donnée en annexe V.

Un exemple d'illustration de traitement de l'aspect progrès sera exposé dans la partie 4.

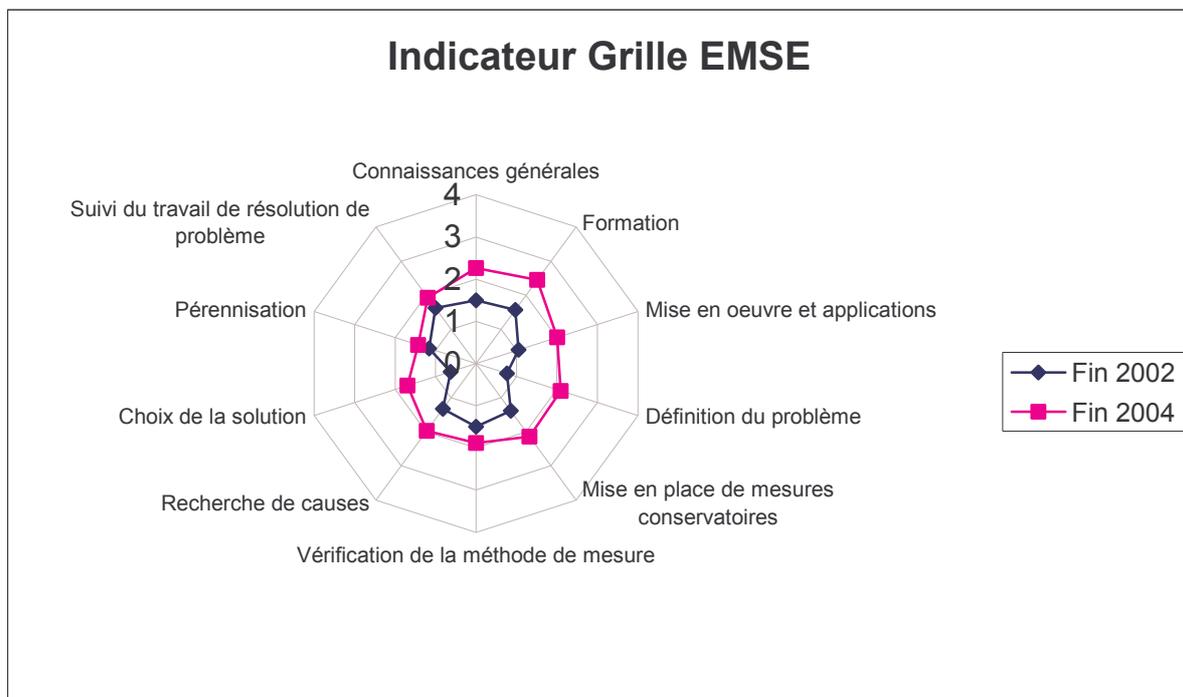


Figure V- 6 : Indicateur d'appropriation de la démarche de résolution de problèmes à TRIXELL

3.5. PARTIE ANTI-RECU

Cette dernière phase de l'automaîtrise a pour objectif de prémunir le poste contre un recul de performance.

Pour cela, chaque poste de production doit être suivi par un certain nombre d'indicateurs de performance, dont des exemples sont proposés dans le Tableau V- 5, permettant de mesurer la situation selon les cinq objectifs (Qualité, Délais, Coûts, Sécurité, Environnement). Certains de ces indicateurs sont suivis à partir des relevés (exemples : capacités, taux de réparations), d'autres sont suivis à partir d'audits (exemples : indicateur de propreté, rangement).

Données	Exemple d'indicateurs de performance
Qualité	Capacités Cp, Pp, Ppk, taux de réparations, taux de rebuts
Délais	TRS (Taux de rendement Synthétique), Taux de service
Coûts	TRS
Sécurité	Nombre d'accidents de travail, de jours d'arrêts
Environnement	Indicateur de propreté, rangement

Tableau V- 5 : Indicateurs de performance

3.6. CONCLUSION

Toutes les actions concernant la maîtrise de la qualité en production doivent être cohérentes et se répondre les unes aux autres.

La définition d'un cadre global prenant en compte les aspects de formalisation, de progrès et d'anti-recul permet d'assurer cette cohérence :

- Au niveau de la direction pour l'affectation des ressources et le choix des sujets
- Au niveau des techniciens et des opérateurs pour la compréhension de l'articulation des méthodes déployées.

Le déploiement d'une telle structure demande de prendre en compte plusieurs dimensions :

- Dimension technique : les méthodes et outils (conceptuels ou logiciels) doivent être adaptés aux spécificités des produits nouveaux de haute technologie.
- Dimension organisationnelle : l'organisation même de l'entreprise étant en pleine mutation, les rôles de chacun doivent être formalisés pour éviter les malentendus mais modulables pour suivre la dynamique de l'organisation.
- Dimension socioculturelle : les méthodes et outils (conceptuels et logiciels) doivent être le plus convivial possible et adaptés à la culture des personnes qui sont plutôt d'une nature créative dans ce type d'entreprise.

4. CAS D'APPLICATION DE LA DEMARCHE DE RESOLUTION DE PROBLEME CONTEXTUALISEE

4.1. INTRODUCTION

Nous nous proposons d'illustrer dans cette partie la phase progrès de la maîtrise des processus par une démarche de résolution d'un problème conduite selon la méthode proposée dans le chapitre III.

Un des objectifs de rendement pour l'année 2005 était de réduire de x % le taux de rebut ESD sur le produit W pour le mois de juillet.

Un ESD (Electro Static Discharge) est une décharge électrostatique entre deux objets proches avec des potentiels électriques différents. C'est une source de défaut et de non-fiabilité majeure rencontrée dans toute l'industrie électronique et micro-électronique. Le transfert de charges entre les deux éléments occasionne des courants électriques intenses sur des durées très brèves qui peuvent soit modifier les caractéristiques électroniques des circuits intégrés, soit les dégrader de manière irréversible, soit créer des défauts latents qui altèrent leur fiabilité. Certains composants pouvant être sensibles à des décharges de quelques centaines de volts, le simple fait qu'un opérateur les manipule sans précautions peut suffire à créer ce type de défaut.

Pour protéger au maximum les produits de ce type de défauts, plusieurs protections existent en standard comme la mise en place de flux ionisants pour dissiper les charges ou la mise à la masse des appareils.

Les rebuts ESD pour le produit W sont de trois catégories : ESD A , ESD B et ESD C .

En terme de perte de rendement, les ESD B et ESD C sont les plus critiques. Le travail doit donc se concentrer sur ces deux défauts.

Nous verrons en 4.2 quelle est la démarche à suivre suite à l'évaluation de l'état méthodologique de la situation et le profil du problème retenu.

Dans les parties suivantes, de 4.3 à 4.5, nous déroulerons la démarche de résolution de problèmes construite précédemment.

Pour la compréhension de ce cas et du vocabulaire utilisé, on peut résumer brièvement la composition du produit W (détecteur). Il est constitué de quatre dalles (matrices de photodiodes) auxquelles est ensuite ajouté un scintillateur (l'ensemble est alors appelé « panneau »), puis la partie électronique est assemblée pour obtenir le détecteur.

4.2. CONSTRUCTION DE LA DEMARCHE A SUIVRE

4.2.1. Etablissement de l'état méthodologique

L'établissement de l'état méthodologique est présenté dans la Figure V-1. Les phases et étapes grisées correspondent aux parties déjà réalisées.

Pour la phase Reconnaître, les étapes Séparer, Trier et Contenir ont déjà été réalisées :

- Séparer : Il y a trois types d'ESD différents : les ESD A, ESD B et ESD C.
- Trier : Les deux défauts les plus critiques en terme de perte de rendement sont : les ESD B et les ESD C.
- Contenir : Pour les ESD A, une action pour contenir le problème est déjà en place, la localisation de l'apparition du défaut étant connue : un contrôle à 100% des produits juste après l'étape identifiée est en cours.

Pour la phase Mesurer, les ESD étant un défaut connu dans ce type d'entreprise, de nombreux moyens de mesure sont disponibles et des experts de l'entreprise savent les interpréter.

La démarche méthodologique à suivre est donc composée seulement des phases restantes, comme le montre la Figure V-2 : Choisir, Définir, Décrire et Analyser.

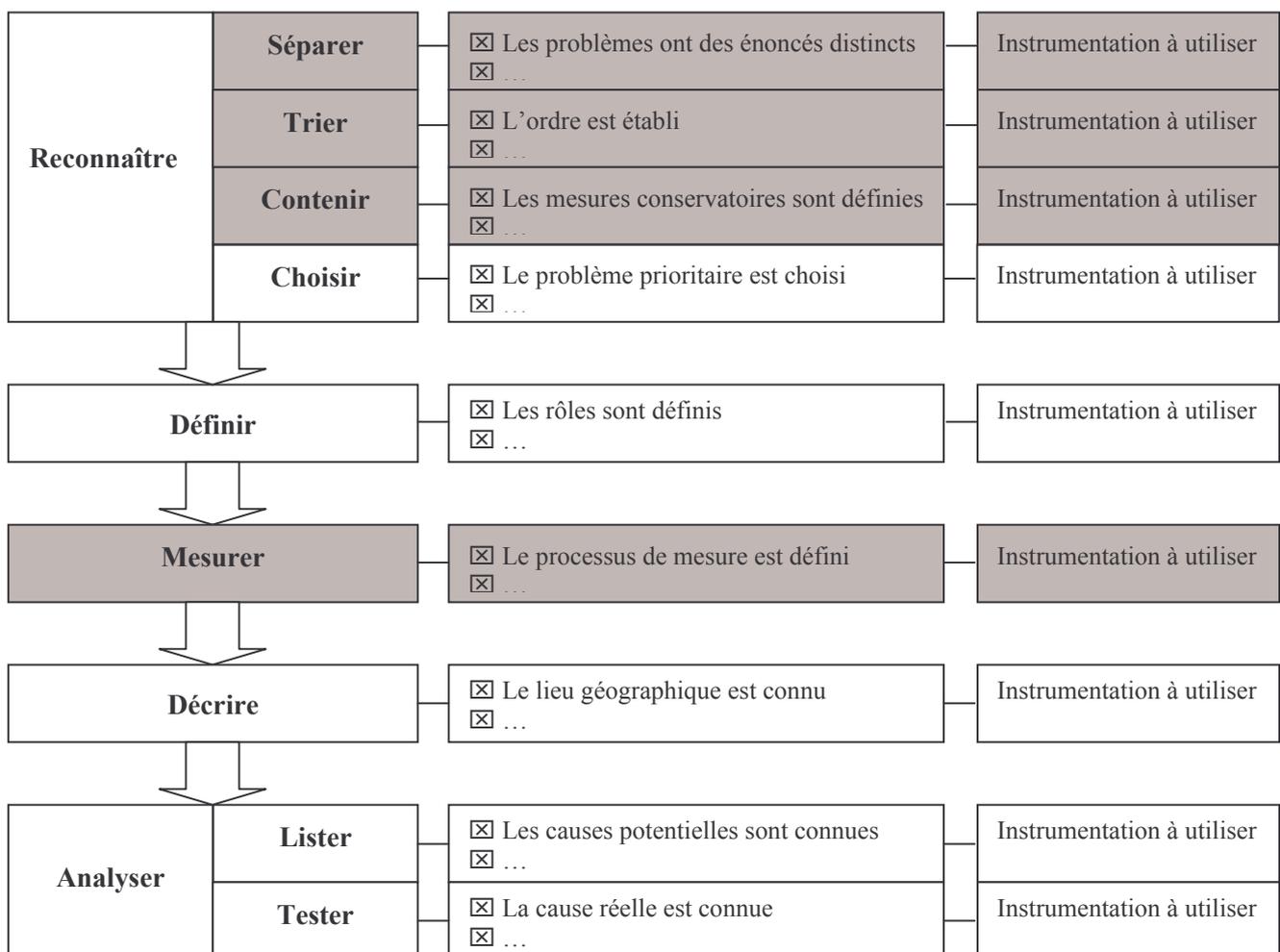


Figure V-1 : Evaluation de l'état méthodologique du problème ESD B

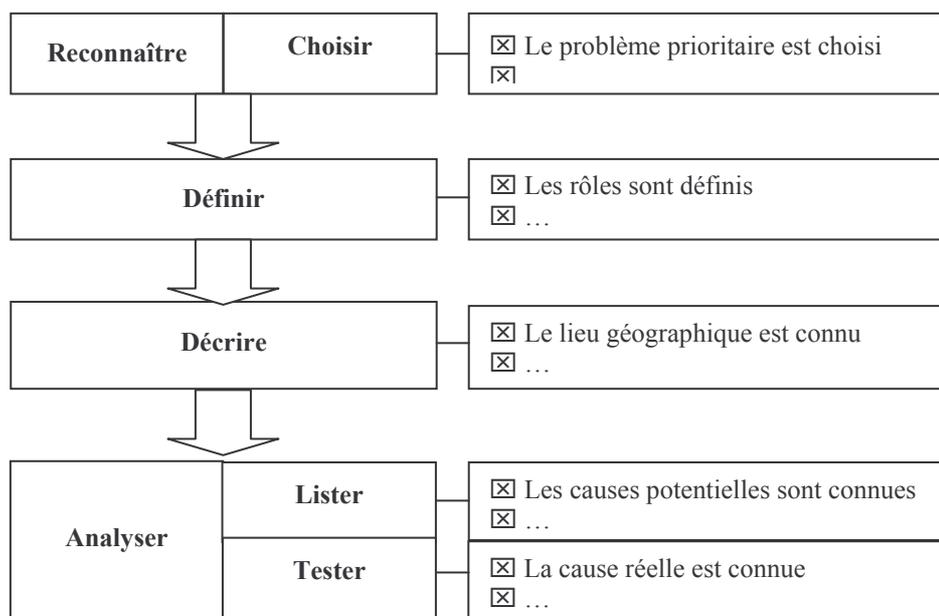


Figure V-2 : Etapes à suivre pour résoudre le problème ESD B

4.2.2. Reconnaître

Afin de clôturer la phase Reconnaître, il reste donc à choisir le problème prioritaire sur lequel travailler entre les ESD B et les ESD C. Pour ce faire, le formulaire de filtrage présenté dans le Tableau V- 6 est utilisé.

Critères pour la résolution de problèmes	Barème	Note pour ESD B	Note pour ESD C
Rebuts constatés			
- rebuts produits finis	10		
- rebuts composants	1 à 9	8	8
- pas de rebut	0		
Période approximative écoulée			
- une demi-journée	4		
- un jour	3		
- deux jours	1	0	0
Identification des causes potentielles			
- causes clairement identifiées	10		
- type de causes identifié	7		
- grande famille de causes identifiée	5	5	5
Mode de manifestation			
- localisation géographique identifiée	2		
- localisation sur le produit identifiée	2		2
- apparition dans le temps identifiée	2	2	
- liste de tous les produits concernés disponible	2	2	
Nom ou rapport d'un témoin			
- témoin de la scène de l'évènement	10	10	10
Preuve technique			
- mode de création physique du défaut identifié	5	5	0
Total		32	25

Tableau V- 6 : Formulaire de filtrage pour les ESD B et ESD C

Détaillons ces deux notations :

- Les deux types de défauts créent des rebuts du sous-ensemble le plus cher du détecteur (panneau). La note pour les « rebuts constatés » est donc fixée à 8.
- Les derniers rebuts datant d'une semaine et aucune investigation sur les lieux n'ayant été menée jusqu'à présent, la note pour la « période approximative écoulée » est de 0.
- La grande famille de défauts est connue (elle est même incluse dans l'intitulé des deux défauts) : ce sont les ESD. La note pour l'identification des causes potentielles est donc de 5.
- Concernant le mode de manifestation, pour les ESD *B*, un premier travail avait été réalisé l'année précédente sur ce défaut. Ce travail consistait à recenser tous les cas avérés, à mettre en place un suivi de ce défaut dans le temps et analyser physiquement ce défaut. La note obtenue pour ce défaut est donc de 4. Quant aux ESD *C*, seule la localisation sur le produit est connue ; la note associée est donc de 2.
- Les opérateurs de production voient les deux défauts sur les produits. La note pour la présence d'un témoin est donc de 10.
- Quant au mode de création physique de défaut, il n'est connu que pour les ESD *B* (identifié lors du précédent travail). La note est donc de 5 pour ce défaut et de 0 pour les ESD *C*.

La comparaison des deux totaux (32 pour les ESD *B* et 25 pour les ESD *C*) a donc orienté notre choix vers les ESD *B*.

4.2.3. Etablissement du profil du problème

Le problème prioritaire à traiter étant choisi – ESD *B* –, on peut maintenant établir le profil de ce problème selon les critères définis dans le chapitre III. Le Tableau V- 7 présente cette évaluation.

Illustrons cette évaluation par l'explication de la notation de trois critères :

- **Nombre de causes potentielles.** Bien que la famille de causes soit connue (ESD), il existe de très nombreuses étapes de production pour lesquelles cette famille de défauts peut se produire. Et dans chacune des étapes, plusieurs manipulations peuvent être incriminées. Il n'est donc pas possible de donner une liste de causes exhaustive dans ce cas.
- **Possibilité d'expérimentation.** Ce défaut apparaissant sur le sous-ensemble le plus cher du détecteur, les possibilités d'expérimentation sont extrêmement limitées, voir quasi-nulles.
- **Nombre des autres problèmes d'enjeux similaires.** Concernant les problèmes de type ESD, nous avons vu qu'il y en a un seul d'enjeux similaires : les ESD *C*. Mais les ESD ne sont malheureusement (!) pas les seuls problèmes ... Il existe d'autres catégories de défauts d'enjeux similaires qui seront aussi à traiter.

Critères	Questions	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Nombre d'occurrences du défaut	Combien d'occurrences du défaut peut-on dénombrer ?	>10	3 à 10	1 à 3
Nombre de causes potentielles	Les causes potentielles sont-elles nombreuses ?	Peu nombreuses	Nombreuses	Impossible à déterminer
Possibilité de décomposition du produit	Le produit est-il décomposable ?	Oui, en majeure partie	Oui, en sous-ensemble	Non
Quantité de données disponibles	De quelle quantité d'information dispose-t-on ou peut-on disposer par produit défectueux ?	Nombreuses informations déjà disponibles	Informations potentiellement disponibles	Peu d'informations
Compétences en statistiques	Les personnes en charge de la résolution ont-elles des compétences en statistiques ?	Statistiques avancées	Statistiques de base	Aucune
Degré de connaissance technique	Quel est le degré de connaissance technique de ce problème ?	Fort	Moyen	Faible
Possibilité d'expérimentation	Peut-on envisager de faire des essais ?	Oui	Limité	Très peu
Nombre des autres problèmes d'enjeux similaires	Y a t il d'autres problèmes que celui-ci dans le même ordre d'enjeu ?	1 à 2	2 à 5	> 5
Possibilité de mesure physique continue	Peut-on envisager une mesure continue du défaut ?	Existe déjà	Envisageable	Non évidente
Possibilité d'analyse physique	Peut-on faire des analyses physiques du défaut ?	Déjà disponible	Envisageable	Non

Tableau V- 7 : Evaluation du profil du problème ESD B

4.2.4. Construction de la structure de résolution de problème

Le profil du problème ayant été établi, il est alors possible de déterminer l'instrumentation à utiliser pour chacune des phases. La Figure V- 7 présente l'instrumentation retenue.

L'évaluation du profil du problème a engendré de nombreuses modifications par rapport à la structure de base (Six Sigma) en terme d'instrumentation. Par exemple, si nous reprenons les trois critères évoqués dans le paragraphe précédent :

- **Causes potentielles difficiles à déterminer.** Cette contrainte engendre un besoin d'approfondir la description du problème et le relevé d'informations qui se matérialise par des outils comme le « Est N'est pas enrichi ». Elle engendre aussi la nécessité de « faire parler » la physique, les produits, périodes et lieux avec et sans défaut, qui se traduit par des outils comme l'AMDEC ciblée.

- **Possibilité d'expérimentation extrêmement réduite.** Cette contrainte impose que le test des causes soit réalisé « sur papier », c'est à dire que les causes potentielles soient filtrées par la description.
- **Nombre des autres problèmes d'enjeux similaires assez important.** Cette contrainte limite fortement la monopolisation d'un groupe entier de travail pour toute la résolution. Une organisation avec deux pilotes, des experts, des témoins et des appréciateurs est plus adaptée.

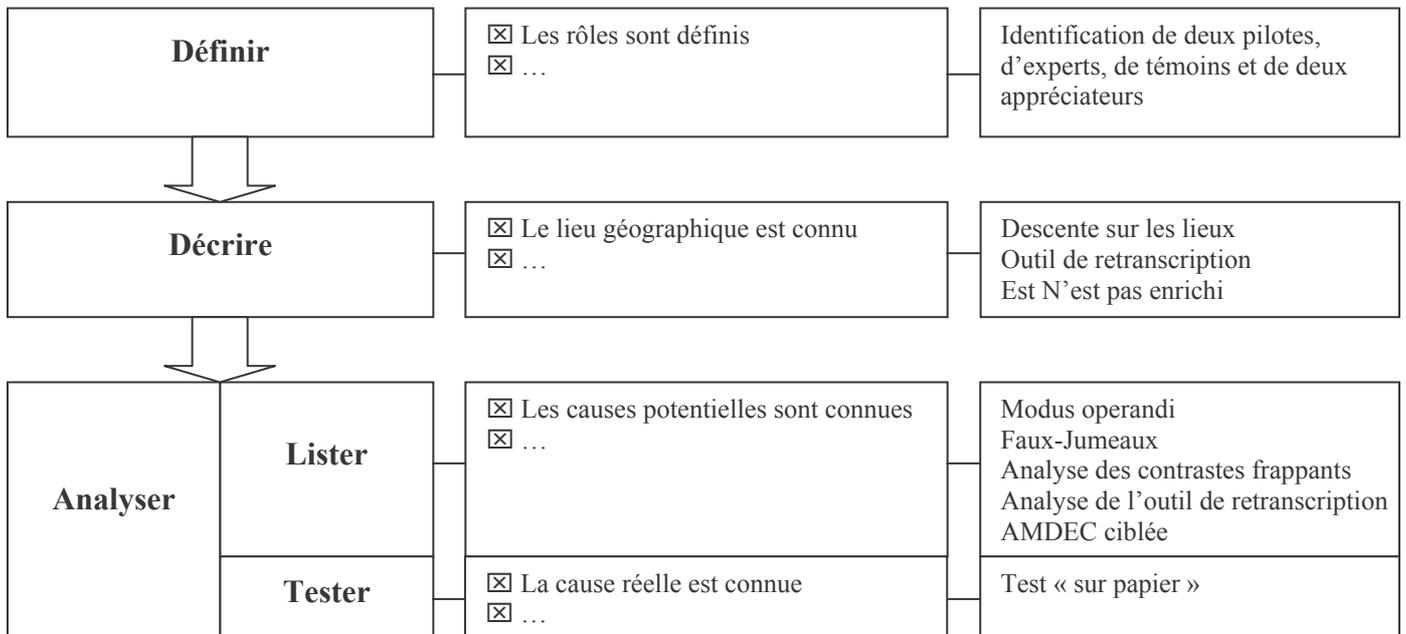


Figure V- 7 : Démarche à suivre pour résoudre le problème ESD B

4.3. DEFINIR ET DECRIRE

4.3.1. Définition des rôles

Pour résoudre le problème des ESD B, les rôles suivants sont définis :

- Deux pilotes : la responsable de l'amélioration des rendements et la responsable des démarches de progrès
- Les témoins : les opérateurs en salle blanche
- Quatre experts : deux opérateurs expérimentés, un technicien procédés et un expert ESD
- Deux appréciateurs : la responsable du pilotage de production et le directeur industriel

Dès le commencement du travail, les pilotes vont sur le terrain (en salle blanche) pour faire un premier repérage des lieux, informer les opérateurs qu'ils vont être mis à contribution pour étudier ce défaut et les interrogent une première fois.

4.3.2. Décrire

Lors du commencement de ce travail, l'outil de retranscription aurait dû être utilisé mais ce ne fut pas le cas. L'étape de description commence donc directement par un « Est n'est pas enrichi »,

présenté dans le Tableau V- 8, rempli grâce à la première interrogation des opérateurs. Les parties grisées correspondent aux questions pour lesquelles a été requis un outil spécifique pour apporter une réponse.

EST	CF	Pourrait être, mais N'EST PAS	
Quel est l'objet ? Produit <i>W</i> Et plus précisément ? Tous les types de produits <i>W</i> (il en existe deux types)	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Quels sont les autres objets similaires qui pourraient aussi être défectueux mais qui ne le sont pas ? Aucun Un seul type de produits <i>W</i>	Q U O I ?
Quel est le défaut ? ESD <i>B</i> Et plus précisément ? <i>Information masquée</i>	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Quels sont les autres défauts que l'objet pourrait avoir, mais qu'il n'a pas ? ESD <i>C</i> , ESD <i>A</i>	
Où, géographiquement, observe-t-on l'objet défectueux ? Trixiell. Chez les fournisseurs. Et plus précisément ?	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	A quel autre endroit pourrait-on l'observer mais ne l'observe-t-on pas ? Chez les clients.	O U ?
Avant Test P1	X	Après Test P1	
Où, sur l'objet, observe-t-on le défaut ? Sur les colonnes Et plus précisément ?	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	A quel autre endroit de l'objet pourrait-on l'observer mais ne l'observe-t-on pas ? Sur les lignes	
Aux extrémités des dalles essentiellement, sur la partie haute du panneau.	X	Au milieu des dalles, aléatoirement en haut ou en bas du panneau.	
Quand, historiquement, a-t-on enregistré ce problème pour la première fois ? Semaine 3 de 2003 Et plus précisément ?	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	A quel autre moment aurait-on pu l'enregistrer, mais ne l'a-t-on pas enregistré ? Pas de suivi antérieur	Q U A N D ?
Quelle est sa fréquence d'apparition ? Fond	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Quelle autre fréquence aurait-on pu avoir et n'a-t-on pas eue ? Crise	
Quand, dans le cycle de vie de l'objet, ce défaut apparaît-il ? Etapes précédant le test P1 Et plus précisément ? Entre l'entrée des dalles et le test P1	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	A quelle autres étapes de la vie de l'objet le défaut aurait-il pu apparaître et n'apparaît-il pas ? Etapes suivant le test P1	
Combien y a-t-il d'objets défectueux ? $x\%$ de pertes en 2004 = n panneaux	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Combien d'objets pourraient être défectueux, mais ne le sont pas ? Ni + ni -	C O M B I E N ?
Quelle est la dimension (taille, nombre ...) du défaut ? <i>Information masquée</i>	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Quelles autres dimensions (taille, nombre ...) pourrait-on constater?	
Quelle est la tendance ? Stable	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	A quelles tendances pourrait-on s'attendre, qui ne sont pas observées ? Augmentation ou diminution	

Tableau V- 8 : Est N'est pas du problème des ESD *B*

Montrons comment les outils associés à cette structure ont permis d'apporter les réponses sur fond grisé du tableau.

Question « Où, géographiquement, observe-t-on l'objet défectueux ? »

Pour répondre à cette question, un diagramme de processus a été utilisé. Celui-ci est présenté dans la Figure V- 8.

Le processus se décompose en trois grandes phases :

- L1 : Préparation des dalles (matrices de photodiodes)
- L2 : Assemblage de quatre dalles pour créer un premier sous-ensemble
- L3 : Couplage de ce sous-ensemble avec un scintillateur pour obtenir un panneau

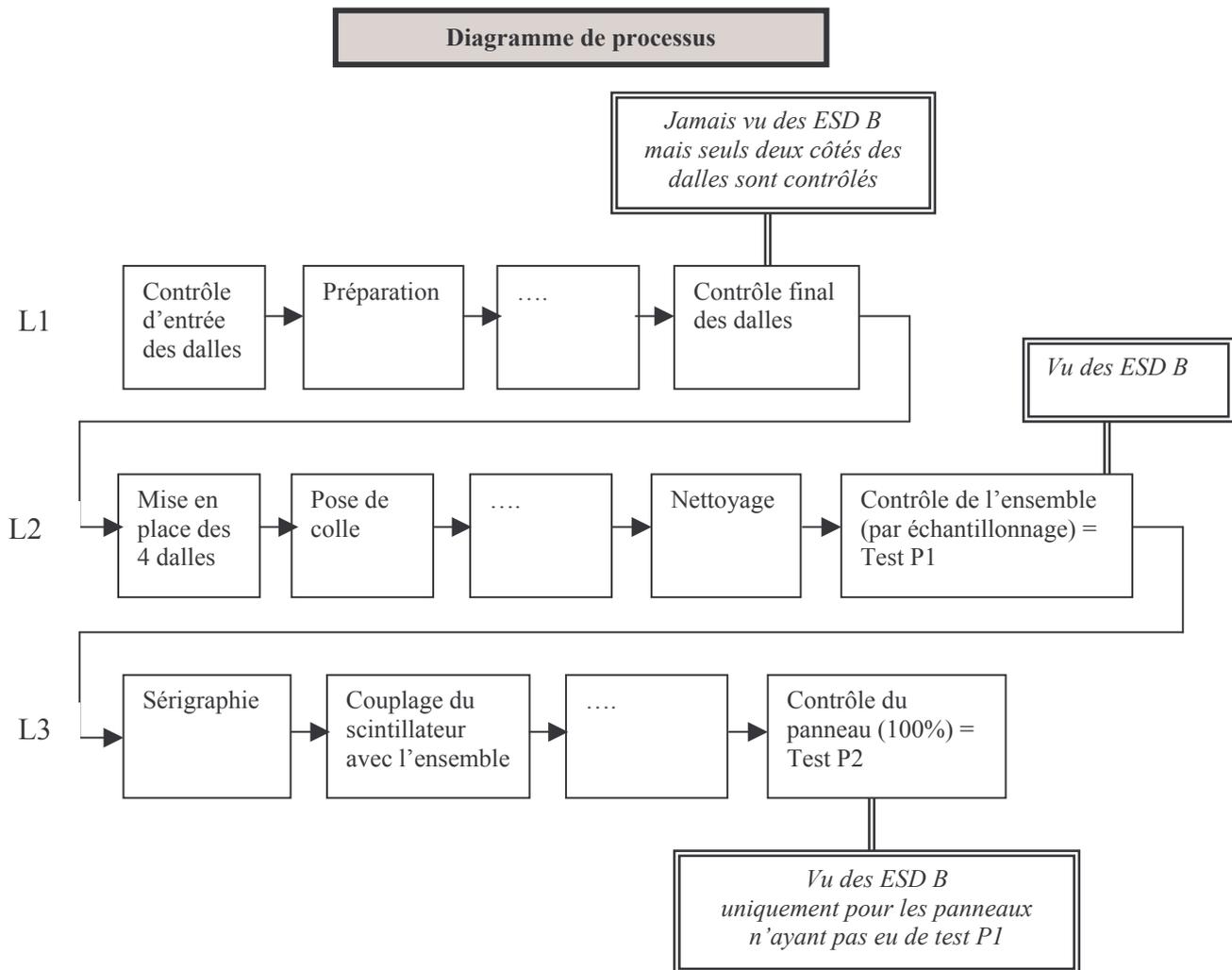


Figure V- 8 : Diagramme de processus pour le problème ESD B

L'analyse de ce diagramme de processus est la suivante :

- Pour L1 : le contrôle final des dalles n'est pas effectué sur tous les côtés. On ne peut donc pas éliminer les étapes précédentes même si aucun ESD B n'a été vu à ce contrôle.
- Pour L2 : plusieurs cas d'ESD B ont été décelés au contrôle de l'ensemble, test P1 (effectué par échantillonnage). Le défaut peut donc se créer dans toutes les étapes précédentes.
- Pour L3 : tous les panneaux présentant un ESD B à ce contrôle n'avaient pas eu de test P1. Il n'y a aucun cas pour lequel le défaut a été vu en test P2 mais n'a pas été vu en test P1. Toutes les étapes entre le test P1 et le test P2 peuvent donc être éliminées de la liste des « suspects ».

Question « Où, sur l'objet, observe-t-on le défaut ? »

La première réponse à cette question a été « la localisation est aléatoire ». Pour vérifier cet a priori, l'outil Graphique de concentration a été utilisé comme le montre la Figure V- 9. Les traits représentent l'ensemble des ESD *B* rencontrés à ce jour selon leur localisation.

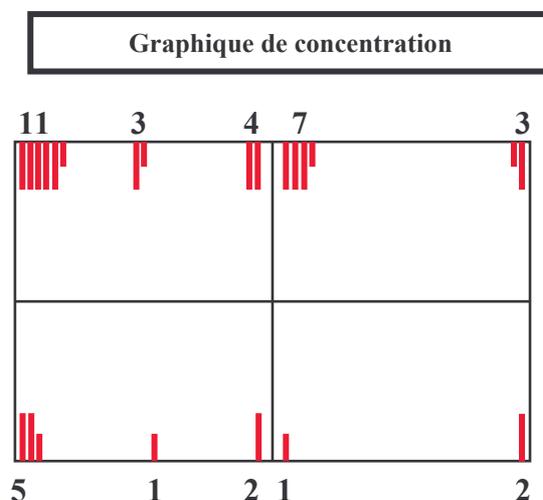


Figure V- 9 : Graphique de concentration du sous-ensemble pour le problème ESD *B*

L'analyse de ce graphique nous montre que la répartition des défauts n'est pas si aléatoire !! Les défauts sont plutôt localisés sur les extrémités des dalles et plutôt sur le haut du sous-ensemble. Cette localisation très particulière nous apporte un indice très précieux quant à la recherche des causes futures. Nous verrons par la suite que, sans cette vérification, la recherche de causes potentielles aurait été beaucoup plus délicate et plus longue.

4.4. ANALYSER

4.4.1. Lister

Les experts sont réunis pour lister les causes potentielles. Les informations dont ils disposent sont celles du « Est N'est pas enrichi ». Les contrastes frappants que l'on peut relever sont :

- La localisation géographique du défaut : avant le test P1
- La localisation du défaut sur l'objet : plutôt en haut du panneau et aux extrémités des dalles.

Une AMDEC est donc menée, ciblée sur ces particularités. Chaque expert note la probabilité d'occurrence de ce défaut pour chaque étape du procédé avant le test P1 connaissant la localisation particulière sur l'objet. Les étapes critiques sont les suivantes :

- Préparation de la dalle
- Retrait de la protection de la dalle
- Mise en place des dalles
- Pose de colle sur les dalles
- Rectification des débordements de colle sur le sous-ensemble
- Nettoyage du sous-ensemble

4.4.2. Tester

L'étape suivante consiste à tester ces étapes relevées comme critiques par rapport à la description du problème. Le Tableau V- 9 présente ce test. Pour chaque étape critique sont notés :

- Le point critique de l'étape pouvant potentiellement créer le défaut
- Le niveau d'attention requis par l'opérateur pour réaliser cette étape : est-elle « opérateur dépendant » ? La note est de 1 si le niveau d'attention requis est bas (effectué par une machine par exemple) et de 2 s'il est élevé.
- La relation avec le défaut pour chaque dimension de la description. Si le défaut n'est pas en contradiction avec la description, la note est de 1, sinon elle est de 0 (pour être éliminatoire lors de la multiplication finale).
- L'indice de suspicion, note finale. Il est obtenu par multiplication du niveau d'attention requis et par chaque note de la relation avec le défaut.

Etapes critiques	Points critiques	Niveau d'attention requis	Relation avec le défaut	Indice de suspicion
Préparation	Prise de la dalle au centre par un outil aspirant	1	QUOI : 1 OU : 0 QUAND : 1 COMBIEN : 1	0
Retrait protection	Pose des doigts sur les coins des dalles toujours aux mêmes endroits	2	QUOI : 1 OU : 0 QUAND : 1 COMBIEN : 1	0
Mise en place des dalles	Pose des dalles sur support différente pour chacune des 4 dalles. Position des pions de calage aux extrémités de chaque dalle. Flux ionisants décalés côté bas du sous-ensemble	2	QUOI : 1 OU : 1 QUAND : 1 COMBIEN : 1	2
Pose de colle	Pose différente selon le type de produit <i>W</i> Pose de la colle sur chaque dalle avant leur assemblage pour le produit <i>W</i> de type <i>I</i> Pose de la colle sur les dalles après leur alignement	2	QUOI : 0 OU : 0 QUAND : 1 COMBIEN : 1	0
Rectification des débordements de colle	Extraction manuelle du surplus de colle avec un outil, pour chaque côté du sous-ensemble	2	QUOI : 1 OU : 0 QUAND : 1 COMBIEN : 1	0
Nettoyage en machine	Maintien de la dalle par des taquets en haut du sous-ensemble	1	QUOI : 1 OU : 0 QUAND : 1 COMBIEN : 1	0

Tableau V- 9 : Test des causes potentielles pour le cas des ESD B

Pour la préparation, la localisation de la prise de la dalle par l'outil (au centre) ne correspond pas à la localisation de défaut sur le sous-ensemble (au bord).

Pour le retrait de la protection, les dalles sont toutes manipulées de la même façon. La dissymétrie haut et bas du sous-ensemble n'est donc pas expliquée.

Pour la mise en place des dalles pour assemblage, les dalles sont posées toutes de manière différente sur leurs supports. De plus, les flux ionisants (censés diminuer les risques d'ESD) sont décalés vers

le bas du sous-ensemble (justement le côté où il y a le moins de défaut). Cette étape reste donc critique pour notre problème.

La pose de la colle est différente selon le type de produits W en terme de procédé de pose et de situation dans le processus de fabrication. Or, le problème d'ESD B est identique pour tous les types de produits W en terme de quantité et de localisation sur l'objet. Cette étape est donc éliminée.

Le procédé de rectification des débordements de colle est identique pour chaque côté du sous-ensemble. La dissymétrie n'est donc pas expliquée.

Quant au nettoyage en machine du sous-ensemble, la position des taquets de maintien ne correspond pas à la localisation des défauts.

Le seul point critique restant en course est donc la mise en place des dalles sur supports. Ce point a donc été plus profondément analysé par une deuxième interrogation des opérateurs. Il s'avère justement que les mises à la masse de ces supports se déconnectaient très fréquemment. Après soumission de ce point critique et discussion avec le technicien procédé de cette ligne de fabrication et le responsable de la maintenance (experts), le scénario de création du défaut a pu être établi.

Scénario :

L'opérateur pose une dalle sur un support dont le fil de masse est débranché. Au rapprochement de la dalle et des pions de calage du support, une décharge électrique se crée. La probabilité d'occurrence de cette décharge est d'autant plus importante sur la partie haute du sous-ensemble que les flux ionisants sont décalés vers la partie basse du sous-ensemble.

4.5. CONCLUSION

Une amélioration technologique comprenant le développement de nouveaux supports dont la matière est intrinsèquement dissipatrice et l'orientation différente des flux ionisants a permis de supprimer totalement les rebuts en fabrication pour ce défaut.

Ce travail a permis de mettre en lumière les bonnes pratiques à retenir pour la prévention des risques ESD lors de la mise en production d'un nouvel équipement. Cet apprentissage a pu être dupliqué aux autres équipements similaires.

L'apport principal de cette méthode pour ce cas-ci a été la systématisation d'outils adéquats pour vérifier les a priori de départ et permettre d'identifier ainsi de vraies particularités intéressantes pour la recherche des causes. L'investigation sur le terrain et la discussion avec les « témoins » ont aussi permis d'accélérer la validation des causes.

La principale difficulté a été la conduite de l'AMDEC ciblée sur la localisation particulière du défaut sur le produit. Même si le schéma de la Figure V- 9 a été clairement affiché pendant cette AMDEC, les personnes ont eu des difficultés à noter les étapes par rapport à cette localisation précise plutôt que par rapport à un risque ESD plus général. Il faudra donc dans le futur proposer un format plus approprié et plus guidé.

5. CAS D'APPLICATION INDUSTRIELLE DES PLANS DICHOTOMIQUES

5.1. INTRODUCTION

Dans la partie précédente, la valeur du sous-ensemble ayant le défaut était telle, que quasiment aucun essai n'était possible. Prenons donc un autre exemple pour illustrer la technique des plans dichotomiques.

Au cours du dernier trimestre 2004, une étude a été menée pour déterminer les facteurs influents sur la température interne du détecteur. Cette étude avait pour objectif de déterminer les recommandations pour l'utilisation du produit dans les systèmes de radiologie pour abaisser au maximum la température interne du détecteur.

La liste des facteurs retenus a été établie à partir d'observations de systèmes clients dont la température interne du détecteur présentait des différences. Ils sont les suivants :

- Ecart entre la température extérieure et la température du liquide de refroidissement
- Température extérieure
- Capotage (présence ou absence)
- Type de montage : posé sur un support isolé métalliquement ou vissé sur une plaque métallique
- Débit du refroidisseur
- Mode de fonctionnement : fréquence image plus ou moins rapide
- Niveau d'alimentation
- Type d'alimentation (fabricants différents)

Ces facteurs ont ensuite été classés par ordre d'influence a priori.

Factor	Level 1	Level 2	Unit	Expected influence
delta_T	-5	0	°C	1
T_ext	25	35	°C	2
Cover	no	yes	N/A	3
Chuck	yes	no	N/A	4
Coolant_flow_rate	high (1,8)	low (0,6)	lit/mn	5
Image_frequency	0,1	60	Hz	6
V_supply	28	20	V	7
Supply	Fab 1.	Fab 2.	N/A	8

Tableau V- 10 : Facteurs retenus pour l'étude de la température interne du détecteur

5.2. TRAITEMENT DU CAS

5.2.1. Essais réalisés

Le Tableau V- 11 présente la séquence des essais réalisés pour étudier ces huit facteurs.

		Supply	V supply	Image frequenc y	Coolant flow rate	Chuck	Cover	T ext	Delta T	T°
	L16 col. ⇒	1	3	5	7	9	11	13	15	
Run number ↓	L16 row ↓									
Run 1	1	Fab.1	28	0,1	high	yes	no	25	-5	41,0
Run 2	9	Fab.2	20	60	low	no	yes	35	0	54,3
Run 3	2	Fab.1	28	0,1	high	no	yes	35	0	53,0
Run 4	10	Fab.2	20	60	low	yes	no	25	-5	42,0
Run 5	3	Fab.1	28	60	low	yes	no	35	0	52,0
Run 6	11	Fab.2	20	0,1	high	no	yes	25	-5	43,0
Run 7	5	Fab.1	20	0,1	low	yes	yes	25	0	45,5
Run 8	13	Fab.2	28	60	high	no	no	35	-5	51,0
	Average									47,9

Tableau V- 11 : Essais réalisés pour étudier l'influence des huit facteurs sur la température interne du détecteur

5.2.2. Analyse

Examinons l'analyse de chaque essai en détail.

Analyse des essais 1 et 2

Pour valider la différence significative entre ces deux réponses, on utilise le test z avec un écart type de 0,95 (écart type expérimental).

On obtient la fonction discriminante suivante : $z_0 = 14 > 1,96$ (z limite pour un risque alpha de 0,05). L'écart est donc significatif.

Analyse de l'essai 3

Pour valider le premier découpage A1 / B1, on applique le test de Dixon aux trois premiers essais :

$$y_1=41 < y_2 = 53 < y_3 = 54,3$$

$$R = (53 - 41) / (54,3 - 41) = 0,902 > 0,886 \rightarrow \text{pour tester la réponse } y_1$$

$$R = (54,3 - 53) / (54,3 - 41) = 0,098 < 0,886 \rightarrow \text{pour tester la réponse } y_3$$

La réponse y_1 peut être considérée comme « aberrante » par rapport à y_2 et y_3 . On peut donc valider le découpage A1 / B1 et conclure que les facteurs influents sont situés dans le groupe B1. Les facteurs type d'alimentation, niveau d'alimentation, mode de fonctionnement et débit du refroidisseur peuvent donc être éliminés.

Analyse de l'essai 4

L'analyse de l'essai 4 n'a pour objectif que de confirmer la validation précédente du premier découpage A1 / B1 par le test t. La Figure V- 10 nous montre sur ce découpage est bien correct : seul le groupe B1 est donc influent.

Découpage		Analyse			
41	n	2	n	2	
42	moy	41,5	moy	53,65	
54,3	sigma	0,707	sigma	0,919	
53	sigma intra		0,820		
	t calculé		14,816		
	p associé		0,005		
	Groupe valide				

Figure V- 10 : Test t pour le découpage A1 / B1 (essai 4)

Analyse des essais 5 et 6

L'analyse des essais 5 et 6 a pour objectif de valider ou d'invalider le découpage C2 / D2. La Figure V- 11 nous montre que l'agrégation de l'essai 5 est valide pour un seul point d'attache (représenté par les essais 2 et 3) et celle de l'essai 6 pour l'autre point d'attache (représenté par les essais 1 et 4).

Le découpage C2 / D2 est donc validé, seul le groupe D2 est influent. Les facteurs type de montage et capotage sont éliminés.

Découpage		Analyse			
41	n	3	n	2	
42	moy	45	moy	53,65	
52	sigma	6,083	sigma	0,919	
54,3	sigma intra		4,560		
53	t calculé		1,897		
	p associé		0,154		
	Groupe non valide				

Découpage		Analyse			
41	n	2	n	3	
42	moy	41,5	moy	53,1	
52	sigma	0,707	sigma	1,153	
54,3	sigma intra		0,937		
53	t calculé		12,381		
	p associé		0,001		
	Groupe valide				

Découpage		Analyse			
41	n	3	n	2	
42	moy	42	moy	53,65	
43	sigma	1	sigma	0,919	
54,3	sigma intra		0,889		
53	t calculé		13,105		
	p associé		0,001		
	Groupe valide				

Découpage		Analyse			
41	n	2	n	3	
42	moy	41,5	moy	50,1	
43	sigma	0,707	sigma	6,183	
54,3	sigma intra		4,624		
53	t calculé		1,860		
	p associé		0,160		
	Groupe non valide				

Figure V- 11 : Test t pour le découpage C2 / D2 (essais 5 et 6)

Analyse des essais 7 et 8

L'analyse des essais 7 et 8 a pour objectif d'étudier séparément les deux facteurs restants : delta température et température extérieure. On peut alors les analyser via un plan complet 2² dont les essais ont déjà tous été réalisés, voir Tableau IV- 10 :

- Ligne 1 ↔ essais 1, 4 et 6
- Ligne 2 ↔ essais 2, 3 et 5
- Ligne 3 ↔ essai 7
- Ligne 4 ↔ essai 8

N° Essai ↓	Temp ext	Delta_ T	Moyenne des réponses
1, 4, 6	25	-5	42
2, 3, 5	35	0	53,1
7	25	0	45,5
8	35	-5	51

Tableau IV-1 : Analyse des facteurs influents par un plan complet

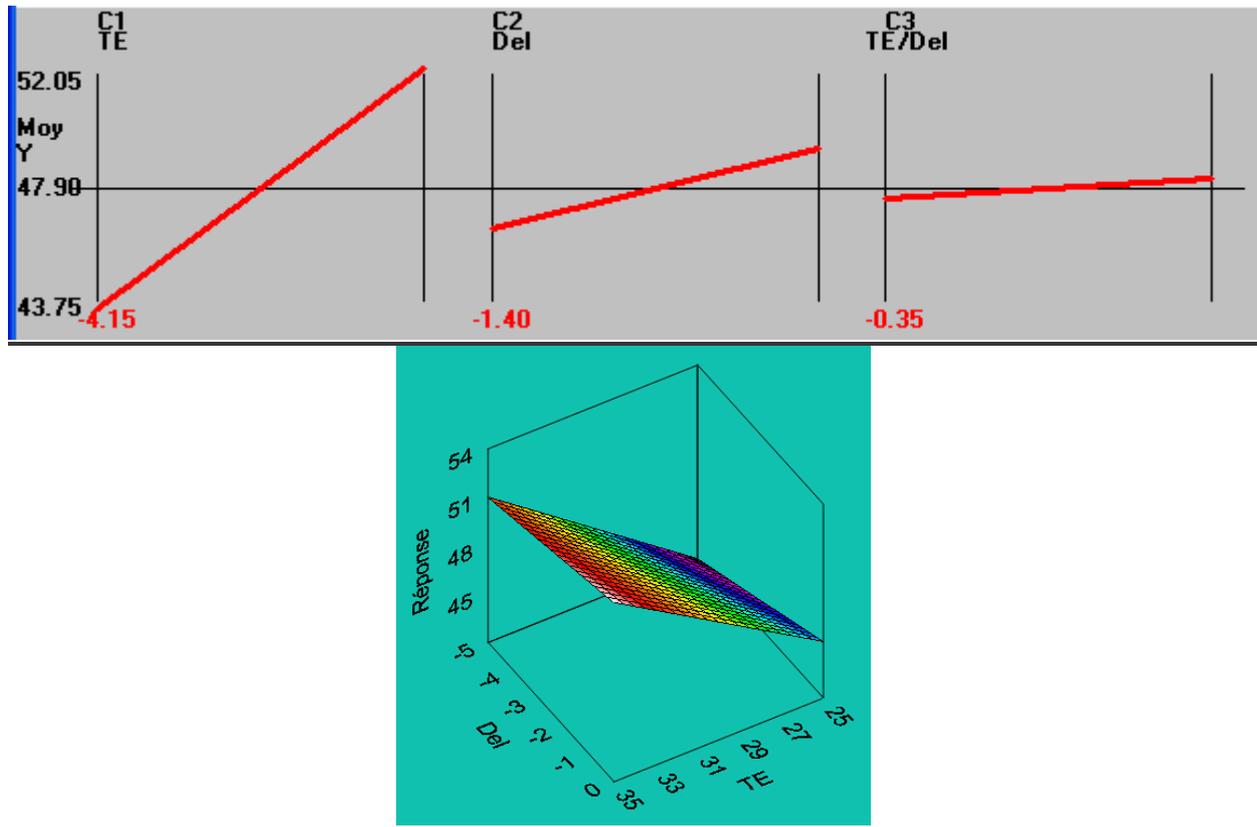


Figure V- 12 : Graphique des effets et des interactions du cas d'application industrielle

On obtient le modèle suivant :

$$Y \sim = 47,9 + 4,15\text{Temp_ext} + 1,4\text{Delta_T} - 0,35\text{Temp_ext.Delta_T}$$

5.3. CONCLUSION

Nous retrouvons donc en huit essais les deux facteurs significatifs : delta température et température extérieure.

Le nombre d'essais aurait encore pu être réduit. En effet, les essais 4 et 6 n'étaient pas indispensables.

Le découpage A1 / B1 ayant été invalidé par l'essai 3, il était inutile de conduire l'essai 4 qui reprend le même découpage.

Le découpage C2 / D2 ayant été invalidé par l'essai 5, il était inutile de conduire l'essai 6 qui reprend le même découpage.

La même conclusion aurait donc pu être atteinte en six essais.

A l'issue de ce plan, on peut donc définir les bonnes conditions d'utilisation :

- La régulation de l'écart entre la température externe et celle du liquide de refroidissement
- La régulation de la température extérieure

6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons montré l'importance du couplage entre la maîtrise des processus et les démarches de résolution de problèmes : la meilleure façon de résoudre un problème est d'éviter de le créer !! De plus, la mise en cohérence de toutes les démarches déployées (MSP, méthode de résolution de problèmes, 5S ...) est essentielle pour une bonne compréhension du rôle de chacune et de leur articulation.

Concernant la démarche de résolution de problèmes contextualisée, son application sur des cas réels a permis de la faire évoluer afin qu'elle « colle » au mieux aux contraintes de TRIXELL. En ce qui concerne l'aspect socioculturel, le fait qu'elle soit basée sur plusieurs méthodes et notamment des méthodes d'autres domaines est un point fort pour son appropriation par des personnes de nature créative.

Cette démarche a notamment permis de mettre en évidence l'importance du recueil d'informations, de le systématiser et de l'outiller. Sur un cas précis rencontré, la cause a pu être trouvée quasi-instantanément lors de l'investigation sur le lieu où le défaut avait été créé : le manque d'un adjuvant lors d'un nettoyage. C'est le genre de cause typique qui ne peut être décelé en analysant seulement les bases de données ou en faisant seulement parler le produit (aussi poussée que soit la méthode).

Nous terminerons ce chapitre sur l'application industrielle en citant tout naturellement un employé de la société ayant utilisé la méthode :

« La plus grande valeur ajoutée de la méthode est d'avoir permis de fixer des priorités et d'éviter l'éparpillement... Ce fut particulièrement vrai dans la phase de recherche des causes possibles. Elle nous a clairement fait gagner un temps précieux. » C.T.

Conclusion générale et perspectives de recherche

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont porté sur la résolution des problèmes qualité pour les produits nouveaux de haute technologie. L'objectif était de proposer une démarche et une instrumentation associée adaptées à ce type de contexte. Afin de mettre en relief les principales contributions de nos travaux, nous rappelons les différentes étapes de notre réflexion et de son application.

Dans un premier chapitre, nous avons vu que les entreprises de haute technologie se multipliaient dans le contexte socioéconomique actuel. Nous avons ensuite étudié les particularités de ce type d'entreprises et de leurs produits (briques technologiques et procédés associés nouveaux et évolutifs, interaction de plusieurs métiers, forte valeur des produits) afin de les décliner en contraintes pour la résolution de problèmes qualité :

- Nombre important de problèmes à traiter
- Difficulté d'établir une liste exhaustive de causes possibles
- Difficulté d'accéder à l'information pertinente
- Morcellement de l'information, pas de vision globale
- Peu d'occurrences pour l'analyse
- Partie amont à l'expérimentation majeure, expérimentation limitée

Nous avons ensuite défini ce que nous entendions par problème qualité pour poser le cadre de notre étude : problème technique sur le produit ou le procédé et associé à une cause spéciale. Nous avons vu qu'il existait deux grandes démarches de résolution de problème : la démarche théorique et la résolution de problème par la qualité. La deuxième démarche, qualifiée de déductive, est plus adaptée lorsque les causes sont inconnues et lorsque la résolution doit se faire dans le cadre d'un groupe de travail. Nous avons donc retenu ce type de démarche pour notre problématique.

Dans un deuxième chapitre, nous avons présenté les principaux outils et méthodes existants basés sur cette catégorie de démarche en montrant leur évolution depuis l'avènement des cercles qualité. Les sept outils de base de la qualité se sont en effet très vite complexifiés et diversifiés avec notamment les outils statistiques qui ont permis de compléter cette panoplie. Des méthodes de résolution de problèmes ont ensuite vu le jour, proposant ainsi une organisation harmonieuse de ces outils suivant une logique de raisonnement. Les principales méthodes existantes et étudiées dans ce chapitre étaient : le RDMAICSI de Six Sigma, le Système de Shainin, le G8D de Ford et le PSDM de Kepner Tregoe. L'analyse de ces quatre méthodes de différents points de vue (principes, structurel, organisationnel, socioculturel) nous a permis de les comparer et d'étudier leur adéquation à notre problématique. Nous avons vu que chacune d'entre elles présentait des avantages mais qu'il n'était pas envisageable de créer une « superméthode » les englobant. De plus, nous avons vu que certaines contraintes de notre problématique n'étaient pas ou peu prises en compte par ces méthodes, comme la difficulté d'accéder à l'information pertinente ou le peu d'occurrences pour l'analyse. Cette confrontation des méthodes et de nos contraintes a aussi mis en relief les phases de résolution de problèmes sur lesquelles notre proposition devait se concentrer : du choix du problème à traiter (phase Reconnaître) jusqu'à la validation de la cause réelle (phase Analyser).

Dans un troisième chapitre, nous avons proposé une structure de résolution de problèmes plus adaptée aux produits nouveaux de haute technologie et adaptable aux différents problèmes qualité

qui pouvaient se présenter. L'objectif n'était pas de proposer une n^{ième} méthode de résolution de problèmes mais plutôt une structure modelable selon les configurations rencontrées. Le principe proposé est fondé sur deux évaluations : l'évaluation du profil du problème et l'évaluation de son état méthodologique.

Le profil du problème peut être défini comme l'ensemble des caractéristiques techniques, physiques et humaines du problème d'une part, et des caractéristiques techniques de l'ensemble des produits, organisationnelles et socioculturelles d'autre part. Dans notre cas d'étude, les trois derniers types de caractéristiques (propres à l'entreprise) sont fixés : ceux des entreprises de haute technologie, nous n'avons donc pas abordé la distinction de ces caractéristiques. En revanche, les trois premiers types de caractéristiques (propres au problème lui-même) sont variables, il faudra donc les évaluer. Nous avons proposé dix critères pour établir le profil du problème. L'objectif de cette évaluation est de proposer une instrumentation adéquate pour le résoudre.

L'état méthodologique peut être défini comme le statut de l'avancée de la résolution du problème. Il est complètement indépendant du profil de problème et donc des caractéristiques propres au produit et à l'entreprise. L'objectif de cette évaluation est d'identifier les étapes qui ont déjà été réalisées et celles sur lesquelles il faut travailler.

Le croisement de ces deux évaluations permet d'établir une démarche de résolution de problème contextualisée constituée des étapes qu'il reste à réaliser et pour chacune d'une instrumentation associée. Pour élaborer cette instrumentation, nous avons travaillé sur trois axes :

- La sélection des méthodes et outils existants les plus adaptés à notre contexte, l'enrichissement de ces entités et la recherche de potentielles interactions positives entre elles. Exemple : la proposition du « Est N'est pas enrichi » pour la description du problème.
- Le développement de nouveaux outils. Exemple : la proposition d'un nouveau type de plan d'expérience de criblage : les plans dichotomiques.
- L'analyse des méthodologies d'autres domaines ayant des contraintes similaires aux nôtres (criminologie et analyse des accidents) et leur adaptation à l'industrie. Exemple : proposition d'une répartition des rôles empruntée aux enquêtes criminelles.

Dans un quatrième chapitre, nous nous sommes focalisés sur le problème particulier de l'expérimentation lors de la recherche et de la validation des causes. Nous avons vu qu'il fallait prendre en compte deux contraintes antagonistes : le nombre de causes potentielles important à étudier et la forte valeur des produits. L'objectif est donc d'étudier de nombreux facteurs en peu d'essais ! Pour répondre à la nécessité de réduire l'expérimentation, nous avons vu qu'il existait trois types de stratégies, chacune agissant sur un paramètre particulier : le nombre de facteurs, le nombre d'essais, le coût de chaque essai. Nous avons préconisé une utilisation séquentielle de ces trois stratégies pour une approche encore plus efficace. Concernant les stratégies de réduction d'essais, après avoir étudié les différentes techniques proposées dans la littérature (plans un facteur à la fois, plans fractionnaires, plans sursaturés, plans par groupes de facteurs et bifurcation séquentielle), nous avons proposé une technique complémentaire : les plans dichotomiques. Cette technique permet de réduire considérablement le nombre d'essais à réaliser en éliminant de larges groupes de facteurs si certaines hypothèses de base sont vérifiées (principe de parcimonie, direction des effets connue, faible écart-type expérimental) et permet de revenir à un plan fractionnaire classique si celles-ci ne sont pas vérifiées.

Dans un cinquième chapitre, nous avons présenté l'application industrielle de nos travaux. Nous avons proposé une organisation basée sur trois aspects : formalisation, progrès et anti-recul. Si le travail théorique présenté dans cette thèse a principalement concerné l'aspect progrès, le travail dans l'entreprise a porté sur les trois volets. Ils ont pour objectif :

- Partie formalisation : prévenir l'apparition de problèmes
- Partie progrès : résoudre les problèmes apparus
- Partie anti-recul : prémunir d'un recul de performance

La mise en cohérence de ces trois parties permet de plus d'assurer une meilleure compréhension de l'ensemble des méthodes déployées et de leur articulation.

Concernant la partie progrès, nous avons présenté un cas d'application de la démarche contextualisée pour illustrer notre proposition du chapitre III et pour montrer les apports et les difficultés rencontrées. Nous avons aussi présenté un exemple d'application de la technique des plans dichotomiques proposée au chapitre IV.

De nombreuses questions restent encore à résoudre et permettent d'entrevoir six pistes principales de perspectives de recherche.

La première piste de recherche concerne les critères établis pour définir le profil du problème. Tout d'abord, cette liste devra être affinée voire complétée au fur et à mesure des différentes utilisations. Ensuite, il serait possible d'inclure dans ces critères les caractéristiques liées au type d'entreprise afin que la démarche proposée soit généralisable à d'autres types d'entreprises.

La deuxième piste de recherche doit permettre de traiter la suite des phases de la résolution de problèmes : Améliorer, Contrôler, Standardiser et Clôturer. Une analyse plus fine de l'impact des contraintes imposées par les produits nouveaux de haute technologie permettrait de proposer aussi une instrumentation ad hoc pour chaque configuration de problème. Par exemple, pour la phase Contrôler, il faudrait proposer des typologies de cartes de contrôle selon les profils de problème. Cependant, ces phases demandent peu de développement supplémentaire en terme d'instrumentation. La focalisation principale doit se faire sur le guidage de l'utilisateur vers l'outil à utiliser.

La troisième piste de recherche concerne l'enchaînement des outils dans les phases. La démarche que nous avons proposée permet de sélectionner les instrumentations adéquates pour chacun des phases et étapes. Il faudrait maintenant proposer un guide d'enchaînement de ces outils à l'intérieur de chacune des étapes comme Shainin le propose pour l'étape « génération d'indices ».

La quatrième piste de recherche concerne les Plans dichotomiques. De nombreux travaux sont encore à réaliser, notamment l'étude de la robustesse des méthodes d'analyse proposées et l'ajout d'une méthode de classement des facteurs pour guider l'expérimentateur dans ses *a priori*.

La cinquième piste de recherche est liée au type de problème traité. Notre travail s'est focalisé sur les problèmes qualité caractérisés par une cause spéciale (au sens de Shewhart). Il faudrait donc développer une seconde proposition pour les problèmes qualité caractérisés par des causes communes ou problèmes de conception. Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, les méthodes utilisées pour résoudre ces deux types de problèmes sont différentes. Nous proposons pour ouvrir cette piste d'étudier la méthode TRIZ [Altshuller 2004] [Cavallucci 1999]. En effet, cette approche propose une méthode de résolution des problèmes de conception dont les concepts de bases sont a priori bien adaptés à notre contexte, comme

- La notion de contradiction (contradiction opérationnelle, technique, physique) qui permettrait d'appréhender la complexité des produits pour le problème donné
- L'inertie psychologique : pour résoudre des problèmes de conception, les personnes se focalisent sur leur propre domaine d'expérience. Les outils proposés par TRIZ permettent de favoriser la pluridisciplinarité et de faire parler des personnes de métiers différents.

La sixième piste de recherche pourrait être l'ouverture de la réflexion menée aux problèmes d'organisation. Notre proposition pour les problèmes techniques a pour structure de base Six Sigma qui se module en fonction des profils de problèmes. La méthode et les outils proposés par Six Sigma étant aussi applicables aux processus organisationnels, il serait intéressant d'étudier si la logique proposée dans ce travail pouvait être transposable aux problèmes organisationnels.

Références bibliographiques

- [Albert *et al.* 1998] Albert Ph., Mougénot Ph., *La création d'entreprises high-tech*, Revue française de Gestion, mars, avril, mai 1998.
- [Altshuller 2004] Altshuller G., *40 principes d'innovation. TRIZ pour toutes applications*, traduit du russe par Avraam Seredinski, Editions Seredinski, 2004.
- [Avrillon *et al.* 2002a] Avrillon L., Pillet M., *L'approche SHAININ : complément amont de la MSP*, Qualité Références, No. 17, p. 95-100, Juillet 2002.
- [Avrillon *et al.* 2002b] Avrillon L., Pillet M., *Six Sigma, comparaison avec d'autres approches*, Journées Six Sigma de RUFEREQ (Réseau Universitaire Français pour l'Enseignement et la Recherche en Qualité), Cachan, France, mai 2002.
- [Avrillon *et al.* 2003] Avrillon L., Pillet M., *Experimental designs concerning high added value products*, 5ème Congrès Int. Pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement (Qualita 2003), Nancy, France, mars 2003, pp. 11-17.
- [Avrillon *et al.* 2004] Avrillon L., Pillet M., Commere B., *Problem solving for new high technology products: the contribution of criminal and incident investigations methodologies*, Third Conf. on Management and Control of Production and Logistics (MCPL'2004), Santiago, Chili, November 2004, pp. 17-27.
- [Avrillon *et al.* 2005a] Avrillon L., Pillet M., Commere B., *Vers une approche modulaire pour la résolution des problèmes de qualité en phase de pré-industrialisation*, Qualita 2005, CD-ROM, Bordeaux, France, 2005, 10 pages.
- [Avrillon *et al.* 2005b] Avrillon L., Pillet M., *Experimental Designs in The High Added Value Products Industry*, Quality Engineering, Vol. 17, No. 4, 2005, à paraître
- [Bauer-Kurz 2000] Bauer-Kurz I., *A comparison of the Global-8D-Process and TRIZ*, www.triz-journal.com/archives/2000/07/c/
- [Bécharde *et al.* 2001] Bécharde B. M., Raïche J.-P., *Choisir judicieusement parmi les outils de la qualité : Un facteur déterminant pour le succès des démarches qualité des organisations*, Congrès Qualita 2001 : 4e Congrès international pluridisciplinaire, Qualité et Sécurité de fonctionnement, ESIA, Annecy France, p. 2-14, mars 2001.
- [Bernard *et al.* 2001] Bernard F., Pillet M., *Analyse des défauts pour l'amélioration de la qualité (ADAQ)*, 4^{ème} congrès Qualita « Qualité et Sécurité de fonctionnement », p. 40-47, Annecy, 22 et 23 mars 2001.
- [Bernasconi *et al.* 2000] Bernasconi M., Monsted M., *Les start-up high tech : création et développement des entreprises technologiques*, Editions Dunod, 2000.
- [Bettonvil 1990] Bettonvil B., *Detection of Important Factors by Sequential Bifurcation*; Tilburg University Press : Tilburg, 1990.

- [**Bettonvil et al. 1997**] Bettonvil, B., Kleijnen, J.P.C., *Searching for Important Factors in Simulation Models with Many Factors: Sequential Bifurcation*, European Journal of Operational Research, Vol. 1, p 180-194, 1997
- [**Booth et al. 1962**] Booth K.H.V., Cox D.R., *Some Systematic Supersaturated Designs*, Technometrics, Vol. 4, p 489-495, 1962.
- [**Bothe 2000**] Bothe K.R., Bote A.K., *World Class Quality. Using Design of Experiments to Make it Happen*, Second Edition, Editions AMACOM, 2000.
- [**Box et al. 1961**] Box G.E.P, Hunter J.S., *The 2^{k-p} fractional factorial designs, part I*, Technometrics, Vol. 3, p311 – 351, 1961.
- [**Campolongo et al. 2000**] Campolongo F., Kleijnen J.P.C, Andres T., *Screening Methods. In: Sensitivity Analysis*, Edited by A. Saltelli, K. Chan and E.M. Scott; Wiley, Chichester (England), p 65-89, 2000
- [**Cavallucci 1999**] Cavallucci D., *TRIZ : l'approche Altshullérienne de la créativité*, Techniques de l'Ingénieur, A 5 211-2, 1999.
- [**Cela 2005**] Cela R., *Using evolutionary algorithms in the building, resolution and practical application of supersaturated design matrices*, Congrès 30 ans de Méthodologie de la Recherche Expérimentale, Aix-en-Provence, France, p 25-37, Juin 2005.
- [**Chartrand 2004**] Chartrand R., *plan de cours SIP 2030 : Organisation de l'enquête*, Ecole de criminologie, Université de Montréal, 2004.
- [**Chaudhry 1999**] Chaudhry A.M., *To be a problem solver, be a classicist*. The formation of a classicist team, Quality Progress, Vol. 32, No. 6, p. 47-51, June 1999.
- [**Chauvel 2000**] Chauvel A.-M., *Méthodes et outils pour résoudre un problème*, 3^{ème} édition, Editions Dunod, 2000.
- [**Cheng 1997**] Cheng, R.C.H., *Searching for Important Factors: Sequential Bifurcation under Uncertainty*,. Proceedings of the Winter Simulation Conference, Edited by S. Andradottir, K.J. Healy, D.H. Withers and B.L. Nelson; p 275-280, 1997.
- [**Cherfi 2002**] Cherfi Z. *La qualité : Démarches, méthodes et outils*, Editions Hermès, 2002.
- [**Choffray et al. 1983**] Choffray J.M., Dorey F., *Développement et gestion des produits nouveaux : concepts, méthodes et applications*, MC GRAW-HILL, Paris, 1983.
- [**Cooper 1986**] Cooper A.C., *Entrepreneurship and hith technology*, The Art and Science of Entrepreneurship, Sexton D., Smilor R., Ballinger, 1986.
- [**Copper et al. 1997**] Cooper A.C., Daily C.M., *Entrepreneurial teams*, Sexton D.L., Smilor R.W., Entrepreneurship 2000, Chicago, Illinois, Upstart 167-88, 1997.
- [**Crocker 1991**] Crocker O.L., Charney C., Sik Leung Chiu J., *Guide pratique des cercles de qualité. L'expérience des Etats-Unis et du Japon au service des entreprises françaises*. Editions Eyrolles, 1991.

- [De Mast 2003]** De Mast J., *A methodological comparison of three strategies for quality improvement*, International Journal of Quality and Reliability Management, Vol. 21, No. 2, p. 198-213, 2004.
- [Deland et al. 1990]** Deland T., Meyer M., *Revolutionary System for Solving Quality Problems*, 44th Annual Quality Congress, p. 893-898, San Francisco CA, May 1990.
- [Deming 1982]** Deming W.E., *Quality, productivity and competitive position*, MIT Center for advanced engineering study, Cambridge, USA, 1982.
- [Dionne 1998]** Dionne B, *Pour réussir : guide méthodologique pour les études et la recherche*, 3e éd., Laval, Études vivantes, p.198-199, 1998.
- [D'Iribarne 1998]** D'Iribarne P., *Culture et mondialisation*, Editions Seuil, 1998
- [Dixon 1950]** Dixon W.J., *Analysis of extreme values*, Annals of Mathematical Statistics, Vol. 21, p 488-506, 1950.
- [Duret et al. 2001]** Duret D. Pillet M. *Qualité en production : de l'ISO 9000 à Six Sigma*, Editions d'Organisation, 2001.
- [Eckes 2001]** Eckes G., *Objectif Six Sigma*, Editions Village Mondial, 2001.
- [Ford 1989]** Ford Motor Company, Germany, *Team-Oriented Problem-Solving Process*, 1989.
- [Ford 1999]** Ford Motor Company, Germany, *Training-manual for the G-8D Process*, 1999.
- [Gautier 1995]** Gautier R., *Qualité en conception de produits nouveaux : Proposition d'une méthode de fiabilisation du processus de management de l'information*, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure d'Art et Métiers, Centre de Paris, 1995.
- [Goetschmann et al. 2003]** Goetschmann C., Pillet M., Avrillon L., *Typologie des problèmes récurrents*, 5ème Congrès Int. Pluridisciplinaire Qualité et Sûreté de Fonctionnement (Qualita 2003), France, Nancy, p. 601-607, mars 2003.
- [Goh 2001]** Goh T.N., *Information transformation perspective on experimental design in Six Sigma*, Quality Engineering, Vol. 13 No. 3, p 349-355, 2001.
- [Greenberg 1973]** Greenberg B., *Enhancement of the investigative function: analysis conclusions*, Menlo Park (California), Standfort Research Institute, 1973.
- [Greenwood 1975]** Greenwood P.W., Chaiken J., Petersilia J., Prusoff L., *The criminal investigation process, Vol. III: Observations and analysis*, Santa Monica (California), RAND, 1975.
- [Hadamard 1893]** Hadamard J., *Résolution d'une question relative aux déterminants*, Bulletin des Sciences Mathématiques, Vol. 17, No. 2, p 241-246, 1893.
- [Hanh et al. 2000]** Hanh G.J., Doganaksoy N., *The Evolution of Six Sigma*, Quality Engineering, Vol 12, No. 3, p 317-326, March 2000.
- [Harry et al. 2000]** Harry N., Schroeder R., *Six Sigma. The breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations*, Editions Currency Doubleday, 2000.

- [Hosotani 1982]** Hosotani K., *The Seven QC Tools, A Seminar in Easy QC Methods*, JUSE, 1982.
- [Hosotani 1997]** Hosotani K., *Le guide qualité de résolution de problème. Le secret de l'efficacité japonaise*, Editions Dunod, 1997.
- [ISO 3534-3 1999]** Norme ISO 3534-3:1999, *Statistique - Vocabulaire et symboles - Partie 3 : plans d'expérience*, Décembre 1999.
- [ISO 9000 : 2000]** Norme ISO 9000 : 2000, *Système de management de la qualité - Principes essentiels et vocabulaire*, ISO, 2000.
- [Jacoby et al. 1962]** Jacoby J.E., Harrison S., *Multi-Variable Experimentation and Simulation Models*. Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 9, p 121-136, 1962.
- [Jayaram et al. 1997]** Jayram J., Handfield R., Ghosh S., *The Application Of Quality Tools In Achieving Quality Attributes And Strategies*, Quality Management Journal, Vol.5, No. 1, p. 75-100, October 1997.
- [Juran et al. 1980]** Juran J., Gryna F, *Quality Planning and Analysis*, Editions McGraw-Hill, New York, 1980.
- [Kepner et al. 1980]** Kepner C.H., Tregoe B.B., *Le manager rationnel : méthodes d'analyse de problèmes et de prise de décision*, Editions d'Organisation, 1980.
- [Kepner et al. 1981]** Kepner C.H., Tregoe B.B., *The new rational manager*, Princeton Research Press, 1981.
- [Kieffer 2005]** Kieffer J-P., *Approche des systèmes complexes*, Exposé oral, Annecy, 2005.
- [Kourilsky-belliard 1995]** Kourilsky-Belliard F., *Du désir au plaisir de changer*, Inter-Editions, 1995
- [Kunh 2004]** Kunh N., *Electronique automobile : les industriels apprennent à gérer la complexité*, Electronique International, No. 571, p20-23, septembre 2004.
- [Le Coz 2001a]** Le Coz E., *Les méthodes et outils de la qualité : Outils classiques*. AG 1770, Techniques de l'Ingénieur, traité l'Entreprise Industrielle, 2001.
- [Le Coz 2001b]** Le Coz E., *Les méthodes et outils de la qualité : Nouveaux outils*. AG 1771, Techniques de l'Ingénieur, traité l'Entreprise Industrielle, 2001.
- [Ledolter et al. 1997]** Ledolter J., Swersey A., *Dorian Shainin's Variables Search Procedure : A Critical Assesment*, Journal of Quality Technology, Vol. 29, No. 3, p 237-247, July 1997
- [Lin 1993]** Lin D. K.J., *A New Class of Supersaturated Designs*, Technometrics, Vol. 35, No. 1, p 28-31, February 1993
- [Lin 2000]** Lin D.K.J., *Recent Developments in Supersaturated Designs*, Chapter 18 in Statistical Process Monitoring and Optimization edited by S. H. Park and G. G. Vining, Marcel Dekker, New York, NY, p 305-319, 2000.

- [**Livingston et al. 2001**] Livingston A.D., Jackson G., Priestley K, *Root causes analysis: Literature review*, WS Atkins Consultants Ltd for the Health and Safety Executive, Contract research report 325/2001, 2001.
- [**Louvet 2003**] Louvet F., *Du plan orthogonal au plan sur mesure*, Tutorial Experimentique, Orléans, 2003.
- [**Lucas 2002**] Lucas M.L., *The Essential Six Sigma : How successful Six Sigma implementation can improve the bottom line*, Quality Progress, Vol. 35, No. 1, p 27-31, January 2002.
- [**Ministère ETL 2001**] Délégation à la qualité du Ministère de l'équipement, des transports et du logement, INSEP, *Résoudre un problème : les outils*, Points de repères, Techniques de travail en commun, N° 18, Janvier 2001.
- [**Montchaud 2003**] Montchaud S., *Les stratégies de développement des grands groupes industriels et l'émergence de start-ups technologiques*, Centre d'Economie et de Finances Internationales, Octobre 2003.
- [**Nayatani 1984**] Nayatani Y., *The Seven New QC Tools*, 3A Corporation, Tokyo, Japan, 1984.
- [**Newell 1969**] Newell A., *Progress In Operations Research*, J. Aronofsky, p 361-414, New York, 1969.
- [**NF X 06-031**] Norme NF X 03-031, *Application de la statistique - Cartes de contrôle - Partie 0 : principes généraux*, 2ème tirage, janvier 1997.
- [**Nickols 1996**] Nickols F.W., *Yes, It makes a Difference*, Quality Progress, Vol. 29, No. 1, p 83-87, 1996.
- [**Nouiga 2003**] Nouiga M., *La conduite du changement par la qualité dans un contexte socioculturel. essai de modélisation systémique et application à l'entreprise marocaine*, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure d'Art et Métiers, Centre de Paris, 2003.
- [**Palady et al. 2002**] Palady P., Olyai N., *The Status Quo's Failure In Problem Solving*, Quality Progress, p 34-39, August 2002.
- [**Patel 1962**] Patel M.S., *Group screening with more than two stages*, Technometrics, Vol. 4, No. 2, May 1962
- [**Pillet 1992**] Pillet M., *Introduction aux plans d'expériences par la méthode de Taguchi*, Editions d'Organisation, 1992.
- [**Pillet 1997**] Pillet M., *Les plans d'expériences par la méthode TAGUCHI*, Editions d'organisation, 1997
- [**Pillet 2004**] Pillet M., *Six Sigma : Comment l'appliquer*, Editions d'Organisation, 2004.
- [**Pillet et al. 2005**] Pillet M., Duclos E., *Interprétation d'un plan d'expériences dans le cas de réponse non mesurable : utilisation de la variable de Wilcoxon Mann-Whitney* Congrès 30 ans de Méthodologie de la Recherche Expérimentale, Aix-en-Provence, France, p 85-88, Juin 2005.

[Pillet *et al.* 2003] Pillet M., Avrillon L., Maire J.L., *L'Automaîtrise : Une approche formelle de la performance des postes de production*, 3ème Colloque Int. Conception et Production Intégrées (CPI'2003), CD-ROM 11-003, Meknès, Maroc, Octobre 2003, 8 pages.

[Pyzdek 2001] Pyzdek T., *The Six Sigma Handbook*, Editions Quality Publishing, 2001.

[Plackett *et al.* 1946] Plackett, R.L.; Burman, J.P., *Design of Optimal Multifactorial Experiments*. Biometrika, Vol. 23, p 305-325, 1946.

[Prévost 1988] Prévost L., *Enquête criminelle*, Editions Modulo Editeur, 1988.

[Pylipow 2000] Pylipow P.E., *Understanding the hierarchy of process control : Using a combination map to formulate an action plan*, Quality Progress, Vol. 33, No. 10, p. 63-66, October 2000.

[Raïche *et al.* 2000] Raïche J.P., Béchard B.M., *Les outils de la qualité : une approche intégrée*, Forum Qualité Scientifique, RUQEREQ, Vol. 1, No. 1, p 1-8, Automne 2000.

[Richer *et al.* 2005] Richer Y., Caporali D., *Six Sigma. France – USA, quelles différences culturelles ?*, Qualité Références, p 74-77, Janvier 2005.

[Rochon 1996] Rochon S., *Méthodologie de conception robuste et fiable des produits industriels associant l'approche expérimentale et l'expertise*, Thèse, Université de Savoie, Juillet 1996

[Sanders *et al.* 2000] Sanders D., Hild C., *A discussion of strategies for Six Sigma implementation*, Quality Engineering, Vol. 12, No. 3, p 303-309, March 2000.

[Satterthwaite 1959] Satterthwaite F., *Random Balance Experimentation*, Technometrics Vol. 1, p 111-137, 1959.

[Scibilia 2000] Scibilia B., *Développement et amélioration des méthodes d'optimisation des procédés par les plans d'expériences*, Thèse Université d'Angers UFR : IUP-ISTIA, 2000

[Shainin 1986] Shainin D., *Better than Taguchi Orthogonal Tables*. ASQC Quality Congress Transactions, Anaheim, CA, p 446-481, 1986.

[Shainin 1989] Shainin D., Shainin P., *Pre-Control Versus X & R Charting: Continuous or Immediate Quality Improvement*, Quality Engineering, Vol. 1, No. 4, p 419-429, April 1989.

[Shainin 1990] Shainin D., Shainin P.D. *Analysis of Experiments*, 44th Annual Quality Congress, p 1071-1077, San Francisco CA, May 1990.

[Shainin 1993a] Shainin R., *Strategies for Technical Problem Solving*, Quality Engineering, Vol. 5, No. 3, p. 433-448, January 1993.

[Shainin 1993b] Shainin P.D., *Managing Quality Improvement*, 47th Annual Quality Congress, p 554-560, Boston MA, May 1993.

[Shainin 1995] Shainin R.D., *A Common Sense Approach to Quality Management*, 49th Annual Quality Congress Transactions, p 1163-1169, Cincinnati OH, May 1995.

- [**Shainin et al. 1997**] Shainin P.D., Shainin R.D., Nelson M.T., *Managing Statistical Engineering*, 51st Annual Quality Congress Proceedings, p 817-832, Orlando FL, May 1997.
- [**Shewhart 1931**] Shewhart W. A., *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. New York, D. Van Nostrand Co., Inc., 1931.
- [**Site KT**] Kepner Tregoe, <http://www.kepner-tregoe.com>.
- [**Site MQQ**] Mouvement Québécois de la Qualité, *Résumé des outils*, <http://www.outilsqualite.com>.
- [**Site QOL**] Qualité, Sécurité et Environnement On Line, *Dossier Thématique n°7 : Synthèse 8D – Principe et finalité de la méthode 8D*, <http://www.qualiteonline.com>.
- [**Smith 2000**] Smith G. F., *Too Many Types Of Quality Problems*, Quality Progress, p 43-49, April 2000.
- [**Taguchi 1987**] Taguchi G., *System of experimental design*, Unipub/Kraub, 1987.
- [**Taguchi 1994**] Taguchi G., *To Improve Quality, Dont' Measure It*, Design News, Vol. 49, No. 2, p.126, January 1994.
- [**Villemus 2001**] Villemus P., *L'entreprise audacieuse à la conquête des marchés de demain*, Editions d'Organisation 2001.
- [**Watson 1961**] Watson G.S., *A study of the group screening method*, Technometrics, Vol. 3, No. 3, August 1961.
- [**Wu 1993**] Wu C.F.J., *Construction of supersaturated designs through partially aliased interactions*, Biometrika, Vol. 80, p 661-669, 1993

ANNEXES

ANNEXE I : Les outils de résolution de problèmes

Dans cette annexe sont présentés brièvement les outils qualité cités dans le chapitre II par ordre d'apparition. Si les outils sont cités dans parties différentes, l'outil n'est listé que pour sa première apparition.

LES OUTILS QUALITE DE BASE ET LEURS DERIVES – Chapitre II Partie 2.2

[Chauvel 2000] [Site MQQ]

📁 *Diagramme d'Ishikawa ou Diagramme causes-effet méthode des familles*

Arborescence visualisant le problème et ses causes potentielles. Les causes sont regroupées par famille, généralement autour des 5 M : Main d'œuvre, Matériel, Matière, Méthode et Milieu.

📁 *Carte de contrôle*

Outil graphique permettant de contrôler et de suivre l'évolution d'un processus. Les différents types de carte de contrôle permettent d'anticiper les dérives des processus tout en s'assurant que la production reste à l'intérieur de limites de contrôle préétablies. Cet outil appuie la maîtrise statistique des procédés.

📁 *Diagramme de Pareto*

Graphique en bâtons classant les causes d'un problème en ordre décroissant, afin de mettre en évidence les causes principales du problème. Il s'appuie sur la loi du 80/20.

📁 *Graphiques*

Visualisation d'un ensemble de données sous une forme simple mettant en évidence un message. Le graphique peut prendre la forme d'un diagramme à barres ou d'un ensemble de points par exemple.

📁 *Fiche de relevés de données*

Imprimé préenregistré permettant de recueillir méthodiquement les informations nécessaires pour déterminer les causes réelles d'un problème ou pour mesurer l'efficacité de la solution mise en œuvre.

📁 *Histogramme*

Graphique normé permettant de visualiser la distribution d'un ensemble homogène de données mesurables, à partir de critères appelés classes.

📁 *Diagramme de corrélation*

Graphique à points mettant en évidence la relation qui peut exister entre deux ensembles de données.

☞ **Diagramme de concentration de défauts**

Graphique représentant le schéma du produit et la localisation sur celui-ci de chaque occurrence du défaut étudié.

☞ **Diagramme de cheminement**

Technique de visualisation d'un processus indiquant l'enchaînement des séquences nécessaires pour assumer une fonction. Elle peut prendre la forme d'une arborescence dans le cas de la fabrication d'un produit.

☞ **Brainstorming**

Séance de travail permettant de produire, en groupe, un maximum d'idées pour identifier les problèmes, rechercher les causes et proposer des solutions.

☞ **QQOQCP**

Technique de recherche d'informations sur un problème et ses causes : Quoi, Qui, Où, Quand, Comment et Pourquoi. Elle peut être utilisée pour bâtir le plan d'actions de la solution proposée.

☞ **Vote pondéré**

Technique de sélection finale du problème que le groupe souhaite résoudre en premier, à partir des résultats d'un vote simple. Les sujets sont classés par ordre de priorité avec une pondération décroissante en fonction de leur classement.

☞ **Diagramme des 5 pourquoi**

Outil d'analyse permettant de rechercher les causes d'un problème par questionnement systématique destiné à remonter aux causes premières possibles d'une situation, d'un phénomène observé. Version simplifiée de l'arbre des causes qui consiste à se poser plusieurs fois de suite la question : « Pourquoi ? » et à répondre à chaque question en observant les phénomènes physiques.

☞ **Est, N'est pas**

Technique permettant de trier les informations relatives à un problème sous deux volets : ce qu'est le problème et ce qu'il n'est pas. C'est une variante du QQOQCP.

☞ **Diagramme causes-effet méthode des processus**

Technique de visualisation des causes d'un problème à partir d'un diagramme de cheminement. C'est une variante du diagramme causes-effet méthode des familles.

☞ **Diagramme CEDAC (Cause and Effect Diagram with Addition of Cards)**

Technique dynamique de visualisation des actions engagées et des résultats obtenus en temps réel. Elle utilise des fiches de fait et des fiches d'actions. C'est une variante du diagramme causes-effet méthode des familles.

☞ **Diagramme ACE (Action sur les Causes d'Erreurs)**

Technique dynamique de visualisation des actions engagées et des résultats obtenus en temps réel. Elle utilise des diagrammes de Pareto et des graphiques positionnés sur un diagramme de cheminement. C'est une variante du diagramme causes-effet méthode des processus.

☞ **Diagramme des affinités ou KJ (Kawahito Jiro)**

Technique de groupement d'idées, d'opinions ou de sujets selon leurs affinités naturelles. De ces éléments qui semblaient a priori sans relation, émergent de nouveaux points de vue qui permettent d'analyser et de développer de nouvelles approches. Utile lorsqu'on a affaire à une situation complexe et sans réponse évidente.

☞ **Diagramme relationnel**

Outil représentant un réseau d'éléments, causes et effets, avec toutes leurs interrelations. L'outil permet d'analyser les relations entre les éléments et d'identifier les causes fondamentales. Plus flexible que le diagramme d'Ishikawa, qui est linéaire, il s'avère utile pour analyser des problèmes beaucoup plus complexes.

☞ **Diagramme en arbre**

Technique de représentation des idées et les classer hiérarchiquement afin d'analyser des sujets complexes. En décomposant une situation en plusieurs niveaux de plus en plus détaillés, on obtient une vue d'ensemble et une représentation hiérarchique des relations entre les différents éléments de la situation, ce qui facilite grandement l'analyse et la planification.

☞ **Diagramme en flèche ou PERT ou diagramme sagittal**

Technique d'ordonnement d'un ensemble de tâches à accomplir pour atteindre l'objectif visé dans le délai le plus court. C'est une variante simplifiée la méthode PERT.

☞ **Diagramme matriciel**

Outil permettant d'identifier les relations entre des groupes d'éléments. À l'aide d'une pondération, il est possible de visualiser l'importance de chacune des relations. Cet outil ne se limite pas à la comparaison de deux groupes d'éléments: on peut en effet produire des matrices à plus de deux dimensions.

☞ **Diagramme de décision**

Outil permettant de représenter la suite des options possibles afin de planifier la mise en oeuvre d'un projet tout en tenant compte des embûches potentielles. L'outil est par conséquent utile comme plan de contingence (préparation des mesures en cas de problème).

☞ **Analyse factorielle**

Outil statistique facilitant l'appréhension et l'interprétation d'un ensemble volumineux de données multidimensionnelles. Elle fait ressortir graphiquement les similitudes entre les données et permet de quantifier le degré de corrélation entre plusieurs facteurs.

☞ **Diagramme de Gantt**

Graphique en réseau permettant l'ordonnement d'un plan d'actions dans le but d'atteindre l'objectif dans le délai le plus court.

☞ **AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité)**

Technique pour anticiper les défaillances potentielles d'un produit ou d'un processus et évaluer les risques qu'elles engendrent. Les défaillances potentielles et leurs conséquences sont identifiées de façon systématique, puis quantifiées en termes de criticité, de probabilité et de difficulté de détection. Il est ensuite facile de hiérarchiser les incidents potentiels afin d'orienter les mesures de prévention et d'améliorer la conception du produit ou du processus.

☞ *Six chapeaux*

Outil de créativité pour structurer la pensée créative et accroître la performance d'un groupe de travail. L'outil oblige les membres du groupe à mettre leur ego de côté en utilisant séparément six modes de pensée: maîtrise du processus, information, émotions, prudence, avantages, créativité. Chacun de ces modes est représenté par un chapeau de couleur différente.

LES OUTILS DE STATISTIQUES – Chapitre II Partie 2.3.

☞ *Test t de Student*

Test statistique permettant de comparer deux moyennes avec variances inconnues.

☞ *Boîte à moustaches*

Graphique couramment utilisée en statistiques pour représenter et comparer des distributions de données.

☞ *Analyse en composantes principales*

Technique mathématique permettant de réduire un système complexe de corrélations en un plus petit nombre de dimensions.

☞ *Capabilité*

Outil statistique permettant de mesurer le rapport entre la performance demandée et la performance réelle. Elle s'exprime par un chiffre.

☞ *Les plans d'expérience*

Techniques pour planifier et optimiser les expériences afin d'en tirer le plus d'informations significatives possibles. Cet outil permet en effet d'analyser de façon simultanée les effets individuels et interactifs de plusieurs facteurs. Surtout utilisé pour le développement et l'amélioration de produits et de processus, le plan d'expériences permet d'optimiser chacun des facteurs à l'étude selon la stratégie préétablie et de définir un modèle de prédiction mathématique.

LES OUTILS DU DMAIC DE SIX SIGMA – Chapitre II Partie 4.2.2.

[Pillet 2004] [Site MQQ]

☞ *Matrice des priorités*

Outil de formalisation du processus de hiérarchisation et de sélection des options. Chacune des options est comparée à des critères pondérés préalablement établis par l'équipe, ce qui facilite le consensus et assure un choix plus objectif et rationnel. Étant donné son caractère quantitatif, l'outil permet également de mesurer l'importance relative de chacune des options.

☞ *Diagramme des CTQ (Critical to Quality)*

Outil permettant de décomposer le besoin du client en exigences qui doivent être mises en face de caractéristiques que l'on sait évaluer par une mesure.

📁 **Cartographie**

Outil graphique permettant d'illustrer les flux physiques et les flux d'informations depuis les approvisionnements en matières premières jusqu'au client.

📁 **Boîte noire**

Représentation graphique d'une activité ou d'un système au moyen d'un rectangle où l'on fait apparaître les variables d'entrée (les X) et les variables de sortie (les Y).

📁 **Diagramme SIPOC (Suppliers, Input, Process, Output, Customers)**

Outil permettant de faire apparaître les flux de matières et les flux d'informations sur un même graphique ou sur deux graphiques séparés.

📁 **Outil R&R (Répétabilité et Reproductibilité)**

Outil statistique permettant de vérifier que la part de la variance de la mesure est faible par rapport à la variance du processus.

LES OUTILS DU SYSTEME SHAININ – Chapitre II Partie 4.2.3.

[Shainin 1989] [Shainin 1990] [Shainin 1993a] [Shainin et al 1997] [Bothe 2000]

📁 **Arbre de définition du problème**

Part de la description de l'état du problème par le management (ex : trop de rebut, coût trop élevé) pour aboutir à l'identification et à la mesure de la caractéristique spécifique en question : le « Green Y » (« Y » parce que c'est la réponse, « Green » parce que c'est la couleur des dollars !!). Cet arbre se termine par un graphe représentant la distribution actuelle et la distribution désirée du Green Y.

📁 **Visual Scoring Transform**

Permet de convertir les données de type attribut en données de type variable et ainsi de voir la variation entre les pièces conformes et non conformes. Grâce à cette nouvelle échelle, le Red X peut être « démasqué » plus vite et avec des tailles d'échantillons plus petites qu'il en aurait été requis en utilisant des données de type attribut.

📁 **Resistance Limit Transform**

Est utilisé quand la caractéristique étudiée est une limite de résistance avec un résultat type attribut « cassé » ou « non cassé ». Il détermine la force de rupture pour chaque échantillon, des données de type variable sont ainsi disponibles.

📁 **Isoplot**

Permet de séparer la variation du produit et l'erreur de mesure pour ainsi de déterminer le discriminant.

📁 **Multi-Vari**

Outil graphique qui permet de déterminer la famille de variation (ou la combinaison de familles) du problème : inter unité, intra unité et temporelle. On peut alors éliminer toutes les causes qui ne concordent pas avec la famille décelée. Cet outil permet aussi de générer d'autres indices : les schémas non aléatoires sont sources de « pistes » (ex : la première pièce est toujours plus mauvaise que les deux suivantes).

📁 **Graphique de concentration**

Outil graphique qui permet d'étudier la famille de variation « intra unité » plus en détail. Ce outil propose d'établir un plan de la pièce sur lequel on note la localisation des défauts pour plusieurs exemplaires de la pièce. Ainsi, une localisation privilégiée des défauts (ex : présence de défauts uniquement sur les bords gauches de la pièce) apportera des indices.

📁 **Faux-Jumeaux**

Permet d'étudier la famille de variation « inter unité » plus en détail. Des paires de pièces « bonne / mauvaise » proches dans le processus de fabrication sont analysées afin d'identifier les différences constantes entre la « bonne » et la « mauvaise » de chaque paire qui constitueront alors de précieux indices.

📁 **Permutation non aléatoire de composants**

Permet d'étudier la famille de variation « inter unité » plus en détail et de trouver le ou les composantes à l'origine du problème. Des tests d'inversion de composants entre un produit très bon BOB (=Best Of the Best) et un très mauvais WOW (=Worst Of the Worst) permettent d'identifier les composants en question.

📁 **Recherche Produit/Process**

Outil de comparaison par paires des caractéristiques du produit et du process.

📁 **Permutation non aléatoire de variables**

Analogue à Permutation non aléatoire de composants sauf que ce sont deux modalités de chaque variable suspecte (un a priori meilleur et l'autre a priori pire) qui vont être permutés.

📁 **Anciens contre Modernes**

Test non paramétrique utilisé pour confirmer qu'une nouvelle méthode, technique donne des meilleurs résultats que l'ancienne.

📁 **Analyse de la variance par la méthode des rangs**

Analyse de la variance non paramétrique proposée par Shainin pour déterminer lesquels des effets ou interactions sont significatifs.

📁 **Spécigraphe**

Permet d'établir la cible et les spécifications pour le Red X (lorsqu'il n'y a pas d'interaction avec une autre variable) en fonction des spécifications sur le Green Y.

📁 **Outils de Méthodologie de Surface de Réponse**

Outils pour optimiser la réponse dans le cas où il y a des interactions importantes à prendre en compte (ex : le Red X est une interaction) et dans les cas de non-linéarité.

📁 ***Certification de process***

Permet de contrôler périodiquement que tous les paramètres procédés listés comme importants sont bien maîtrisés.

📁 ***Certification des opérateurs***

Permet d'attester que tel opérateur est formé pour tel procédé et de suivre l'avancement ou le renouvellement de ses formations.

📁 ***Positrol***

Contraction de POSitive conTROL. Plan de surveillance basé sur le QQQQCP (Qui Quoi Où Quand Comment Pourquoi).

📁 ***Precontrol***

Carte MSP (Maîtrise Statistique des Procédés) très simple d'utilisation : trois zones de couleur – verte, jaune et rouge – sont dessinées par rapport aux tolérances et des règles simples indiquent à l'opérateur quand et combien de pièces il doit prélever et s'il doit régler ou non.

📁 ***Arbre de la solution***

Technique arborescente pour expliquer le déroulement logique qui a permis d'atteindre le Red X depuis le Green Y.

ANNEXE II : Check-lists associées à chaque phase et étape

Cette annexe présente des extraits de la check-list retenue.

RECONNAITRE

SEPARER

- Les problèmes ont des énoncés distincts
- Chaque problème est énoncé avec un objet et un défaut.

TRIER

- Un premier ordre des problèmes est établi.

CONTENIR

- Les mesures conservatoires sont définies.
- Les mesures conservatoires sont mises en place.

CHOISIR

- Le problème prioritaire est choisi.
- Le choix du problème est soutenu par la direction.

DEFINIR

- Les différents acteurs sont identifiés.
- Les rôles des différents acteurs sont définis.
- L'impact sur les clients, les profits et le rapport avec la stratégie de l'entreprise sont définis.
- Le plan d'actions est défini.
- Le plan d'actions est communiqué et approuvé par la direction.

MESURER

- Le processus de mesure est adapté au défaut.
- Le processus de mesure est défini et capable.
- L'incertitude de mesure est connue.
- Une recherche d'une mesure continue a été menée.

DECRIRE

- Le type d'objets concerné par le problème est défini (ainsi que son complément).
- La localisation géographique d'apparition du défaut est connue (ainsi que son complément).
- La localisation du défaut sur l'objet est connue (ainsi que son complément).
- Les périodes d'apparition du défaut sont connues (ainsi que leur complément).
- La liste des objets concernés est établie.
- La typologie de manifestation du défaut est connue.

ANALYSER

LISTER

- Les causes potentielles sont connues.
- Les causes potentielles sont liées à des faits ou à des observations.

TESTER, VALIDER

- Les causes potentielles ont été filtrées par la description.
- La cause réelle est connue.
- La cause réelle est validée.

ANNEXE III : Présentation de la société TRIXELL

IDENTITE

Trixell est une joint-venture engagée dans le développement, l'industrialisation et la fabrication d'une famille complète de détecteurs radiologiques numériques destinés à l'imagerie radiologique.

Les compétences complémentaires de ses actionnaires (**Thales Electron Devices 51%**, **Philips Medical Systems 24.5%** et **Siemens Medical Solutions 24.5%**) apportent à Trixell la compréhension exhaustive des exigences du marché :

- au niveau de la technologie des dispositifs de détection avec Thales Electron Devices (ex Thomson Tubes Electroniques) premier fabricant mondial d'intensificateurs et de dispositifs d'imagerie radiologique, .
- au niveau des systèmes et de leur utilisation, Philips Medical Systems et Siemens Medical Solutions leaders des systèmes d'imagerie médicale et experts de l'exploitation clinique et des besoins des praticiens.

L'engagement et le support de ces sociétés confèrent aux activités de Trixell la garantie indispensable à son développement.

Siège social

460 rue du Pommarin ZI Centr'Alp
38430 - Moirans - France
Téléphone: +33 (0) 4 76 57 41 00
Fax: +33 (0) 4 76 57 40 48

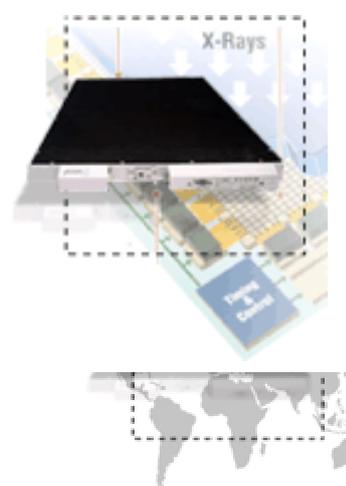


Ressources humaines

250 employés
40% ingénieurs et techniciens très qualifiés

Ressources industrielles

Site dédié de 5100 m² dont 800 m² de salles blanches



HISTORIQUE

2004

- Production en série des détecteurs Pixium 4700
- Extension des bâtiments pour tripler la capacité de production
- Trixell certifié ISO 13485

- Dispositif d'acquisition et de pré-traitement d'image pour les détecteurs Pixium (ACPP) disponible

2003

- Mars : Millième Pixium en service dans le monde
- Détecteurs Pixium 4700 pour application vasculaires et R&F livrés pour tests cliniques

2002

- Production en série des détecteurs Pixium 4800.
- Trixell certifié ISO 9001

2001

- Production en série des Pixium 4600

2000

- Premiers détecteurs cardio-vasculaires Pixium 4800 livrés pour essais cliniques

1999

- Les premiers prototypes du Pixium 4600 sont fabriqués.
- Les actionnaires consolident Trixell par l'acquisition de la majorité des parts dans la Société dpiX, garantissant ainsi leur source d'approvisionnement en dalles.
- Plusieurs sites radiologiques équipés de Pixium 4600 en Europe et aux Etats-Unis.

1998

- Inauguration du centre de production de Trixell à Moirans
- Présentation au RSNA'98 du 1er prototype Pixium 4600 avec des images cliniques
- Premiers accords du FDA américain reçus par les clients de Trixell pour la mise en service d'équipements radiologiques intégrant le Pixium 4600

1997

- Création de Trixell, Joint Venture entre Thales Electron Devices (TED), Philips Medical Systems et Siemens Medical Solutions
- Présentation du concept du Pixium au RSNA'97

1996

- Philips Medical Systems rejoint l'association et contribue au développement du programme
- Programme de recherche européen : ESPRIT
- Développement du détecteur radiographique (MEDID)
- Test clinique à Regensburg, en Allemagne

1995

- Test clinique à Freiburg en Allemagne

1991

- Projet de recherche européen EUREKA (ASTRID) entre Thales Electron Devices et Philips Medical Systems, dépôt des premiers brevets.

MISSIONS DE TRIXELL



Etablir les standards technologiques des détecteurs radiographiques numériques.

Depuis sa création en **1997**, Trixell a l'ambition de concevoir et de fabriquer une gamme complète de détecteurs radiologiques numériques de technologie unique destinées aux nouvelles générations de systèmes radiologiques.

Plus de **100 brevets** déposés et plus de **150 millions** d'euros investis concrétisent l'engagement et la capacité d'innovation de Trixell. Ce choix rallie la plupart des acteurs et constitue, de fait, la référence technologique dans l'imagerie numérique.

Rendre cette technologie facilement accessible à tous les professionnels de l'imagerie médicale : fabricants et praticiens

L'arrivée de ces nouveaux détecteurs numériques va améliorer la conception, le fonctionnement et les performances des équipements radiologiques. La technologie numérique rend possible l'intégration de tous les systèmes numériques radiologiques dans les systèmes de transmission et d'archivage d'image.

Trixell assure la commercialisation de ses produits à l'ensemble des fabricants d'équipements radiologiques (OEMs) à travers le réseau international de Thales Electron Devices.

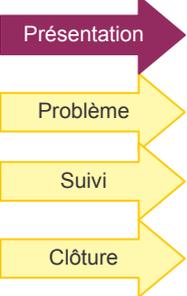
Maintenir une capacité de développement et de production à la hauteur du marché mondial
Avec une constance dans ses choix technologiques, devenus le standard du marché, dans ses missions, sa stratégie, son actionnariat, Trixell poursuit sa croissance.
Le marché mondial de l'imagerie médicale numérique trouve en Trixell un partenaire industriel compétent et dynamique, solide et innovant.

La force de Trixell est de réunir l'ensemble des compétences en termes de conception, de spécification et d'intégration. Trixell dispose ainsi de la totale maîtrise de chacune des 'briques' technologiques nécessaires, qu'il s'agisse de composants, de sous-ensembles ou des différents process industriels appliqués.

Avec ses deux familles de détecteurs, Trixell fait désormais partie du club international très fermé des industriels high-tech du domaine de l'imagerie médicale.
Six ans après sa création, Trixell est devenu leader mondial en nombre de détecteurs numériques grand format en service dans le monde pour la radiographie générale.

ANNEXE IV : Document de Gestion de Résolution de Problèmes

Voir page suivante



FICHE PRESENTATION

Prochaine réunion (Date + Horaire + Salle) :

ENONCE DU PROBLEME

ETAPE ACTUELLE DE LA RESOLUTION

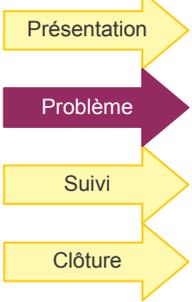
COMPOSITION ET CONTRAT DU GROUPE		
Nom	Equipe Trixell	Fonction dans le groupe
		Pilote

Fréquence des réunions	
-------------------------------	--

PLANNING PREVISIONNEL															
Semaines															
Identifier Séparer															
Fixer des priorités Agir															
Définir le problème prioritaire															
Trouver la cause réelle															
Choisir la solution															
Mettre en place la solution															
Généraliser															

Date de dernière mise à jour : XX/XX/XX

HISTORIQUE		
Date	Sujet	Résumé



FICHE PROBLEME

L'ECART 	
Réalité (situation actuelle) :	Norme (situation souhaitée) :

L'ENONCE DU PROBLEME (Objet + Défaut) 
<p>Possibilité d'insérer une image ou un graphique illustrant le problème</p>

LES CLIENTS (Principal et autres)

LES ENJEUX (Mesurables et non mesurables) 

L'OBJECTIF A ATTEINDRE	
Objectif mesurable et daté :	Indicateur :

APPROBATION DE L'OBJECTIF A ATTEINDRE	
Visa Pilote (date)	Visa Client (date)

Nota : Les signatures peuvent être absentes si le document est électronique



Présentation

Problème

Suivi

Clôture

FICHE SUIVI

Répertoire de travail	
------------------------------	--

LISTE DES DOCUMENTS UTILES POUR LE GROUPE	
Numéro	Titre et Auteur

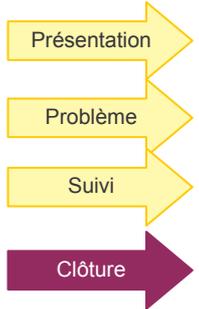
LISTE DES DOCUMENTS GENERES PAR LE GROUPE	
Numéro	Titre et Auteur
	Reconnaître
	Définir
	Mesurer
	Analyser
	Améliorer
	Contrôler
	Standardiser
	Clôturer

PLAN D' ACTIONS
Voir Fichier Excel SHN-F-084 Formulaire Plan d'actions

COUTS				
Sujet	Date	Temps (taux = 93)	Autres	Total



FICHE CLOTURE



SITUATION A LA CLOTURE
Principaux résultats, Cause identifiée, Solution choisie, Points « bloquants » ...

MISSIONS ET ACTIONS RESIDUELLES				
Quoi ?	Pourquoi ?	Qui ?	Pour quand ?	Statut au jour de clôture

CAPITALISATION DE L'EXPERIENCE ACQUISE	
Points forts	Points faibles

Clôturé Transféré Date :

VALIDATION		
Nom et signature pour le groupe :	Nom et signature du client:	Nom et signature du repreneur :

Nota : Les signatures peuvent être absentes si le document est électronique

Client : Note de satisfaction pour le résultat	1	2	3	4	5
Client : Note de satisfaction pour le délai	1	2	3	4	5
Groupe : Note de satisfaction du fonctionnement du groupe	1	2	3	4	5

ANNEXE V : Grille EMSE pour la résolution de problèmes à TRIXELL

THEMES	Question	0	1 Existence
SHAININ et Cie	Qu'évoque pour vous ce nom ?	The sun is shining ??? Non, ce n'est pas ça ??	C'est une méthode / des outils pour résoudre les problèmes.
Formation	Avez-vous déjà suivi des formations Shainin et Cie ?	Je ne sais pas qu'il y a eu des formations Shainin et Cie à Trixell	J'ai entendu parler de ces formations Shainin et Cie
Mise en oeuvre et applications	Avez-vous déjà appliqué la méthode, les outils Shainin et Cie?	Jamais	Je sais où trouver ces outils ou qui aller voir mais je ne l'ai pas encore fait
Définition du problème	Lors d'une résolution de problème, comment définissez-vous le problème ?	"Comme ça me vient", intuitivement	Je sais que cette phase est importante
Mise en place de mesures conservatoires	Que signifie pour vous une mesure conservatoire ou "containment" ?	Je n'en sais rien.	Je sais ce que ça veut dire mais je ne pense jamais à mettre en place de telle mesure
Vérification de la méthode de mesure	Lors d'une résolution de problème, vérifiez-vous toujours votre méthode de mesure ? Si oui, comment ?	Pas de vérification ou vérification intuitive	Je sais qu'il existe des outils pour cela. Je connais l'importance d'avoir une mesure continue par rapport à une mesure par attribut.
Recherche de causes	Lors d'une résolution de problème, comment déterminez-vous les causes ?	"Je pars sur la première piste"	Je fais des brainstorming, des Ishikawa ...
Choix de la solution	Lors d'une résolution de problème, comment choisissez-vous la solution à retenir ?	"Je pars sur la première piste"	Je sais qu'il existe des méthodes/outils (analyse de décision ...) pour cela

THEMES	2 Méthode	3 Systématique	4 Excellence
SHAININ et Cie	Je connais la méthode, je sais où aller chercher des infos sur cette méthode et ces outils.	Pour chaque résolution de problème, j'utilise cette méthode.	Je sais associer astucieusement expertise et utilisation de cette méthode et de ces outils.
Formation	J'ai déjà suivi une formation sur quelques outils ou une partie de cette méthode	J'ai déjà suivi une formation complète sur la méthode	Ma formation à cette méthode et ces outils est renouvelée en continu.
Mise en oeuvre et applications	Je l'ai déjà appliqué sur un exemple	Je l'utilise régulièrement	Je l'utilise astucieusement et j'obtiens d'excellents résultats
Définition du problème	Je définis par Objet + Défaut puis j'utilise le "est/n'est pas" pour la description.	Idem niveau 2 + je prends du temps pour le faire avec les personnes du groupe.	Idem Niveau 3 + j'explique à mon groupe l'importance de cette phase.
Mise en place de mesures conservatoires	Je sais mettre en place de telle mesure et je l'ai déjà fait	Systématiquement je pense à mettre en place une telle mesure si cela est possible	Idem Niveau 3 + Si difficulté pour trouver une telle mesure, je charge un groupe de personnes de travailler sur cette mesure en parallèle de la résolution de problème
Vérification de la méthode de mesure	Je sais utiliser ces outils et j'ai des exemples de R&R ou de Cmc à montrer. Je sais expliquer la différence entre justesse, répétabilité et reproductibilité.	J'utilise systématiquement ces outils	Je sais adapter astucieusement ces outils
Recherche de causes	Je connais les méthodes et outils Shainin et Cie (Est / N'est Pas, Faux Jumeaux ...).	J'utilise systématiquement ces méthodes et outils.	Je sais conjuguer astucieusement selon le cas à traiter l'utilisation des méthodes et outils et mon expertise.
Choix de la solution	Je sais utiliser ces méthodes/outils et j'ai des cas d'utilisation à montrer.	J'utilise systématiquement ces méthodes/outils	Je sais conjuguer astucieusement selon le cas à traiter l'utilisation de ces méthodes/outils et mon expertise.